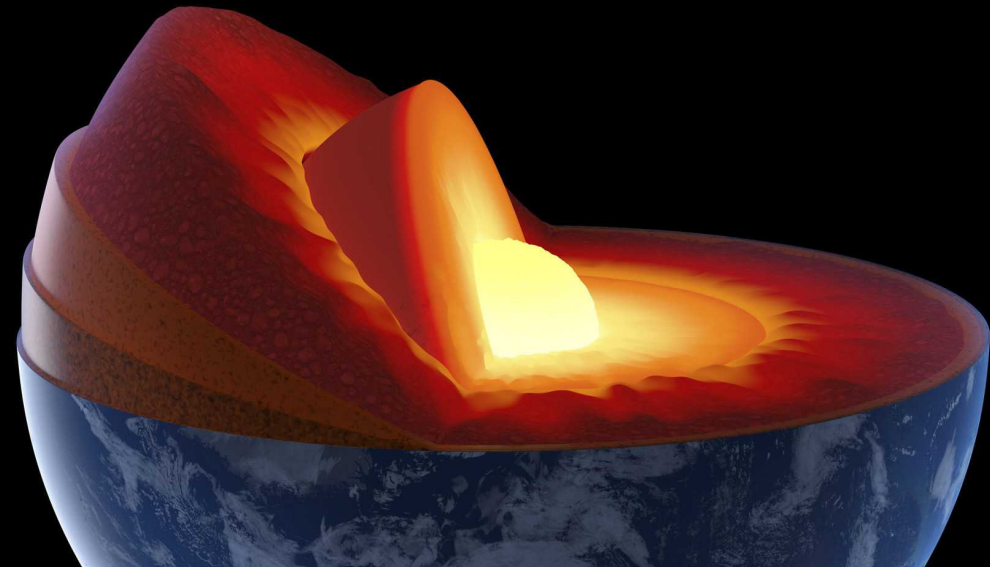


System Erde Entwicklung & Dynamik

I. Plattentektonik & Geophysik



Dumasfjellet (Nordnorge)

System Erde Entwicklung & Dynamik



Geowissenschaften befassen sich mit den naturwissenschaftlichen Aspekten des Systems Erde.

Dazu gehören u.a. Geologie, Paläontologie, Mineralogie, Petrologie, Hydrologie, Ozeanografie, Geografie, Geophysik, Meteorologie, Bodenkunde, Fernerkundung

Earth Sciences are fields of science dealing with planet Earth, including the study of the atmosphere, hydrosphere, lithosphere and biosphere

Dumasfjellet (Nordnorwegen)

System Erde Entwicklung & Dynamik

Die Geologie ist die Wissenschaft des Aufbaus, der Zusammensetzung und der Struktur der Erde.

Sie untersucht die physikalischen Eigenschaften, sowie die Prozesse, welche sich auf der Erdoberfläche und im Erdinnern abspielen.

Sie ist eine empirische Wissenschaft und bedient sich der naturwissenschaftlichen Methode.

Blocklava, Teinde (Teneriffa)

System Erde Entwicklung & Dynamik

Die naturwissenschaftliche Methode

(the nature of scientific inquiry)

1. Sammeln von Daten

durch Beobachtungen - Experimente - Messungen

2. Ordnen der Daten durch Quantifizierung - Klassifikation

3. Formulieren einer Arbeitshypothese (= Interpretation)

4. Testen der Hypothese

Verwerfen (\Rightarrow Modifizieren) oder Akzeptieren (\neq Beweis)

... es gibt keine fixen Wege oder Vorgehensweisen, ...

... welche zu wissenschaftlicher Erkenntnis führen ...

System Erde Entwicklung & Dynamik



Eine Hypothese...

... ist eine versuchsweise, nicht überprüfte Erklärung

Eine Theorie...

... ist eine geprüfte und von der Forschungsgemeinschaft akzeptierte (bzw. noch nicht verworfene) Ansicht, welche die beobachteten Daten am besten erklärt.

Eine Theorie soll möglichst einfach und allgemein sein

Aus aktuellem Anlass: Plattentektonik - 50 Jahre Theorie

Griespass, (Zentralschweiz)

System Erde Entwicklung & Dynamik

für die Vorlesung brauchen wir ...

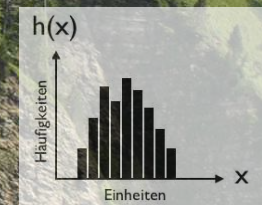
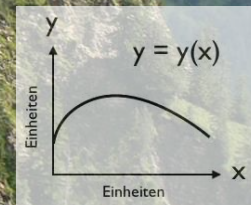
... Mathematik und Physik (Mechanik) des 18. Jahrhunderts
siehe Leonhard Euler (1707 - 1783), Daniel Bernoulli (1700 - 1782)

das heisst, ein paar grundlegende Konzepte ...

... Funktionen $y = f(x)$, wo y die abhängige und
 x die unabhängige Variable ist, ... auch Statistik

... Physikalische Grössen, wie Kraft, Wärme,
Temperatur, Druck und Spannung

... und schliesslich sollten wir gut "über den Daumen peilen"
können (back of the envelope calculations)



0 Einführung

Organisation der Vorlesung

Einführung

- Kreislauf der Gesteine
- Sphären & Systeme

Geologische Vorgeschichte

Entwicklung des plattentektonischen Modells

- Wegeners Kontinentaldrift
- Wadati Benioffzonen
- Sea floor spreading
- Theorie der Plattentektonik
- Wilson Cycle

System Erde Vorlesungsplan 2017 / 2018

Thema	Dozierende	Mo 13-14	Di 13-14	Mi 13-14	Do 15-18
Plattentektonik & Geophysik	Heilbronner / Kilian		19-Sep-2017	20-Sep-2017	21-Sep-2017
Plattentektonik & Geophysik	Heilbronner / Kilian	25-Sep-2017	26-Sep-2017	27-Sep-2017	28-Sep-2017
Plattentektonik & Geophysik	Heilbronner / Kilian	2-Oct-2017	3-Oct-2017	4-Oct-2017	5-Oct-2017
Plattentektonik & Geophysik	Heilbronner / Kilian	9-Oct-2017	10-Oct-2017	11-Oct-2017	12-Oct-2017
Mineralogie & Kristallographie	DeCapitani	16-Oct-2017	17-Oct-2017	18-Oct-2017	19-Oct-2017
Mineralogie & Kristallographie	DeCapitani	23-Oct-2017	24-Oct-2017	25-Oct-2017	26-Oct-2017
Mineralogie & Kristallographie	DeCapitani	30-Oct-2017	31-Oct-2017	1-Nov-2017	2-Nov-2017
Sedimente	Wetzel	6-Nov-2017	7-Nov-2017	8-Nov-2017	9-Nov-2017
Sedimente	Wetzel	13-Nov-2017	14-Nov-2017	15-Nov-2017	16-Nov-2017
Sedimente	Wetzel	20-Nov-2017	21-Nov-2017	22-Nov-2017	23-Nov-2017
Sedimente	Wetzel	27-Nov-2017	28-Nov-2017	29-Nov-2017	30-Nov-2017
Sedimente	Wetzel	4-Dec-2017	5-Dec-2017	6-Dec-2017	7-Dec-2017
Geol. Zeitmessung & Stratigraphie	Meyer	11-Dec-2017	12-Dec-2017	13-Dec-2017	14-Dec-2017
Geol. Zeitmessung & Stratigraphie	Meyer	18-Dec-2017	19-Dec-2017	20-Dec-2017	21-Dec-2017
Bodenkunde & Biogeochemie	Alewell / Lehmann	26-Feb-2018	27-Feb-2018	28-Feb-2018	1-Mar-2018
Bodenkunde & Biogeochemie	Alewell / Lehmann	5-Mar-2018	6-Mar-2018	7-Mar-2018	8-Mar-2018
Bodenkunde & Biogeochemie	Alewell / Lehmann	12-Mar-2018	13-Mar-2018	14-Mar-2018	15-Mar-2018
Bodenkunde & Biogeochemie	Alewell / Lehmann	19-Mar-2018	20-Mar-2018	21-Mar-2018	22-Mar-2018
Bodenkunde & Biogeochemie	Alewell / Lehmann	26-Mar-2018	27-Mar-2018	28-Mar-2018	29-Mar-2018
Hydrogeologie	Huggenberger	Ostern	3-Apr-2018	4-Apr-2018	5-Apr-2018
Hydrogeologie	Huggenberger	9-Apr-2018	10-Apr-2018	11-Apr-2018	12-Apr-2018
Magmatite	Franz / DeCapitani	16-Apr-2018	17-Apr-2018	18-Apr-2018	19-Apr-2018
Magmatite	Franz / DeCapitani	23-Apr-2018	24-Apr-2018	25-Apr-2018	26-Apr-2018
Metamorphite	Franz / DeCapitani	30-Apr-2018	1-May-2018	2-May-2018	3-May-2018
Metamorphite	Franz / DeCapitani	7-May-2018	8-May-2018	9-May-2018	Auffahrt
Strukturgeologie & Tektonik	Heilbronner / Kilian	14-May-2018	15-May-2018	16-May-2018	17-May-2018
Strukturgeologie & Tektonik	Heilbronner / Kilian	Pfingsten	22-May-2018	23-May-2018	24-May-2018
Strukturgeologie & Tektonik	Heilbronner / Kilian	28-May-2018	29-May-2018	30-May-2018	31-May-2018

Vorlesungs-Unterlagen

Beilagen auf ADAM

adam.unibas.ch

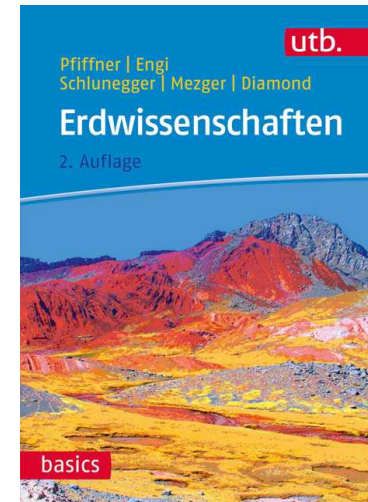
Phil II / Geowissenschaften / System Erde: Entwicklung und Dynamik (Teil I)

Ordner	Thema	Dozierende	Prüfungs-Paket
HS 2017			
1	Plattentektonik & Geophysik	Heilbronner / Kilian	4
2	Mineralogie	de Capitani / Franz	1
3	Exogene Dynamik - Sedimente	Wetzel	2
4	Geol. Zeitmessung	Meyer	2
FS 2018			
5	Biogeochemie & Bodenkunde	Lehmann	3
5	Biogeochemie & Bodenkunde	Alewell	3
9	Hydrogeologie	Huggenberger	3
6	Magmatische Gesteine	de Capitani / Franz	1
7	Metamorphose & Geochronologie	de Capitani / Franz	1
8	Strukturgeologie & Tektonik	Heilbronner / Kilian	4

Literatur

Lehrbuch

Pfiffner et al. 2016 Erdwissenschaften. 2., korrig. u. aktual. Aufl.,
UTB basics, Haupt Verlag. 367 Seiten, 978-3-8252-4381-4



Weitere Literaturempfehlung (deutsch)

- Tarbuck, E.J. and Lutgens, F. K., 2009. Allgemeine Geologie. Pearson Studium
- Siever, R., 2003. Allgemeine Geologie. 3. Aufl., Spektrum, Heidelberg
- Bahlburg, H. und Breitzkreuz, C., 2008. Grundlagen der Geologie, 3. Aufl., Spektrum, Heidelberg

Weitere Literaturempfehlung (englisch)

- Tarbuck, E.J. and Lutgens, F. K., 2008. Earth, 9th ed., Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ
- Marshak, S., 2008. Earth: Portrait of a Planet. Norton & Co., New York
- Rogers, N., editor, 2008. Our Dynamic Planet. Cambridge Univ. Press, Cambridge

Web sites

<http://de.wikipedia.org>

<http://en.wikipedia.org>

<http://ansatte.uit.no/kare.kullerud/webgeology/>

<http://www.seismo.ethz.ch/>

<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>

Stundenplan

	Mo	Di	Mi	Do	Fr
13-14	VL	VL	VL		
14-15					
15-16				VL / Üb	
16-17				VL / Üb	
17-18				VL / Üb	

Vorlesung:

Leistungsüberprüfung:

Klausur am Ende des Jahreskurses

Note: 25% pro Prüfungspaket

Übungen:

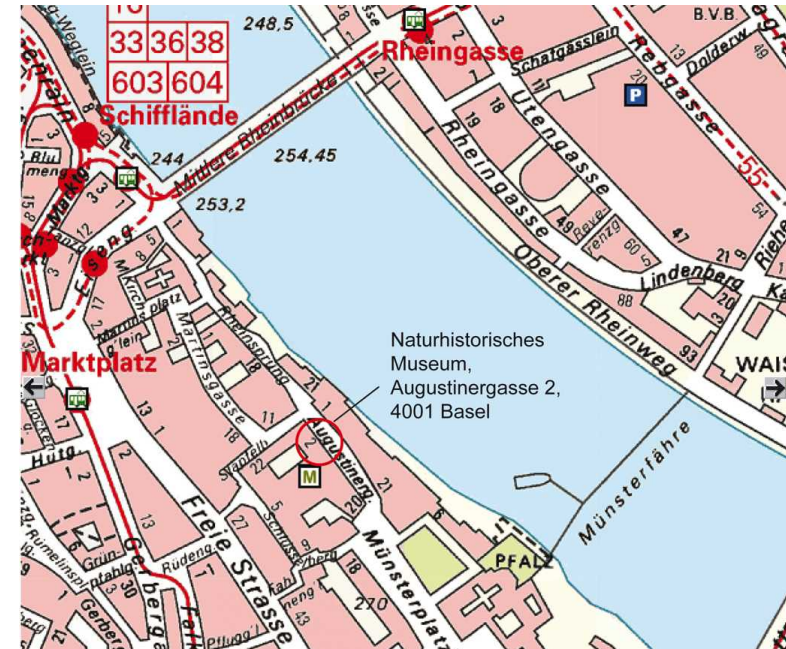
Leistungsüberprüfung:

unterschiedlich von Block zu Block

wo?

VL im Raum 223

Übungen in den Praktikumsräumen



Ausnahme: I. Übung

Donnerstag, 21. 9. 2015

Naturhistorisches Museum

Augustinergasse 2

Treffpunkt:

15.00 Uhr
am Eingang

Mitbringen:

Schreibwerkzeug

(Übungsblatt wird ausgeteilt)

System Erde

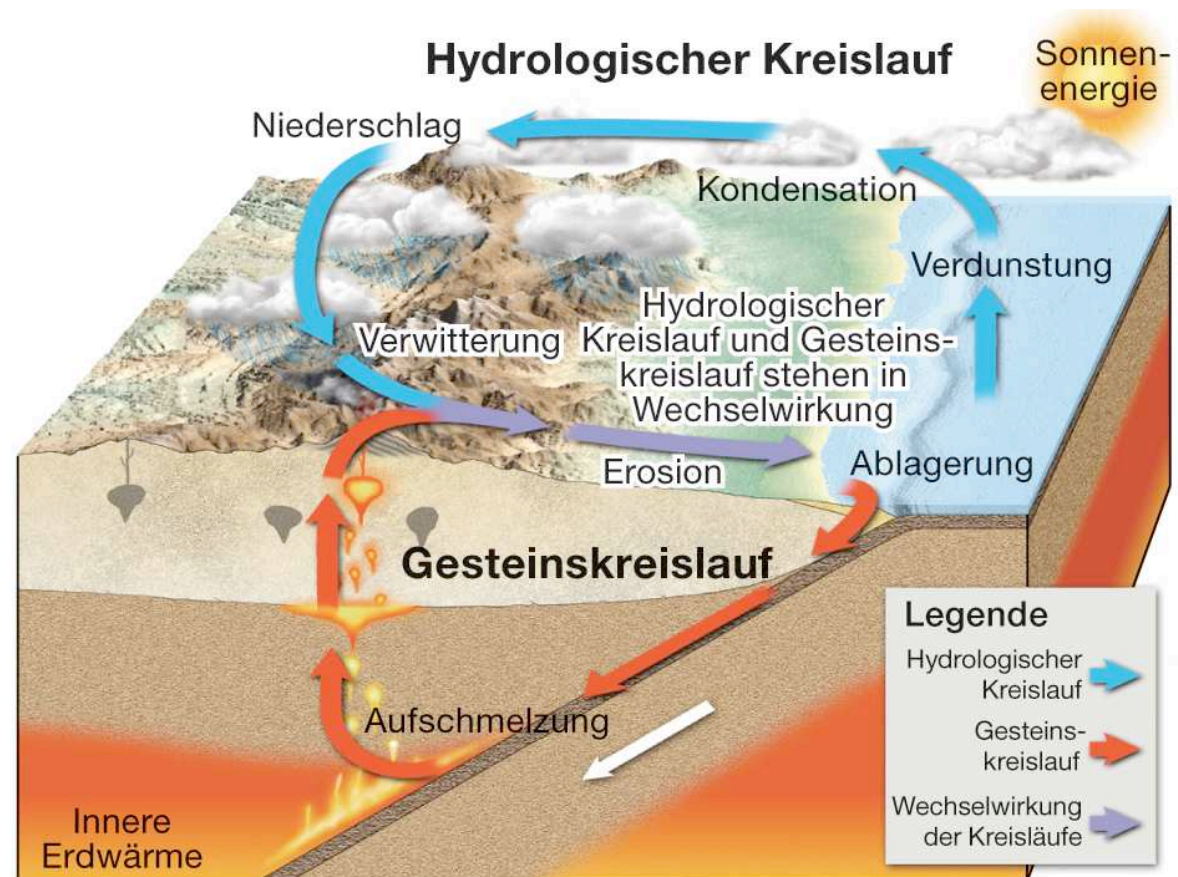
Kreislauf der Gesteine

System Erde: Sphären - Kreisläufe - Interaktionen

Sphären:

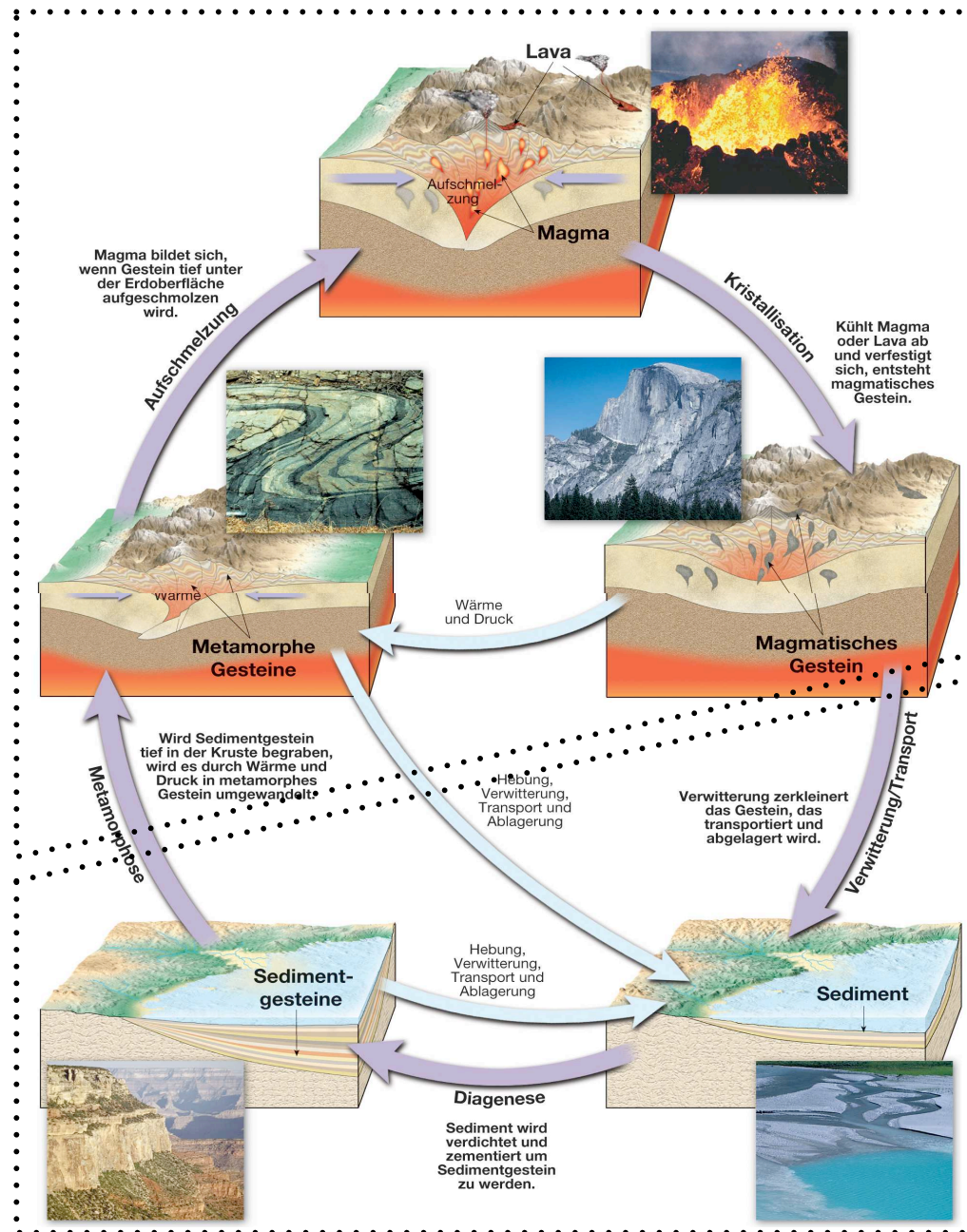
Atmosphäre
Biosphäre
Hydrosphäre
Geosphäre

Beispiel für Interaktion von Sphären:
Hydrosphäre - Geosphäre



Tarback & Lutgens (2009)
Kapitel I

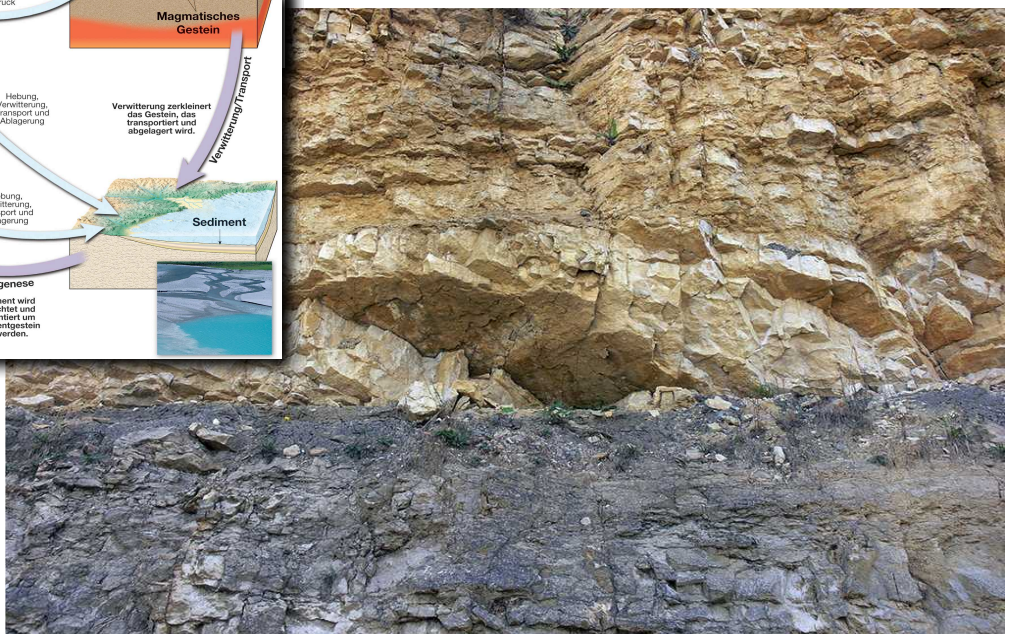
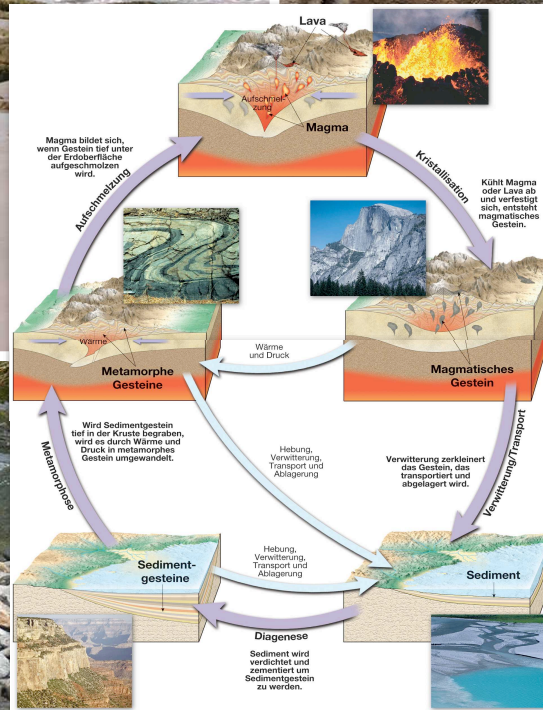
Dynamische Erde: Kreislauf der Gesteine



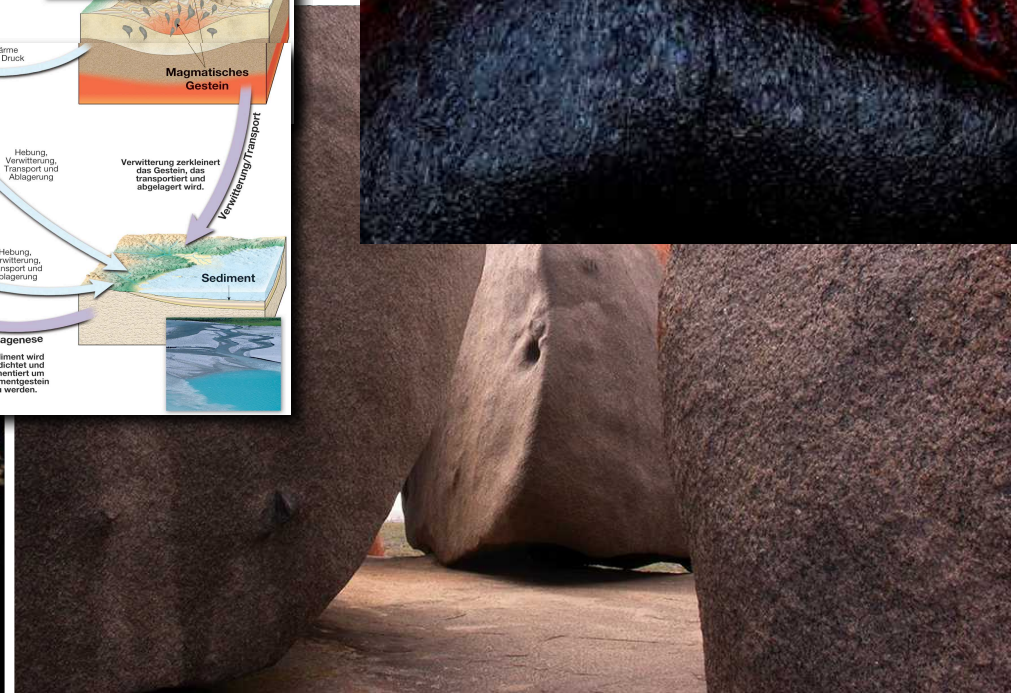
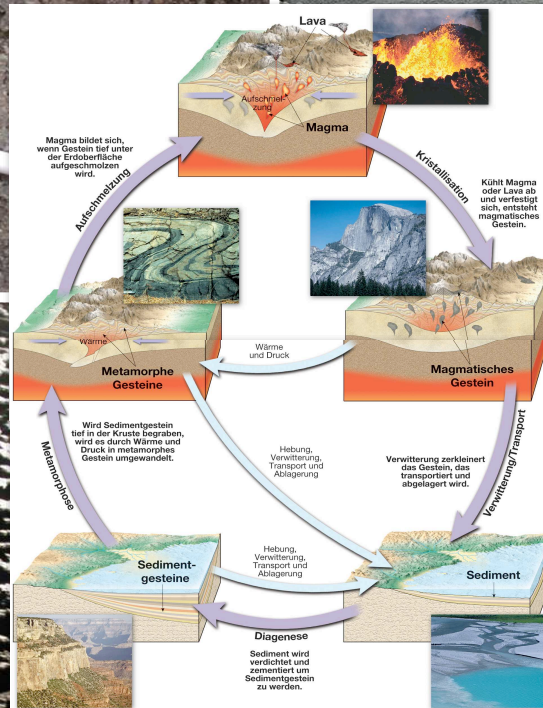
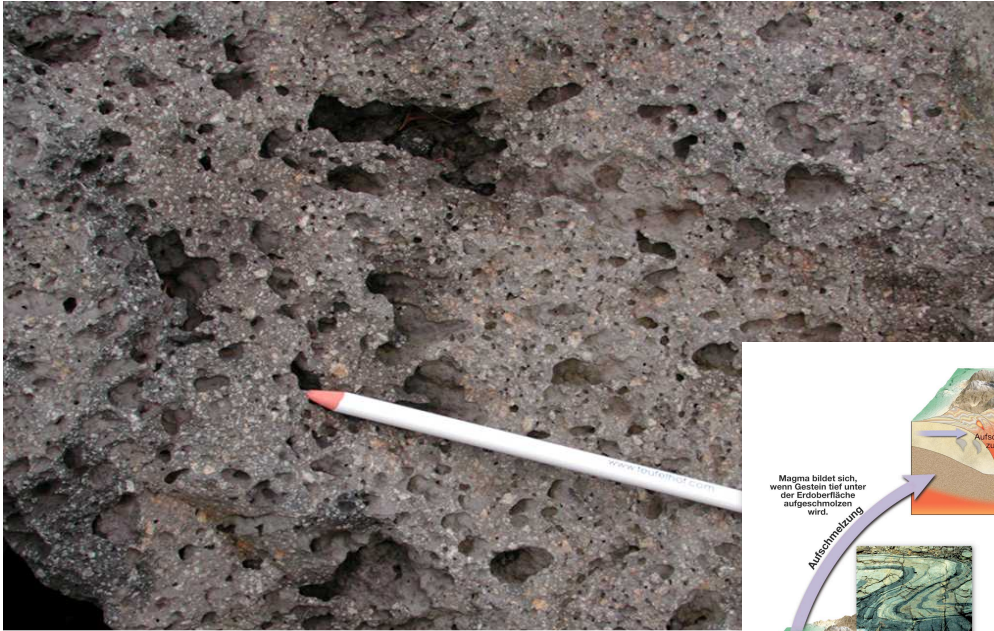
Endogener Kreislauf
(im Erdinnern)

Exogener Kreislauf
(an der Erdoberfläche)

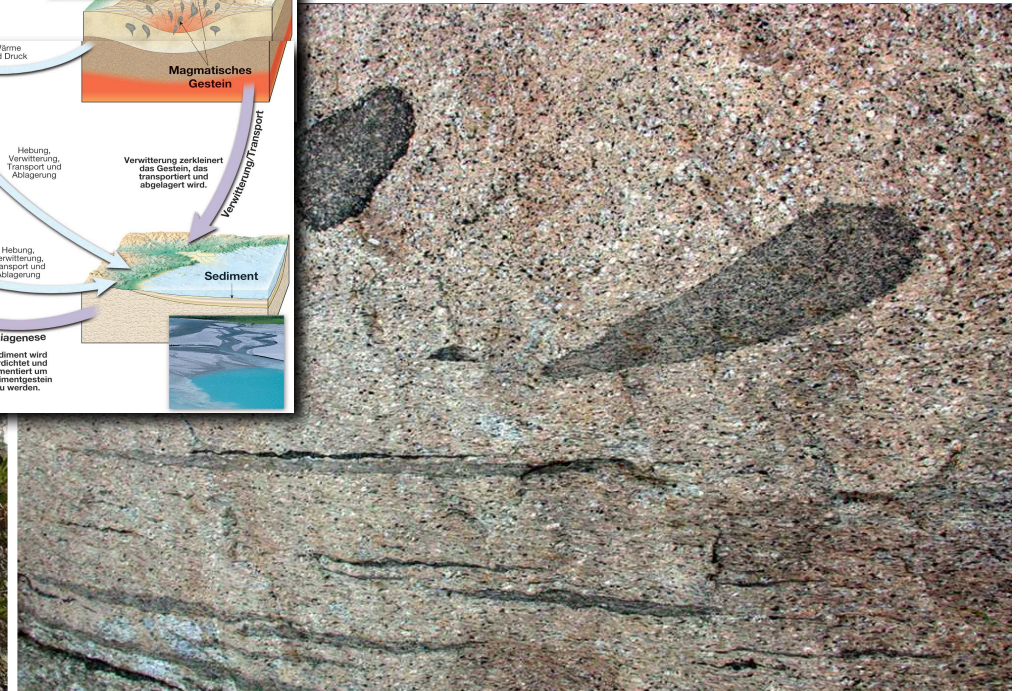
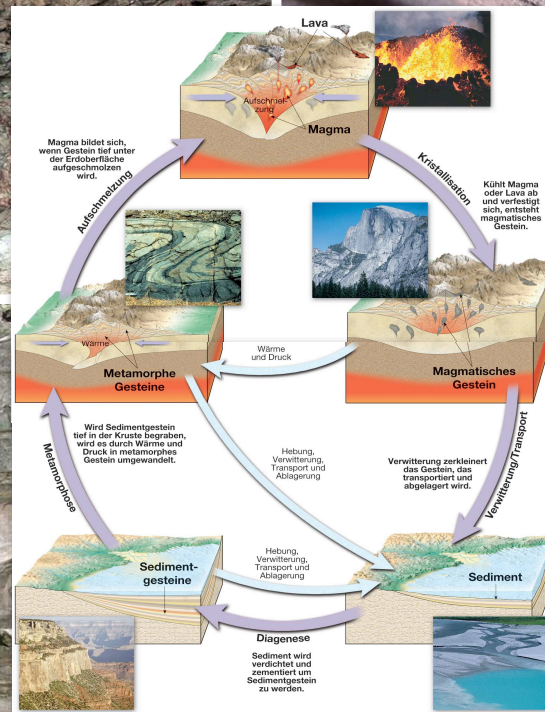
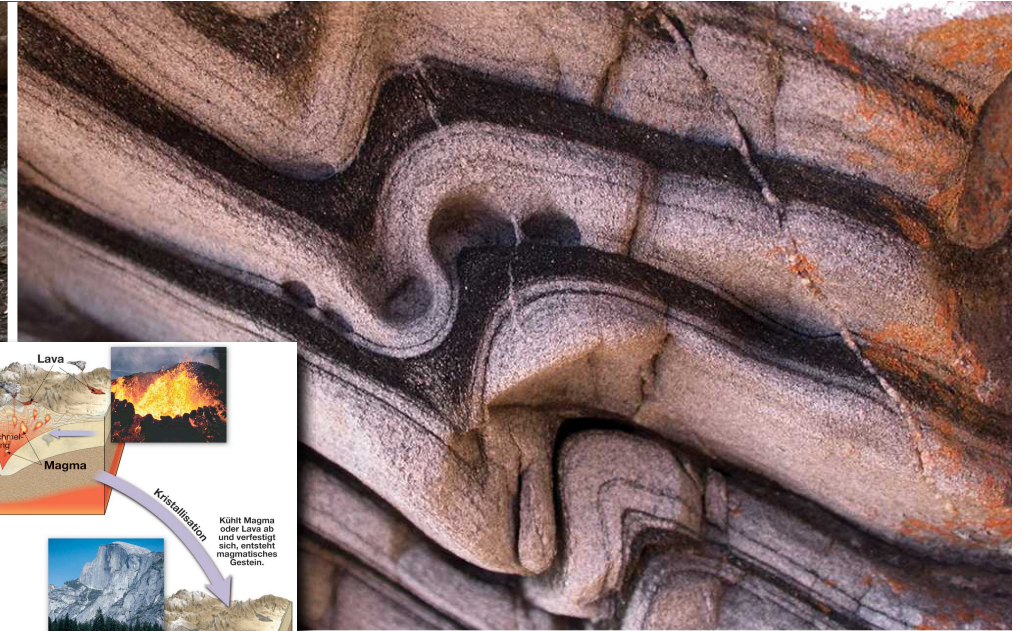
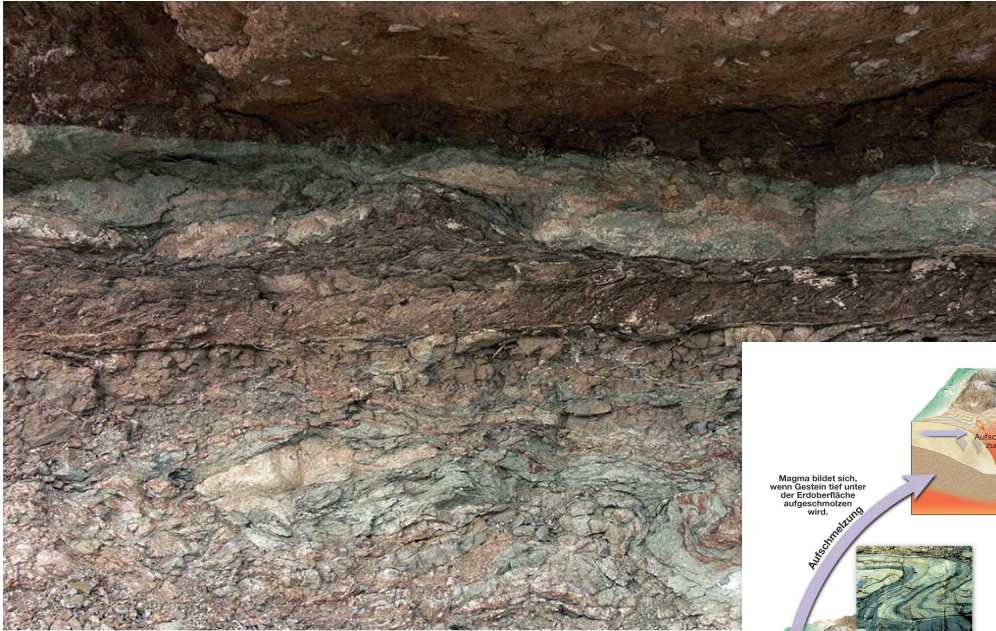
Sedimente - Sedimentgestein



Magma - Magmatisches Gestein



Metamorphes - verformtes Gestein



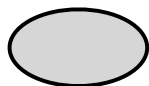
Dynamische Erde: Kreislauf der Gesteine

Exogener Kreislauf
(an der Erdoberfläche)

- 1 Diagenese und Lithifikation
- 2 Erosion und Ablagerung

Endogener Kreislauf
(im Erdinnern)

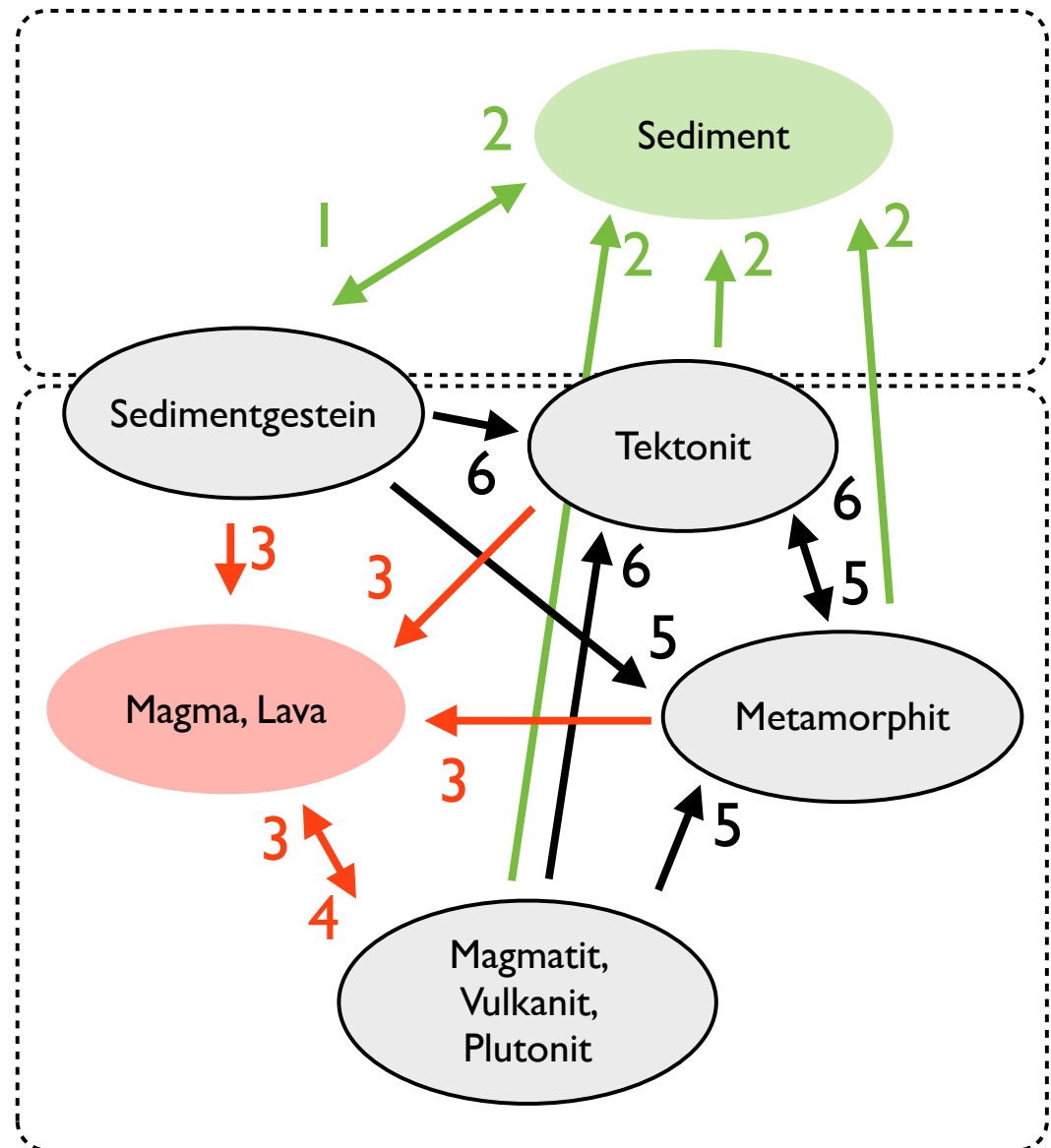
- 3 Aufschmelzen
- 4 Erstarren
- 5 Metamorphose
- 6 Deformation



Gestein

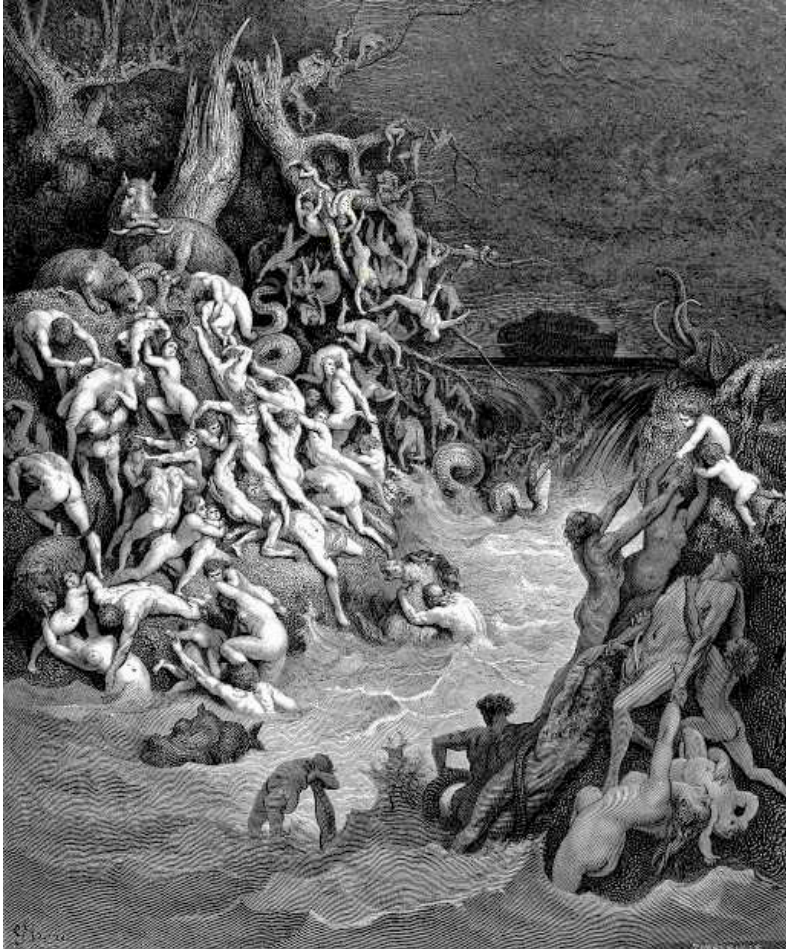


kein Gestein



Geologische Vorgeschichte

Katastrophen- (Kataklysmen-) theorie



Oberflächenformationen sind durch Katastrophen (z.B. Sintflut) entstanden



Baron Georges Léopold
Chrétien Frédéric Dagobert
Cuvier (1769-1832)

Superpositionsprinzip

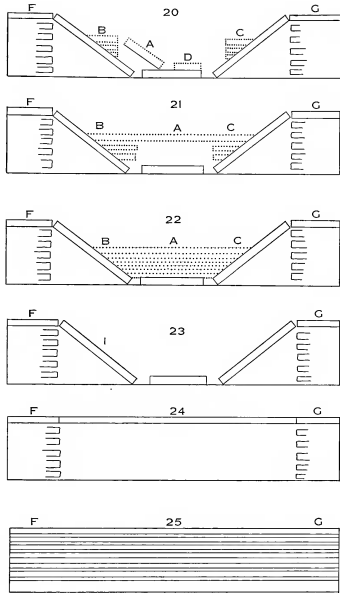


Figure 20 shows the hills and valleys produced there by the breaking of the upper sandy strata.

Figure 21 shows a portion of the lower strata in the new beds destroyed, while the upper strata remain unbroken.

Figure 22 shows new strata, made by the sea, in the valleys.

Figure 23 shows the mountains and valleys caused by the breaking of the upper strata.

Figure 24 shows the huge cavities eaten out by the force of fires or waters while the upper strata remained unbroken.

Figure 25 shows the vertical section of Tuscany at the time when the rocky strata were still whole and parallel to the horizon.



**Nikolaus Steno
(1638-1686)**

Nikolaus Steno (1669):

"De solido intra solidum"

1. Horizontbeständigkeit (lateral konstant)

2. Horizontale Ablagerung

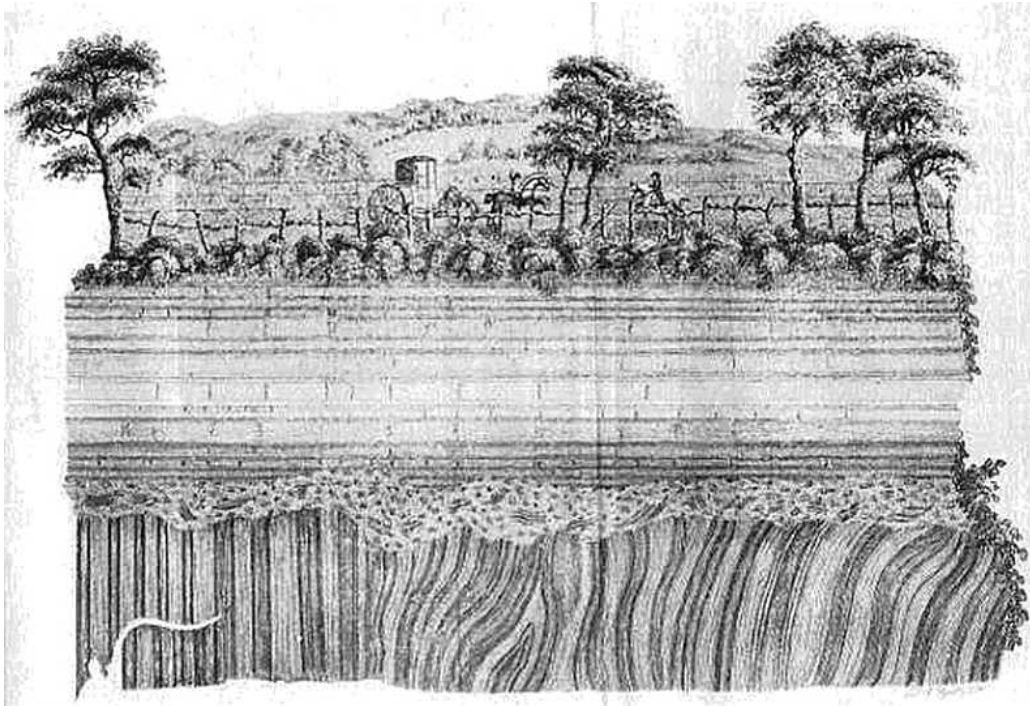
3. Lagerungsabfolge (= Superpositionsprinzip)

Altersabfolge: unten (= Liegendes) ist älter

oben (= Hangendes) ist jünger

Aktualismus - (engl. uniformitarianism)

auch: Aktualitätsprinzip - Gleichförmigkeitsprinzip



Jedburgh Unconformity

"Theory of the Earth" (1785)

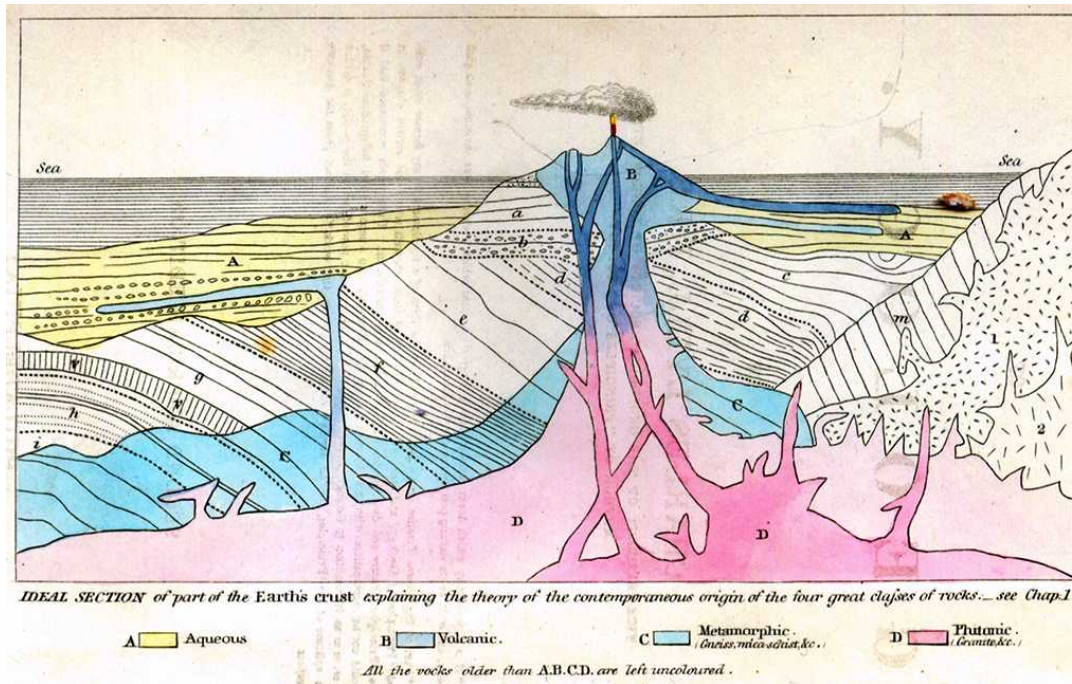
"... we find no vestige of a beginning, no prospect of an end..."



James Hutton
(1726 - 1797)

Aktualismus - (engl. uniformitarianism)

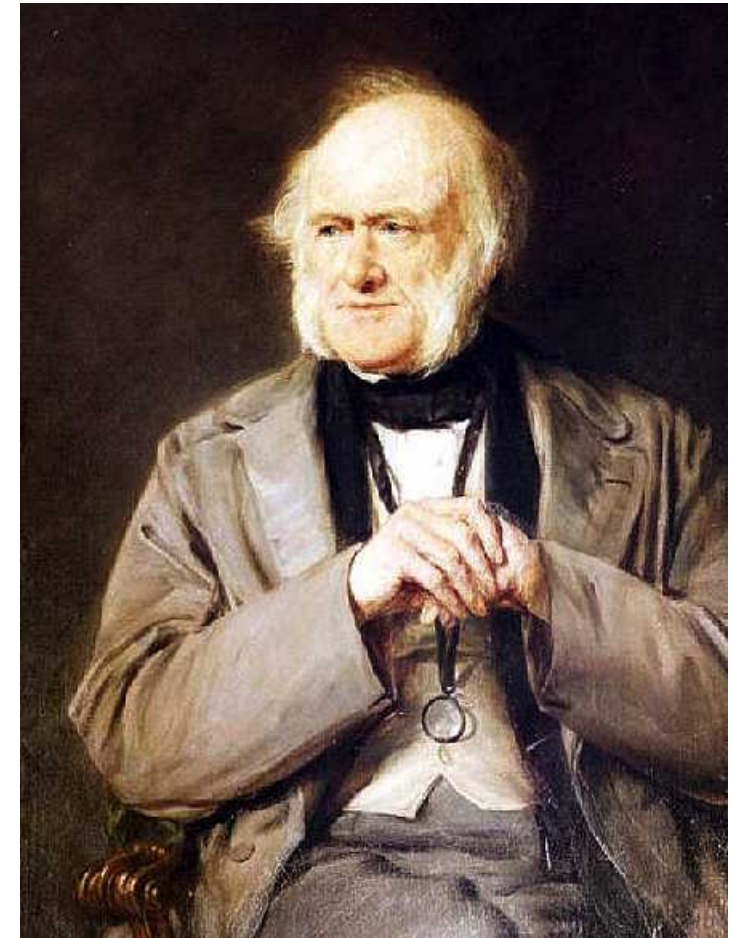
auch: Aktualitätsprinzip - Gleichförmigkeitsprinzip



"The Principles of Geology" (1830)

"... the present is the key to the past..."

Physikalische, chemische, biologische
Gesetzmässigkeiten, die heute gültig sind,
waren auch in der Vergangenheit gültig



Charles Lyell
(1797 - 1875)

erste Altersabschätzungen

Annahmen:

Temperaturzunahme mit Tiefe:

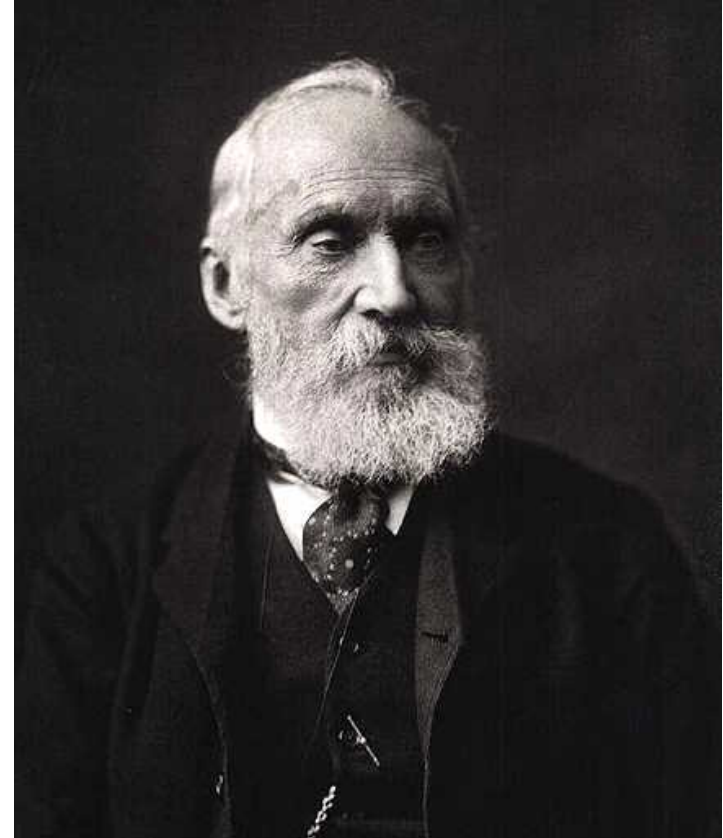
1°F / 50 feet (20°C / km)

Anfangstemperatur (geschmolzenes Gestein):

7000° F (3900°C)

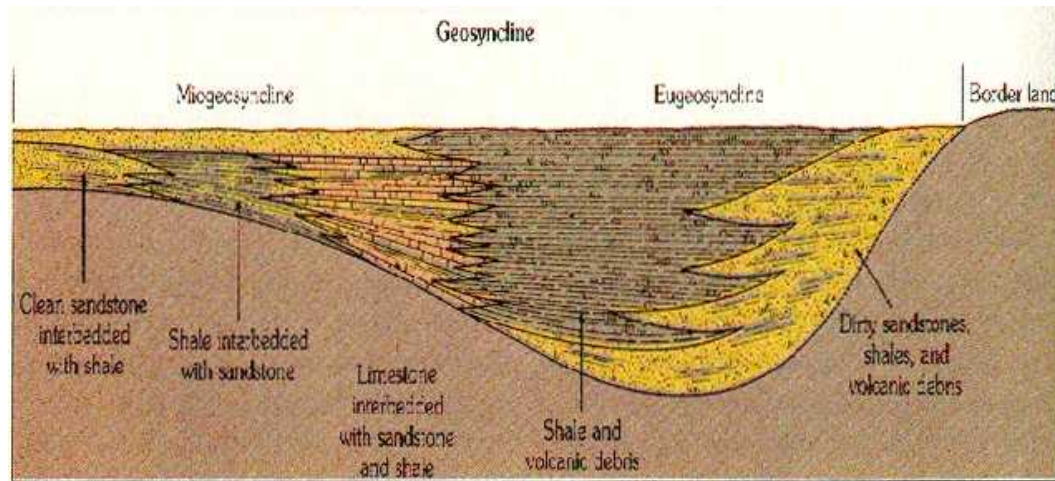
Durch Fourier-Gleichung berechnet:

Erdalter \approx 100 Ma



William Thomson,
1st Baron Kelvin of Largs
(1824 - 1907)

Geosynklinal - Theorie



Phasen der Gebirgsbildung:

1. Bildung eines Troges, Ablagerung von Sedimenten
2. Zusammenschub und Faltung
3. Hebung und Erosion

*"It [the geosynclinal theory] constitutes a great - probably one of the greatest - unifying principles in geologic science."
(Knopf, A., 1948)*



James Hall
(1811 - 1898)

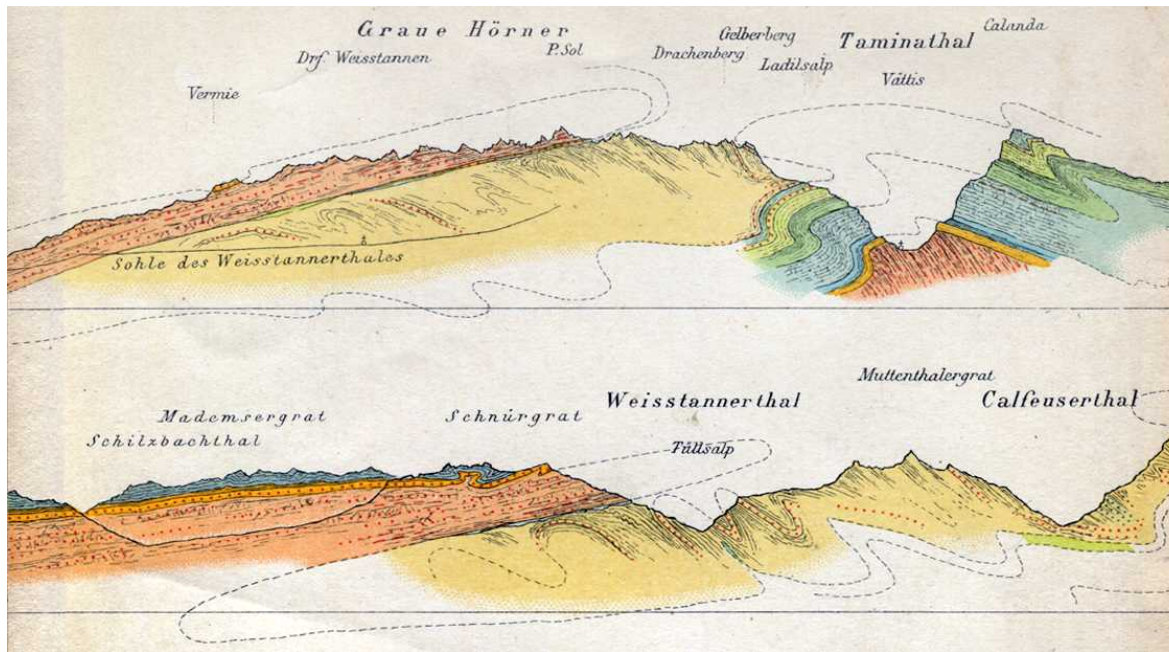


James Dwight Dana
(1813 - 1895)

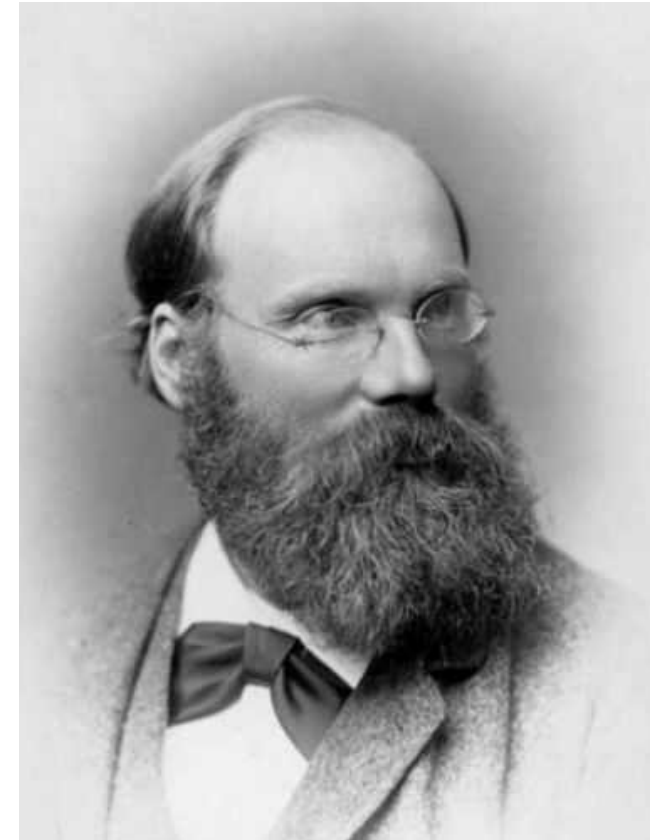
Aber....

*"The trouble with geosynclines is like the Trouble with Harry [A. Hitchcock 1955]; they are dead."
(Dietz, R.S., 1965)*

Problem mit der horizontalen Verkürzung



*Geologie der Hochalpen zwischen Reuss und Rhein.
(Albert Heim, 1891)*



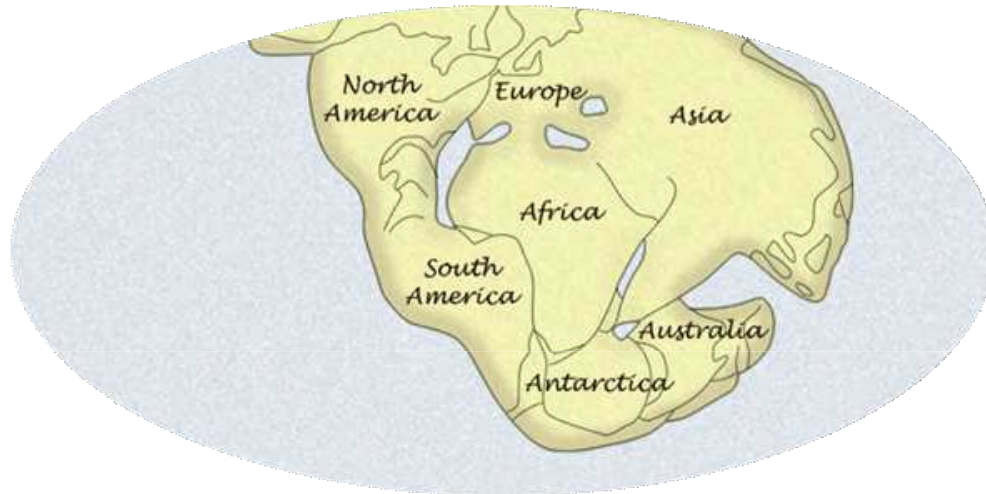
Albert Heim
(1849 - 1937)

Glarner Hauptüberschiebung als Doppelfalte

Wenn wissenschaftlich begründet, hätte Heim Kontinentaldrift akzeptiert

Entwicklung des plattentektonischen Modells

Kontinentaldrift - Hypothese

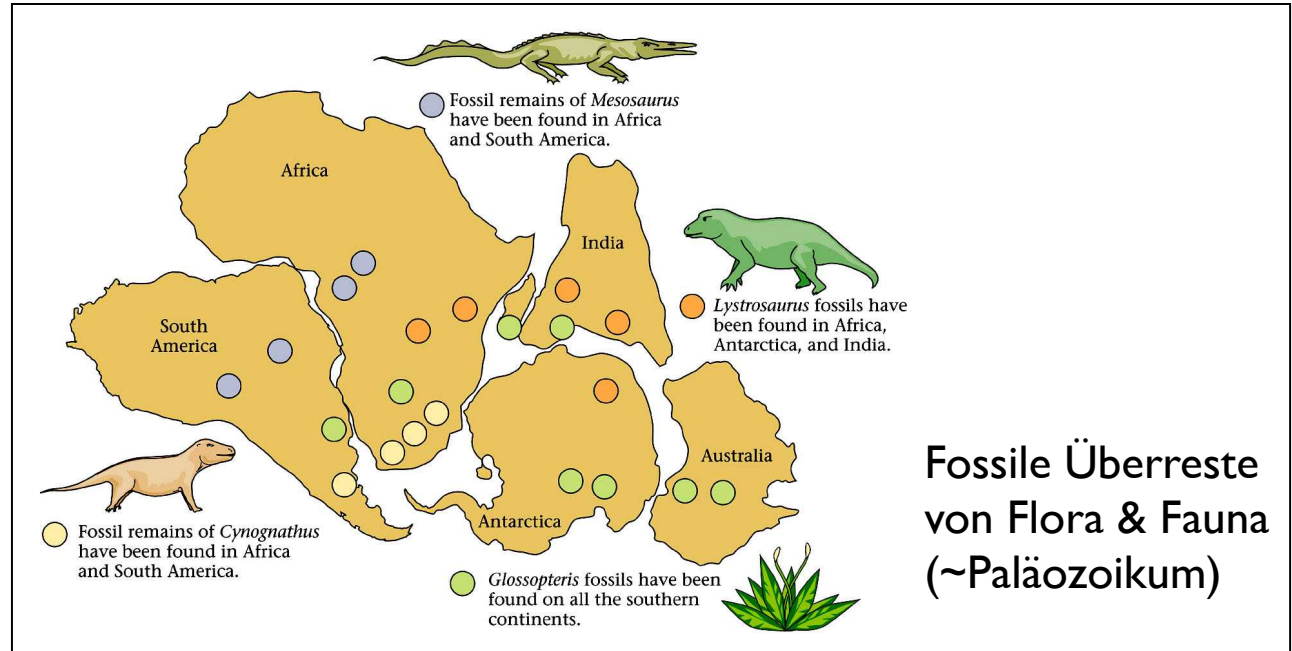
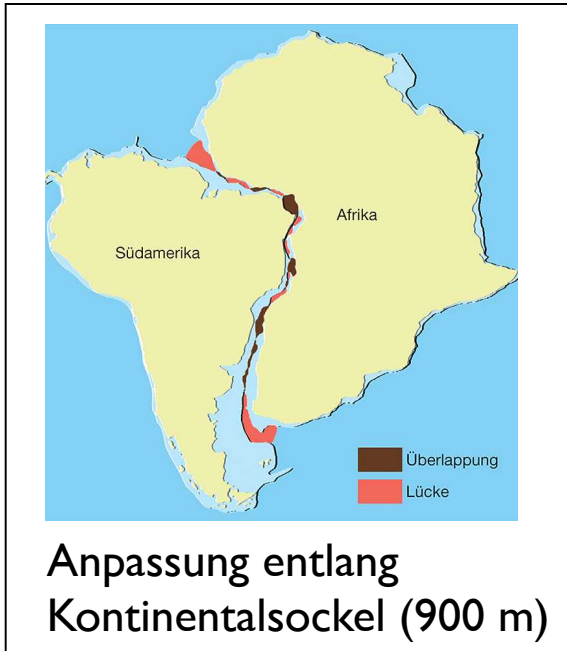


Hypothese (1912):
Vor 200 Ma bricht Superkontinent
"Pangäa" auseinander

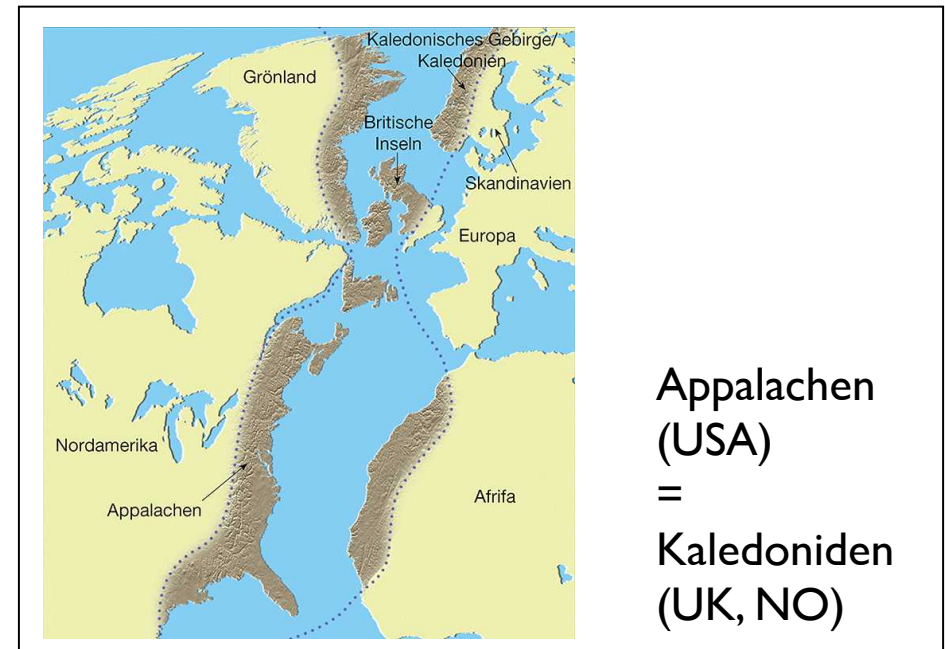
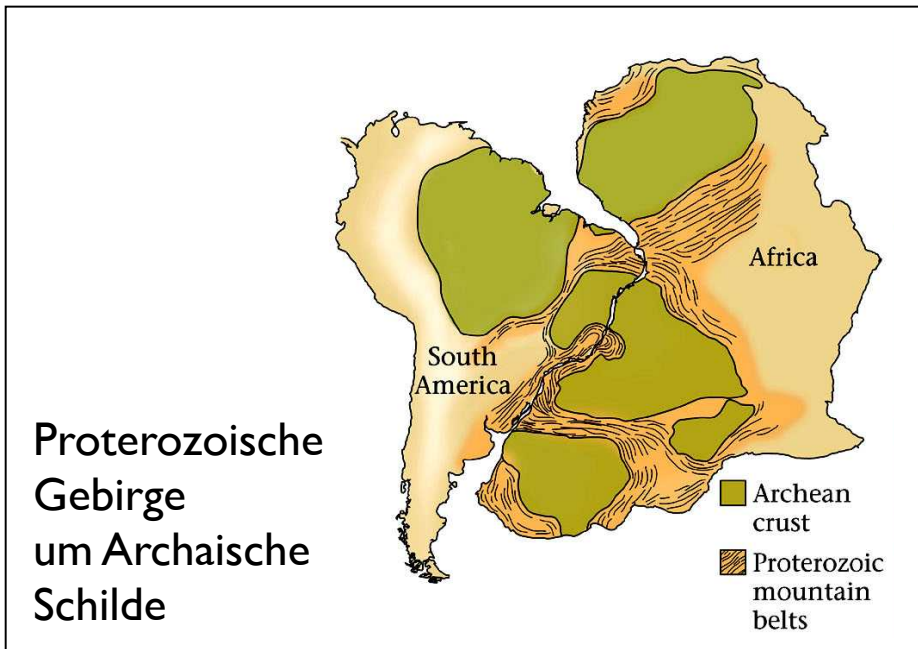


Alfred Lothar Wegener
(1880 - 1930)
Meteorologe & Polarforscher

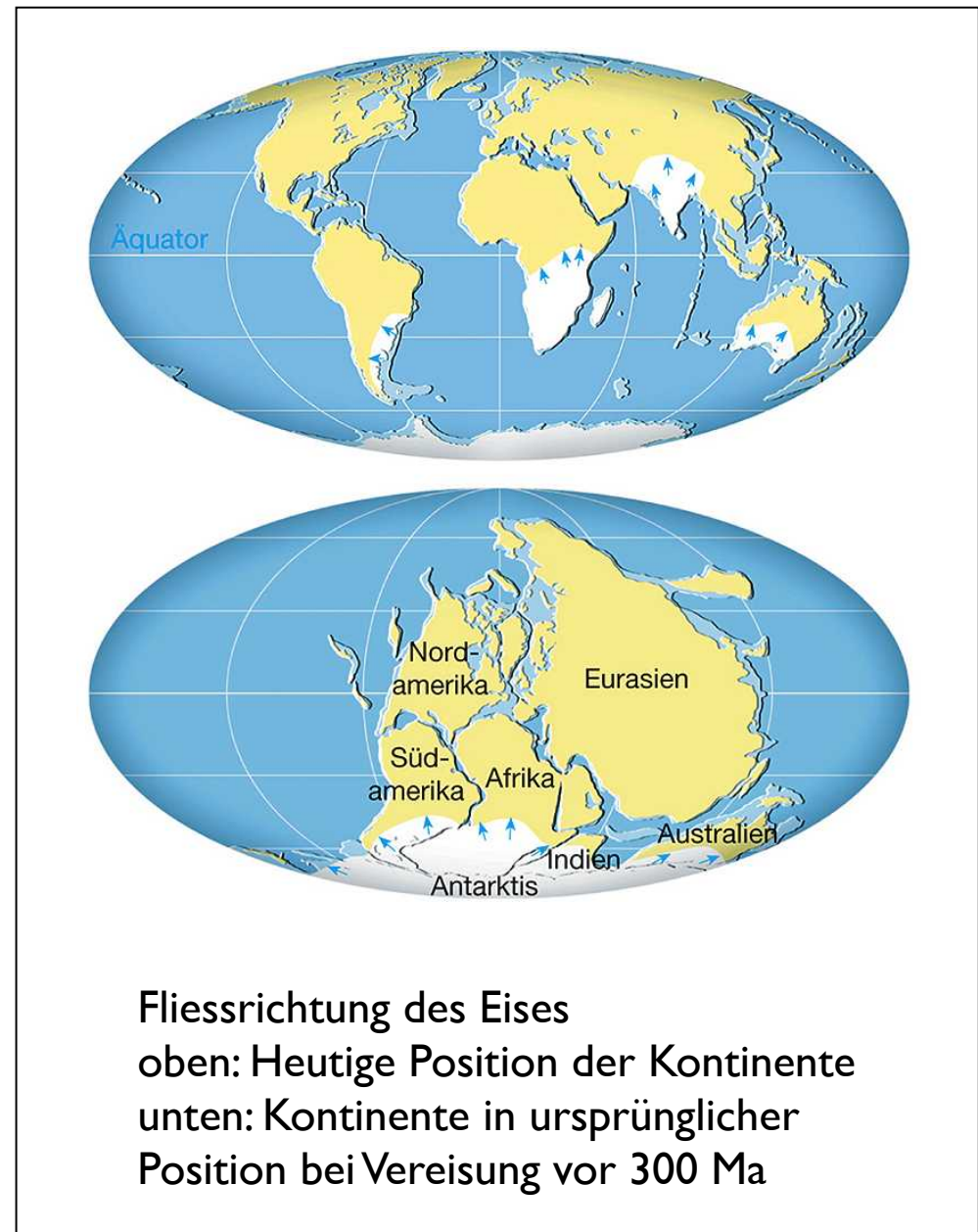
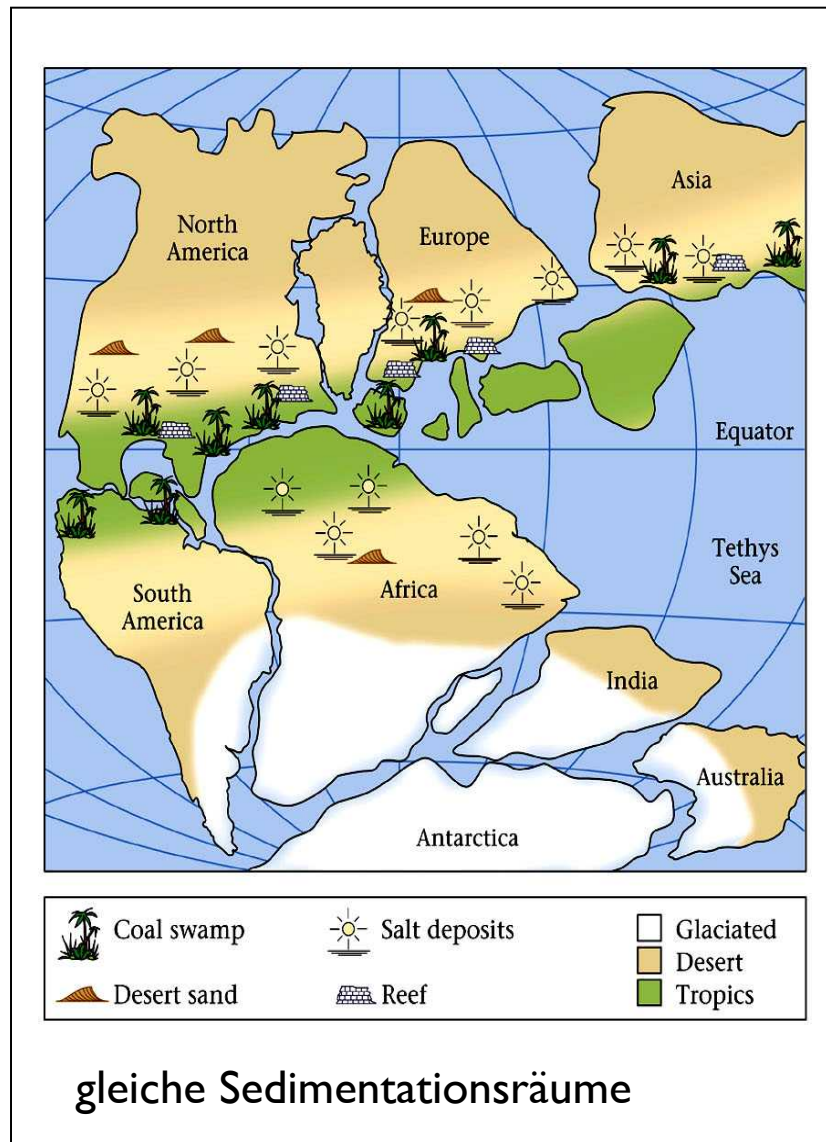
Evidenz für die Existenz von Pangäa



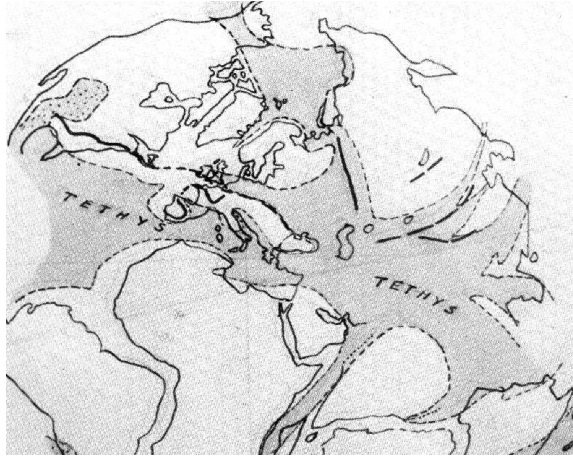
Fossile Überreste von Flora & Fauna (~Paläozoikum)



Evidenz für die Existenz von Pangäa



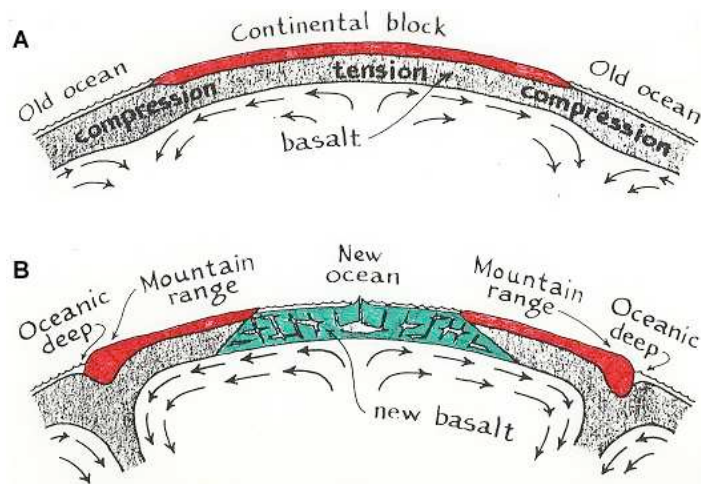
Kontinentaldrift findet Unterstützung



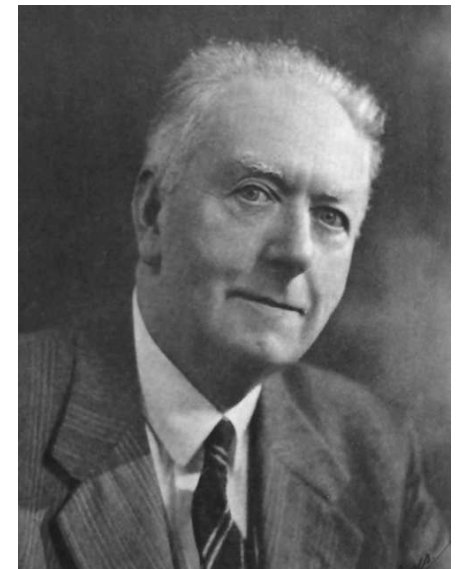
"Our wandering Continents" (1937)
Pangäa → Laurasia + Gondwana



Alexander Logie du Toit
(1878 - 1948)



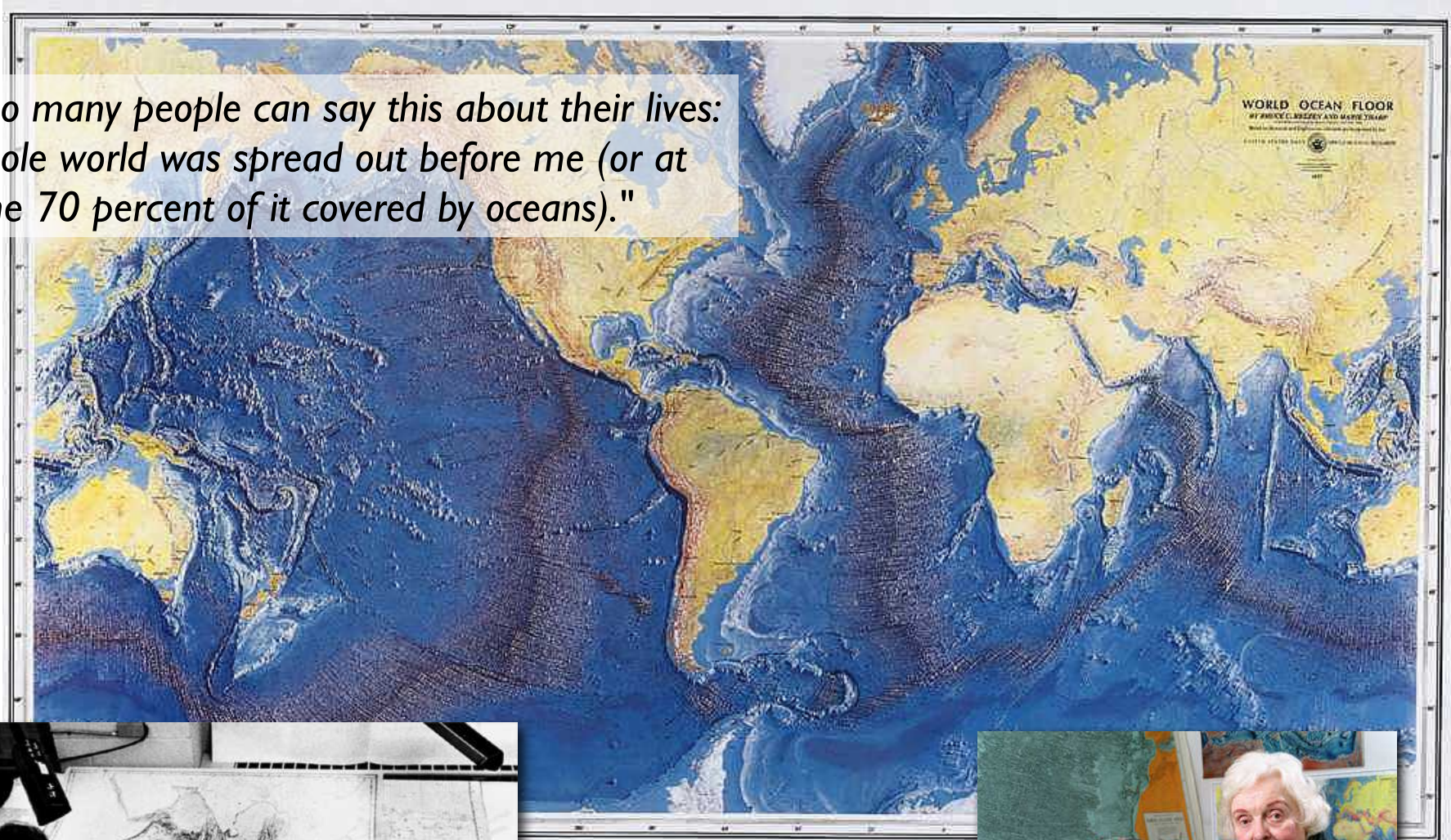
"Principles of Physical
Geology" (1944)
"Spekulation" über
Kontinentaldrift



Arthur Holmes
(1890 - 1965)

Kartierung des Ozeanbodens

*"Not too many people can say this about their lives:
The whole world was spread out before me (or at
least, the 70 percent of it covered by oceans)."*



Marie Tharpe (1920 - 2006)

Ozeanrücken: Entstehung von Erdkruste



Marie Tharpe
(1920 - 2006)

Bruce Heezen
(1924 - 1977)



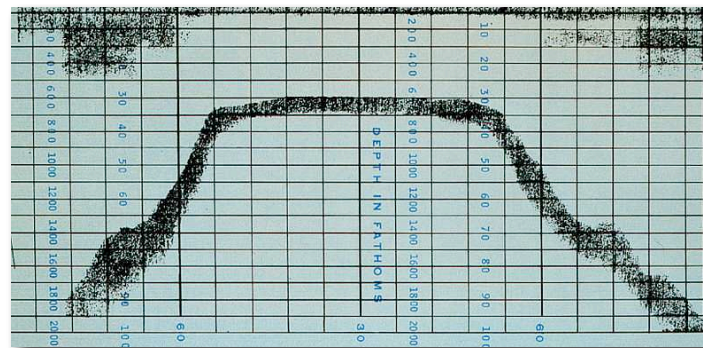
Expanding Earth Idee -
wurde u.a. unterstützt
von Bruce Heezen



Harry Hammond Hess
(1906 - 1969)



Robert Sinclair Dietz
(1914 - 1995)



Echolot-Aufzeichnung des "ersten Guyots",
entdeckt von Harry Hess, Universität Princeton

Magnetische Anomalien

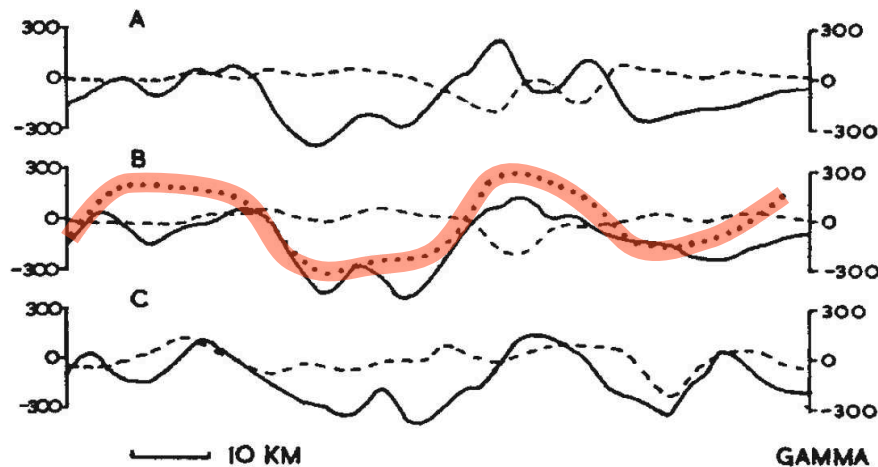
September 7, 1963

NATURE

MAGNETIC ANOMALIES OVER OCEANIC RIDGES

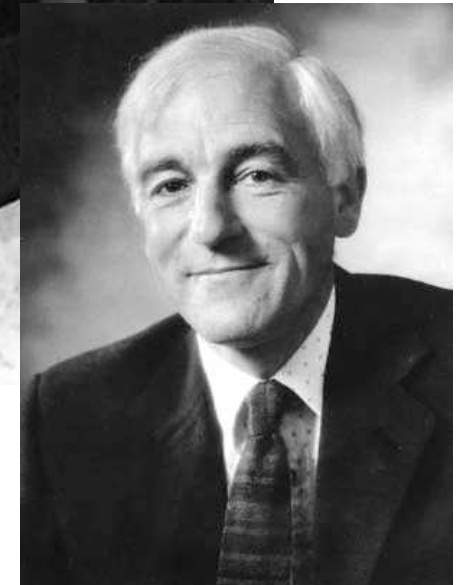
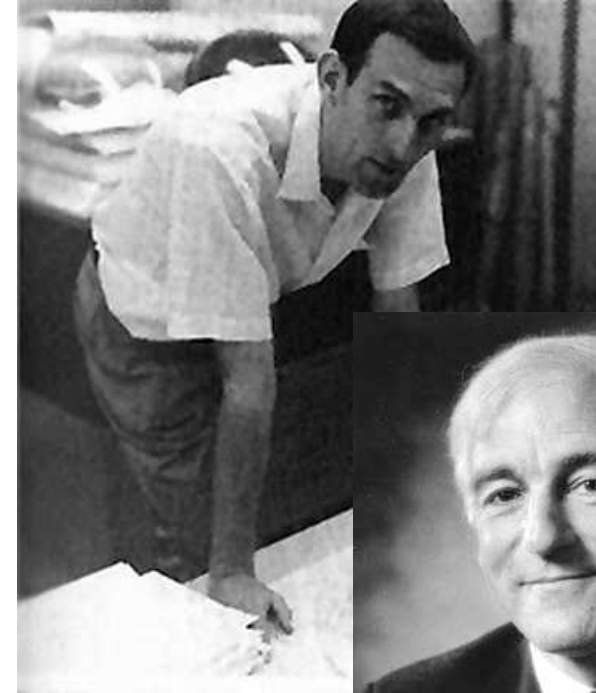
By F. J. VINE and Dr. D. H. MATTHEWS

Department of Geodesy and Geophysics, University of Cambridge



The theory is consistent with, in fact virtually a corollary of, current ideas on ocean floor spreading⁷ and periodic reversals in the Earth's magnetic field⁸.

- beobachtet
- - - - berechnet - mit konstanter Magnetisierung
- berechnet - mit Annahme von Feldumkehr



Frederick John Vine
(* 1939)

Drummond Hoyle Matthews
(1931 - 1997)

Magnetische Streifen

16 December 1966, Volume 154, Number 3755

SCIENCE

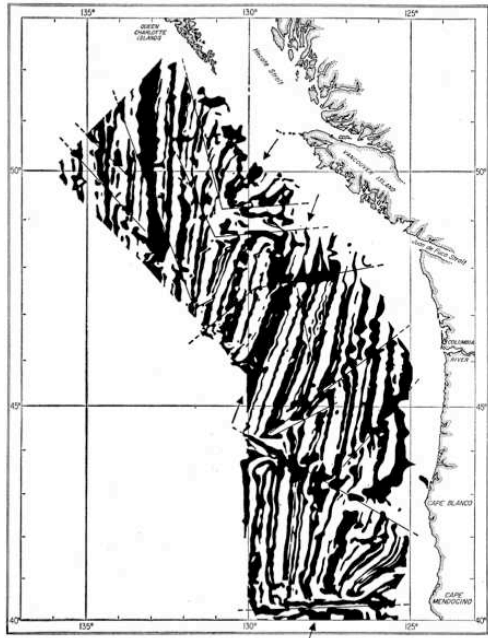
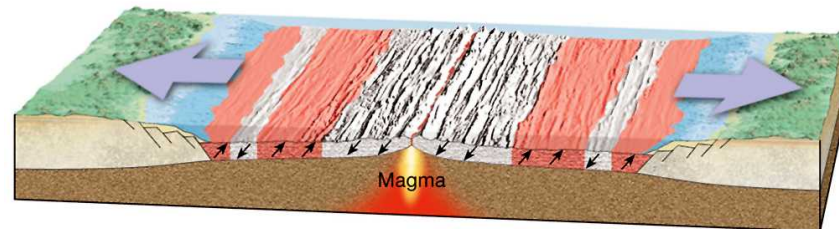
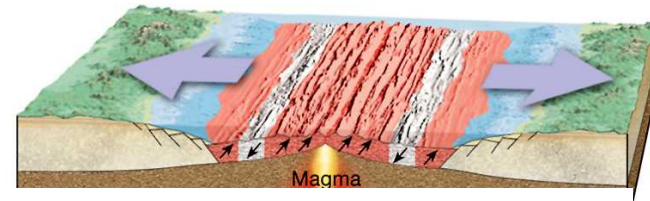
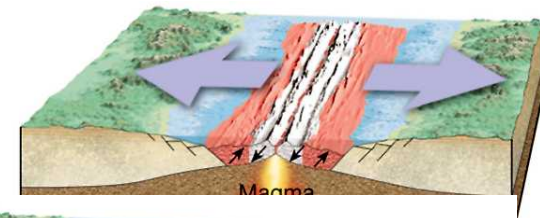
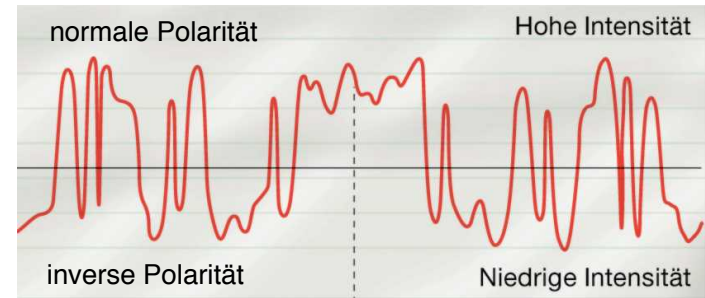
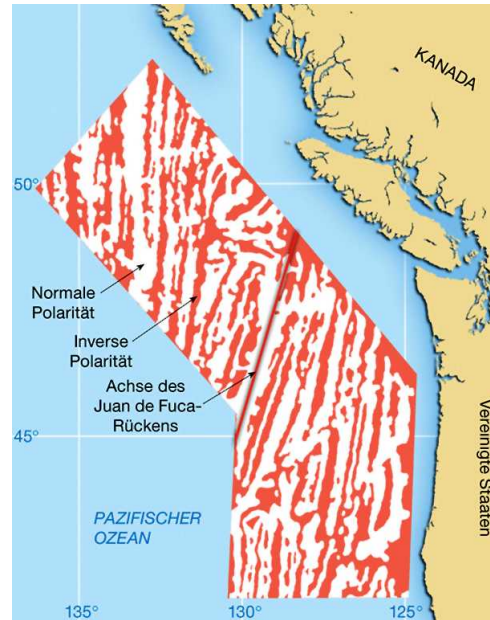


Fig. 1. Summary diagram of total magnetic-field anomalies southwest of Vancouver Island. Areas of positive anomaly are shown in black. Straight lines indicate faults offsetting the anomaly pattern; arrows, the axes of the three short ridge lengths within this area—from north to south, Explorer, Juan de Fuca, and Gorda ridges. See also Fig. 15. [Based on fig. 1 of Raff and Mason (27); courtesy Geol. Soc. Amer.]

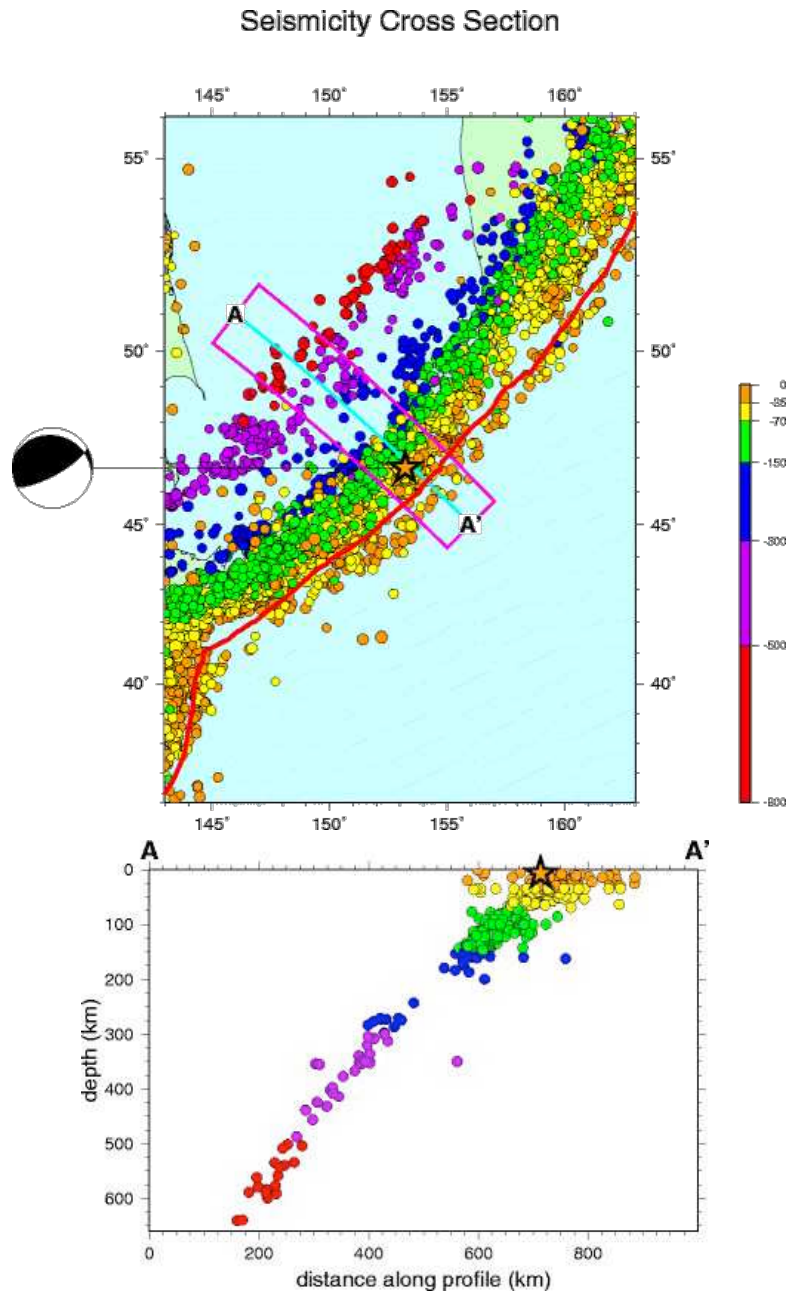


Spreading of the Ocean Floor: New Evidence

Magnetic anomalies may record histories of the ocean basins and Earth's magnetic field for 2×10^8 years.

F. J. Vine

Wadati-Benioff-Zone



Kiyoo Wadati
(1902 - 1995)



Victor Hugo Benioff
(1899 - 1968)

Wadati: deep earthquakes (>300km) are associated with oceanic trenches
Benioff: distribution of epicenters are evidence for fault origin of ocean deeps

⇒ lineare Senke für Erdoberfläche

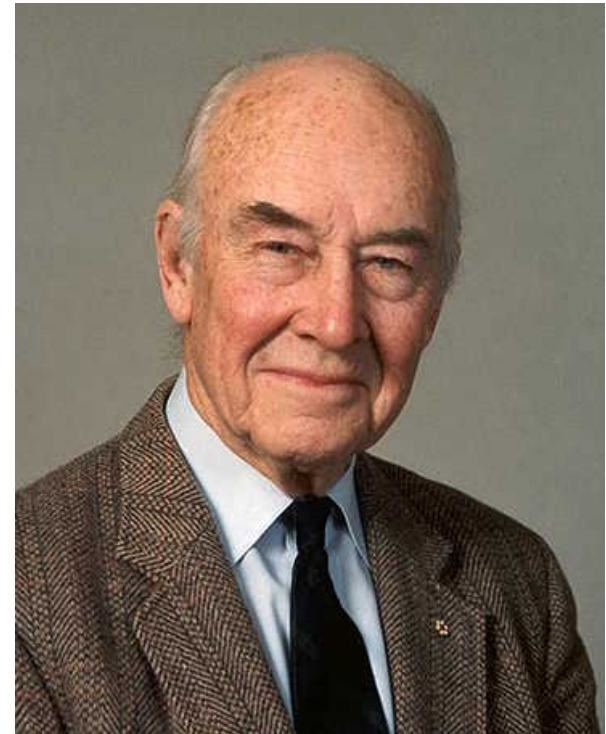
Plattentektonisches Konzept

(1) Hotspots (1963)

Platten bewegen sich über stationäre hotspots hinweg. Das bedeutet, dass die Platten relativ steif sind und sich über die weiche (schwache) Asthenosphäre hinwegbewegen, ohne sich intern zu verformen.

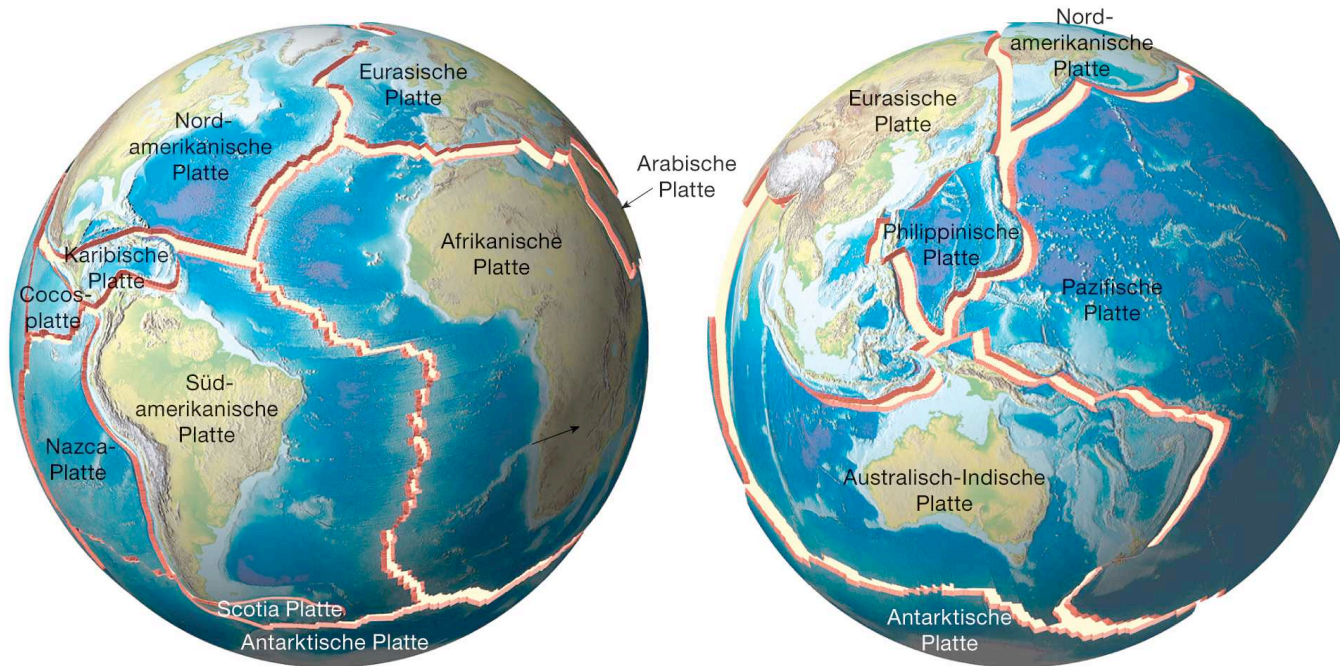
(2) Transformbrüche (1965)

Die Erde expandiert nicht, deshalb muss es auch destruktive Plattengrenzen geben. Transformbrüche verbinden Seafloor Spreading und Subduktionszonen und bilden so eine zusammenhängende Plattengrenze.



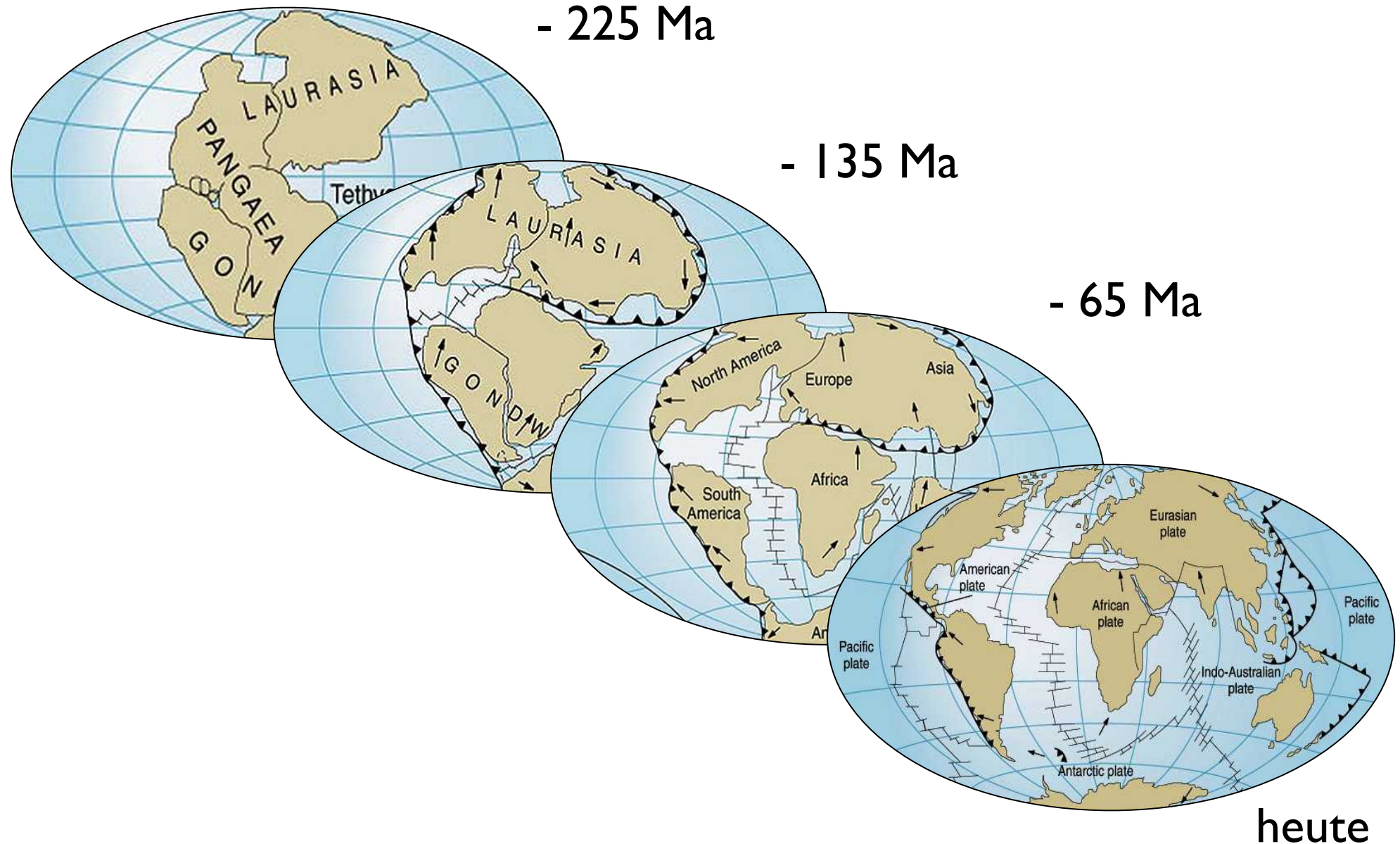
John Tuzo Wilson
(1908 - 1993)

Theorie der Plattentektonik



- Die Erdoberfläche ist in ca. 20 tektonische Platten unterteilt.
- Die Platten sind Lithosphärenplatten und bewegen sich \pm steif (ohne sich innerlich zu verformen) über die fließfähige Asthenosphäre hinweg.
 1. An den mittelozeanischen Rücken (= konstruktive Plattengrenze) wird aufsteigendes Mantelmaterial an die auseinander driftenden Platten angefügt (Seafloor Spreading)
 2. An den Subduktionszonen (= destruktive Plattengrenze) wird die Lithosphäre wieder in den Erdmantel zurück versenkt.
 3. Transformbrüche (= konservative Plattengrenzen) verbinden die Plattengrenzen, sodass jede Platte kinematisch vollkommen von ihren Nachbarinnen entkoppelt ist.

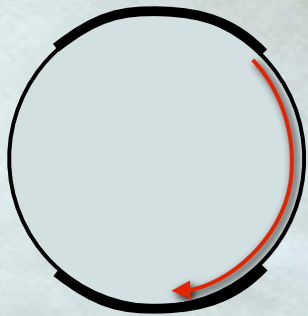
Wilson Zyklus - von Pangäa bis heute



Back-of-the-envelope Wilson cycle

Annahme: ein Superkontinent (z.B. Pangaea) bricht entzwei und driftet auseinander.

Frage: Wie lange dauert es, bis er auf der andern Seite der Erde wieder zusammen trifft und einen neuen Superkontinent bildet ?



Radius (Superkontinent) = $5 \cdot 10^6$ m (5000 km)

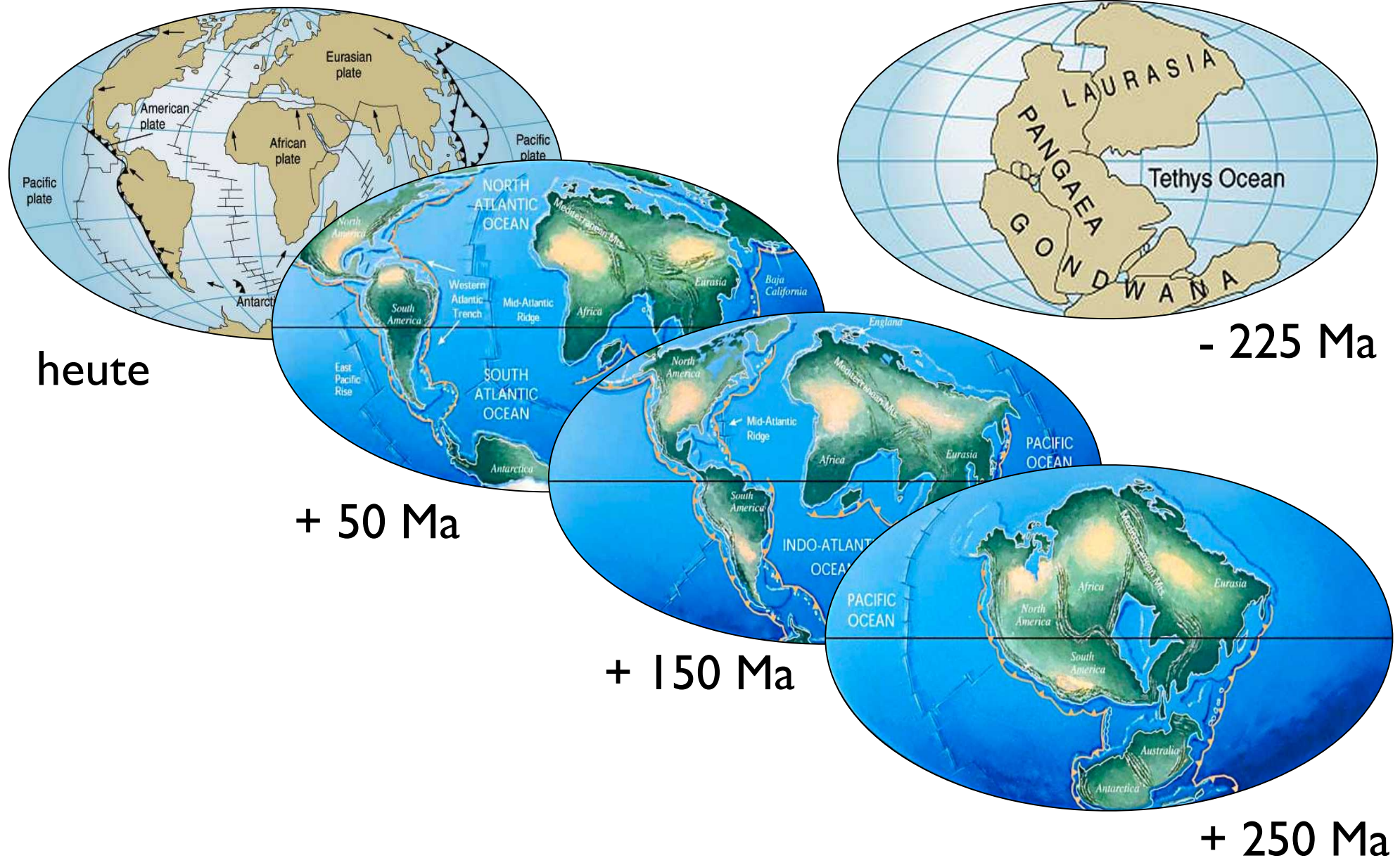
Erdumfang $\approx 4 \cdot 10^7$ m (40'000 km)

Spreading rate = 3 cm / Jahr (= $3 \cdot 10^{-2}$ m a⁻¹)

$$\begin{aligned} \text{Weg } s &= 1/2 \text{ Erdumfang} - \text{Radius Superkontinent} \\ &= [(40 \cdot 10^6) / 2] - 5 \cdot 10^6 = 15 \cdot 10^6 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Zeit } t &= \text{Weg} / \text{Geschwindigkeit} = s / v \\ &= 15 \cdot 10^6 \text{ m} / 3 \cdot 10^{-2} \text{ m a}^{-1} = 5 \cdot 10^8 \text{ a} = 500 \text{ Ma} \end{aligned}$$

Wilson Zyklus - die nächsten 250 Ma



I Entstehung der Erde

die Erde im All

Entstehung...

- ... des Universums
- ... des Sonnensystems
- ... der Erde

Geologische Zeiträume und Dimensionen

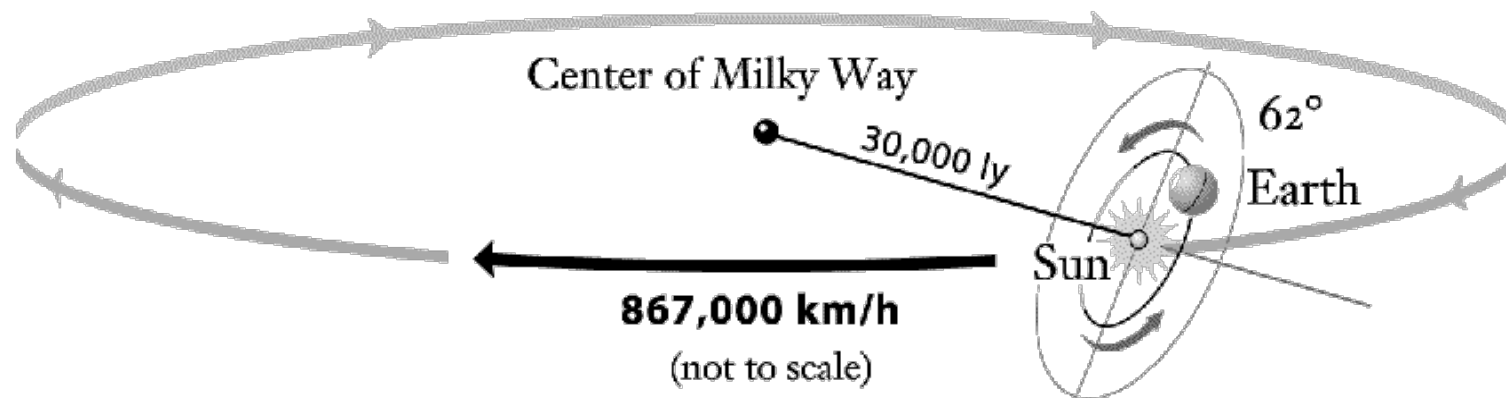
Plattentektonik

die Erde im All

Milchstrasse - Galaxis



Durchmesser	~ 100'000 Lichtjahre	$\approx 10^{21}$ m
Höhe	~ 1000 Lichtjahre	$\approx 10^{19}$ m
100 - 300 Milliarden Sterne:	~ $100 \cdot 10^9$	$\approx 10^{11}$



Sonnensystem

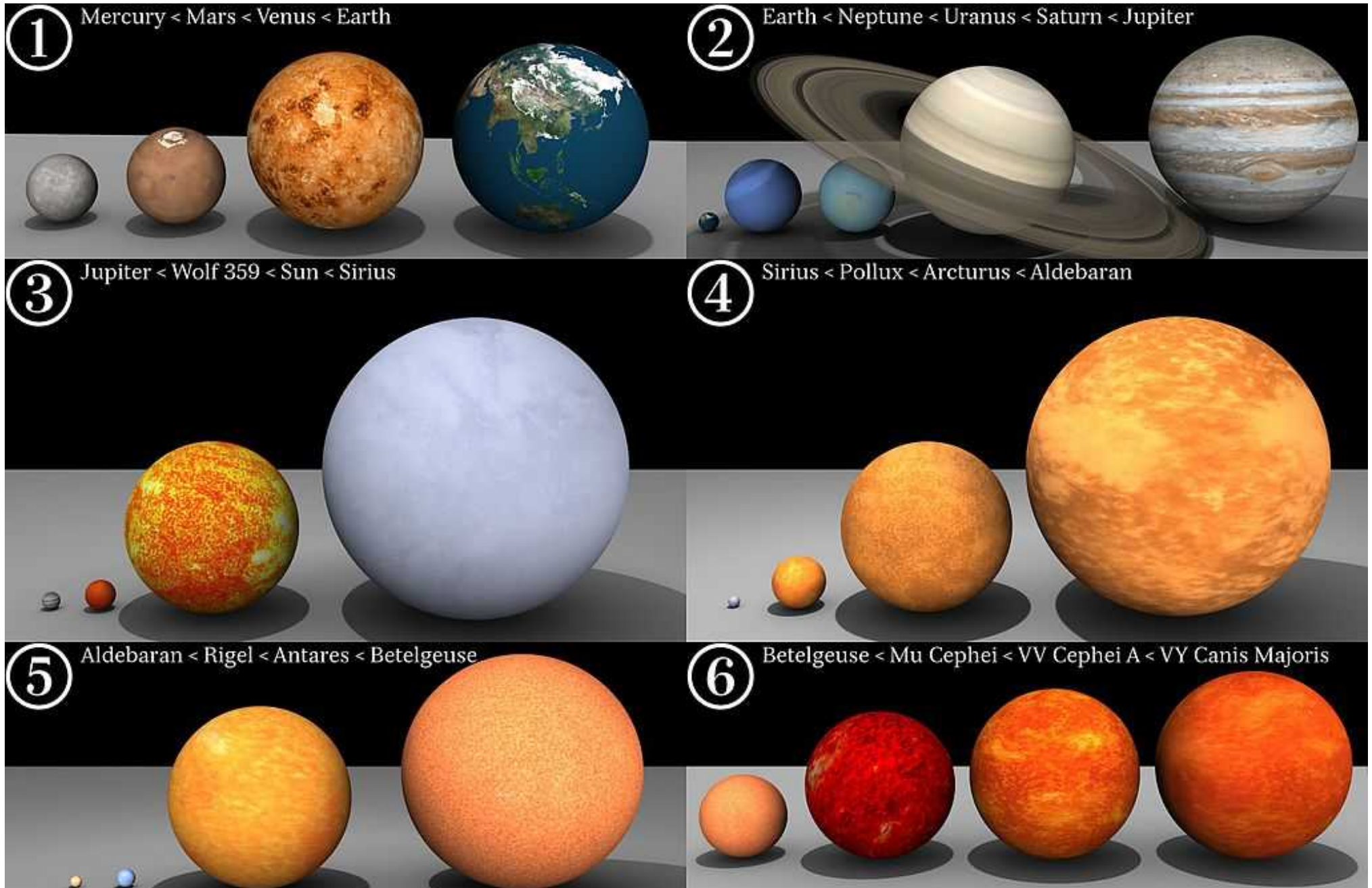
... Neptun, Kuiper-Gürtel, Oort-Wolke



Sonne, Merkur, Venus, Erde, Mars, Asteroiden, Jupiter, Saturn, Uranus...
Man Verachte Einen Menschen In Seinem Unglück Nie

Grössenvergleich

<https://de.wikipedia.org/wiki/Stern>



Dimensionen

	Parsec (pc)	Lichtjahre (ly)	astron. Einh. (AU)	Meter (m)
Galaxis Durchmesser	33'000	~110'000	$6.8 \cdot 10^9$	10^{21}
Galaxis Dicke	310	~1'000	$6.3 \cdot 10^7$	10^{19}
Sonnensystem inkl. Oort-Wolke	1	3.2	~200'000	$3 \cdot 10^{16}$
Sonnensystem inkl. Kuiper-Gürtel	$0.4 \cdot 10^{-3}$	$1.3 \cdot 10^{-3}$	~80	$1.2 \cdot 10^{13}$
Sonnensystem bis Neptun	$0.3 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	~60	$1 \cdot 10^{13}$
Sonne Durchmesser	$0.4 \cdot 10^{-7}$	$1.4 \cdot 10^{-7}$	0.01	$\sim 1.4 \cdot 10^9$
Erde Durchmesser	$0.4 \cdot 10^{-0}$	$1.4 \cdot 10^{-10}$	0.00001	$\sim 12.7 \cdot 10^6$

Verhältnis der Logarithmen der Durchmesser (in m):
Galaxis : Sonnensystem : Sonne : Erde = 21 : 13 : 9 : 7

das Universum im Masstab 1: 10¹⁷

Galaxis (Sterne):

$$d = 10^{21} \text{ m}$$

$$h = 10^{19} \text{ m}$$

Sterne pro Galaxis:
10¹¹ Sterne

Sonnensystem
incl. Kuiper-Gürtel (Pluto):

$$d = 10^{13} \text{ m}$$

Sonne (10⁹ m)

Erde (10⁷ m)

Schneegestöber (Schneeflocken):

$$\text{Durchmesser } 10^4 \text{ m} = 10 \text{ km}$$

$$\text{Höhe } 100 \text{ m}$$

$$\text{Volumen } \sim 10 \text{ km}^3$$

Schneeflocken pro Kubikmeter:
 $\sim 10^{11} / 10^{10} \text{ m}^3 = 10 \text{ m}^{-3}$

Schneeflocke

Grösse:

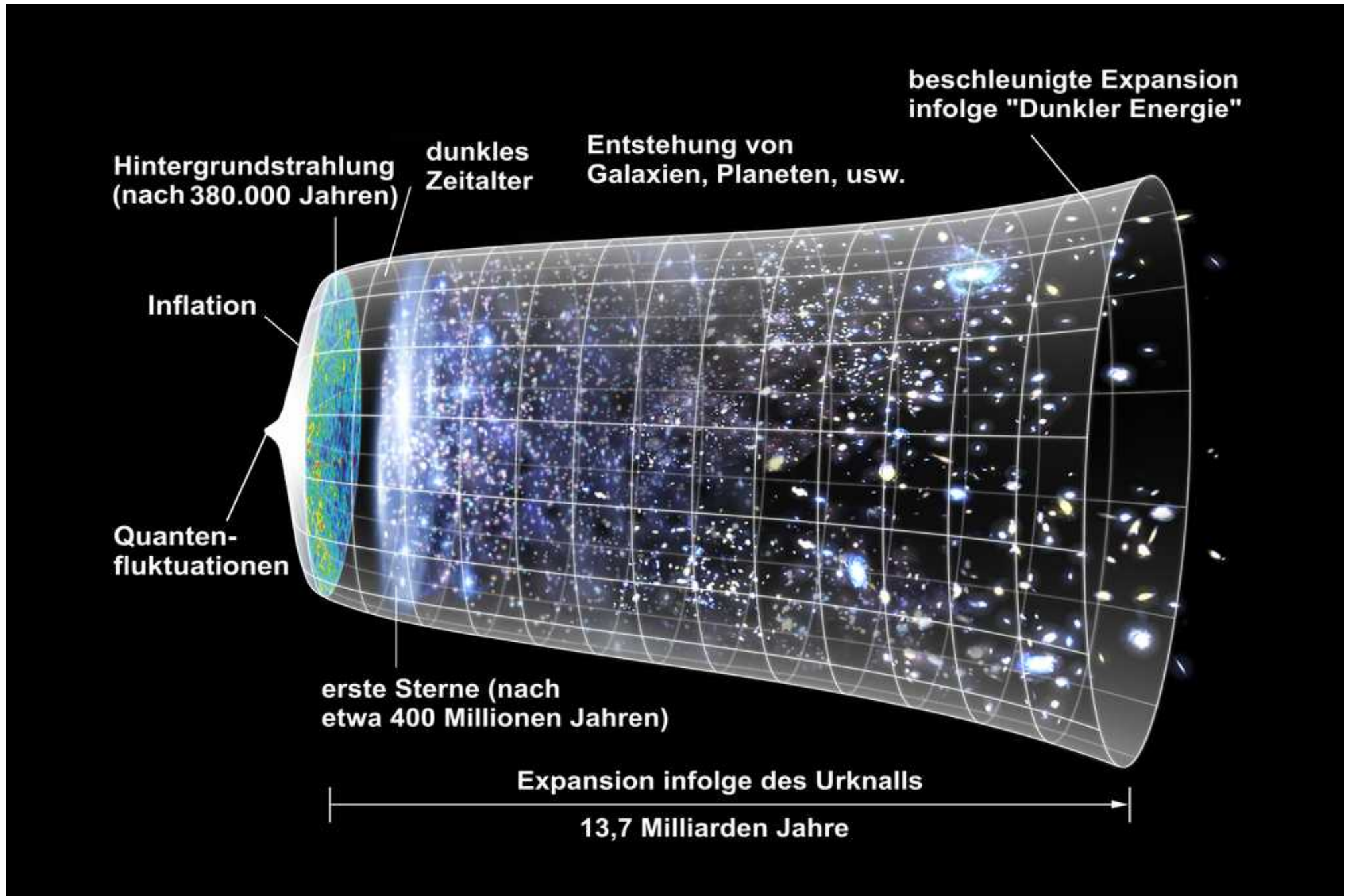
$$d = 10^{-4} \text{ m} = 0.1 \text{ mm} = 100 \mu\text{m}$$

$$10^{-8} \text{ m} = 10 \text{ nm}$$

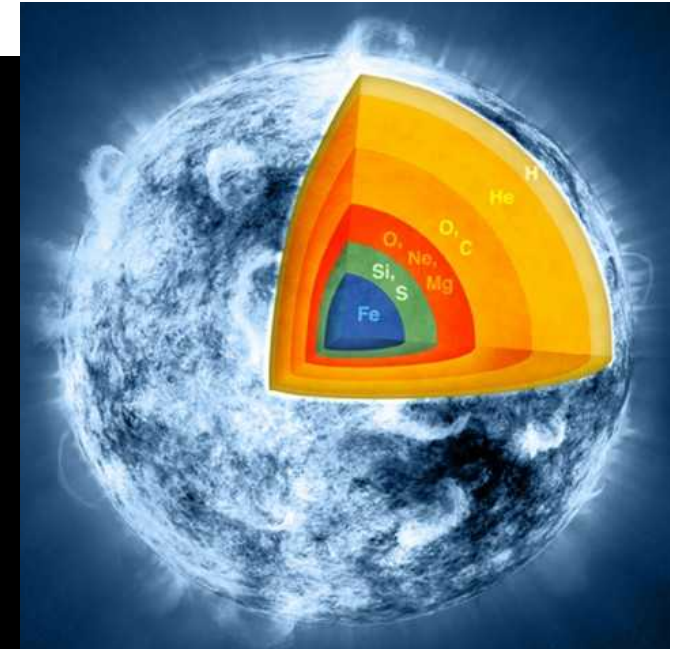
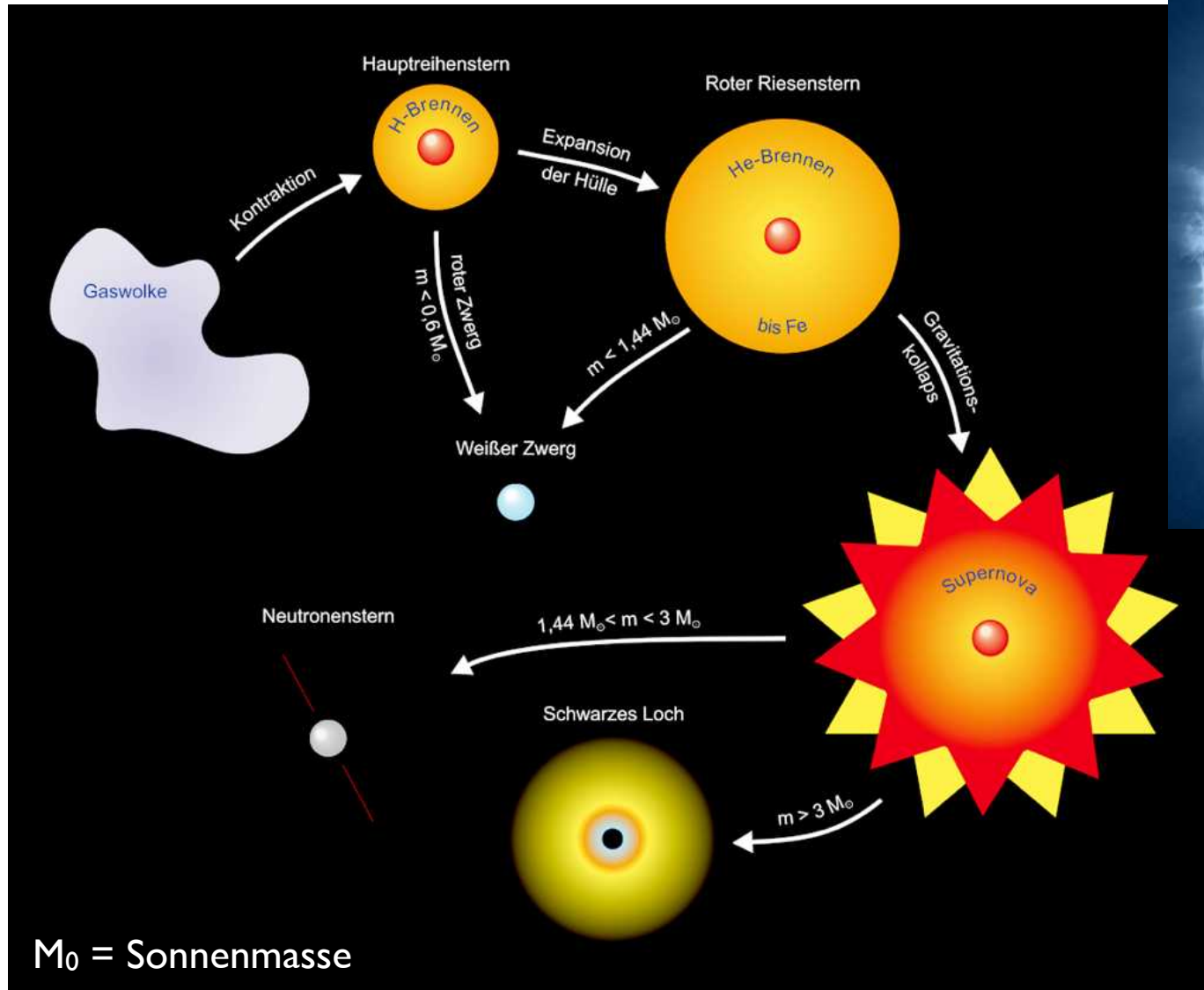
$$10^{-10} \text{ m} = 0.1 \text{ nm} (= 1 \text{ \AA})$$

Entstehung der Erde

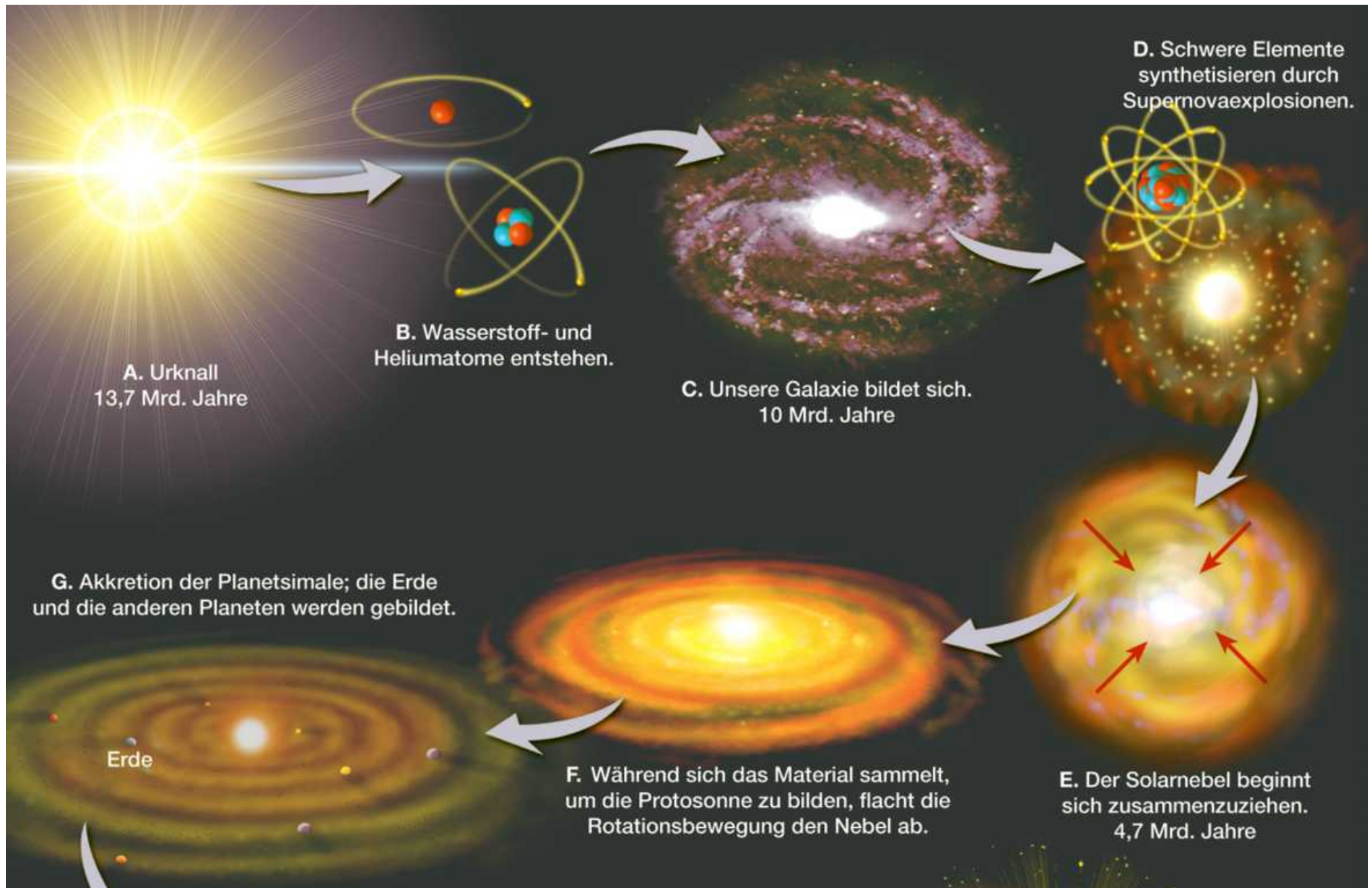
Entstehung des Universums



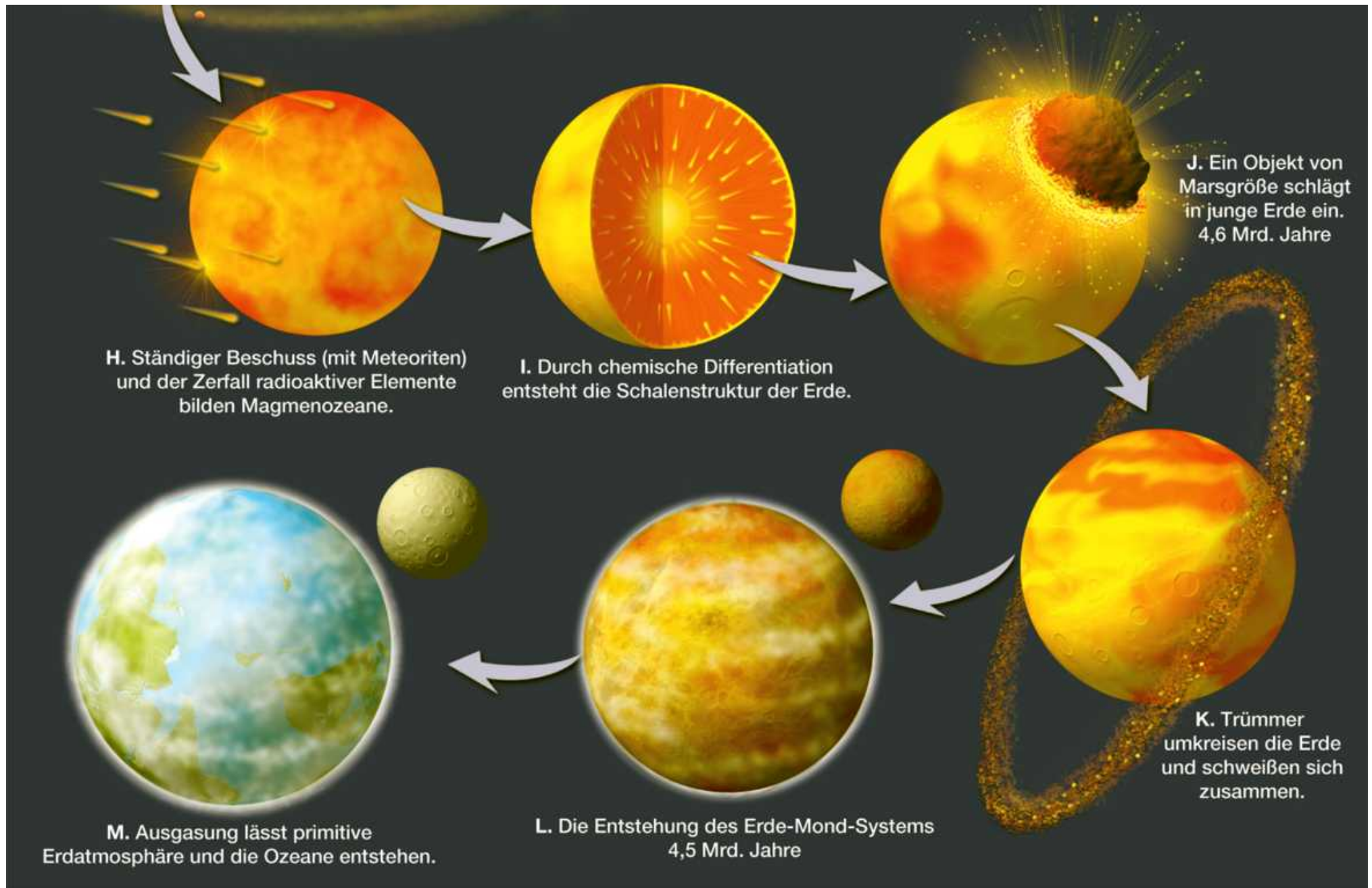
Entstehung von Sternen



Entstehung des Sonnensystems



Entstehung der Erde



Masszahlen für Erde - Sonne

- Sonne
- Radius = $6.957 \cdot 10^8$ m (695'700 km) (= 109 · Erdradius)
 - Masse = $1,989 \cdot 10^{30}$ kg (99.85% des Sonnensystems)

- Erde
- Mittlerer Radius = $6.371 \cdot 10^6$ m (6'371 km)
 - Erdradius: Äquator: $6.378 \cdot 10^6$ m - Pol: $6.357 \cdot 10^6$ m
 - Masse = $5.9736 \cdot 10^{24}$ kg
 - Mittlere Dichte = $5'500$ kgm⁻³
 - Jährlicher Zuwachs (Meteorite, Staub) $\approx 10^7$ kg (10'000 t)

Planet	Symbol	Mean Distance from Sun		Diameter Kilometers	Relative Mass (Earth = 1)	Average Density (g/cm ³)
		Millions of Kilometers	Period of Revolution			
Mercury	☿	58	88 ^d	4878	0.06	5.4
Venus	♀	108	225 ^d	12,104	0.82	5.2
Earth	♁	150	365.25 ^d	12,756	1.00	5.5
Mars	♂	228	687 ^d	6794	0.11	3.9
Jupiter	♃	778	12 ^{yr}	143,884	317.87	1.3
Saturn	♄	1427	29.5 ^{yr}	120,536	95.14	0.7
Uranus	♅	2870	84 ^{yr}	51,118	14.56	1.2
Neptune	♆	4497	165 ^{yr}	50,530	17.21	1.7

kleine Zahlen

Erdmasse $= 5.9736 \cdot 10^{24}$ kg

Jährlicher Zuwachs
(Meteoriten etc.) $\approx 10^7$ kg

Frage: Um wieviel Prozent nimmt
die Masse der Erde jährlich zu ?

$$\frac{10^7 \text{ kg}}{6 \cdot 10^{24} \text{ kg}} = 1/6 \cdot 10^{-17} \approx 10^{-18}$$
$$= 10^{-12} \text{ ppm}$$
$$= 10^{-16} \%$$
$$= 10^{-15} \text{ ‰}$$



Manuel Eggimann, Dr. Ali Al-Kathiri und
Dr. Edwin Gnos vor grossem Meteoriten
Berner Meteoritenprojekt im Oman

10^{-3} milli 10^{-6} micro 10^{-9} nano 10^{-12} pico 10^{-15} femto 10^{-18} atto

grosse Zahlen

Annahme:	Sonne	Masse	=	$1,989 \cdot 10^{30}$	kg
		Radius	=	$6.957 \cdot 10^8$	m
	Erde	Masse	=	$5.9736 \cdot 10^{24}$	kg
		Radius	=	$6.378 \cdot 10^6$	m

Frage: Um wieviel ist die Sonne grösser als die Erde ?

$$\text{Masse} \approx \frac{2 \cdot 10^{30} \text{ kg}}{6 \cdot 10^{24} \text{ kg}} \approx 1/3 \cdot 10^6 \text{ mal} \approx 330'000 \text{ mal}$$

$$\text{Durchmesser} \approx \frac{7 \cdot 10^8 \text{ m}}{6 \cdot 10^6 \text{ m}} \approx 1.1 \cdot 10^2 \text{ mal} \approx 110 \text{ mal}$$

$$\Rightarrow \text{Volumen} \approx \frac{343 \cdot 10^{24} \text{ m}^3}{216 \cdot 10^{18} \text{ m}^3} \approx 1.5 \cdot 10^6 \text{ mal} \approx 1'500'000 \text{ mal}$$

10^3 k(ilo) 10^6 M(ega) 10^9 G(iga) 10^{12} T(era) 10^{15} P(eta) 10^{18} E(xa) 10^{21} Z(etta) 10^{24} Y(otta)

Geologische Dimensionen und Zeiträume

Geologische Zeiträume

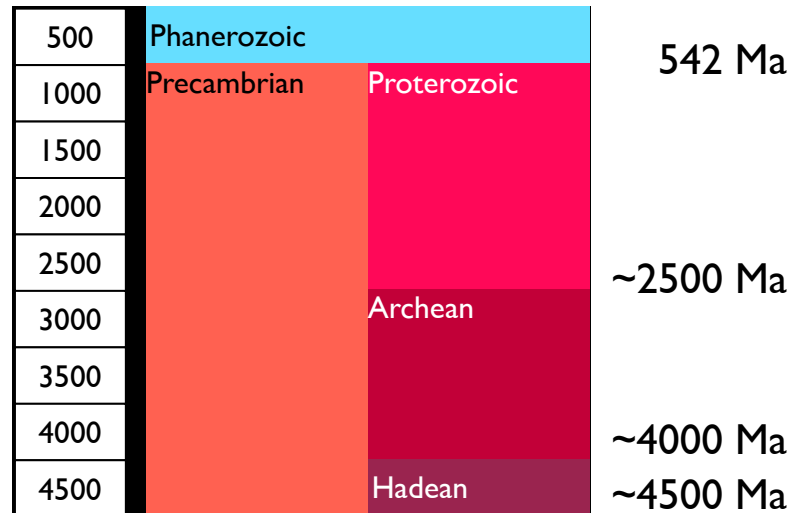
Entstehung ...

... der Erde

~ 4.5 Ga

... des Universums

~ 13.7 Ga



supernova

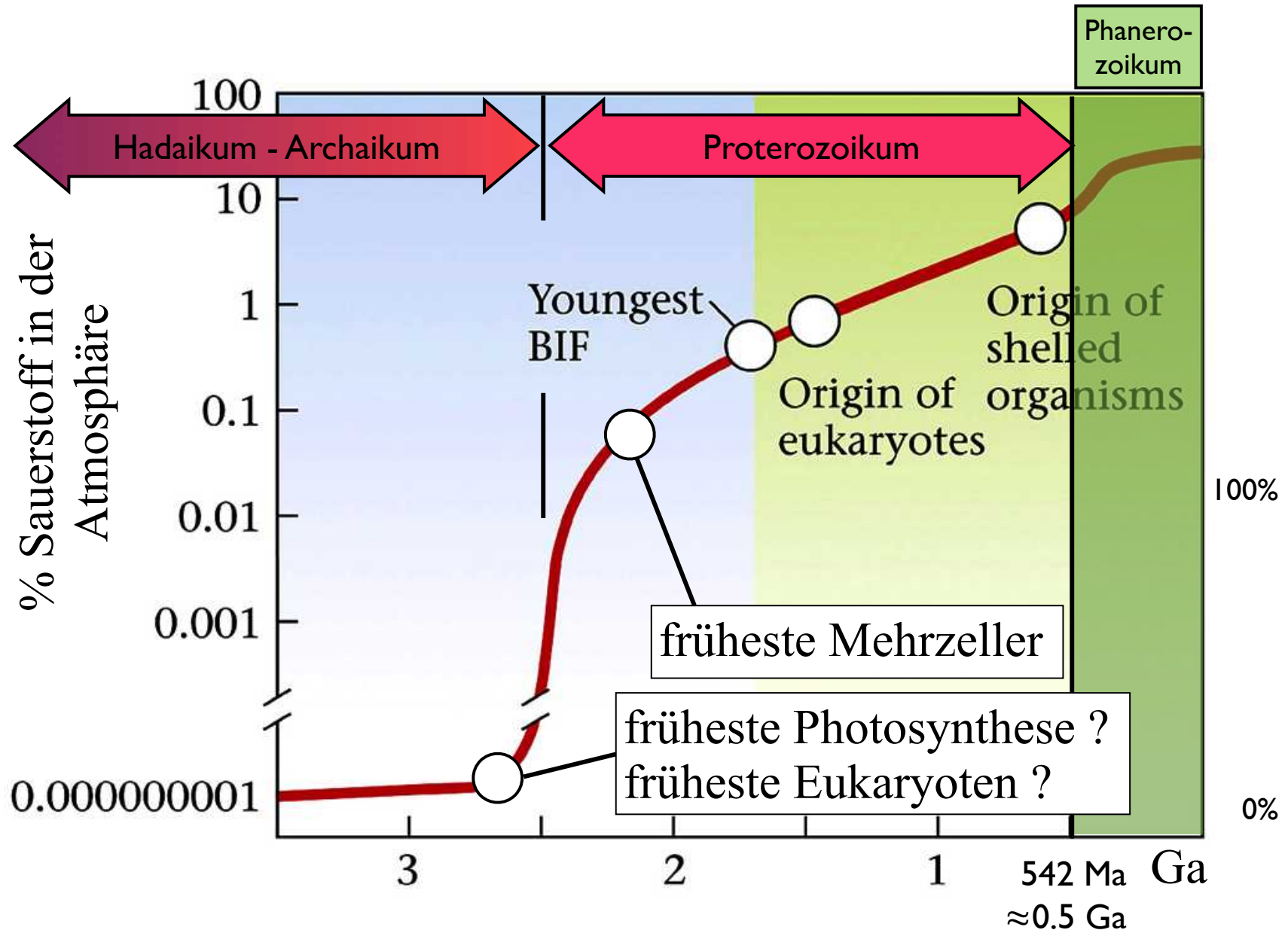


big bang

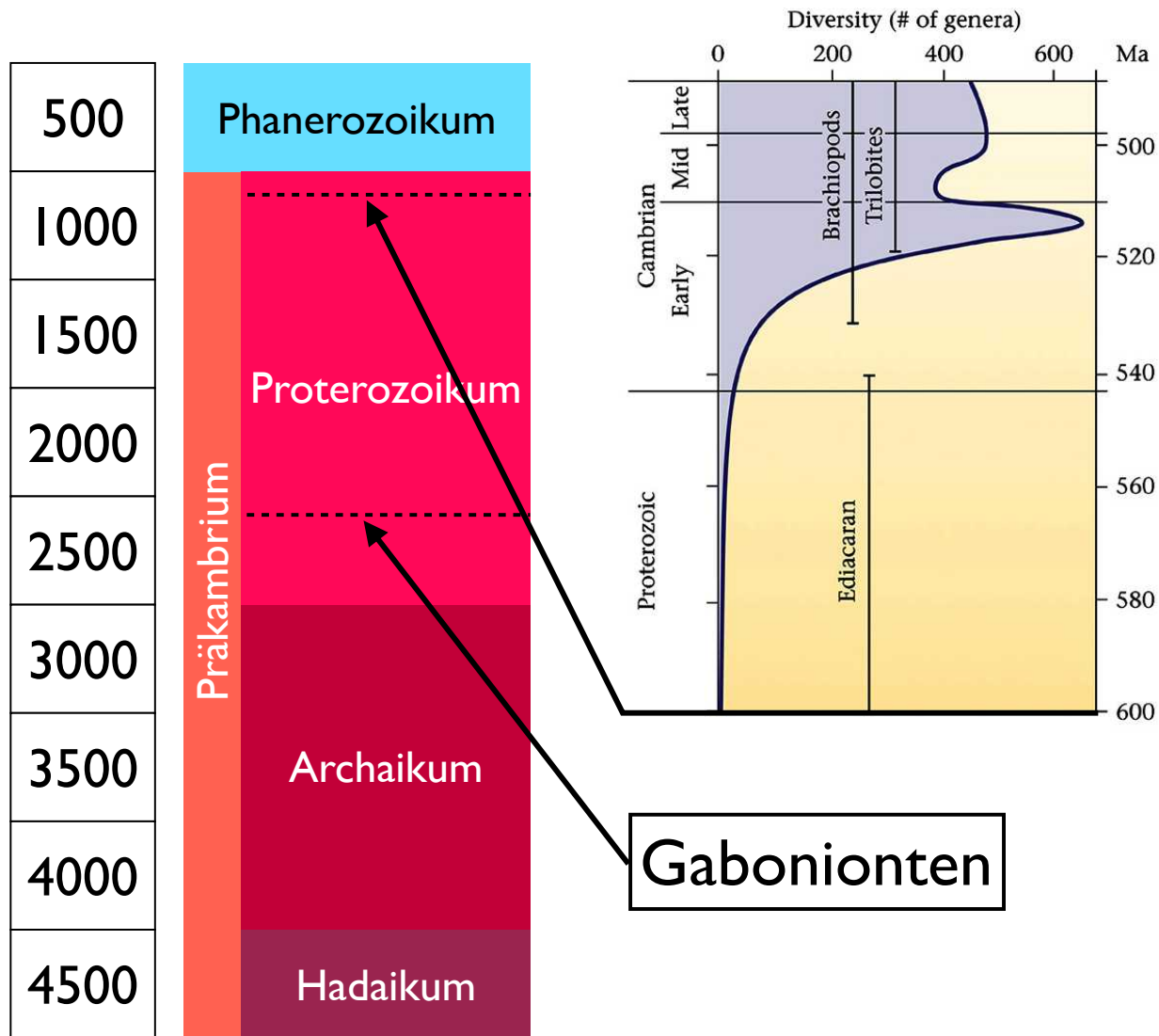
1 a	1 Jahr
1 Ma	10^6 Jahre
1 Ga	10^9 Jahre

1 a ~ $3 \cdot 10^7$ s

Sauerstoffgehalt in der Erdatmosphäre



Phanerozoikum ... wird sukzessive älter ...

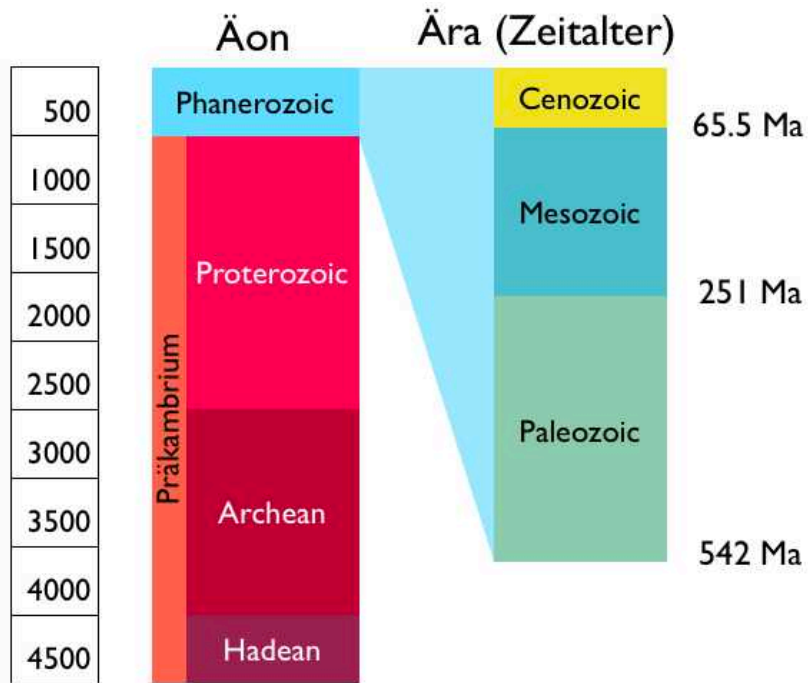


Phanerozoikum:
"Leben erscheint"
ursprünglich 542 Ma

Ediacara Fauna
(1958 entdeckt)
"Leben erscheint"
neu: 580 - 600 Ma

Gabonionten
(2008 entdeckt)
"Leben erscheint"
jetzt: 2.1 Ga !

Zeitraffer



| Sekunde entspricht ca. 150 a
 | Stunde 500'000 a
 | Tag 13 Ma
 | Monat 380 Ma
 | Jahr 4.567 Ga

31.12. 23:59:58 James Hutton - moderne Geologie
 31.12. 23:59:45 Zeitenwende
 31.12. 23:59:40 Römisches Reich (dauert 10 s ...)
 31.12. 23:59:20 Altes Ägypten (dauert 23 s...)
 31.12. ab 23:45 Bronzezeit (Holozän)
 31.12. ab 22:30 Eiszeiten (Günz)
 31.12. abends: Australopithecus (Homini)
 31.12. mittags: Sahelanthropus, Steinzeit (Pleistozän)

Weihnacht: Artensterben (Kreide)
 Mitte Dez.: Dinosauriere
 Anfang Dez.: Great Dying (Perm)
 Ende Nov.: Landpflanzen, -tiere
 Mitte Nov.: Ediacara Fauna
 Anfang Nov.: Ozonschicht gebildet
 Ende Okt.: Snowball Earth
 Ende Sept.: Stromatolithen
 Anfang Aug.: Eukaryoten
 Ende Juli: Gabonionten
 Ende Feb.: Prokaryonten
 Mitte Feb.: ältestes Gestein - Wasser
 Anfang Jan.: Mond - Magmaozean



INTERNATIONAL STRATIGRAPHIC CHART

International Commission on Stratigraphy



Eonothem Eon	Era Eratheum	System Period	Series Epoch	Stage Age	Age Ma	GSSP		
Phanerozoic	Cenozoic	Quaternary *	Holocene		0.0117	↗		
			Pleistocene	Upper	"Ionian"	0.126		
				Calabrian	0.781			
			Pliocene	Gelasian	1.806			
				Piacenzian	2.588			
			Neogene	Miocene	Zanclean	3.600		
		Messinian			5.332			
		Tortonian			7.246			
		Serravallian			11.608			
		Oligocene		Langhian	13.82			
				Burdigalian	15.97			
				Aquitanian	20.43			
				Chattian	23.03			
		Paleogene	Eocene	Rupelian	28.4 ± 0.1			
	Priabonian			33.9 ± 0.1				
	Bartonian			37.2 ± 0.1				
	Lutetian			40.4 ± 0.2				
	Ypresian			48.6 ± 0.2				
	Thanetian			55.8 ± 0.2				
	Paleocene		Selandian	58.7 ± 0.2				
			Danian	~ 61.1				
			Maastrichtian	65.5 ± 0.3				
	Mesozoic		Cretaceous	Upper	Campanian	70.6 ± 0.6		
					Santonian	83.5 ± 0.7		
					Coniacian	85.8 ± 0.7		
				Lower	Turonian	~ 88.6		
					Cenomanian	93.6 ± 0.8		
					Albian	99.6 ± 0.9		
					Aptian	112.0 ± 1.0		
					Barremian	125.0 ± 1.0		
					Hauterivian	130.0 ± 1.5		
			Permian	Carboniferous	Pennsylvanian	Upper	Kasimovian	307.2 ± 1.0
		Middle				Moscovian	311.7 ± 1.1	
		Lower			Bashkirian	318.1 ± 1.3		
		Mississippian		Upper	Serpukhovian	328.3 ± 1.6		
					Visean	345.3 ± 2.1		
				Lower	Tournaisian	359.2 ± 2.5		
					Artinskian	275.6 ± 0.7		
					Roadian	270.6 ± 0.7		
					Wordian	268.0 ± 0.7		
	Triassic	Lopingian	Changhsingian	251.0 ± 0.4				
			Wuchiapingian	253.8 ± 0.7				
			Capitanian	260.4 ± 0.7				
		Guadalupian	Wordian	268.0 ± 0.7				
			Roadian	270.6 ± 0.7				
		Cisuralian	Kungurian	275.6 ± 0.7				
			Artinskian	284.4 ± 0.7				
Sakmarian			294.6 ± 0.8					
Asselian			299.0 ± 0.8					
Gzhelian			303.4 ± 0.9					
Jurassic	Upper	Rhaetian	251.0 ± 0.4					
		Norian	216.5 ± 2.0					
		Carnian	~ 228.7					
	Middle	Ladinian	237.0 ± 2.0					
		Anisian	~ 245.9					
	Lower	Olenekian	~ 249.5					
		Induan	251.0 ± 0.4					
		Hettangian	251.0 ± 0.4					
		Sinemurian	189.6 ± 1.5					
		Pliensbachian	183.0 ± 1.5					
		Toarcian	175.6 ± 2.0					
Devonian	Upper	Famennian	359.2 ± 2.5					
		Frasnian	374.5 ± 2.6					
		Givetian	385.3 ± 2.6					
	Middle	Eifelian	391.8 ± 2.7					
		Emsian	397.5 ± 2.7					
	Lower	Pragian	407.0 ± 2.8					
		Lochkovian	411.2 ± 2.8					
		Ludfordian	416.0 ± 2.8					
		Gorstian	418.7 ± 2.7					
		Homerian	422.9 ± 2.5					
		Sheinwoodian	426.2 ± 2.4					
		Telychian	428.2 ± 2.3					
Silurian	Llandovery	436.0 ± 1.9						
	Rhuddanian	439.0 ± 1.8						
	Hirnantian	443.7 ± 1.5						
	Katian	445.6 ± 1.6						
	Sandbian	455.8 ± 1.6						
Ordovician	Upper	Darriwilian	460.9 ± 1.6					
		Dapingian	468.1 ± 1.6					
	Lower	Floian	471.8 ± 1.6					
		Tremadocian	478.6 ± 1.7					
Cambrian	Furongian	Stage 10	~ 492 *					
	Paibian	Stage 9	~ 496 *					
	Guzhangian	Stage 8	~ 499					
Paleozoic	Series 3	Drumian	~ 503					
		Terreneuvian	~ 506.5					
	Series 2	Stage 4	~ 510 *					
		Stage 3	~ 515 *					
	Stage 2	Stage 2	~ 521 *					
		Fortunian	~ 528 *					
Proterozoic	Archean	Eoarchean	Hadean (informal)	~ 4600				
			Statherian	1800				
			Orosirian	2050				
		Mesoarchean	Rhyacian	2300				
			Siderian	2500				
	Proterozoic	Neo-proterozoic	Cryogenian	~ 635				
			Tonian	850				
		Meso-proterozoic	Stenian	1000				
			Ectasian	1200				
			Calymnian	1400				
Precambrian	Hadean (informal)			542				

Chronostratigrafie
 Ära
 Periode
 Epoche
 Alter
 Lithostratigrafie
 Ärathem
 System
 Serie
 Stufe

Subdivisions of the global geologic record are formally defined by their lower boundary. Each unit of the Phanerozoic (~542 Ma to Present) and the base of Ediacaran are defined by a basal Global Standard Section and Point (GSSP ↗), whereas Precambrian units are formally subdivided by absolute age (Global Standard Stratigraphic Age, GSSA). Details of each GSSP are posted on the ICS website (www.stratigraphy.org).

Numerical ages of the unit boundaries in the Phanerozoic are subject to revision. Some stages within the Cambrian will be formally named upon international agreement on their GSSP limits. Most sub-Series boundaries (e.g., Middle and Upper Aptian) are not formally defined.

Colors are according to the Commission for the Geological Map of the World (www.cgmw.org).

The listed numerical ages are from 'A Geologic Time Scale 2004', by F.M. Gradstein, J.G. Ogg, A.G. Smith, et al. (2004; Cambridge University Press) and 'The Concise Geologic Time Scale' by J.G. Ogg, G. Ogg and F.M. Gradstein (2008).

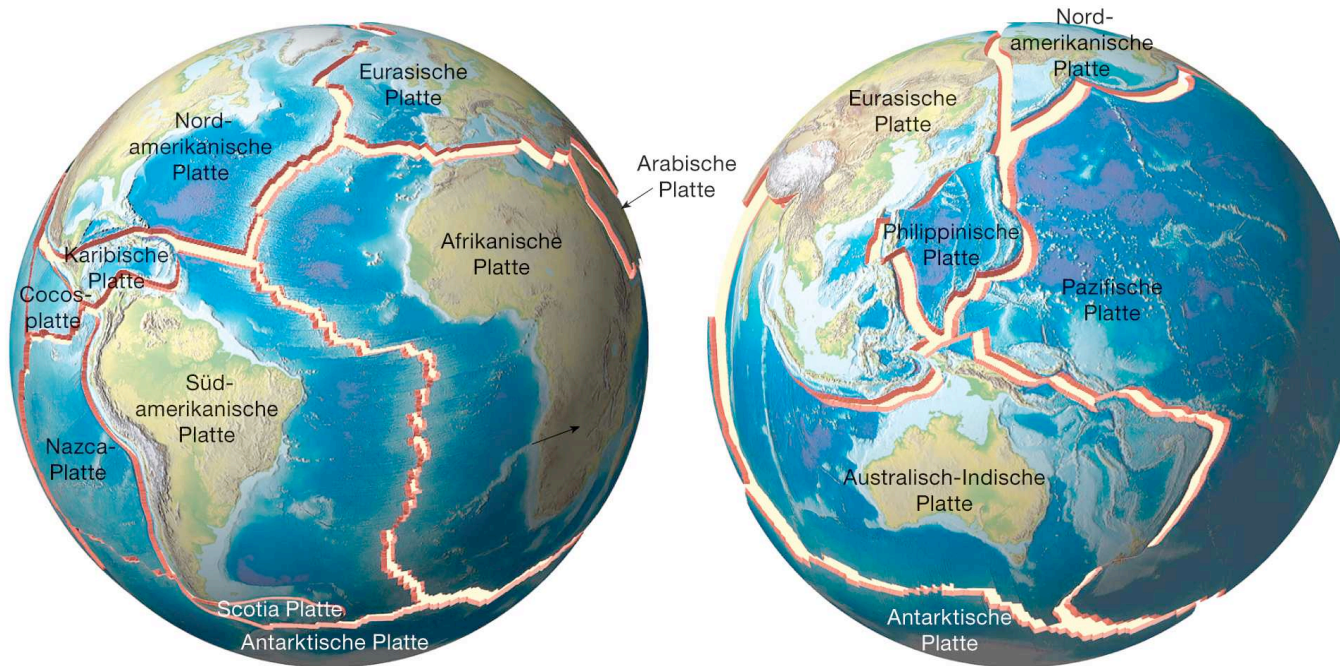
* Definition of the Quaternary and revision of the Pleistocene are under discussion. Base of the Pleistocene is at 1.81 Ma (base of Calabrian), but may be extended to 2.59 Ma (base of Gelasian). The historic "Tertiary" comprises the Paleogene and Neogene, and has no official rank.

Beispiel:

Tithon (Alter) = Oberjura (Epoche) = Jura (Periode) = Mesozoikum (Ära)

Plattentektonik

pro memoria: Theorie der Plattentektonik

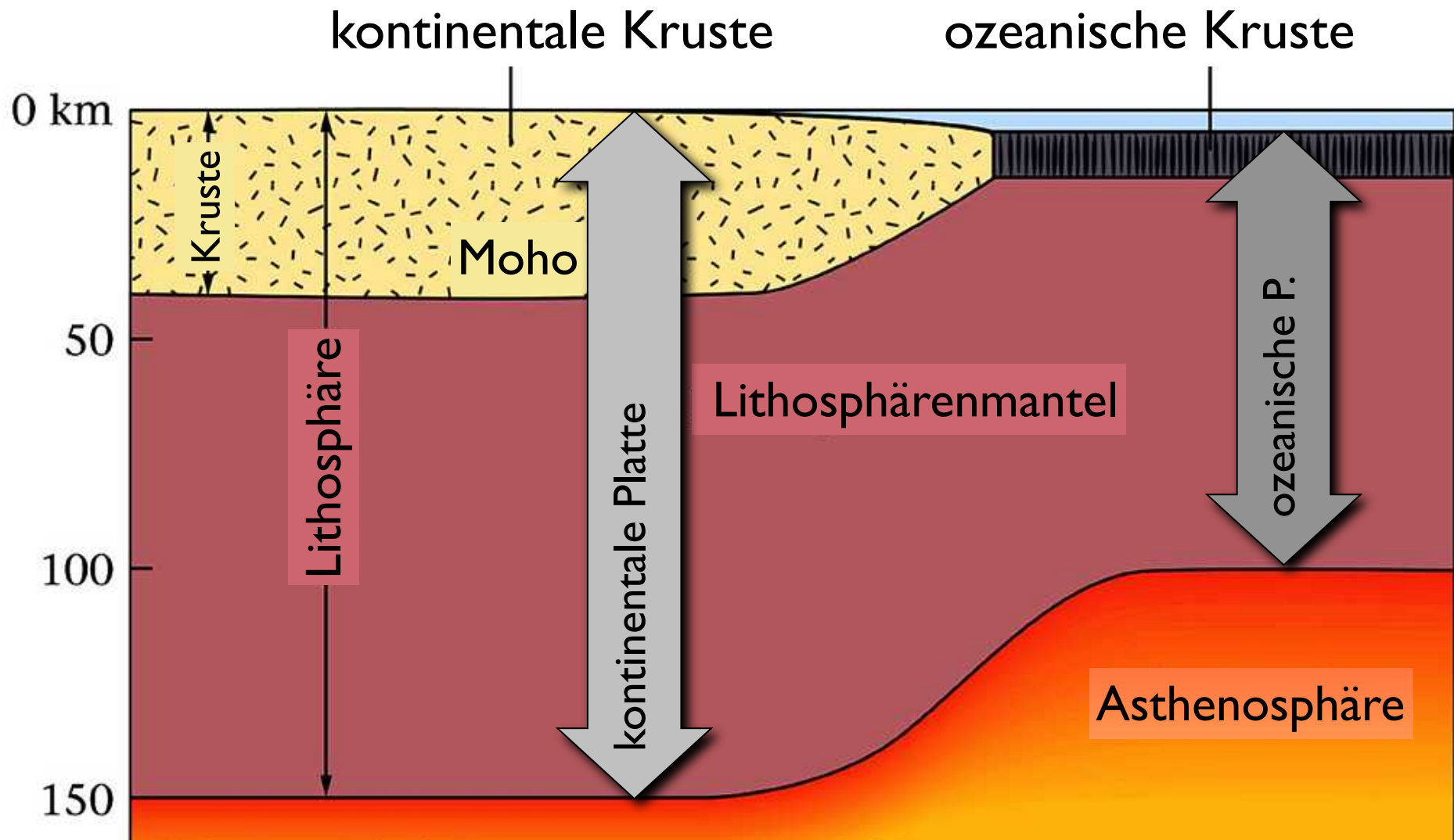


- Die Erdoberfläche ist in ca. 20 tektonische Platten unterteilt.
- Die Platten sind Lithosphärenplatten und bewegen sich \pm steif (ohne sich innerlich zu verformen) über die fließfähige Asthenosphäre hinweg.
 1. An den mittelozeanischen Rücken (= konstruktive Plattengrenze) wird aufsteigendes Mantelmaterial an die auseinander driftenden Platten angefügt (Seafloor Spreading)
 2. An den Subduktionszonen (= destruktive Plattengrenze) wird die Lithosphäre wieder in den Erdmantel zurück versenkt.
 3. Transformbrüche (= konservative Plattengrenzen) verbinden die Plattengrenzen, sodass jede Platte kinematisch vollkommen von ihren Nachbarinnen entkoppelt ist.

7 grosse und 6 kleinere Lithosphärenplatten



kontinentale und ozeanische Platten(teile)

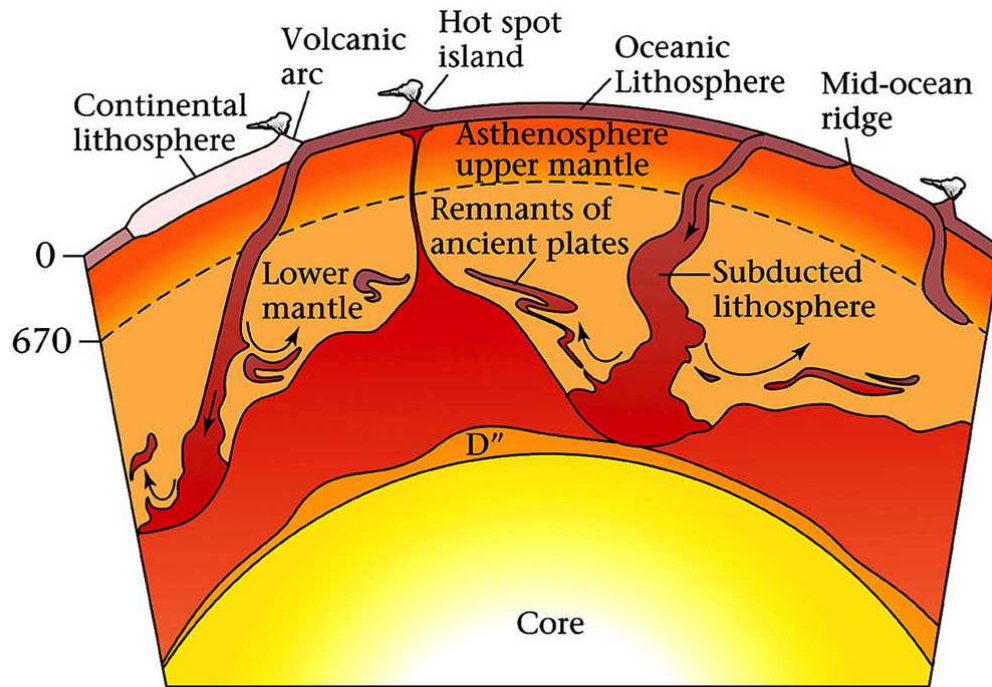
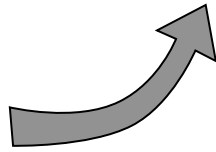


Platten sind Lithosphärenplatten:
bestehen aus Kruste und Mantel - haben Festigkeit

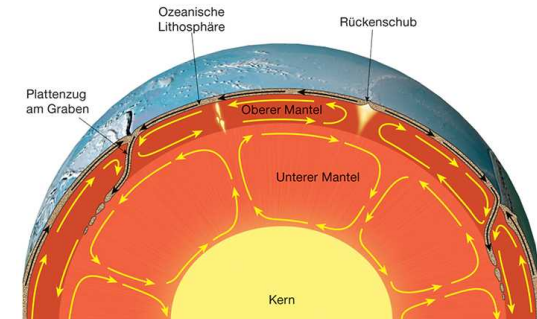
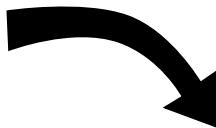
Konvektionsmodelle

Plattentektonischer Kreislauf

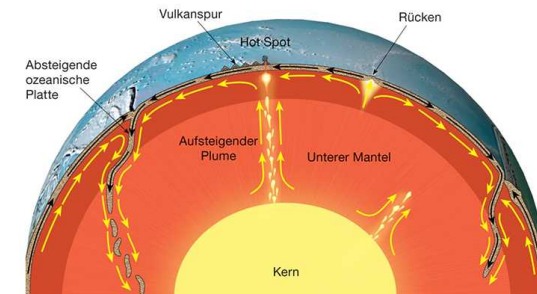
leichte
kontinentale
Kruste / Platte



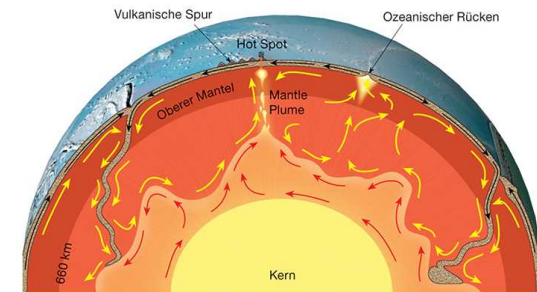
schwere
ozeanische
Kruste / Platte



Lagenbau in 660 km Tiefe

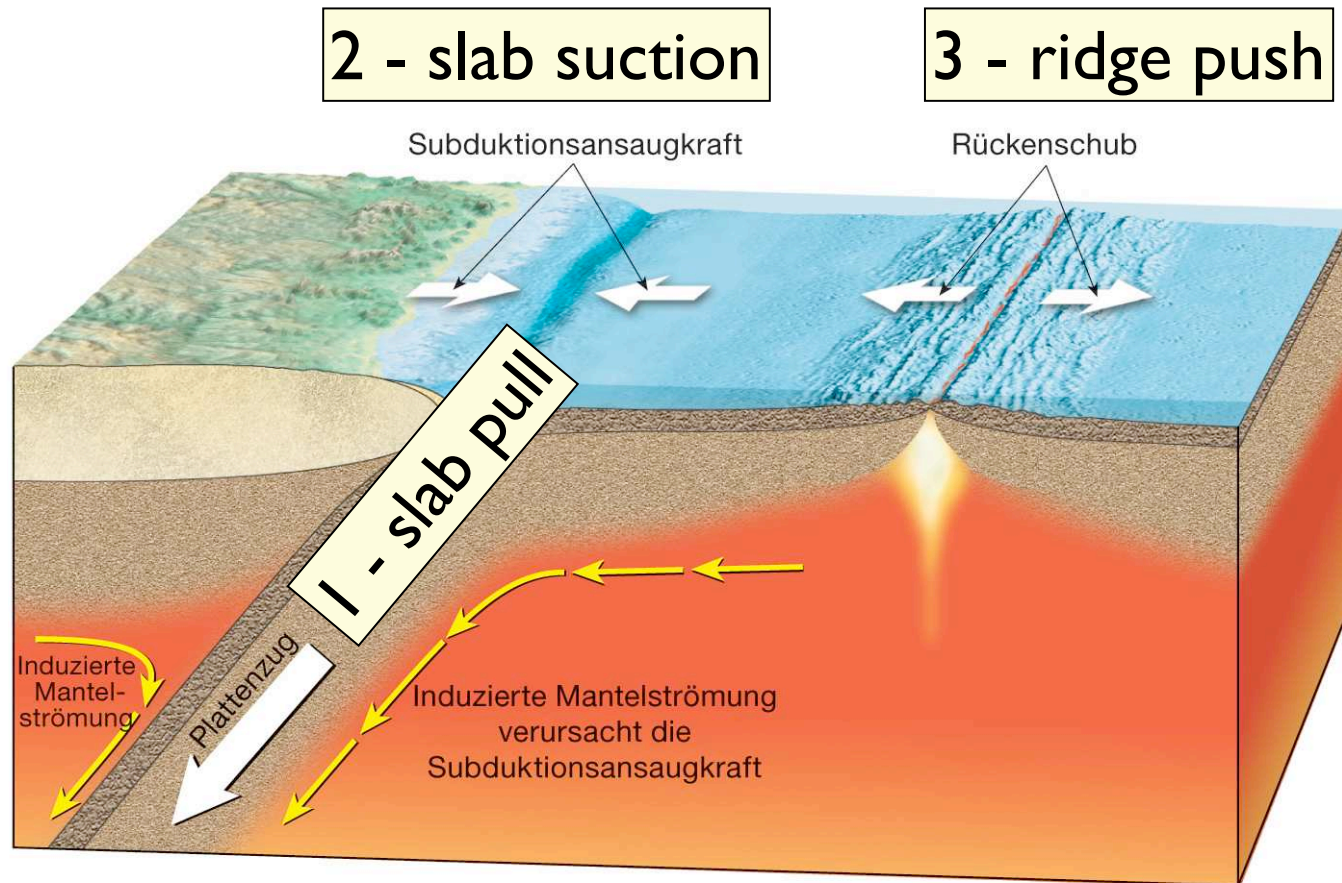


Konvektion im gesamten Mantel



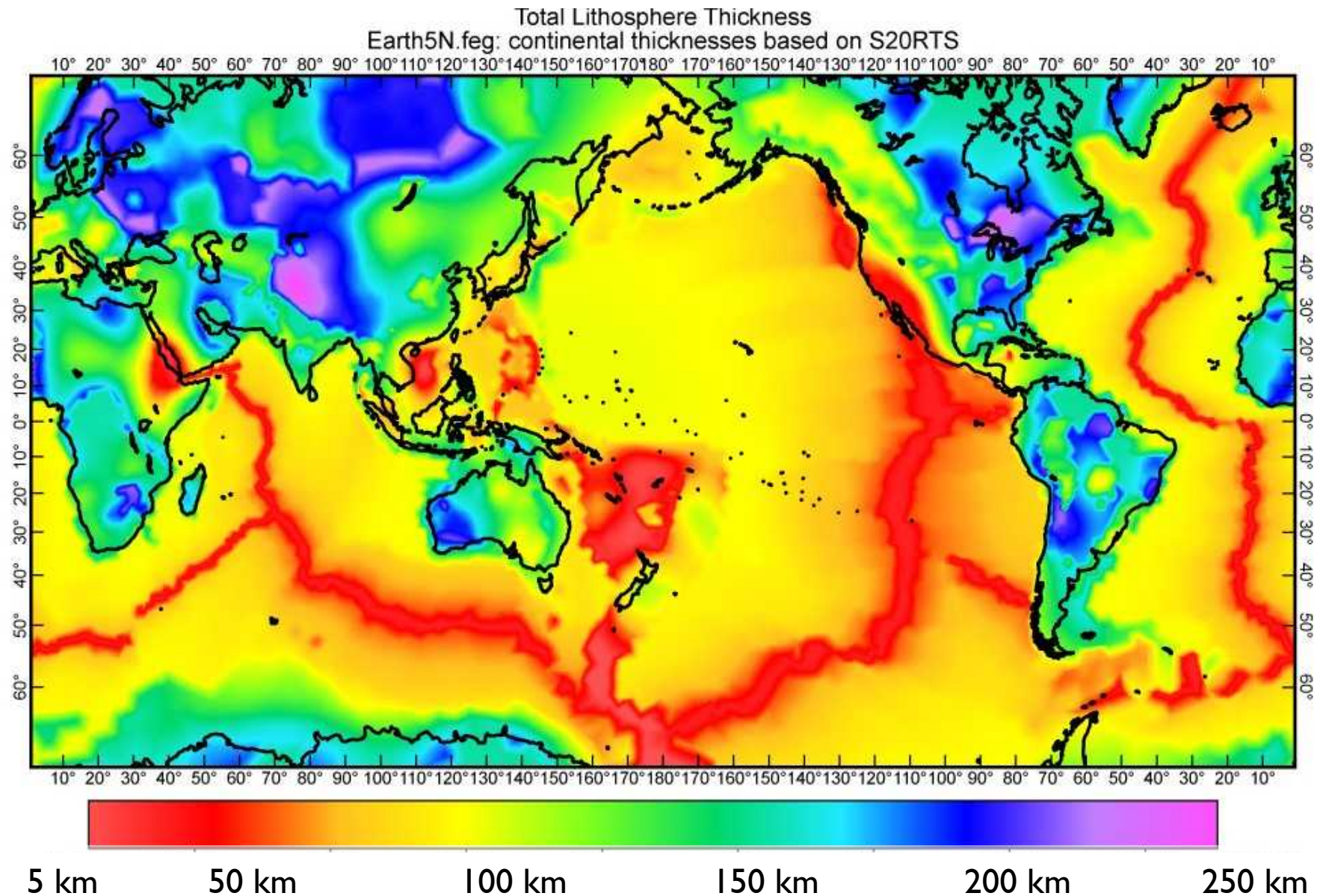
Lagenstruktur im tiefen Mantel

Kräfte an tektonischen Platten

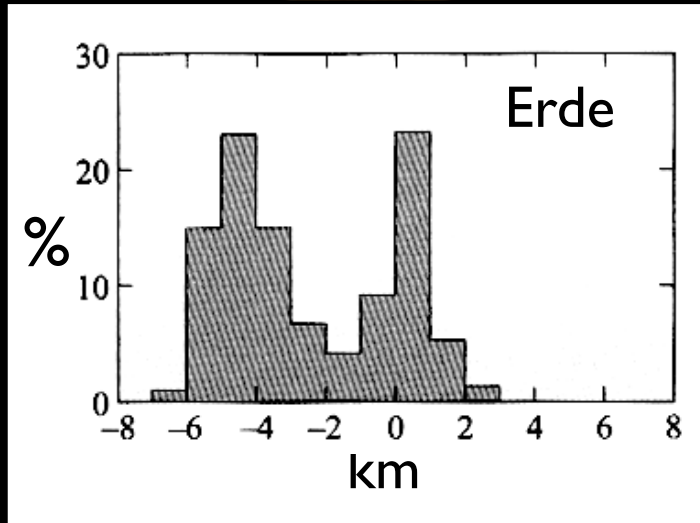


- | | |
|-----------------------|--|
| 1- Isostasie: | Kalte, schwere Platte sinkt in den Mantel |
| 2- Mantelzirkulation: | Scherkräfte wirken auf beide Platten |
| 3- Gravitation: | Platte gleitet vom topographisch höheren Ozeanrücken |

Dicke der Lithosphärenplatten



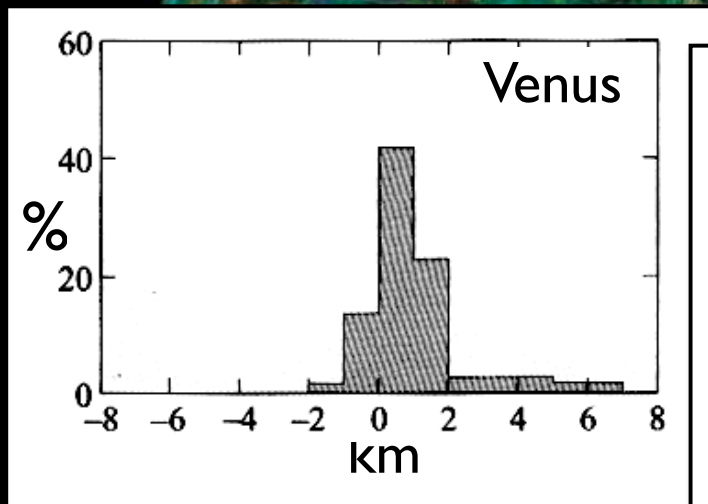
Vergleich: Mond - Erde - Planeten



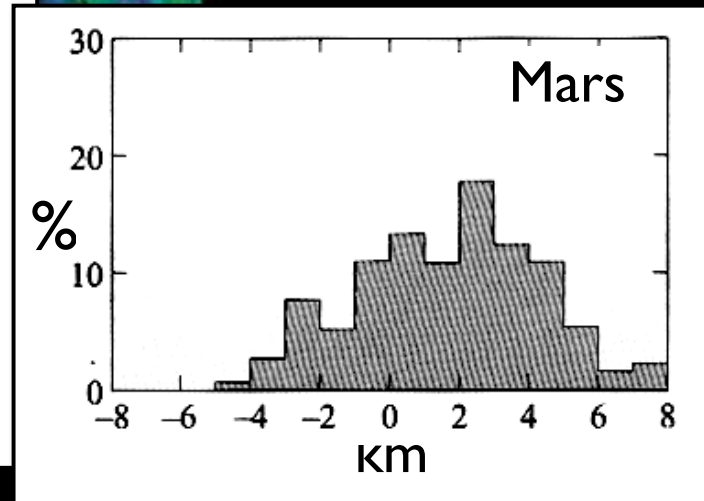
Mond
alte
Oberfl.



Erde (junge Oberfl.)

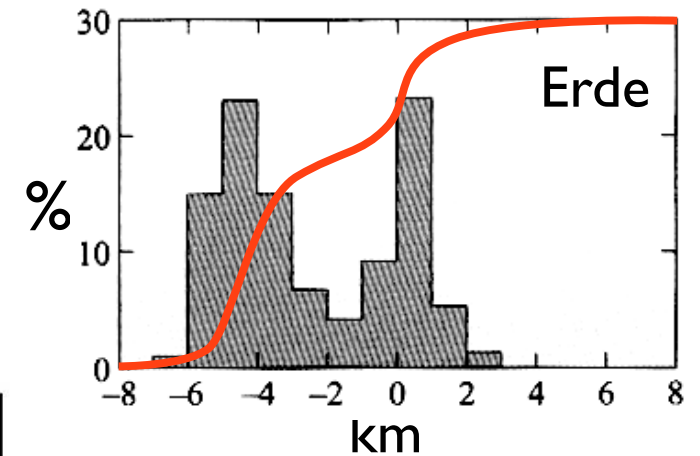
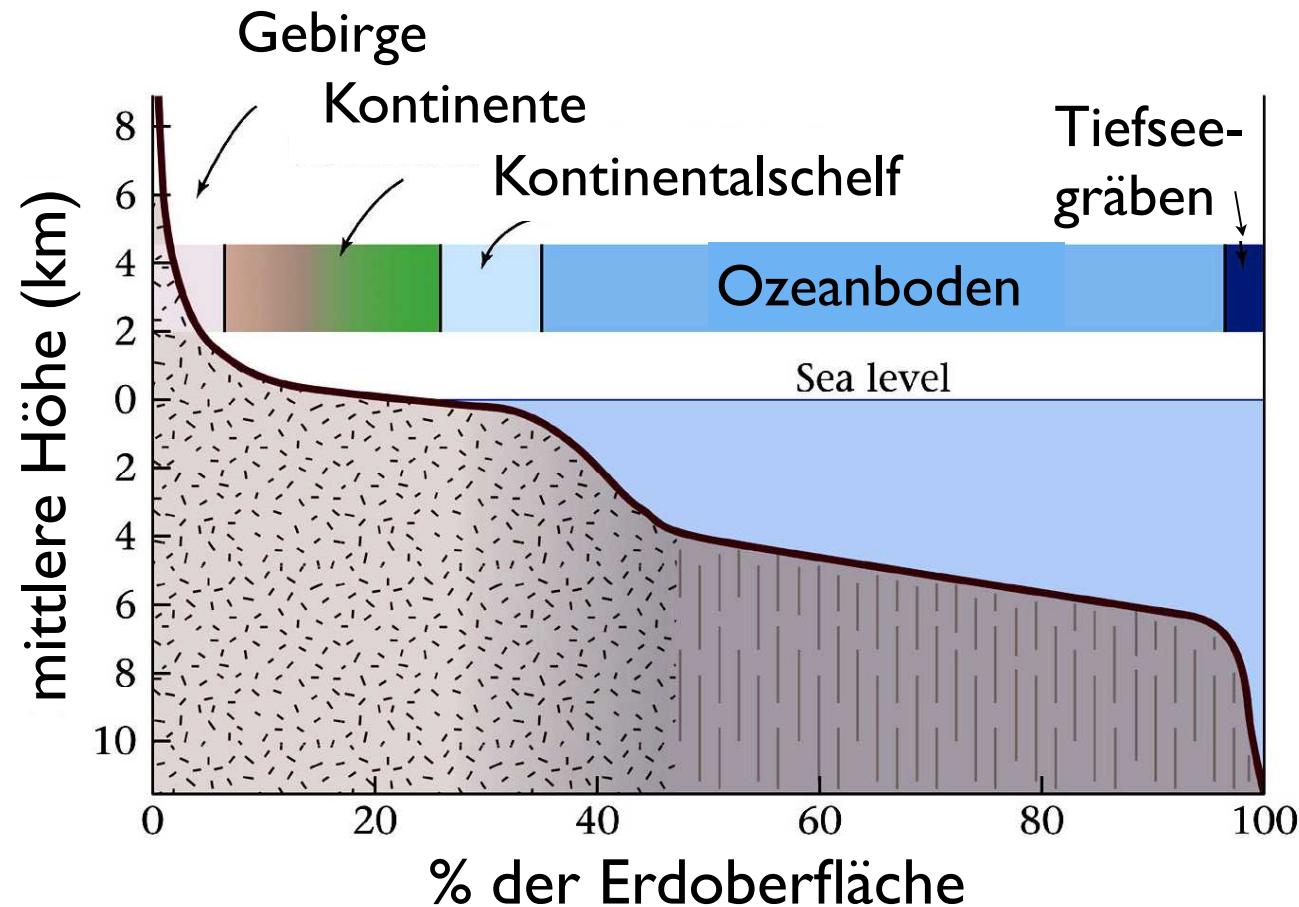


Venus



Mars

Hypsometrisches Histogramm



2 Typen von
Oberflächen:

- ozeanisch
- kontinental

→ dynamisches
Gleichgewicht

2 physikalischer Aufbau der Erde

Die Erde von aussen

- Plattentektonische Domänen des Ozeanbodens

Aufbau der Erde - Schalenbau der Erde

Physikalische Differenzierung des Erdinnern

- Lithosphäre
- Asthenosphäre
- Mesosphäre (unterer Mantel)
- Äusserer Kern
- Innerer Kern

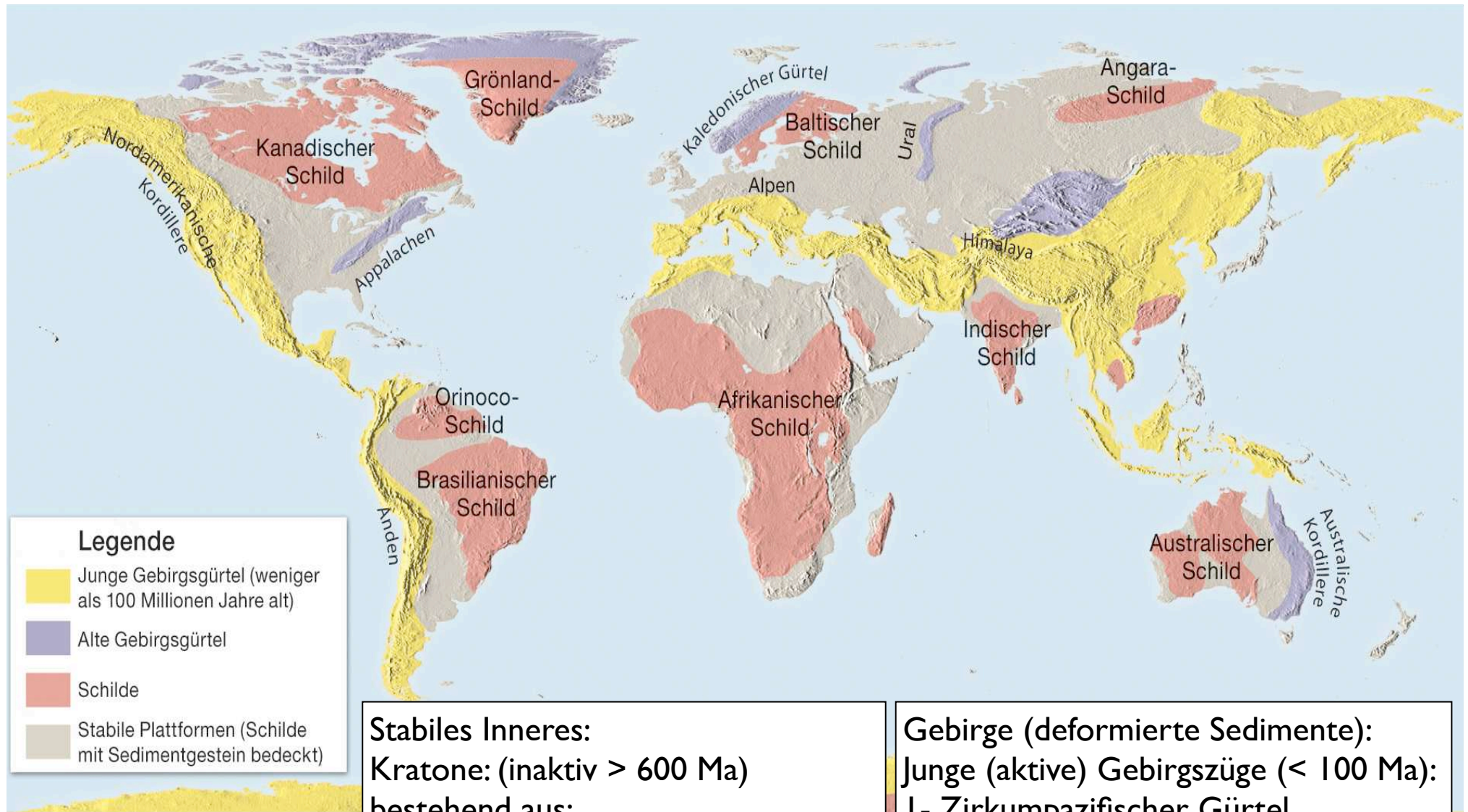
PREM (preliminary reference earth model)

Tektonische Platten

- Lithosphärenplatten

die Erde von aussen

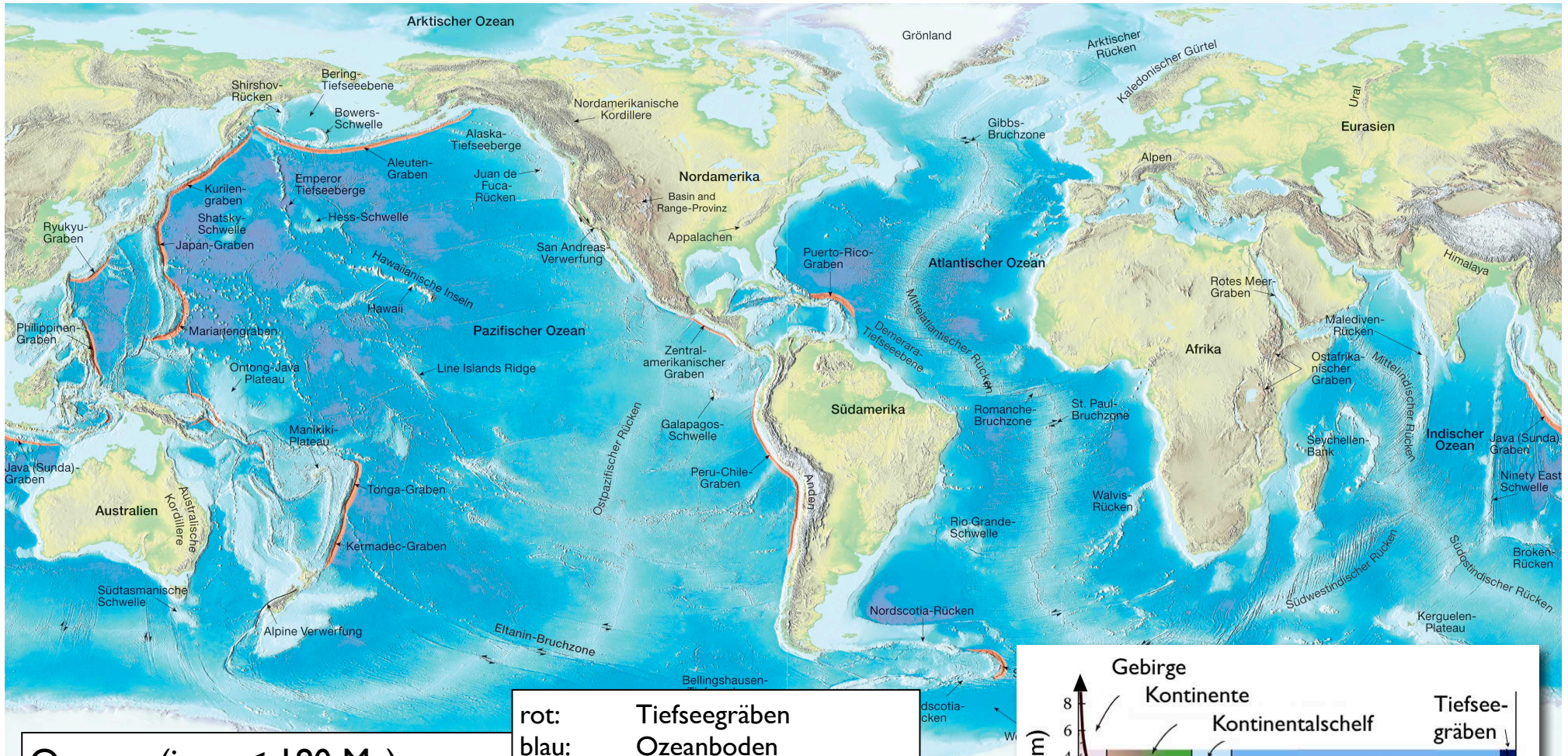
Kontinente: Gebirge und Kratone



Stabiles Inneres:
Kratone: (inaktiv > 600 Ma)
bestehend aus:
Schilden: Kristallin (bis zu > 4 Ga)
Plattformen: metamorphe Sedimente

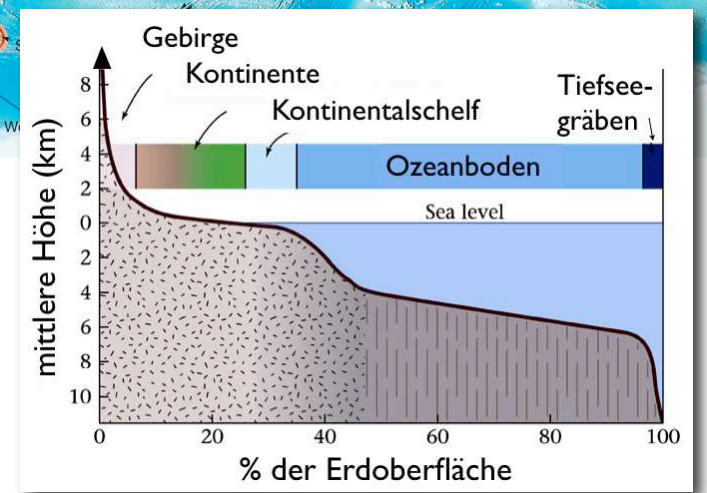
Gebirge (deformierte Sedimente):
Junge (aktive) Gebirgsgürtel (< 100 Ma):
1- Zirkumpazifischer Gürtel
2- Alpen-Himalaya
Ältere Gebirgsgürtel (> 450 Ma):
Appalachen, Kaledoniden, Ural

Ozeane: 2/3 der Erdoberfläche

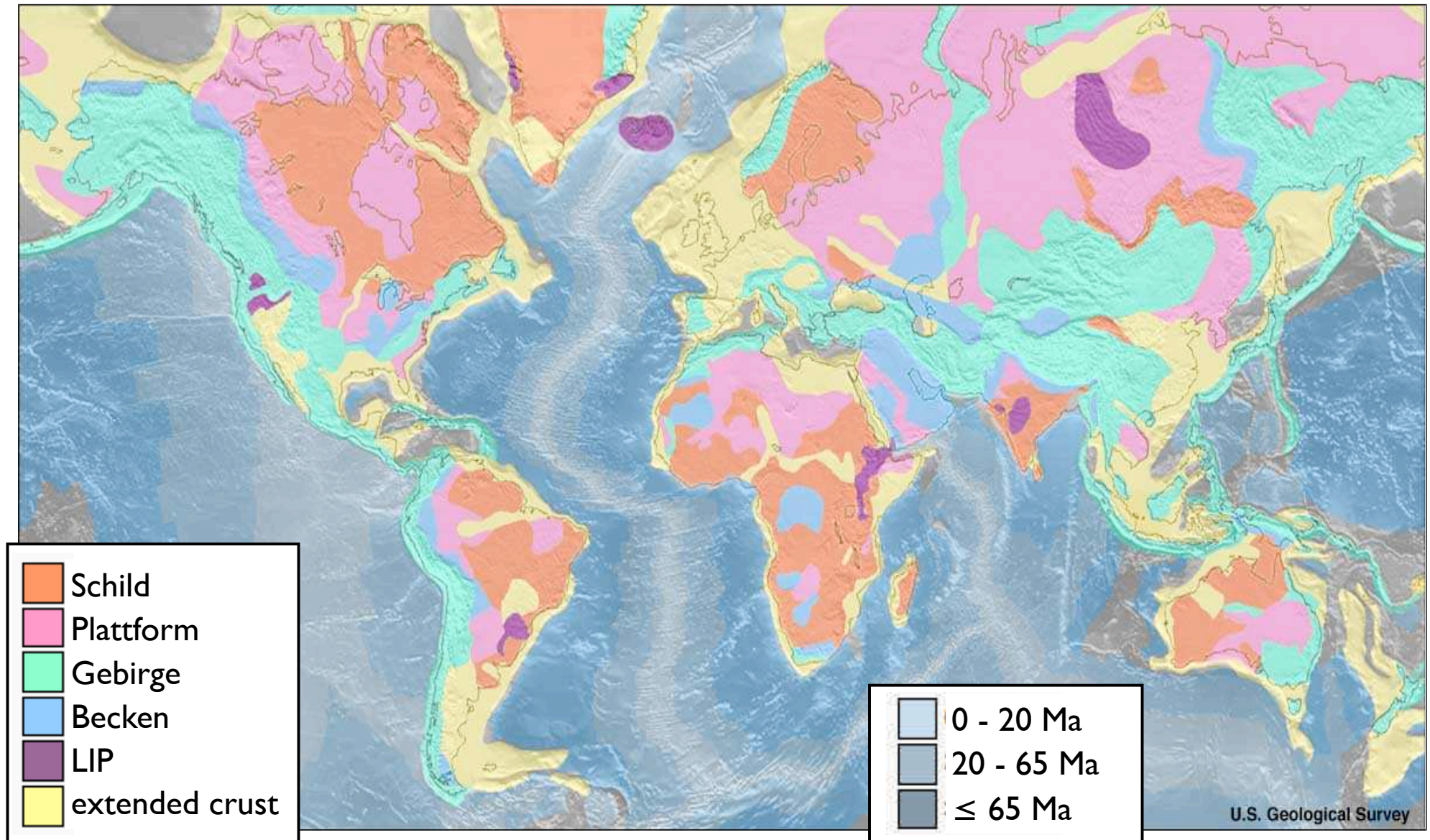


Ozeane: (jung, < 180 Ma)
 Kontinentalränder
 Tiefseebecken (Abyssalebene, Tiefseeberge)
 Tiefseegräben
 Ozeanische bzw. mittelozeanische Rücken
 Transform- Bruchzonen

rot: Tiefseegräben
 blau: Ozeanboden
 hellblau: mittelozeanische Rücken

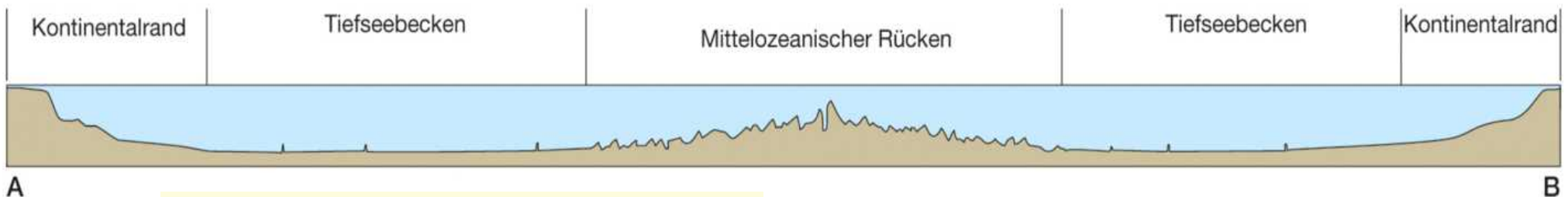
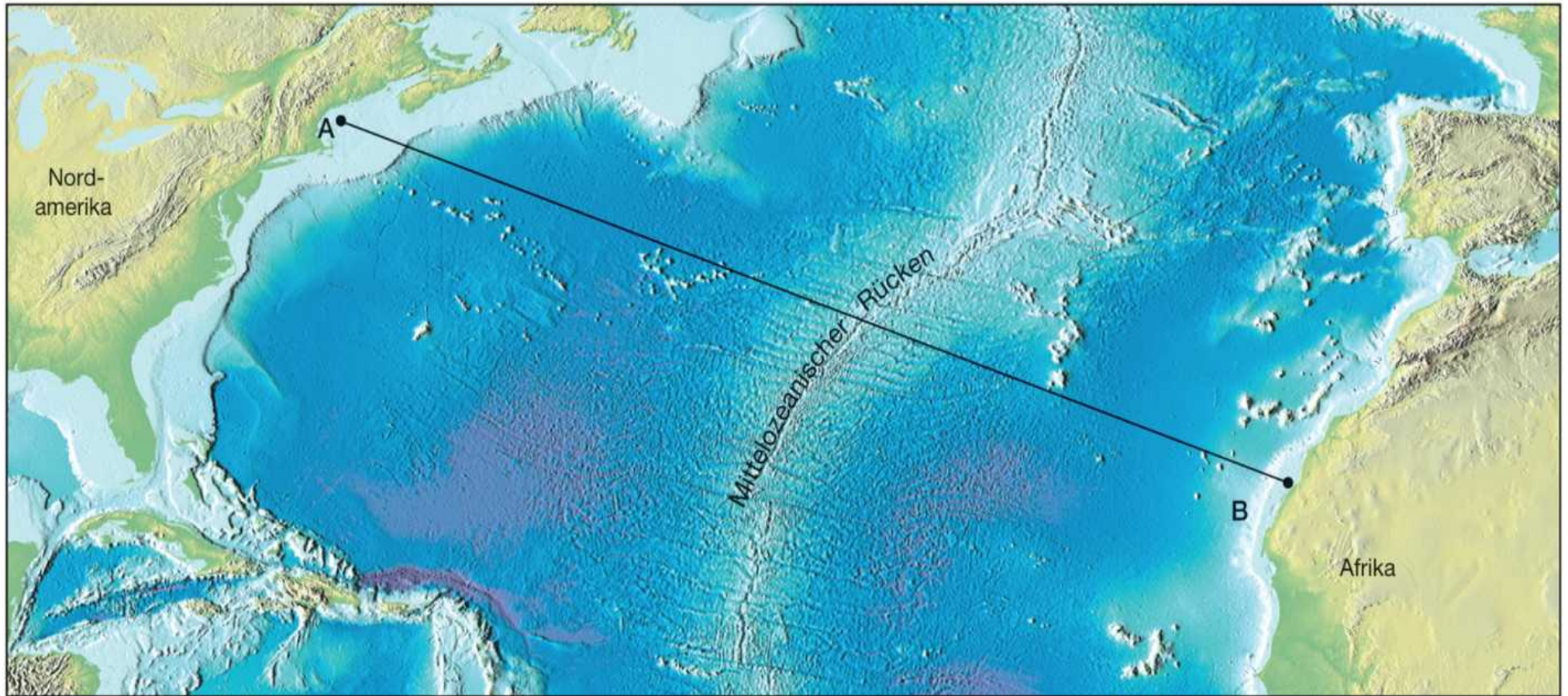


kontinentale und ozeanische Kruste



Plattentektonische Domänen des Ozeanbodens

Ozeanböden



Grenze Kontinent-Ozean \neq Küstenlinie

passiver Kontinentalrand

Kontinentalschelf

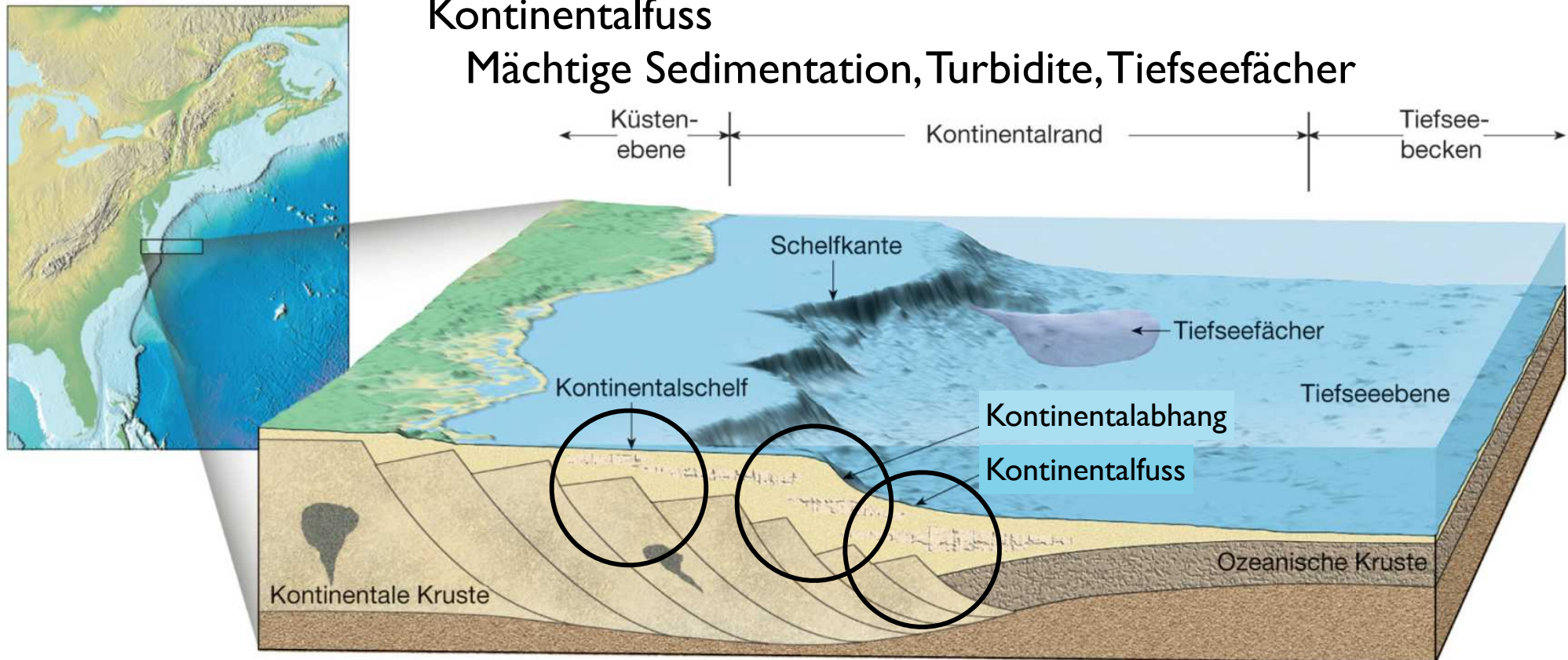
Langsame Absenkung, mächtige Ablagerung,
Mineral-, Erdöl-, Erdgas- Lagerstätten

Kontinentalabhang

Submarine Schluchten (Canyons), Erosion

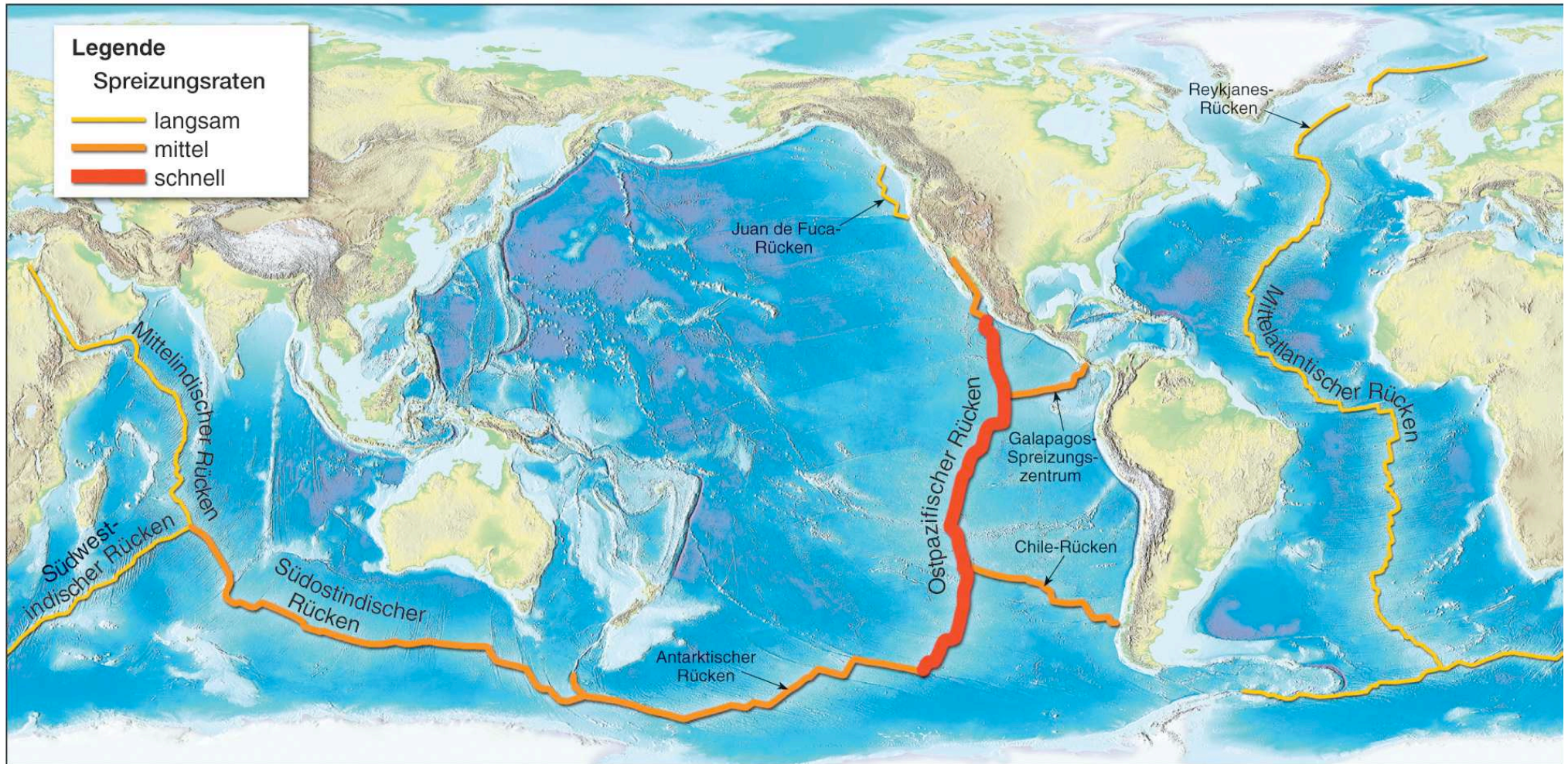
Kontinentalfuss

Mächtige Sedimentation, Turbidite, Tiefseefächer



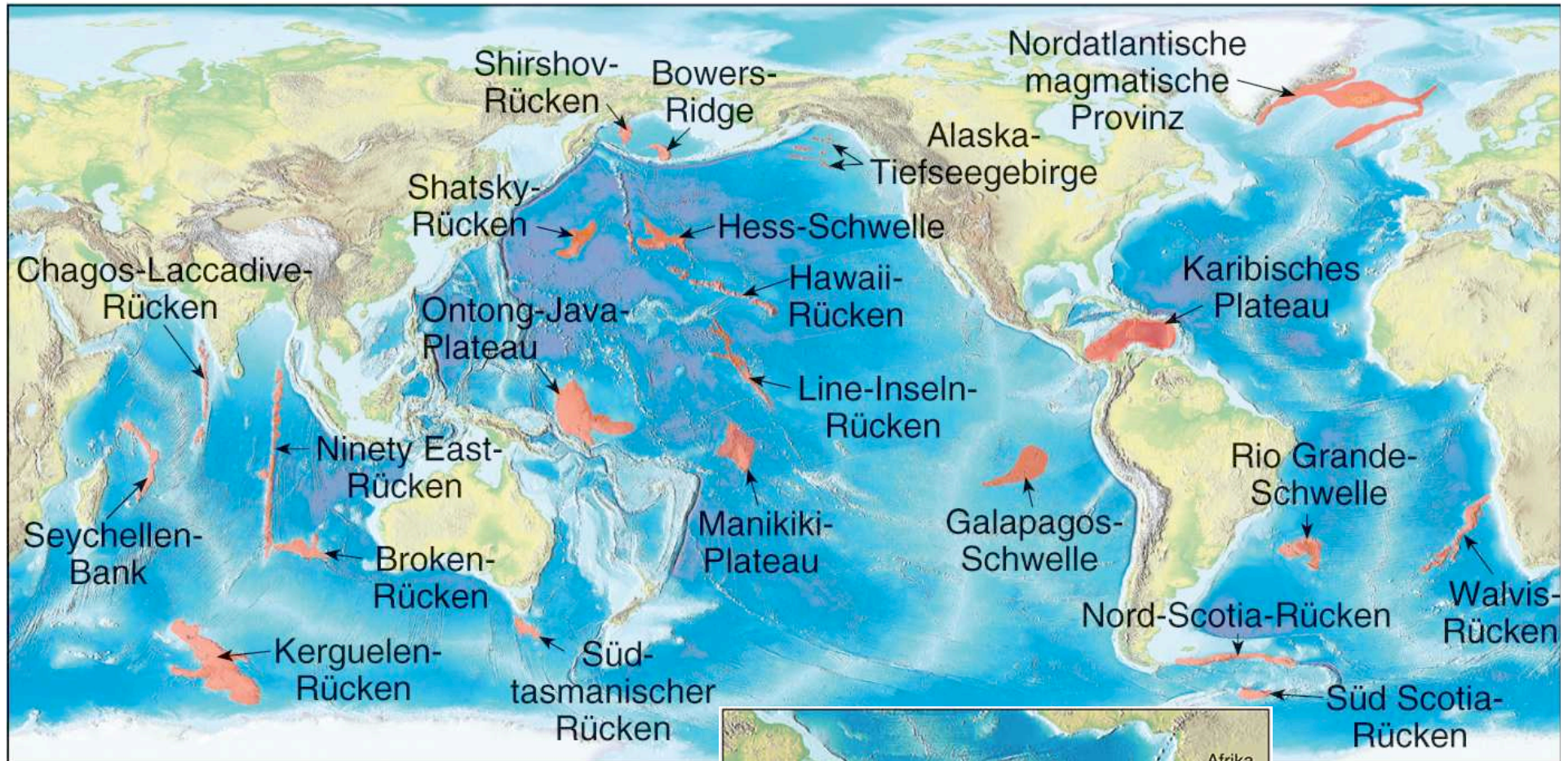
Ozeanrücken-System

Ozeanrücken = aktiver Plattenrand \neq aktiver Kontinentalrand



Gesamtlänge mittelozeanischer Rücken: 70'000 km

Plateaus und Hotspots

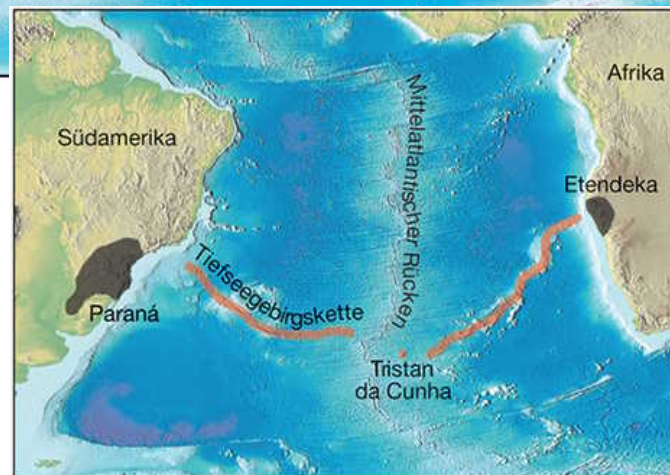


Ozeanplateaus (Submarine Vulkane)

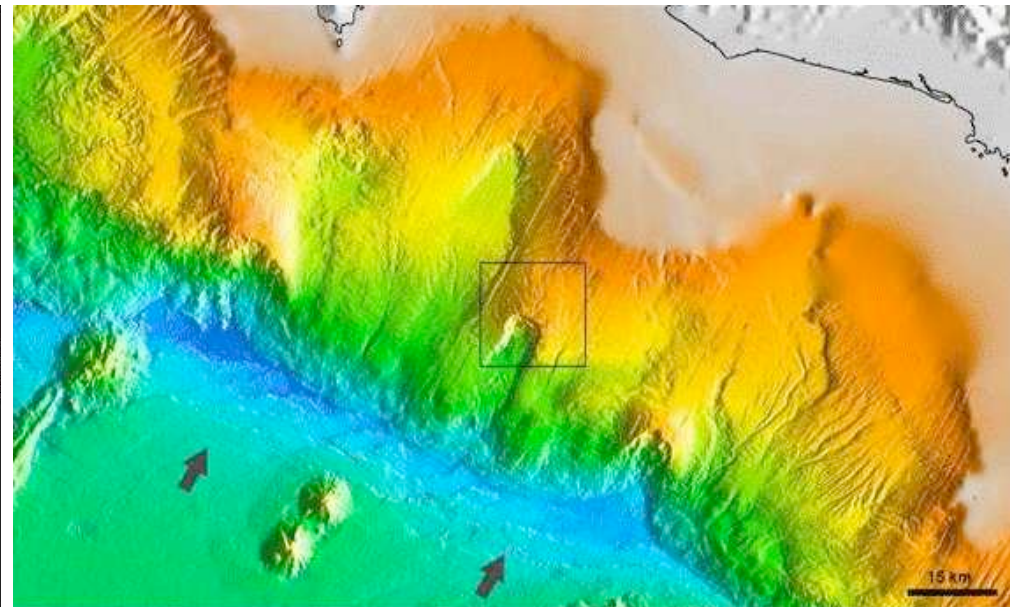
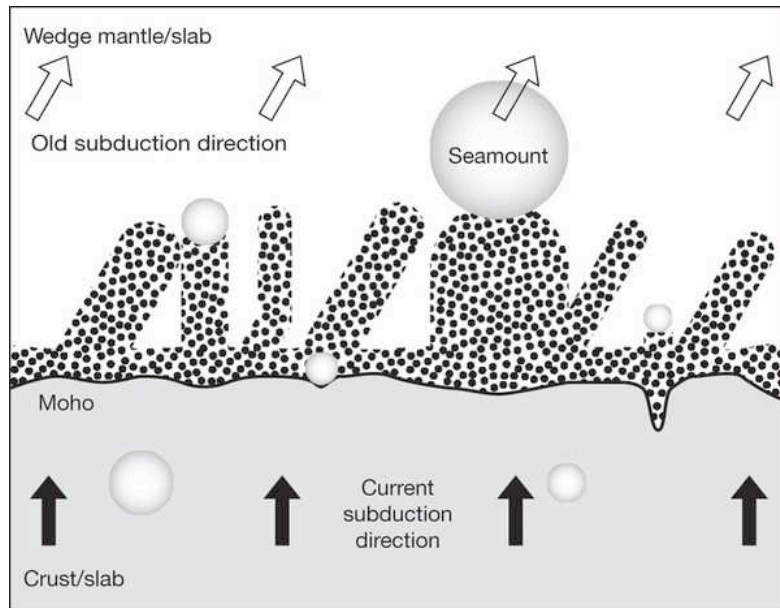
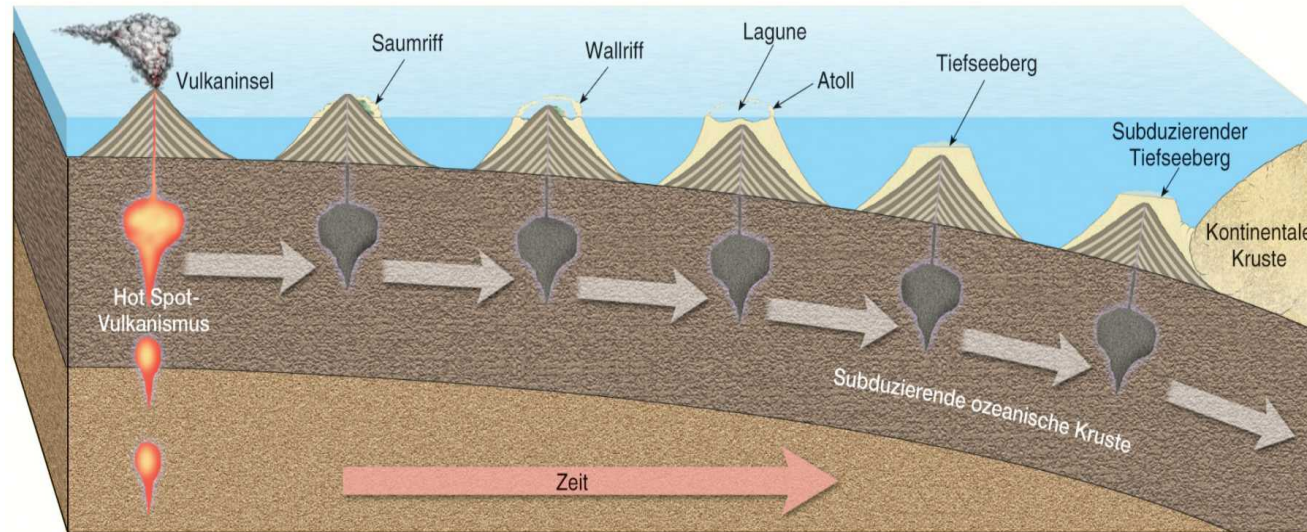
Hotpots

Tafelberge (Guyot)

Flutbasalte



Sea mounts (Tiefseeberge)

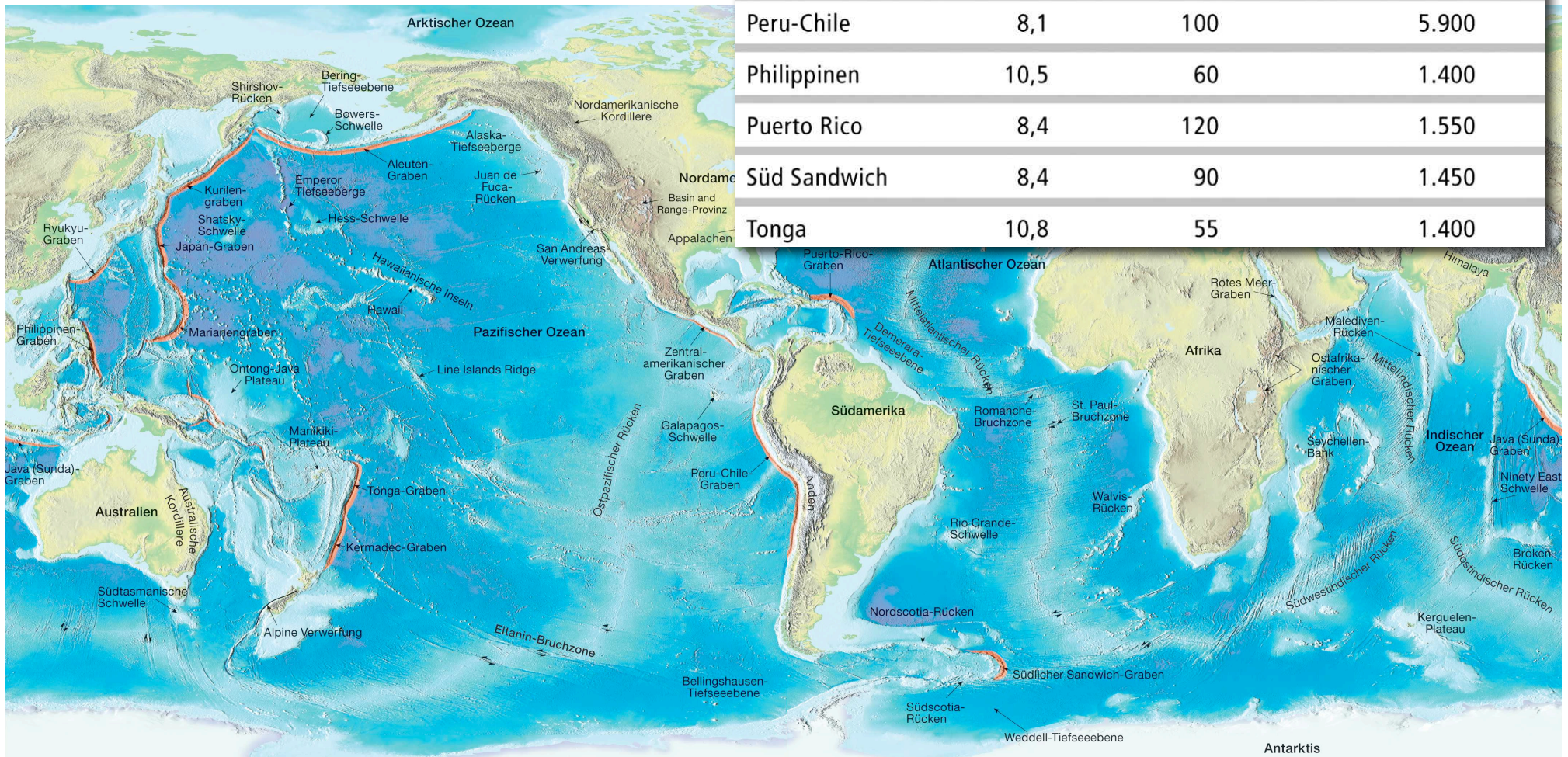


Tremor zones, Western Shikoku,
Nankai subduction zone, Japan

Tiefseegräben

= aktiver Plattenrand
 = aktiver Kontinentalrand

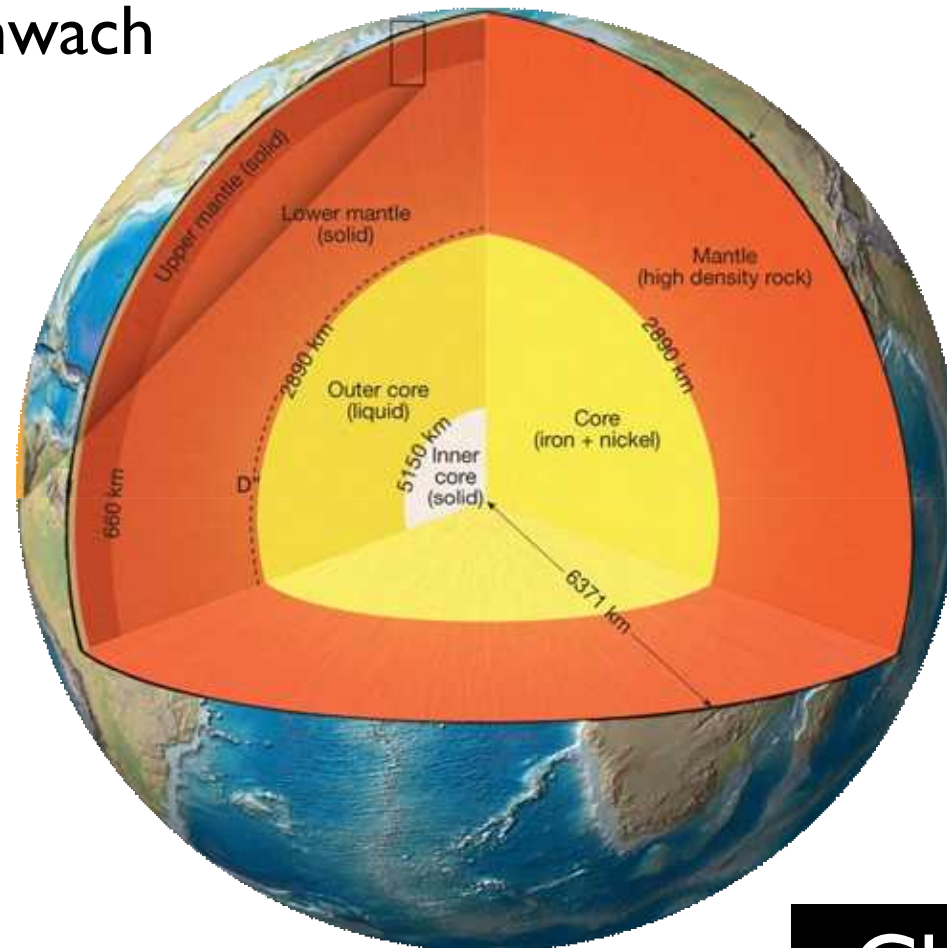
Graben	Tiefe (Kilometer)	Durchschnittliche Breite (Kilometer)	Länge (Kilometer)
Aleuten	7,7	50	3.700
Japan	8,4	100	800
Java	7,5	80	4.500
Kurile-Kamchatka	10,5	120	2.200
Marianen	11,0	70	2.550
Zentralamerika	6,7	40	2.800
Peru-Chile	8,1	100	5.900
Philippinen	10,5	60	1.400
Puerto Rico	8,4	120	1.550
Süd Sandwich	8,4	90	1.450
Tonga	10,8	55	1.400



die Erde von innen - Schalenbau

Schalenbau: 3D Tiefenstruktur

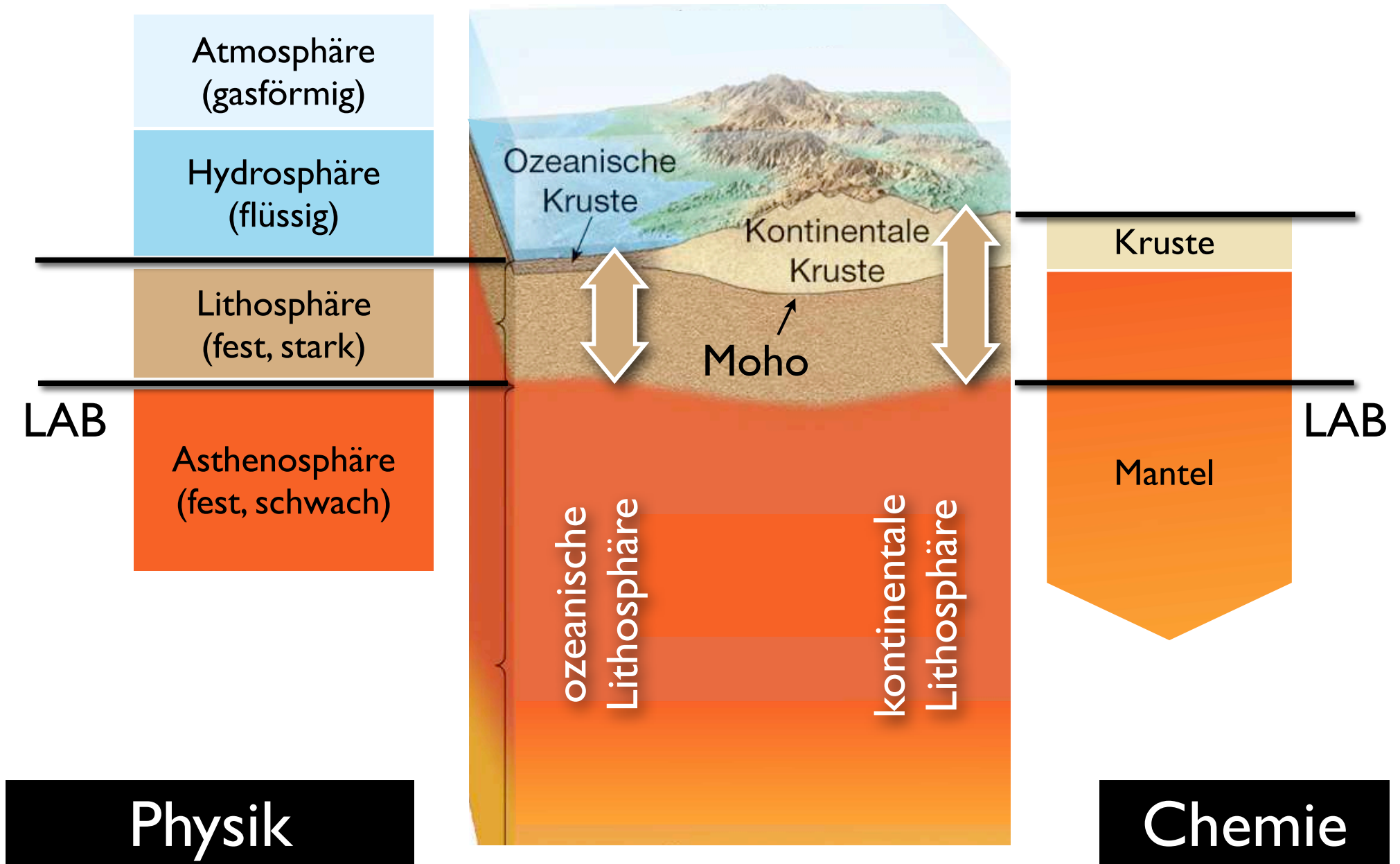
Lithosphäre	fest	stark		Kruste
Asthenosphäre	fest	schwach		
Unterer Mantel (Mesosphäre)	fest			Mantel
Äusserer Kern	flüssig			
Innerer Kern	fest			Kern



Physik

Chemie

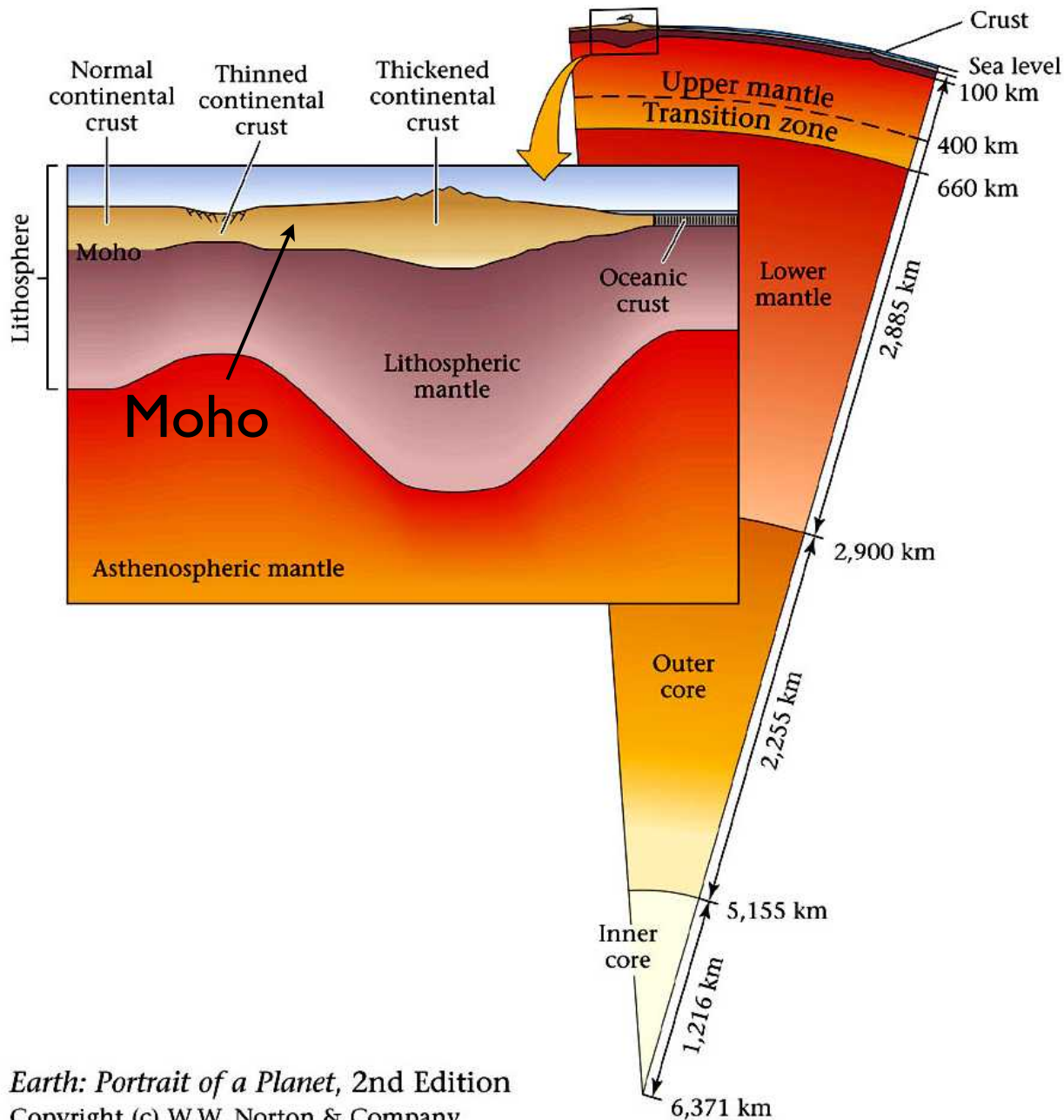
Schalenbau der Erde



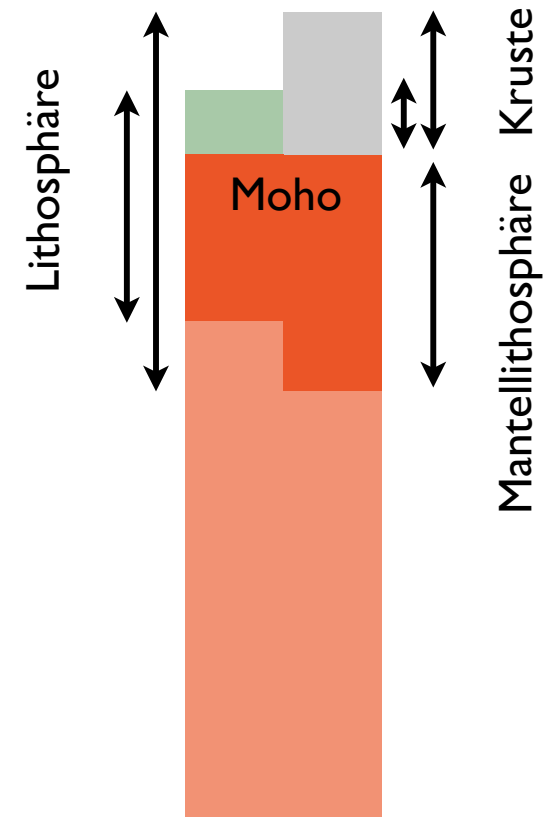
Schalenbau - Zusammensetzung

	Zusammen- setzung	Dicke	Dichte (kgm^{-3})	Alter
Kruste				
- kontinental	Granodiorit	35 - 40 km (up to 70 km)	2700	≤ 4 Ga
- ozeanisch	Basalt	~ 7 km	3000	≤ 180 Ma
Mantel	Peridotit (Fe-Mg-Silikat)	82 % (Erdvolumen)	3000-5000	\pm Erde (4.5 Ga)
Kern	Fe-Ni Legierung		11'000	\pm Erde (4.5 Ga)

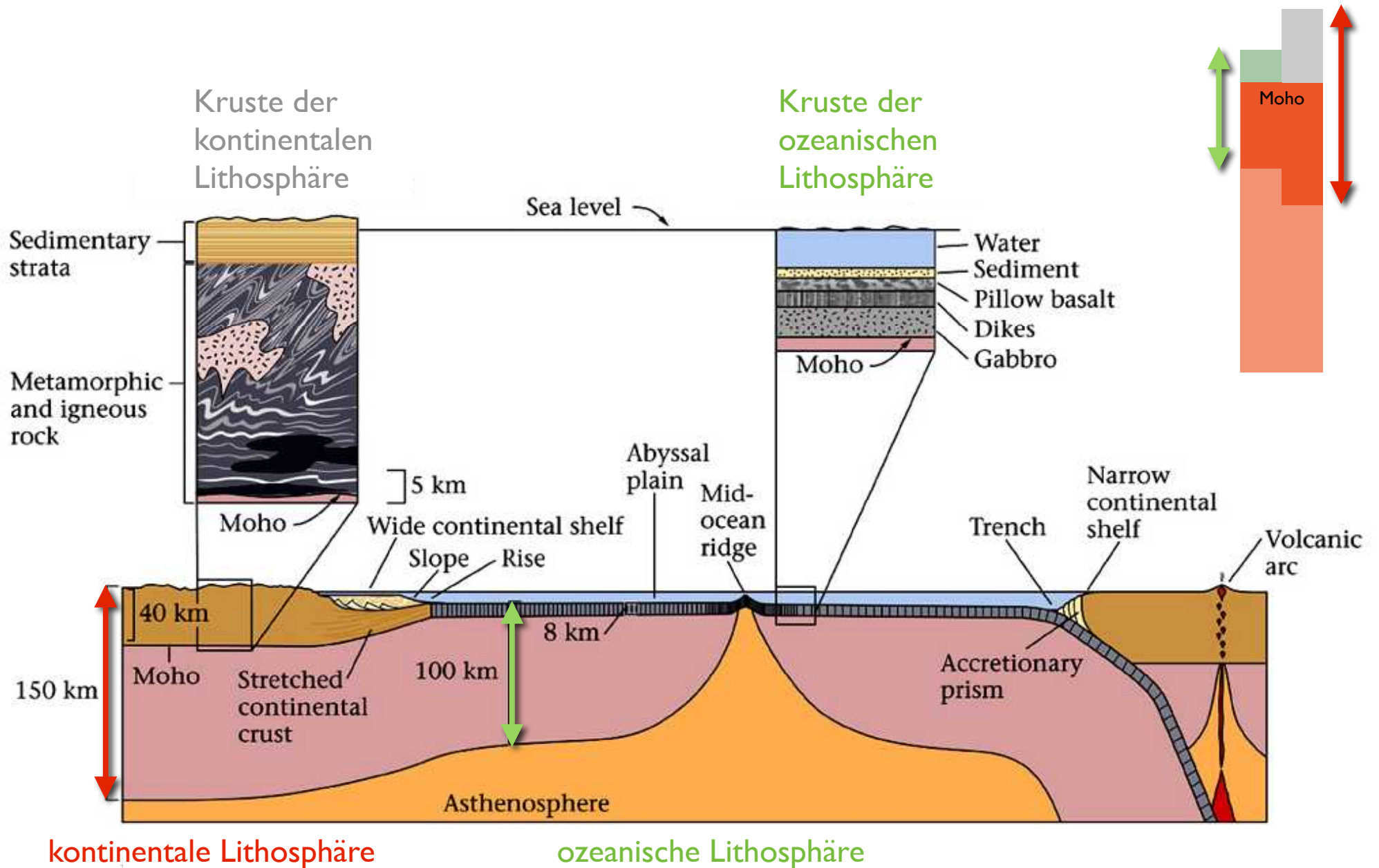
Ozeanische und kontinentale Platten



ozeanisch | kontinental

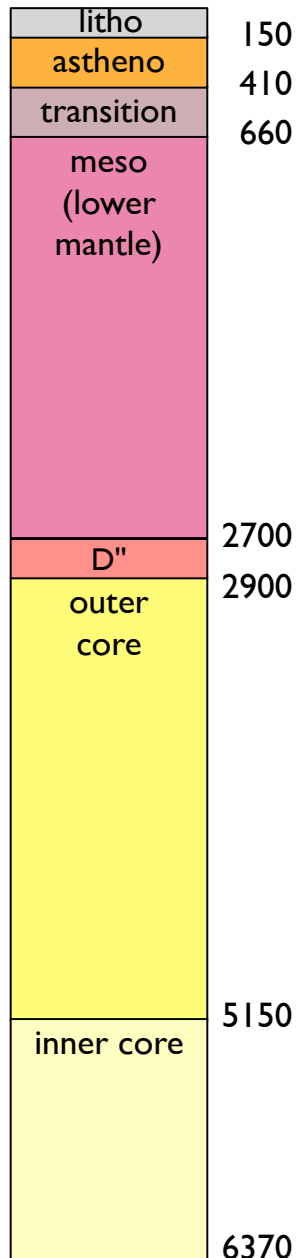


Plattenaufbau



Physikalische Differenzierung des Erdinnern

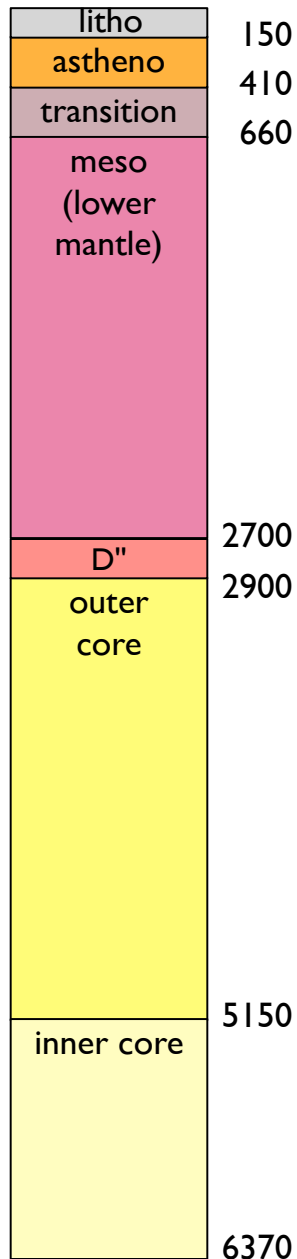
Schalenbau - Physikalische Eigenschaften



Lithosphäre

- Äusserste Schicht der Erde
- besteht aus Kruste und oberstem Mantel (Mantellithosphäre)
- Relativ kühl, daher fest, steif ($T \leq 1500 \text{ K}$)
- Durchschnittliche Dicke $\sim 100 \text{ km}$, bis 250 km (unterhalb alter Kontinent-Anteile)

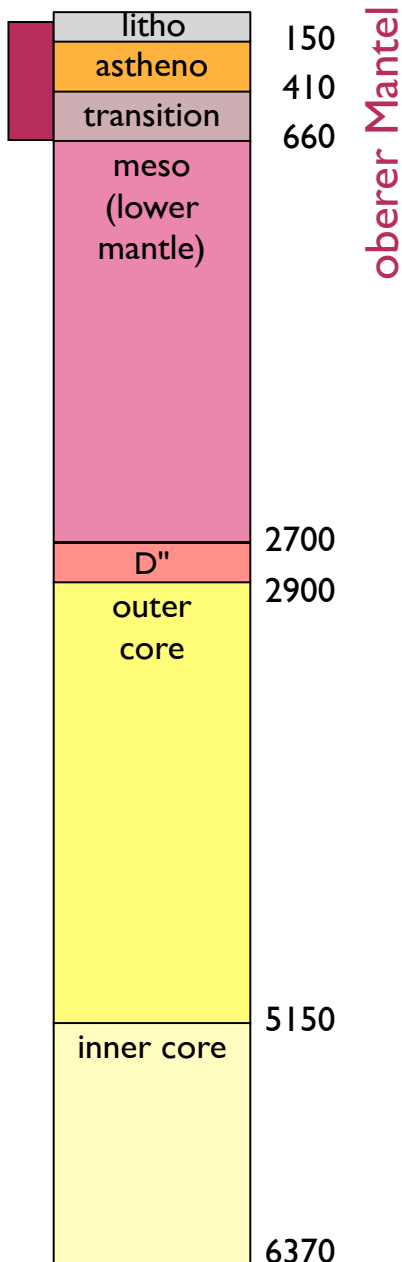
Schalenbau - Physikalische Eigenschaften



Asthenosphäre

- Unterhalb Lithosphäre, bis zu einer Tiefe von ca. 660 km (schliesst eine Übergangszone ein)
- Relativ leicht fließfähig, schwach
- Geringe Schmelzanteile trennen die Asthenosphäre mechanisch vom darunter liegenden festen Mantel
- Dadurch kann die darüberliegende Lithosphäre über den Mantel bewegt werden

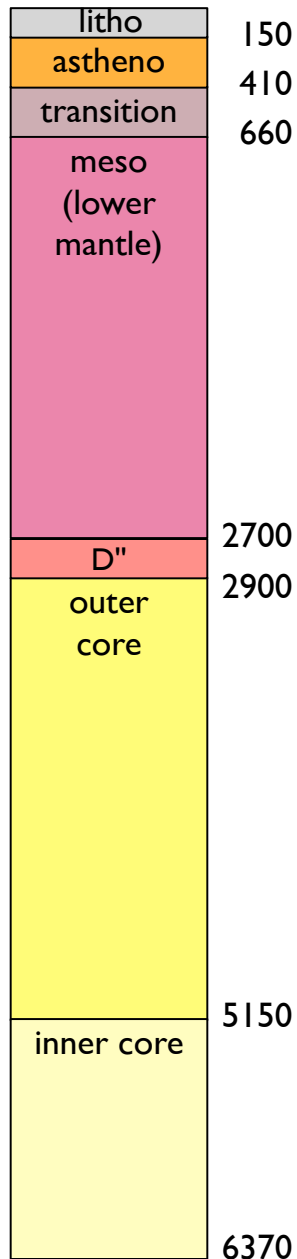
Schalenbau - Physikalische Eigenschaften



Mesosphäre (Unterer Mantel)

- Feste Schicht in einer Tiefe von 660 km bis 2900 km (incl. D'')
- Unter hohem Druck und hoher Temperatur sind Mantelgesteine fließfähig
- Mantelkonvektion
- Mantel entspricht ca. 82% der Erdmasse

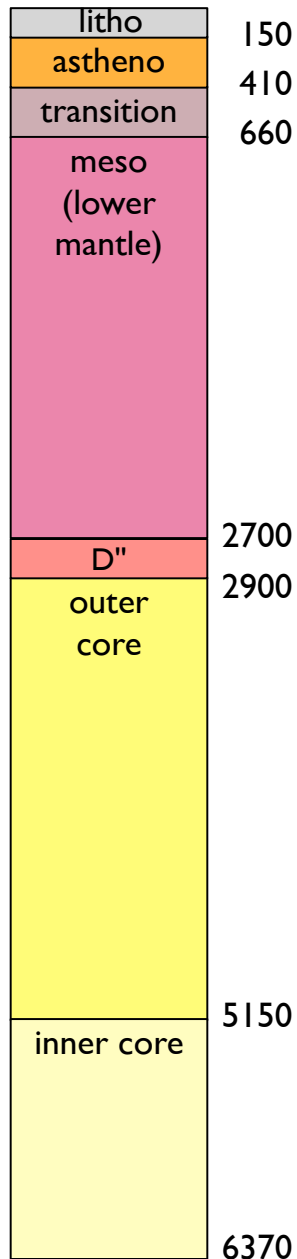
Schalenbau - Physikalische Eigenschaften



Äusserer Kern

- Zusammensetzung vorwiegend Fe - Ni Legierungen
- Flüssige Schicht ($T > 4700 \text{ K}$)
- ~2270 km dick
- Konvektionsströme bewirken Magnetfeld der Erde - seit ca. 3.5 Ga
- Feldumkehr im Mittel alle 300 ka (vor etwa 780 ka Brunhes-Matuyama-Umkehr...)

Schalenbau - Physikalische Eigenschaften

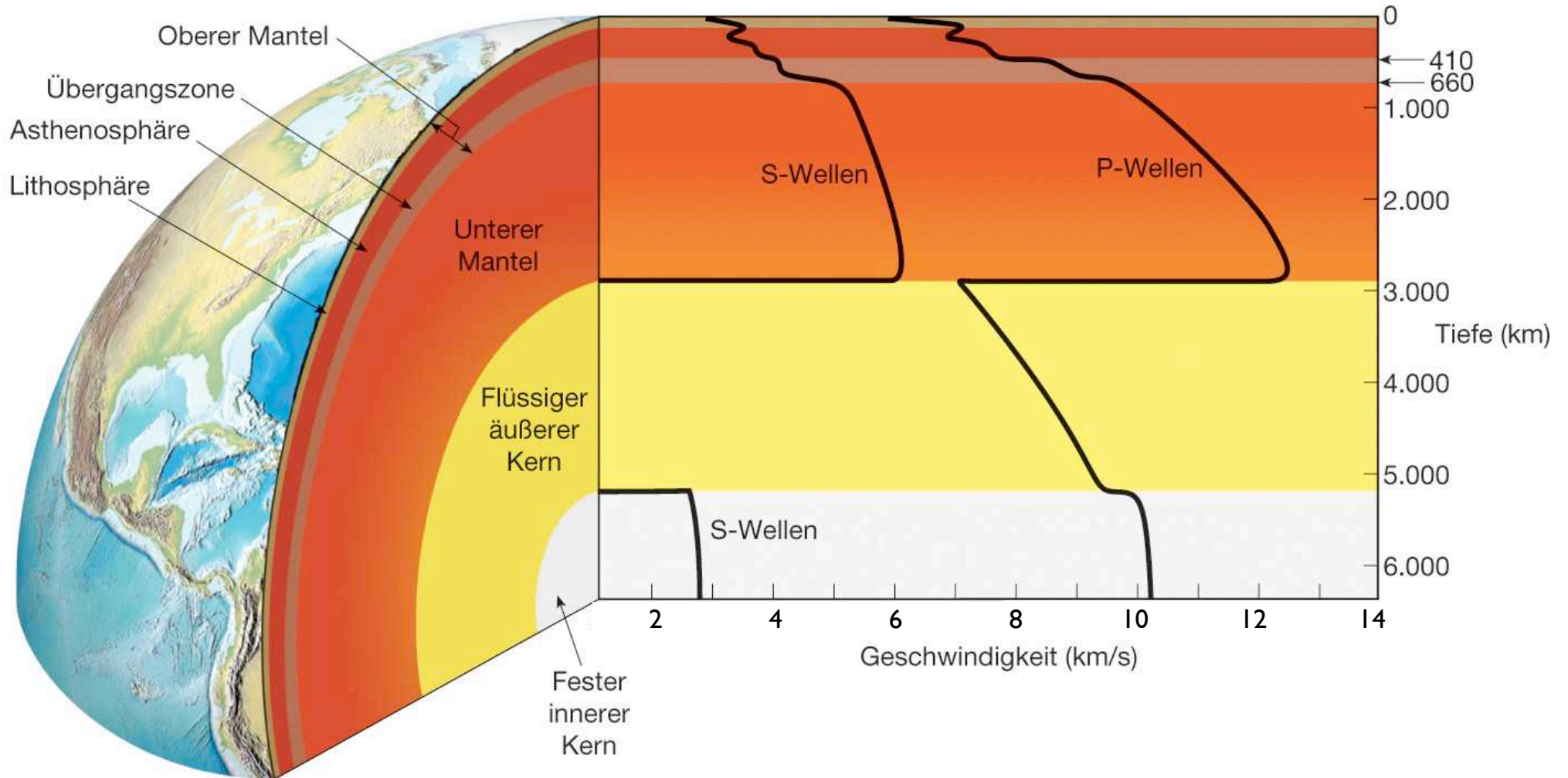


Innerer Kern

- Radius des inneren Kerns: ~ 1220 km
- Kern kristallisiert langsam aus
- Schmeltemperatur von Fe bei 300 GPa: ~ 5700 K ($\sim 5430^\circ\text{C}$)
- Innerer Kern verhält sich wie ein Festkörper

Schalenbau der Erde

Rheologie - physikalische Eigenschaften

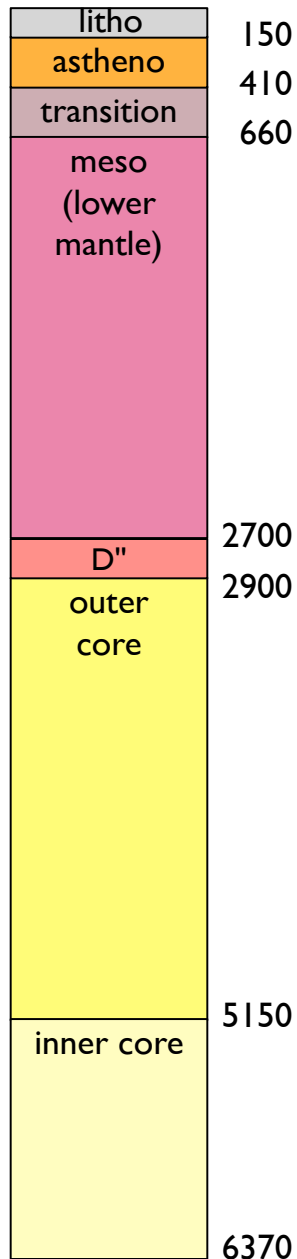


Beispiel: seismische Geschwindigkeiten

PREM

**preliminary earth
reference model**

Physikalische definierte Schalen



Lithosphäre

- Relativ kühl, steif

Asthenosphäre (incl. transition zone)

- Kleine Schmelzanteile, niedrige Viskosität

Mesosphäre (Unterer Mantel)

- Festkörper, hohe Viskosität

Äusserer Kern

- Flüssig

Innerer Kern

- Festkörper

Preliminary Reference Earth Model

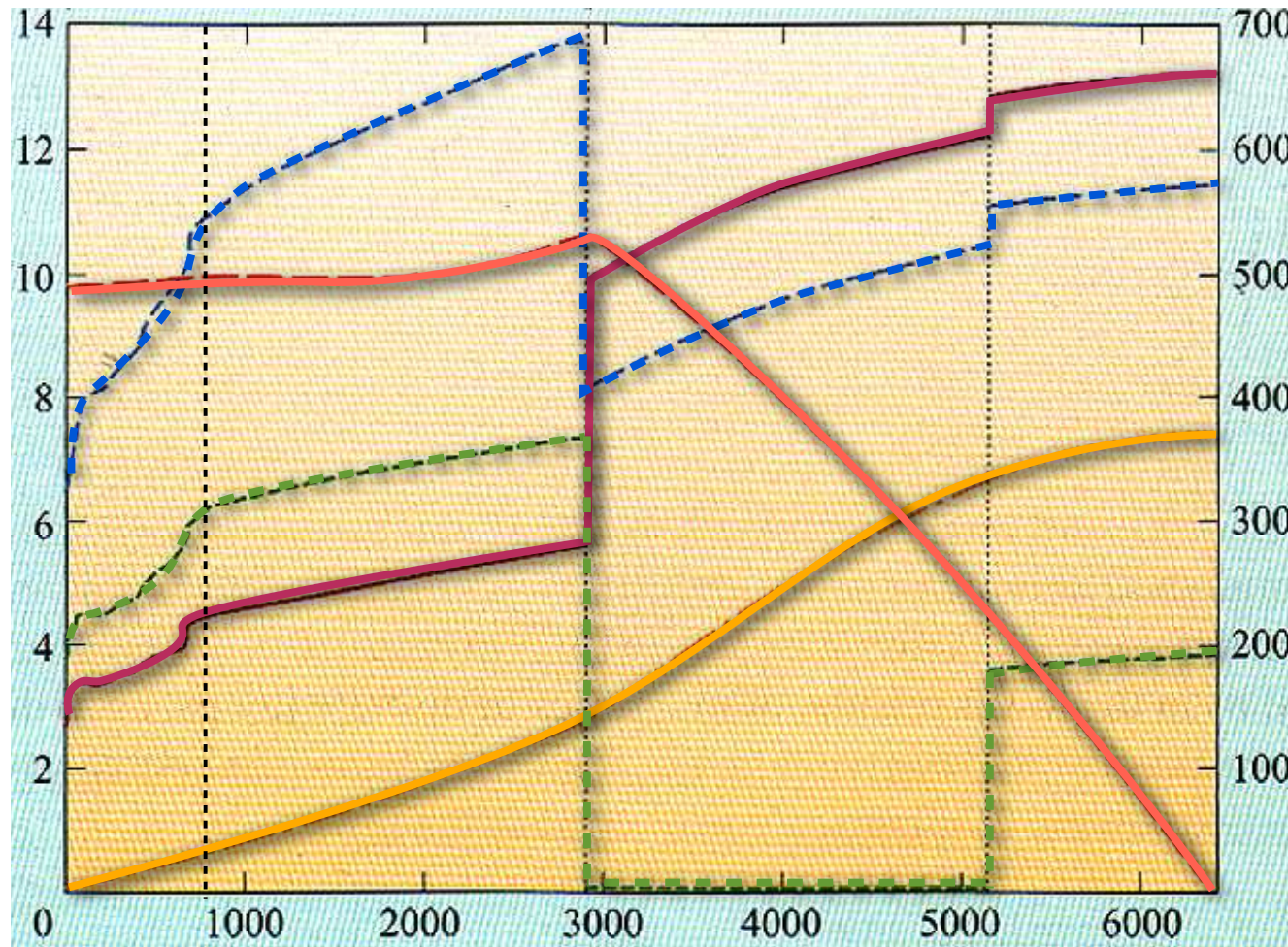
PREM (1981) (Adam M. Dziewonski und Don L. Anderson)

ρ (10^3 kgm^{-3})

v_p, v_s (10^3 ms^{-1})

g (ms^{-2})

p (GPa)



upper mantle

lower mantle

outer core

inner core

Dichte

ρ (10^3 kg/m^3)

Seismische
Geschwindigkeit

v_p (10^3 m/s)

Druck

p (GPa)

Seismische
Geschwindigkeit

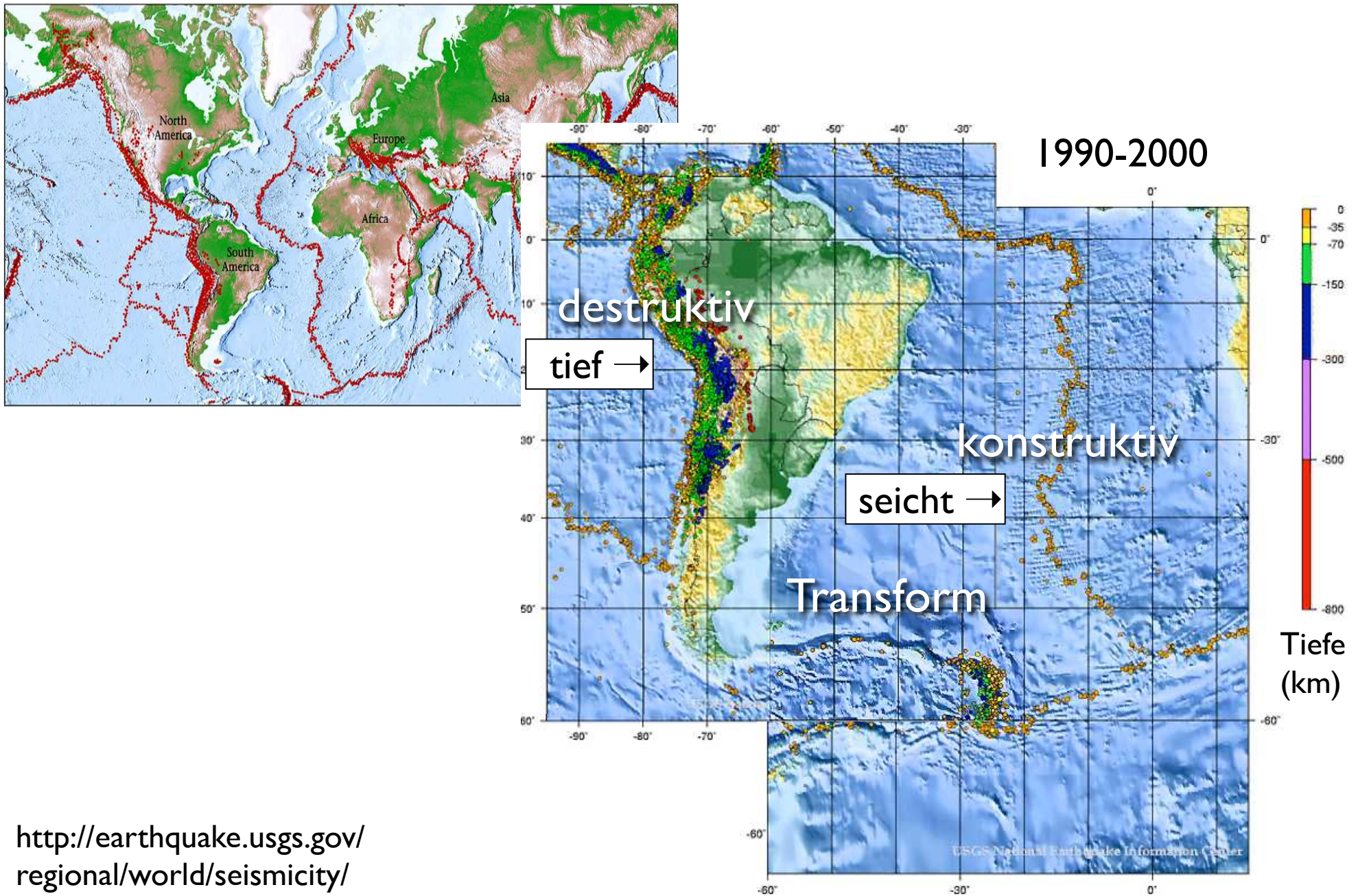
v_s (10^3 m/s)

Erdbeschleunigung

g (m/s^2)

Tektonische Platten

Platten - definiert durch Seismizität



<http://earthquake.usgs.gov/regional/world/seismicity/>

Platten - definiert durch Vulkanismus



Island arc



Continental arc



Rift



Hot spot



Mid-ocean ridge

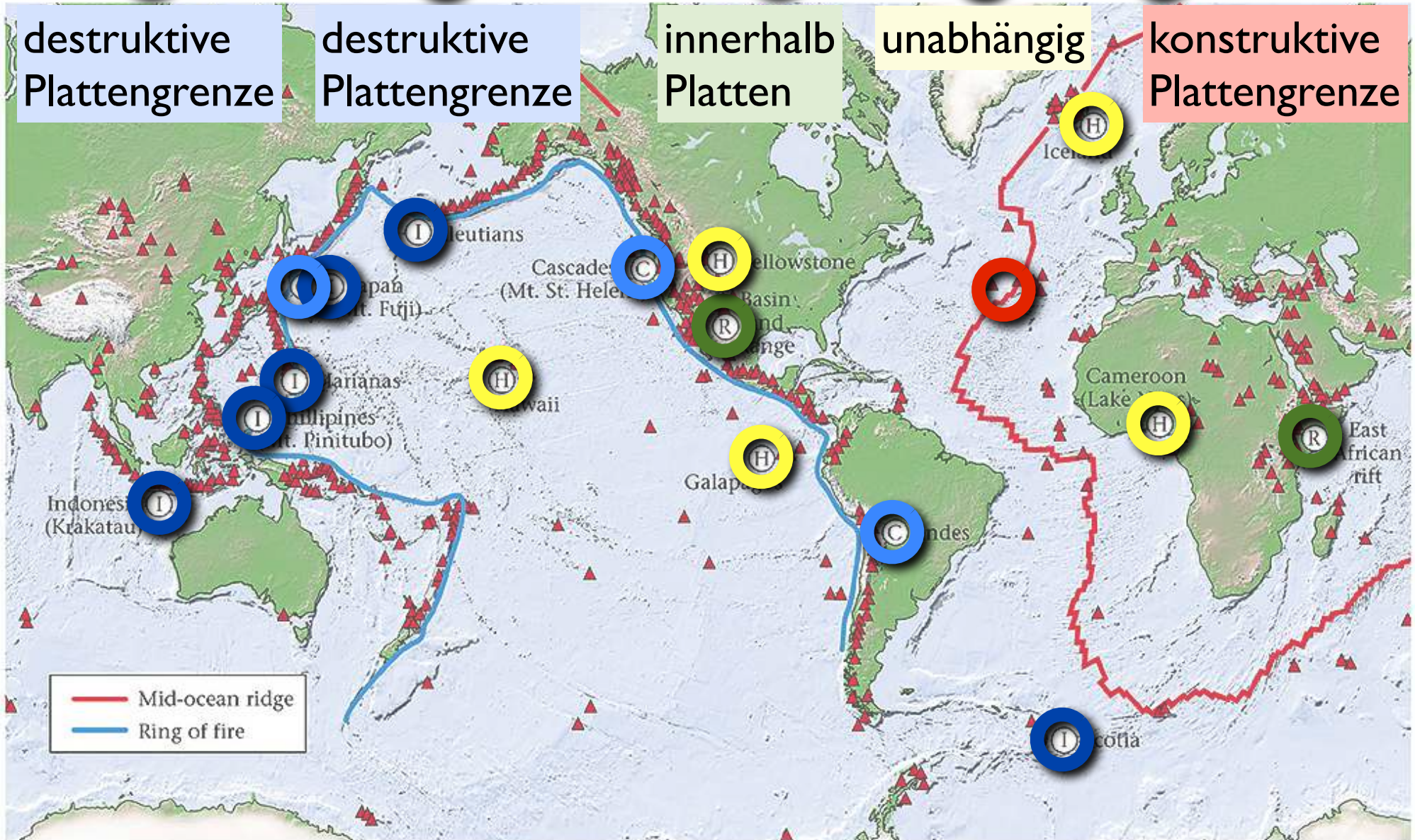
destruktive Plattengrenze

destruktive Plattengrenze

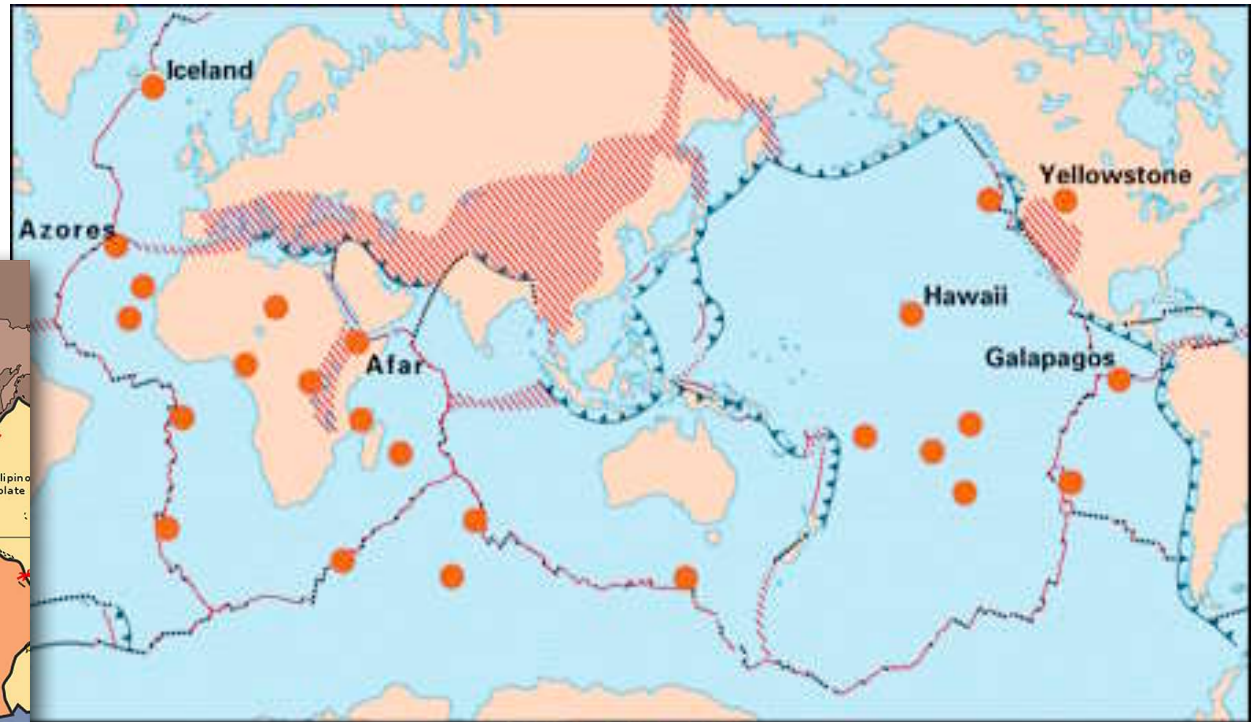
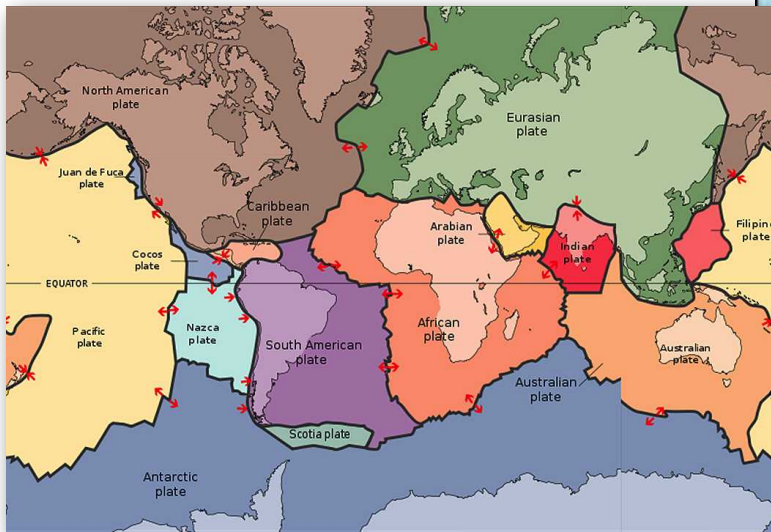
innerhalb Platten

unabhängig






konstruktive Plattengrenze



Plattengrenzen (-grenzzonen)



EXPLANATION

-  Divergent plate boundaries—Where new crust is generated as the plates pull away from each other.
-  Convergent plate boundaries—Where crust is consumed in the Earth's interior as one plate dives under another.
-  Transform plate boundaries—Where crust is neither produced nor destroyed as plates slide horizontally past each other.
-  Plate boundary zones—Broad belts in which deformation is diffuse and boundaries are not well defined.
-  Selected prominent hotspots

3 Dynamik der Plattentektonik

Plattengrenzen

- Konstruktive
- Destruktive
- Konservative

Typ I: Konstruktive Plattengrenzen

Magnetismus

Remanente Magnetisierung:

- TRM - thermisch
- DRM - detritisch
- CRM - chemisch

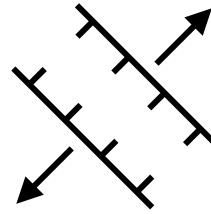
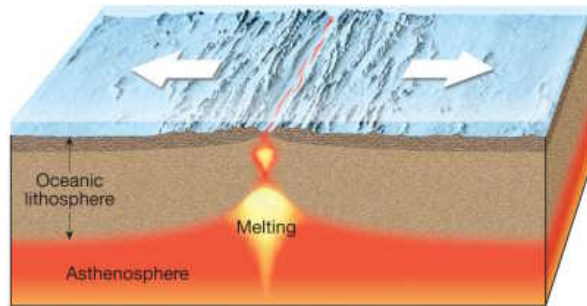
Paläomagnetik

Sea floor spreading

Anatomy of a spreading ridge

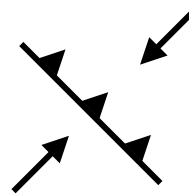
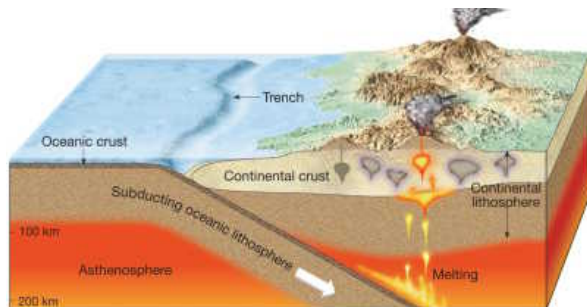
Plattengrenzen

Plattengrenzen: 3 Typen



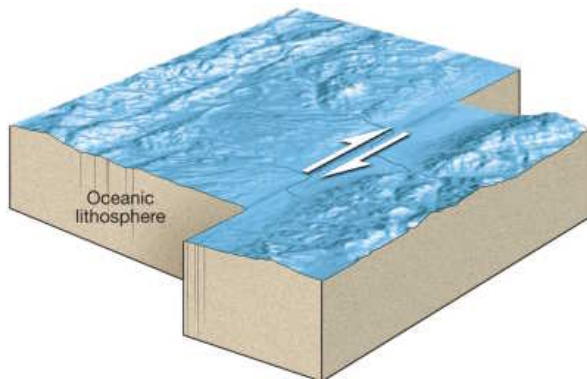
Graben

Oberfläche:	konstruktiv
kinematisch:	divergent
geometrisch:	distensiv



Überschiebung

Oberfläche:	destruktiv
kinematisch:	konvergent
geometrisch:	kompresiv



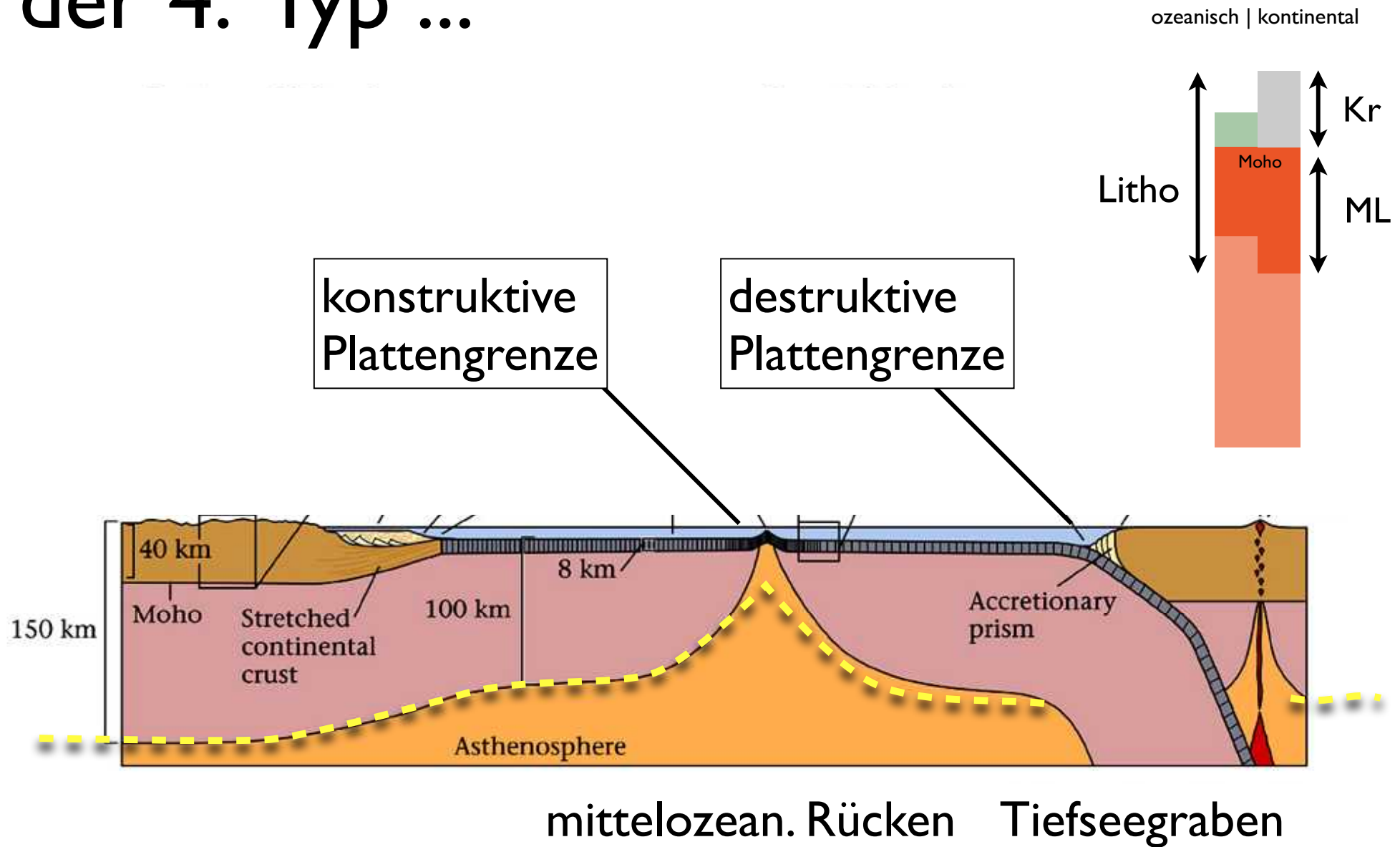
Blattverschiebung

Oberfläche:	konservativ
kinematisch:	Transform-
geometrisch:	Transform-

(-plattengrenze)

- jede Platte hat alle drei Typen von Grenzen
- neue Grenzen entstehen, wenn das Bewegungsmuster / Kräftefeld ändert
- Platten können Spannungen übertragen

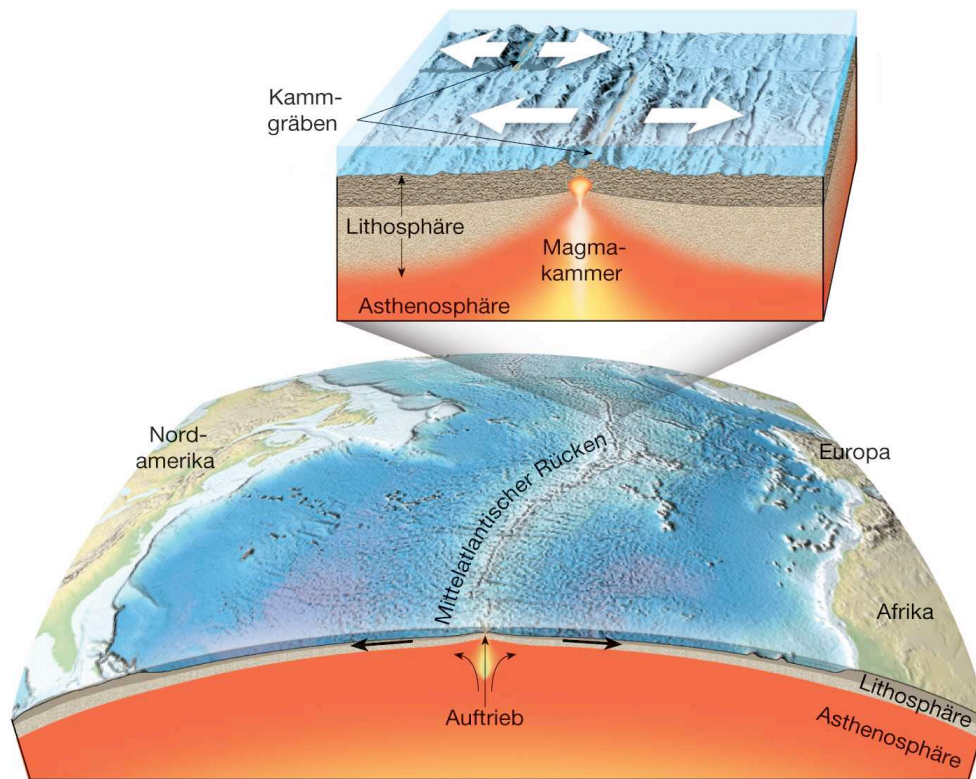
der 4. Typ ...



Untergrenze = LAB = Lithosphäre/Asthenosphäre ≠ Moho

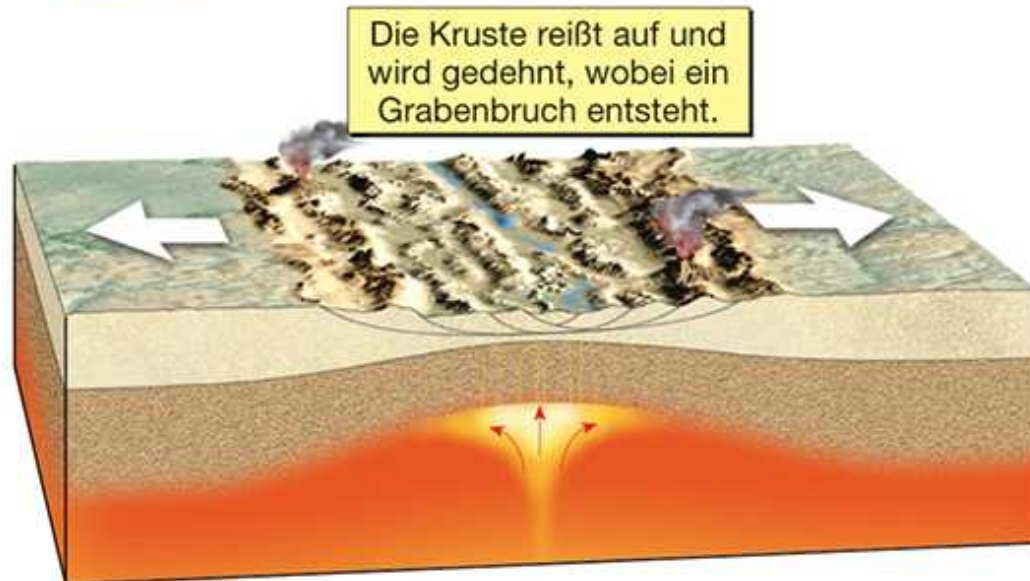
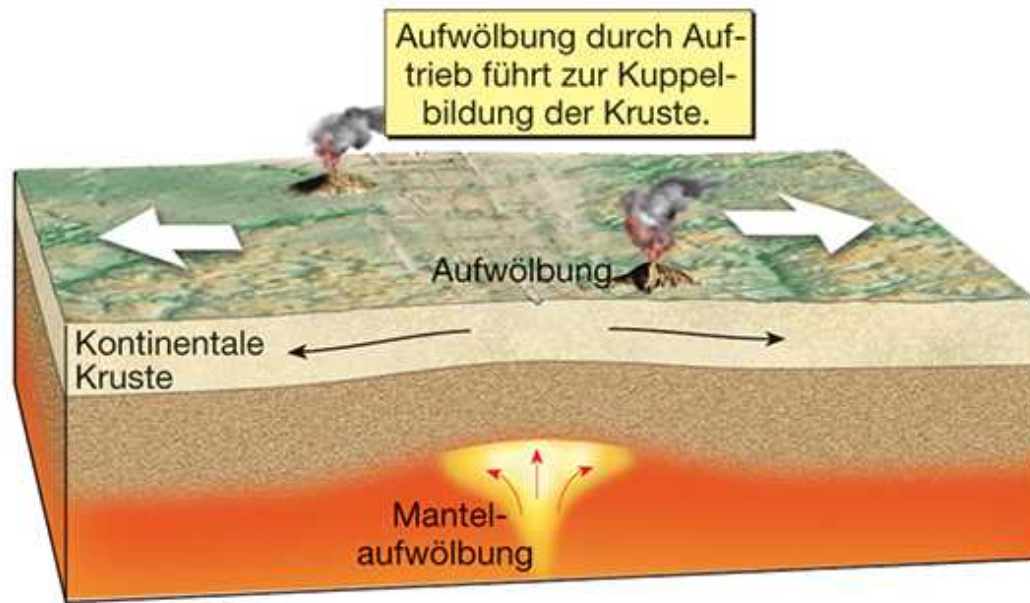
konstruktive Plattengrenzen

Konstruktive Plattengrenzen



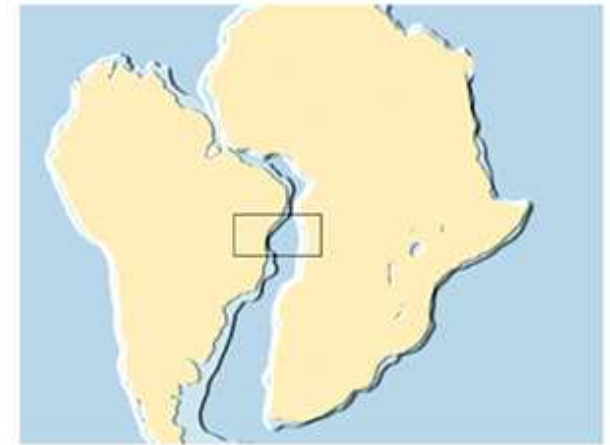
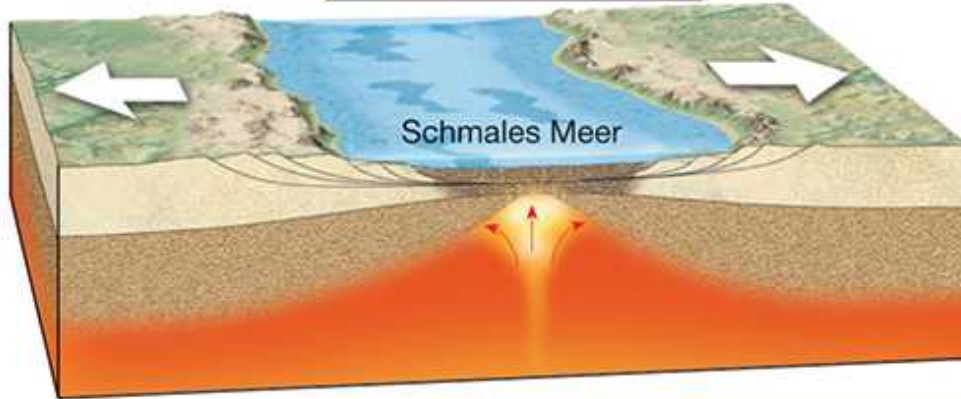
- Sea floor spreading (Ozeanbodenspreizung) tritt im Zentrum von mittelozeanischen Rücken auf
- Idee wurde 1960 von Harry Hess formuliert
- aktive Zonen sind 20 - 30 km breit
- beim Auseinanderdriften der Platten dringt Magma ein
- Magma erstarrt und bildet neue ozeanische Lithosphäre
- Lithosphäre bewegt sich wie ein Förderband

vom kontinentalen Grabenbruch ...

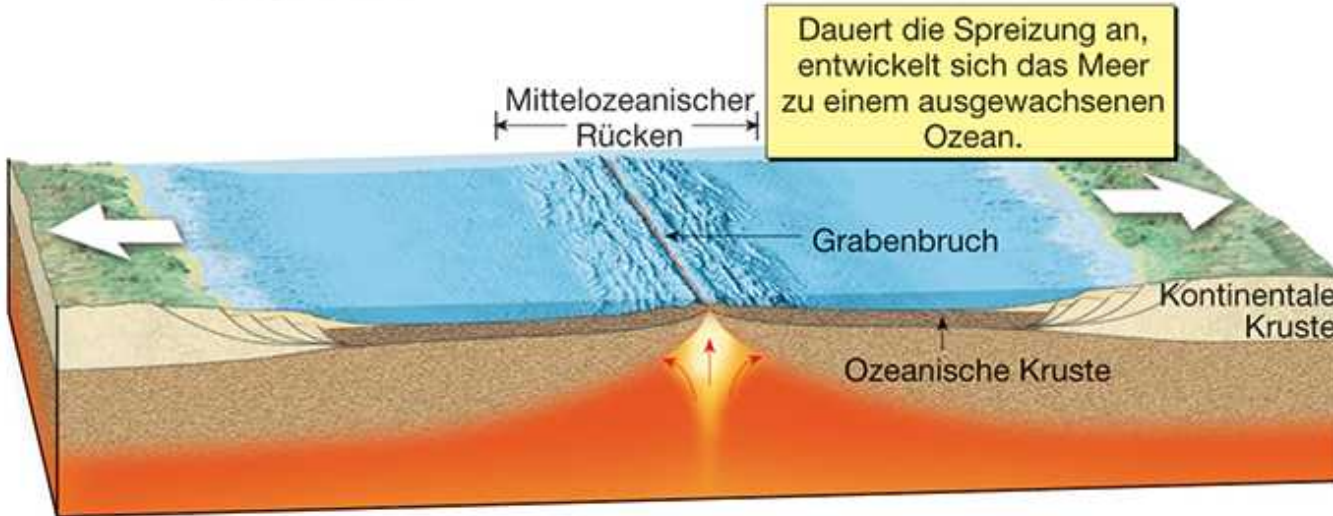


... zum Ozean

Durch Kontinentaldrift entsteht schließlich ein Schmales Meer.

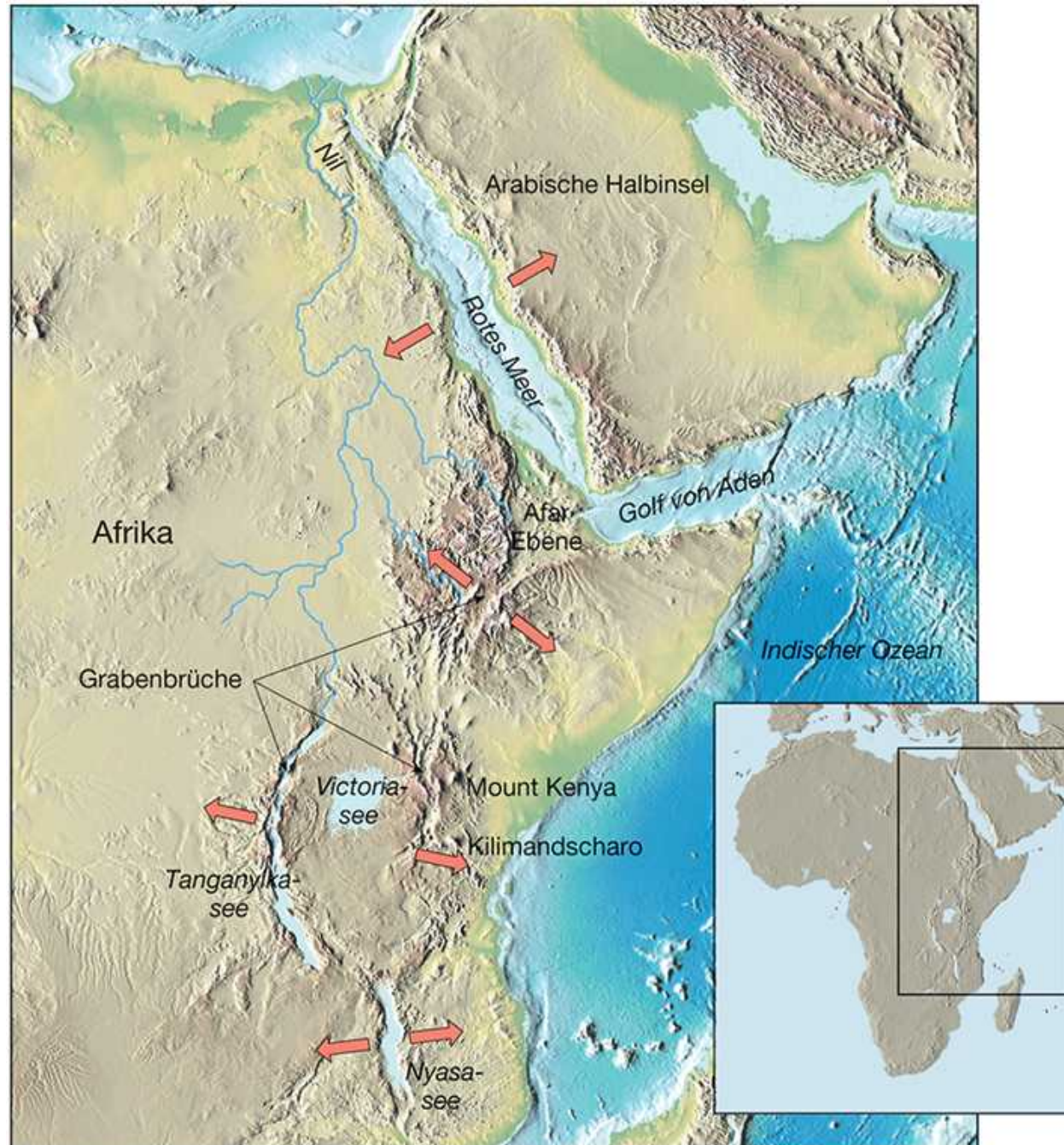


Dauert die Spreizung an, entwickelt sich das Meer zu einem ausgewachsenen Ozean.



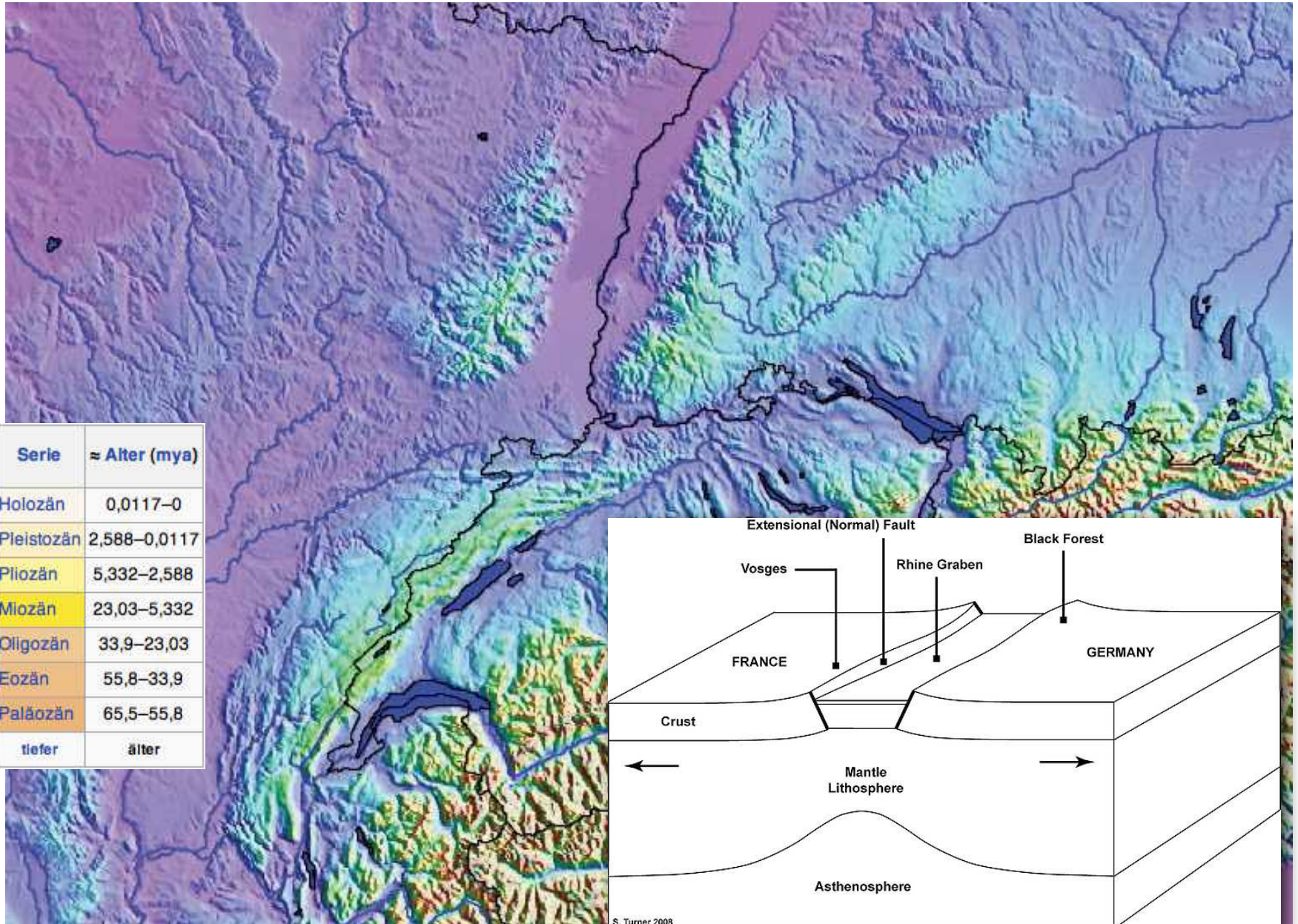
Bsp: Ostafrikanischer Grabenbruch

aktuell



Bsp: Rhein - Bresse Graben

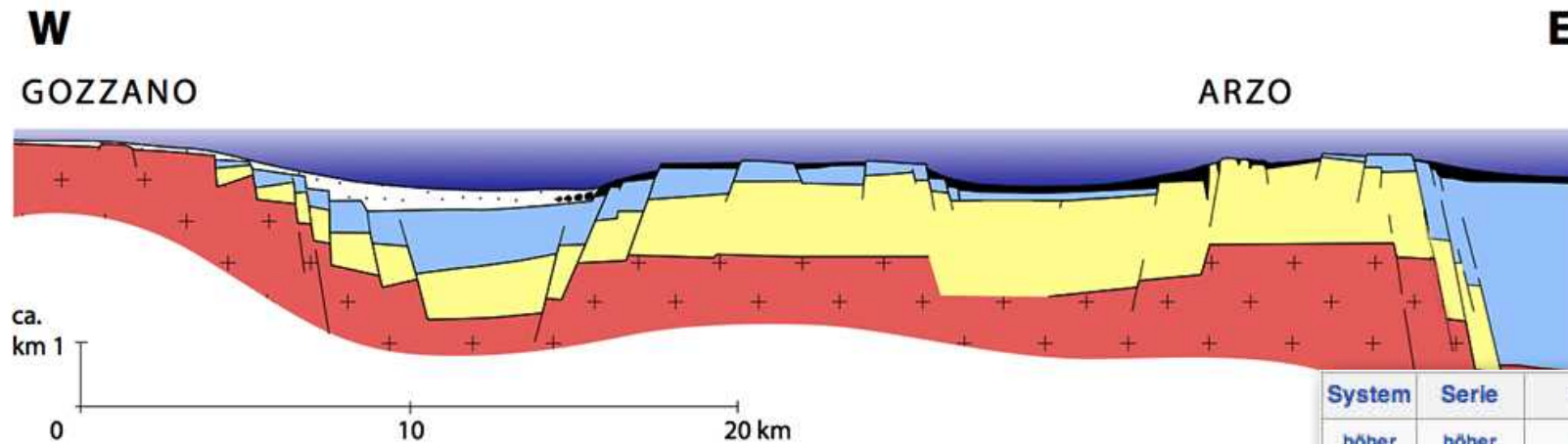
Eozän - Miozän



<http://en.wikipedia.org/wiki/File:Rhinegrabencross.jpg>

Bsp: Rifting Europa-Afrika

unt.-mittl.Jura



- Pelagische Sedimente
- flyschartige Resedimente der Valmaggione-Formation
- unter- und mittelliasische Beckensedimente (inkl. hemipelagische Sedimente des Domerian)
- mittel- und obertriasische Flachwasser-Karbonate
- Permische Vulkanite

Monte San Giorgio,
S von Lugano



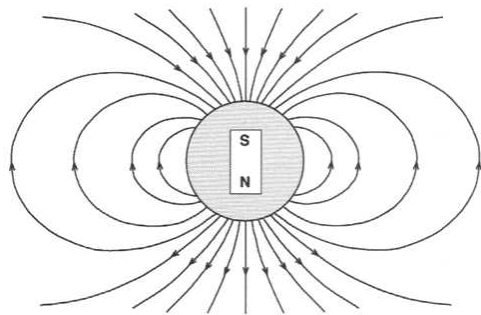
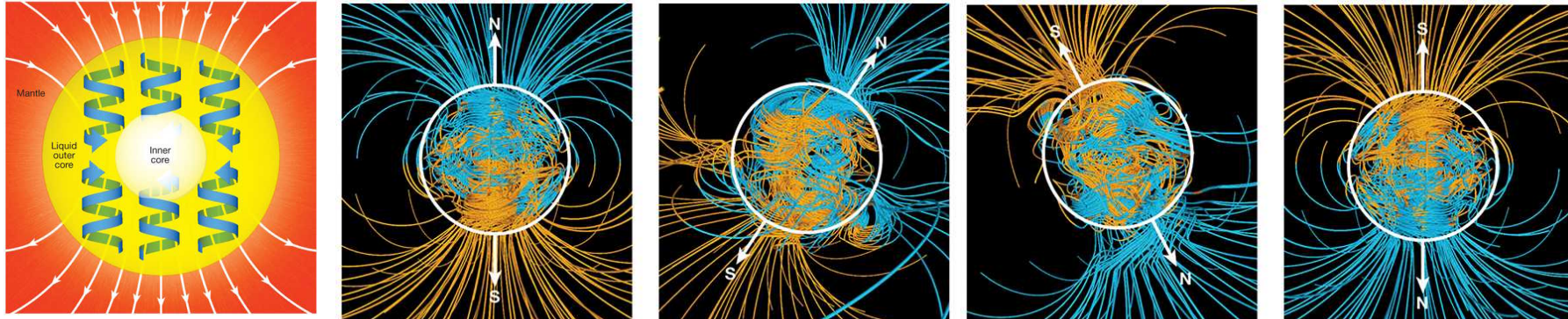
Brekzie von Arzo

System	Serie	Stufe	≈ Alter (mya)
höher	höher	höher	jünger
Jura	Oberjura	Tithonium	150,8–145,5
		Kimmeridgium	155,6–150,8
		Oxfordium	161,2–155,6
	Mitteljura	Callovium	164,7–161,2
		Bathonium	167,7–164,7
		Bajocium	171,6–167,7
		Aalenium	175,6–171,6
	Unterjura	Toarcium	183–175,6
		Pliensbachium	189,6–183
		Sinemurium	196,5–189,6
Hettangium	199,6–196,5		
tiefer	tiefer	tiefer	älter

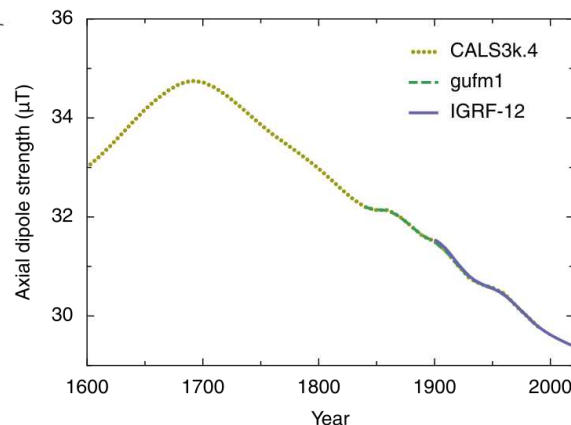
dynamisches Magnetfeld der Erde

Geodynamo

Geodynamo = 95 % des Magnetfeldes
ändert alle 10'000 bis 100'000 Jahre
 ≤ 3 % des Magnetfeldes
ändert mit Tageszeit und jährlich



Dipolfeld
magn. S = geogr. N

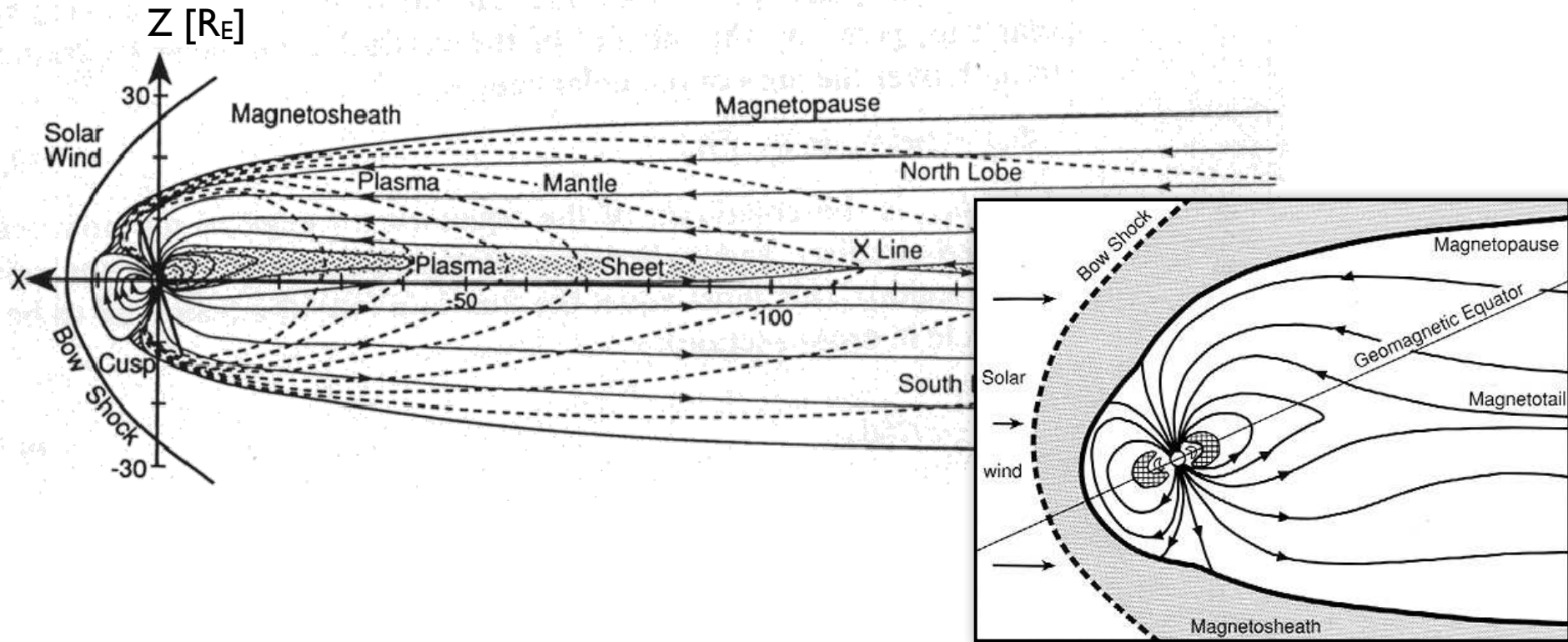


Ursachen für Magnetfeld (Dynamo):
Wachstum des festen Kerns,
Reibung innerer/äusserer Kern,
radiokativer Wärmetransport im Kern

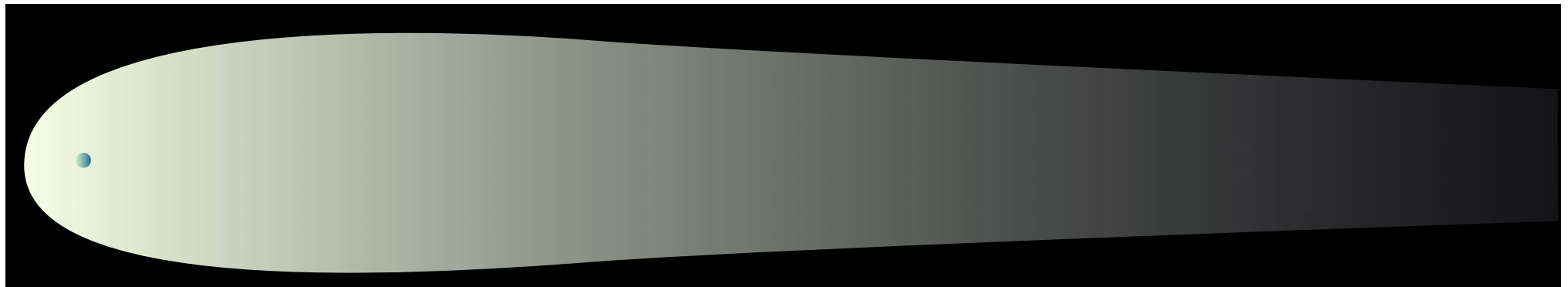
Magnetische Feldumkehr - Polsprung
Umkehr in wenigen 100-1000 Jahre

momentan starke Abnahme des
Magnetfeldes

Magnetosphäre

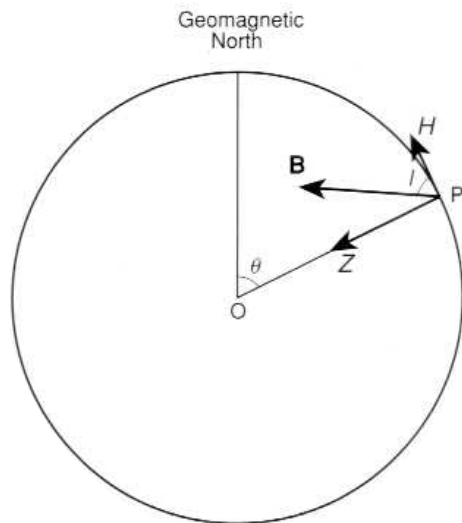


Erde: $d = 2 \cdot R_E \approx 10^4$ km



← mehrere 10^6 km →

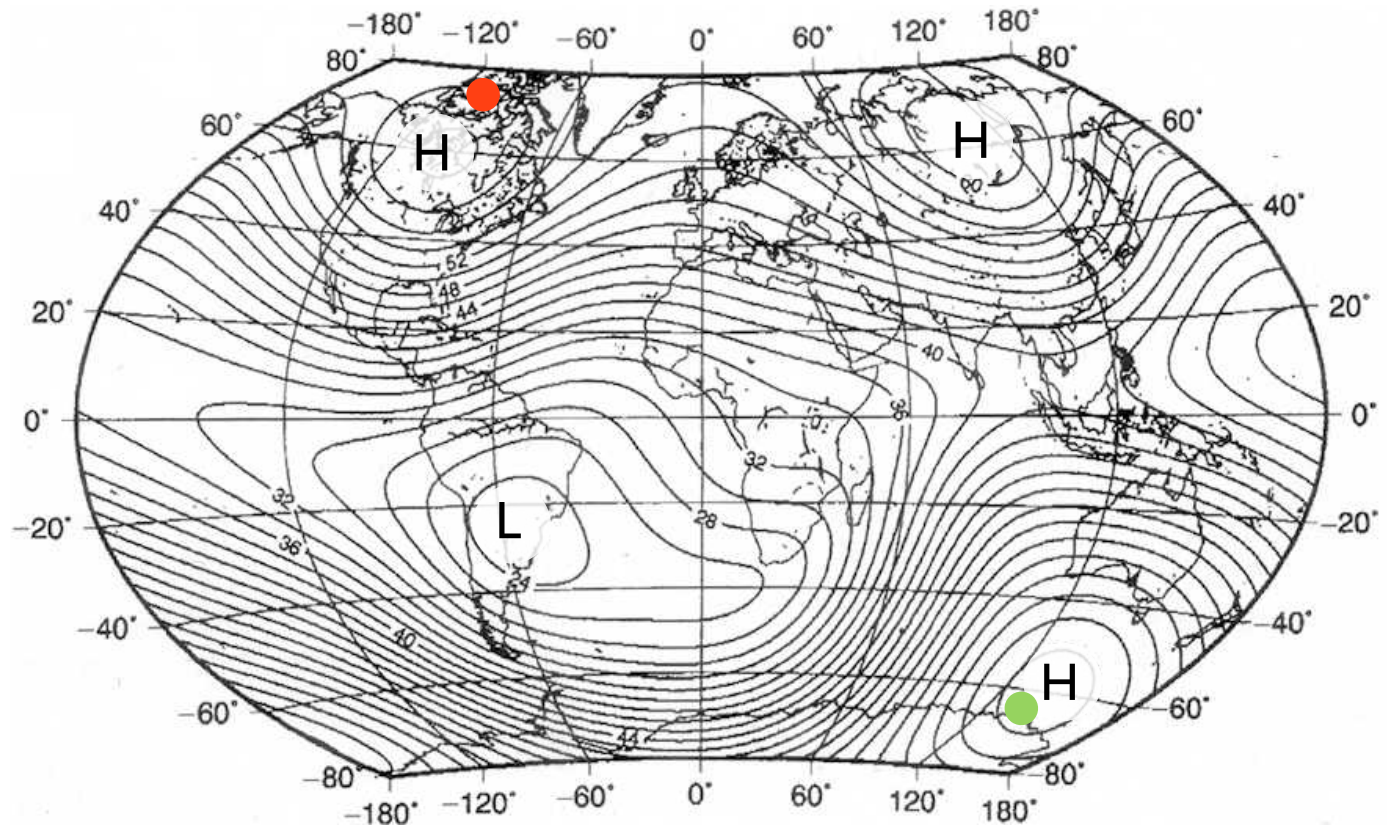
Erdmagnetfeld - Intensität



$$\vec{B} = \vec{H} + \vec{Z}$$

H: horizontal
Z: vertikal

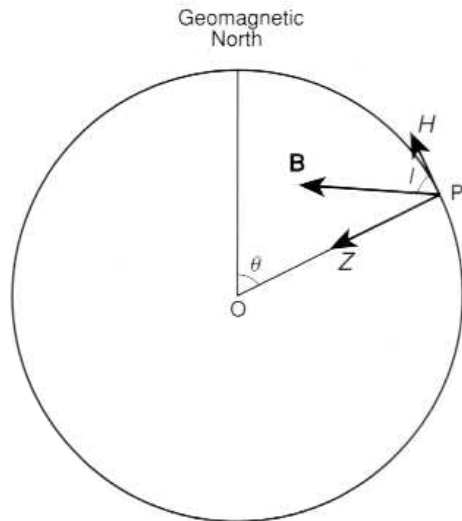
Gesamtintensität B des Erdfeldes (IGRF7)
25 - 65 μT = 0.25 - 0.65 Gauss



- magnetischer Nordpol: 76°N 101°W
- magnetischer Südpol: 66°S 141°E

IGRF (international geomagnetic reference field)

Erdmagnetfeld - Einheiten



$$\vec{B} = \vec{H} + \vec{Z}$$

H: horizontale

Z: vertikale Komponente
des Magnetfeldes

$$\vec{H} \neq H$$

(A/m²) (T)

$$B = \mu \cdot H$$

Masse für das Magnetfeld:

B = Magnetfeld (Einheit: T)

("magnetische Flussdichte, Induktion")

H = magnetische Feldstärke (Einheit: A/m²)

μ = magnetische Permeabilität

[B] in SI Einheiten:

[B] = 1 kg A⁻¹ s⁻² = 1 Tesla

Erdfeld Grössenordnung μ T

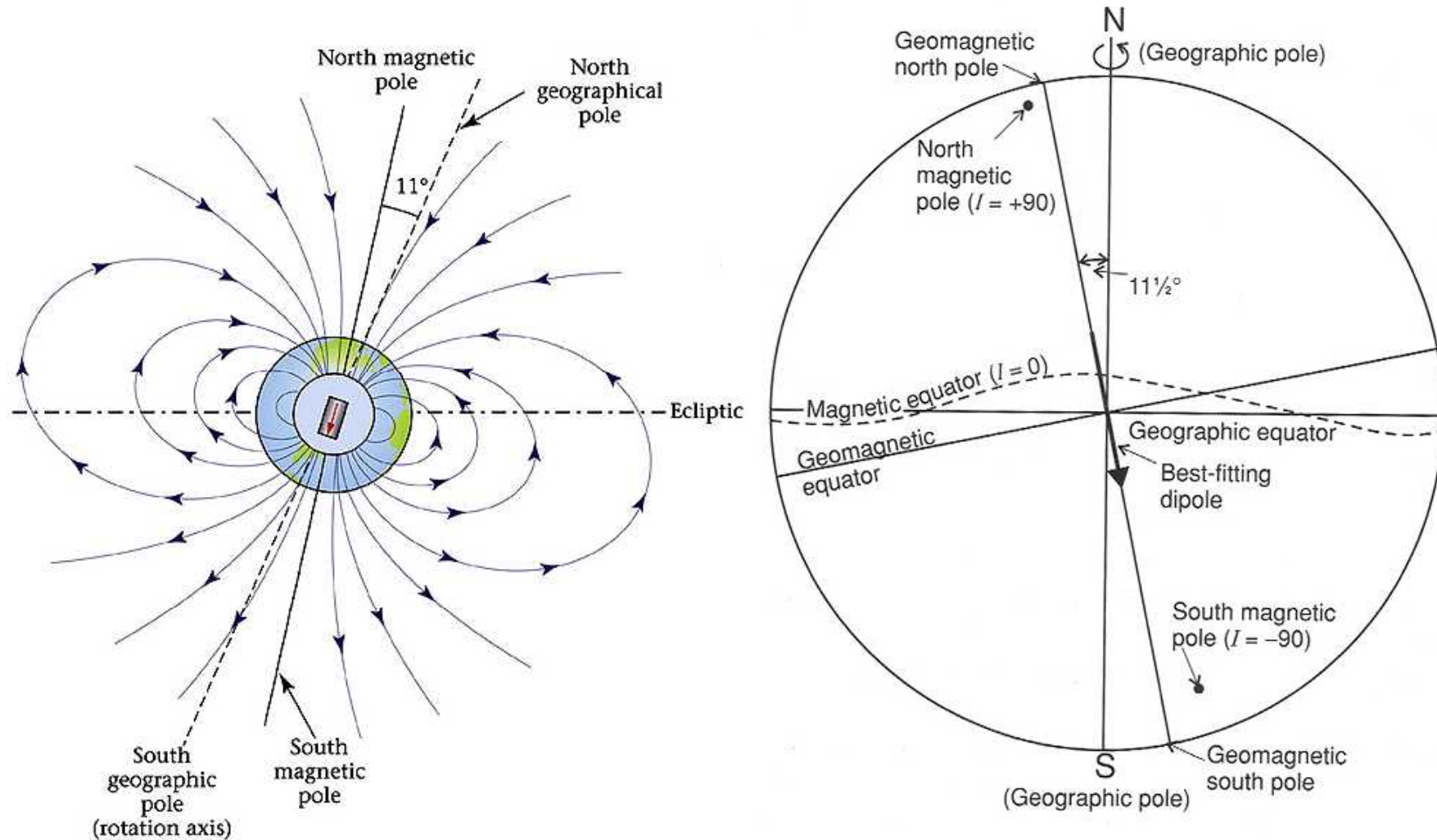
[B] in cgs Einheiten:

1 G ("Gauss") = 10⁻⁴ T = 0.1 mT = 100 μ T

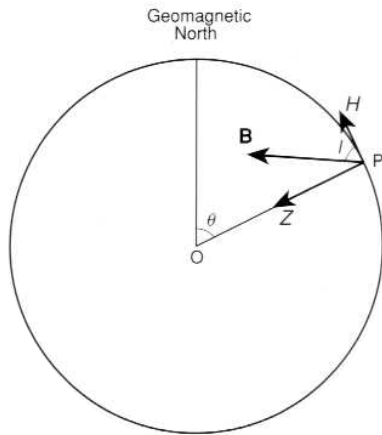
1 γ ("Gamma") = 10⁻⁵ G = 1 nT

Erdmagnetfeld - Richtung

Magnetischer versus geographischer N-Pol

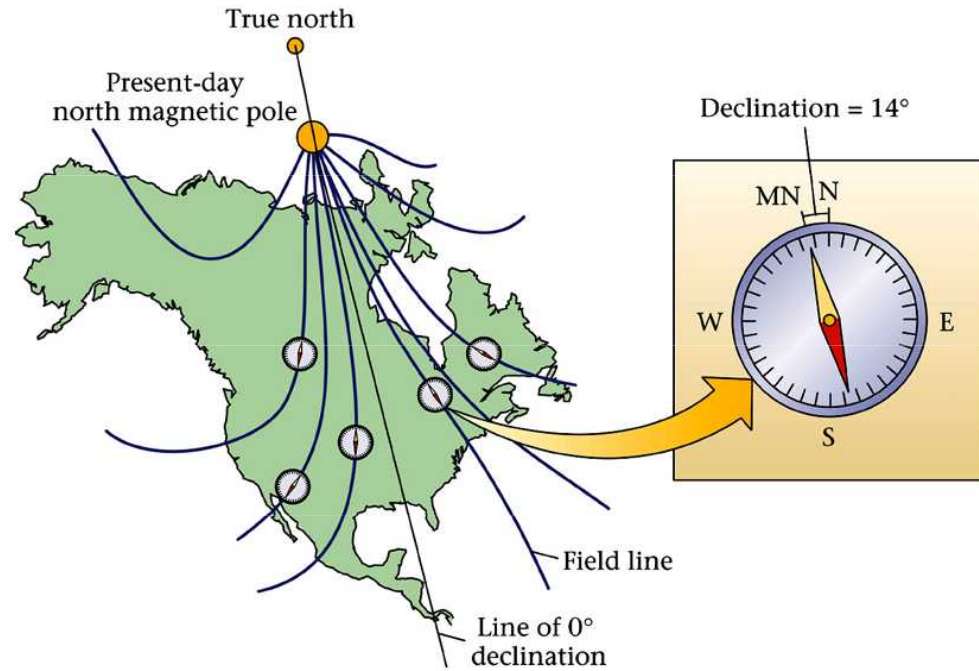


Magnetische Deklination



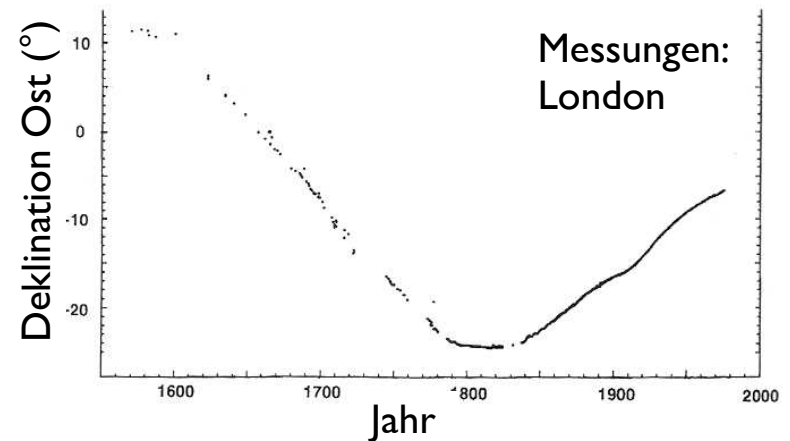
$$\vec{B} = \vec{H} + \vec{Z}$$

H: horizontal
Z: vertikal

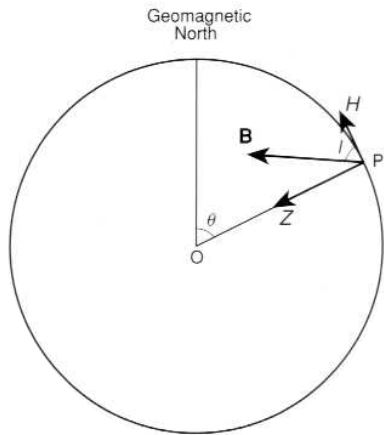


Diurnale Variation
(0.5%) - durch Sonne

Säkulare Variation



Magnetische Inklination



$$\vec{B} = \vec{H} + \vec{Z}$$

H: horizontal
Z: vertikal

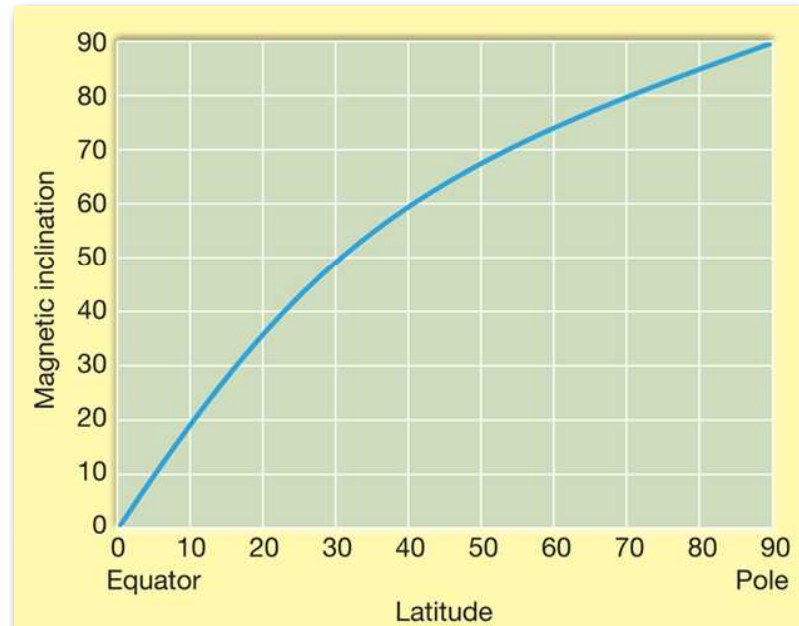
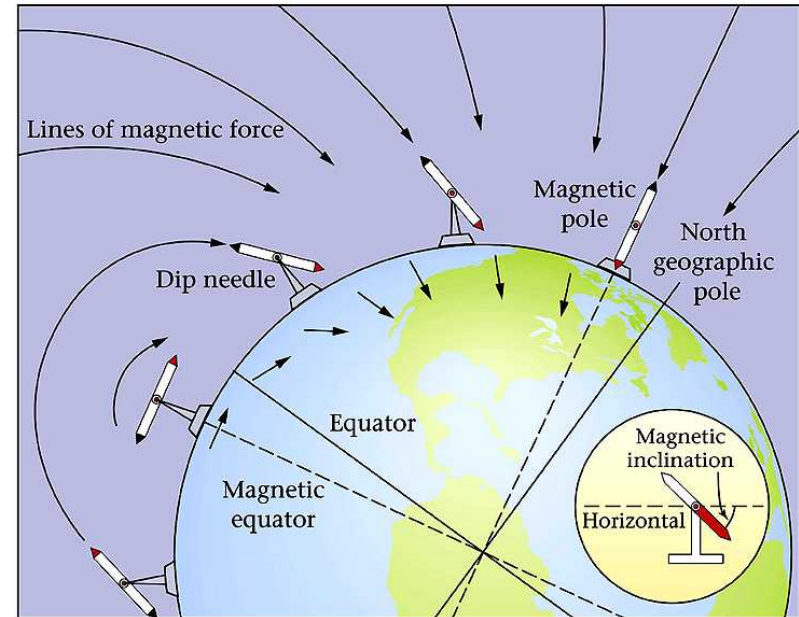
$$\tan(I) = 2 \tan(\lambda)$$

I = Inklination

λ = Breite

am Äquator: $I = 0^\circ$

am Pol: $I = \sim 90^\circ$

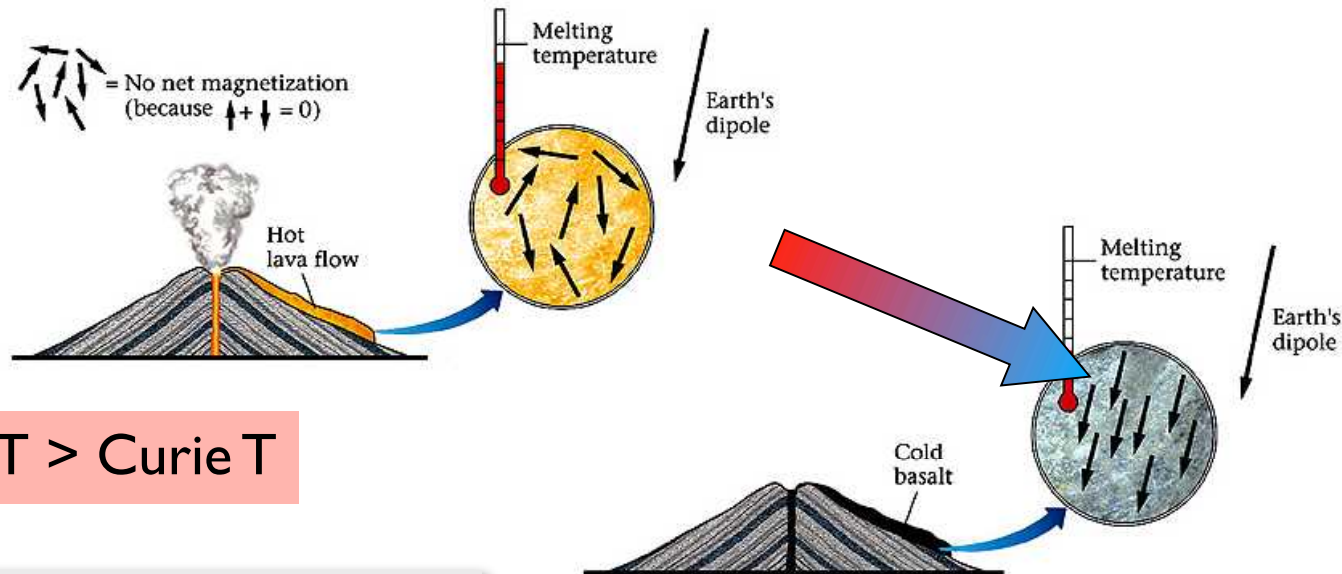


Magnetisierung

("fossiles " Magnetfeld der Erde)

remanente Magnetisierung

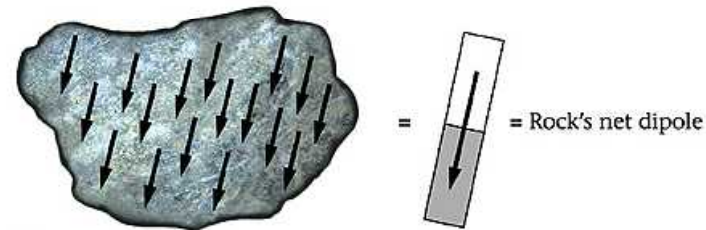
= wenige % des Magnetfeldes
örtlich variabel



$T > \text{Curie } T$

Curie Temperatur:

Eisen	1041 K	(768 °C)
Magnetit Fe_3O_4	851 K	(578 °C)
Hämatit Fe_2O_3		(675 °C)



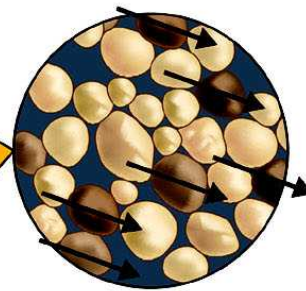
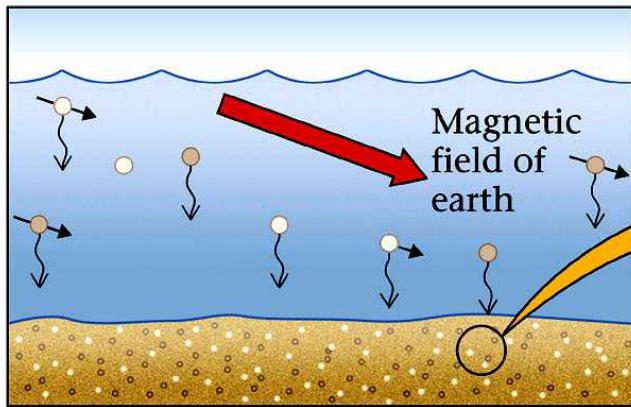
$T < \text{Curie } T$

I. TRM = thermische
remanente Magnetisierung

remanente Magnetisierung

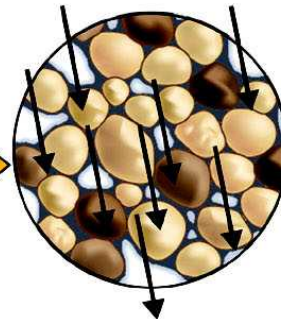
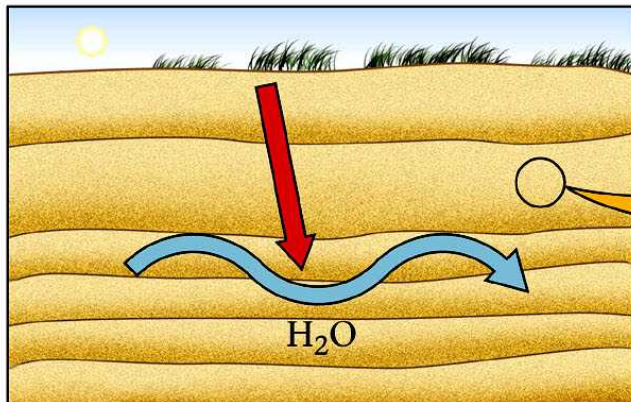
= wenige % des Magnetfeldes
örtlich variabel

Sedimentär durch Einregelung von
Partikeln während Ablagerung



2. DRM = detritische
remanente Magnetisierung

Chemisch durch Lösung und
Wiederausfällung im Magnetfeld



3. CRM = chemische
remanente Magnetisierung

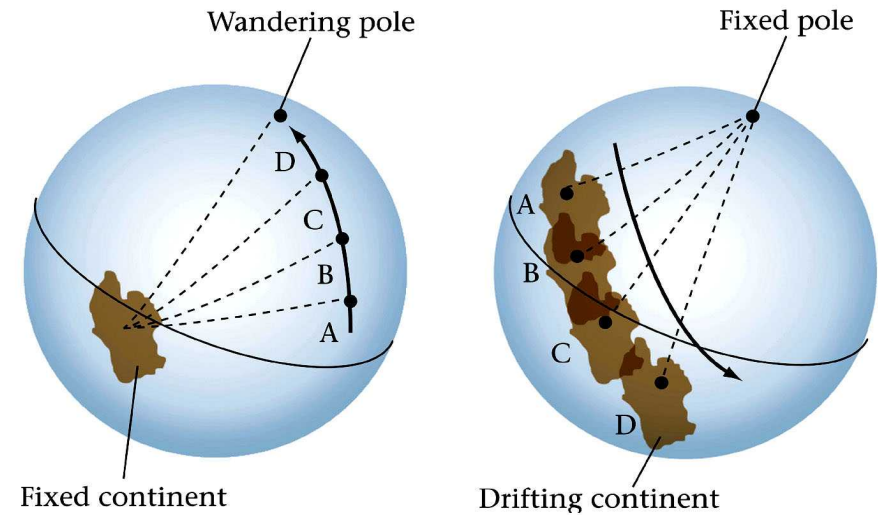
Paläomagnetik

Polwanderung



Lage des magnetischen Nordpols von 1904 - 2005

Relativbewegung: Kontinent - Pol



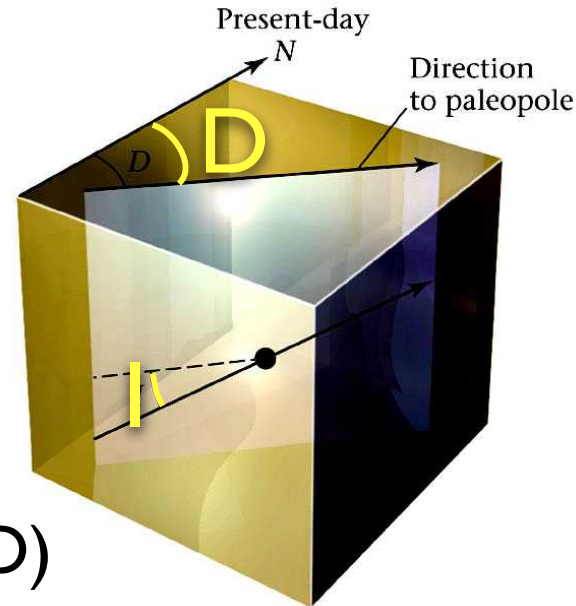
echte Polwanderung:

⇒ Magnetfeld verschiebt sich

scheinbare Polwanderung:

⇒ Kontinent verschiebt sich

Paläomagnetik



Deklination (D)

Kompassrichtung
des Paläopols

Inklination (I) \Rightarrow Breite (λ)

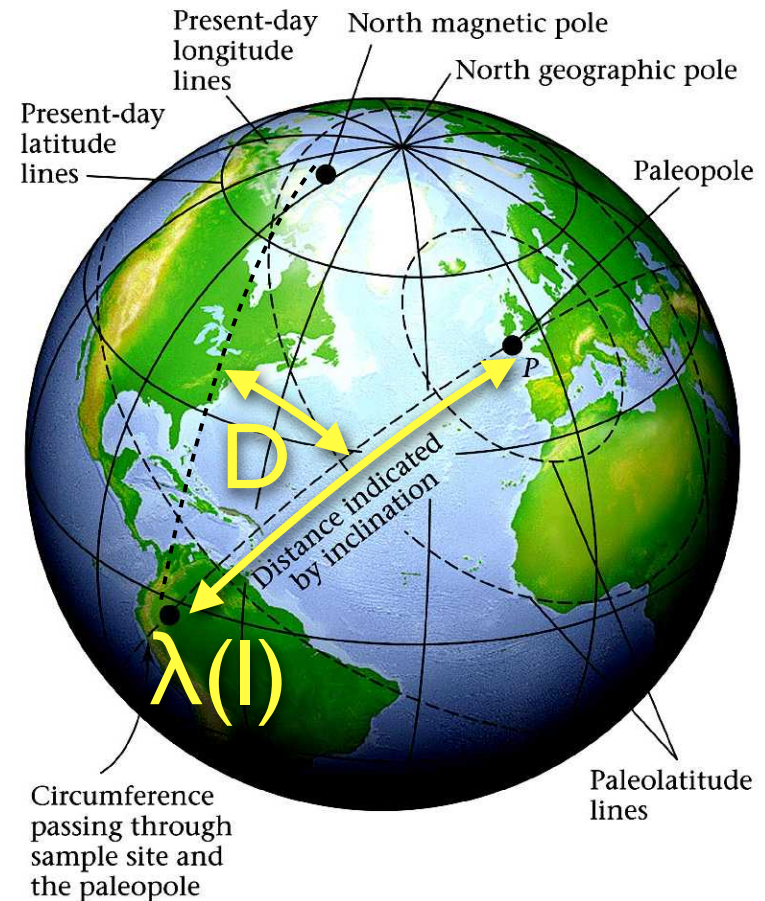
pro memoria:

$$\tan(I) = 2 \tan(\lambda)$$

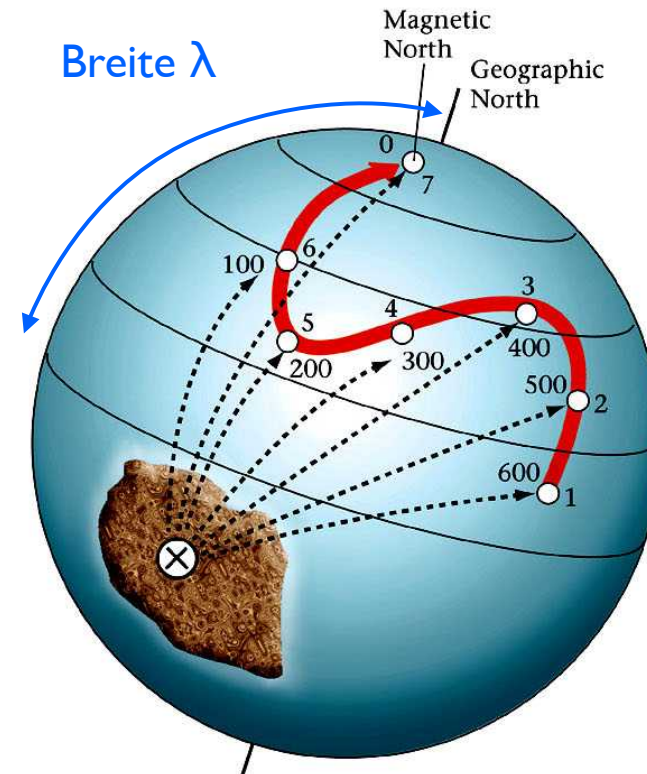
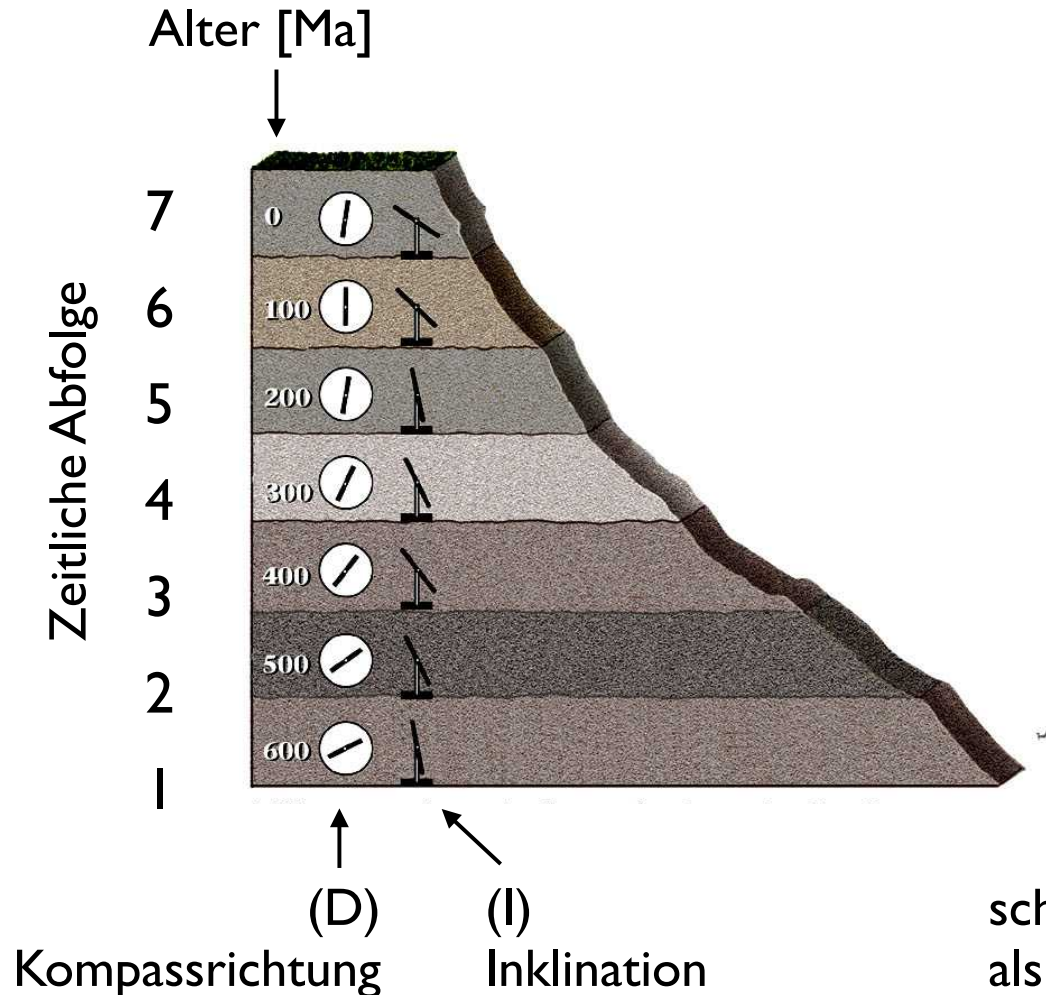
I = Inklination

λ = Breite

Breite
des Paläopols



Paläomagnetik

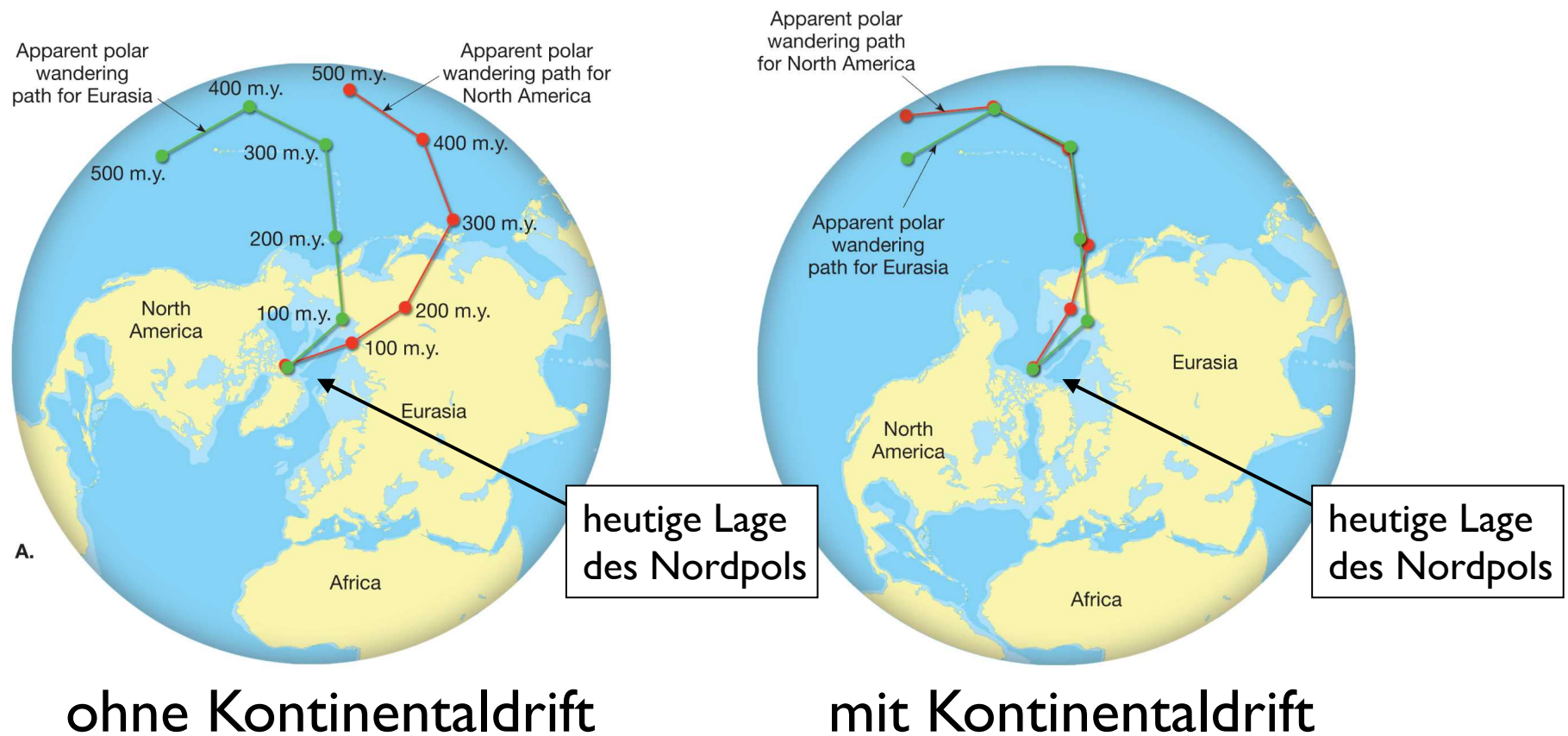


scheinbare geographische Lage des Nordpols
als Funktion von Alter [Ma]

Zeitpunkt 1 und 5: Inklination steil \Rightarrow näher am Pol
Zeitpunkt 7 (heute): Inklination flach \Rightarrow näher am Äquator

Scheinbare Pol-Wandererrouten

Polwandererrouten berechnet für Eurasia
für Nordamerika



sea floor spreading

magnetische Lineationen

No. 4897 September 7, 1963 NATURE

MAGNETIC ANOMALIES OVER OCEANIC RIDGES

By F. J. VINE and Dr. D. H. MATTHEWS
Department of Geodesy and Geophysics, University of Cambridge

16 December 1966, Volume 154, Number 3755

SCIENCE

Spreading of the Ocean Floor: New Evidence

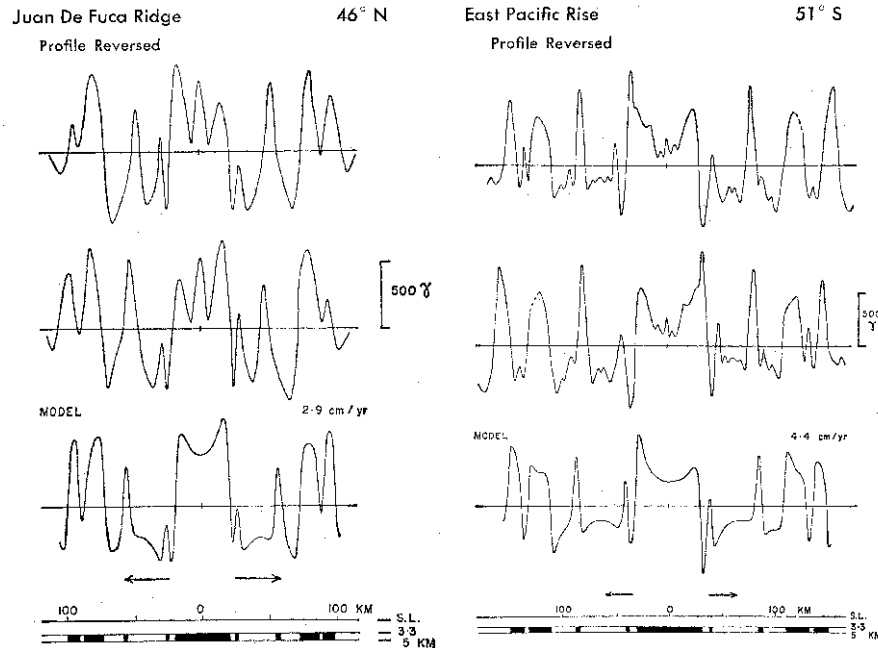
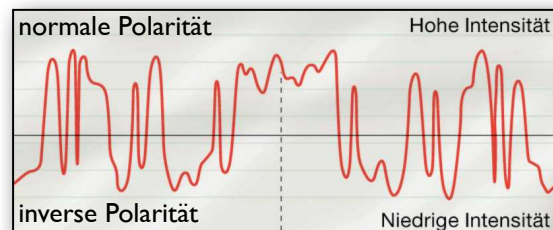
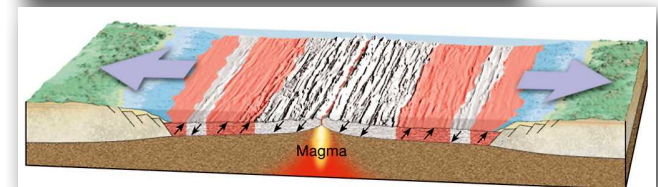
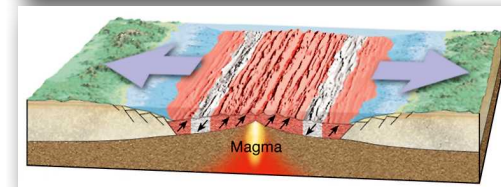
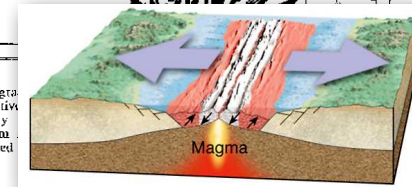
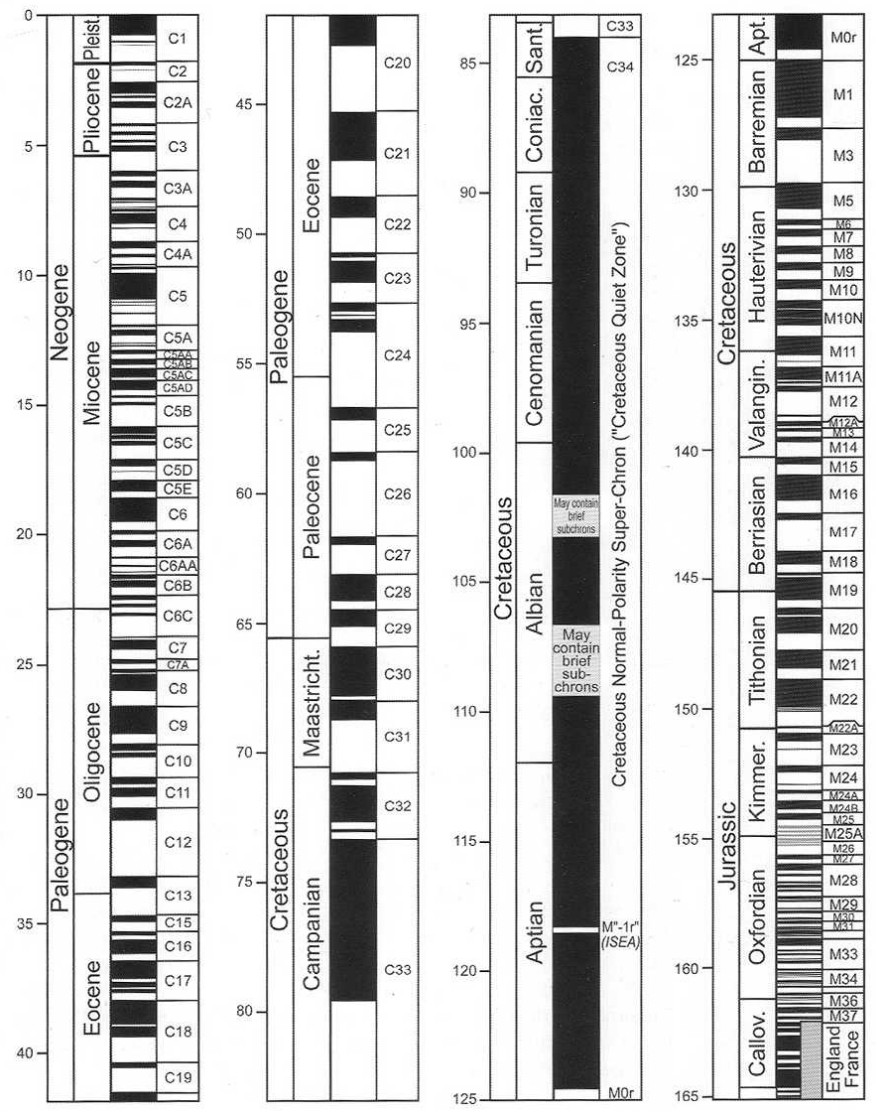
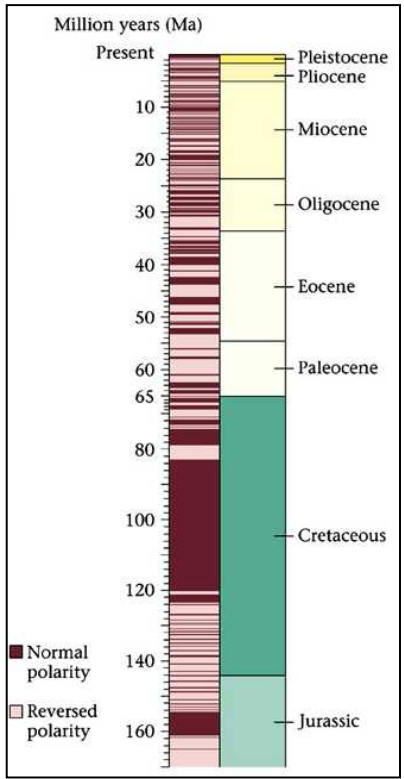
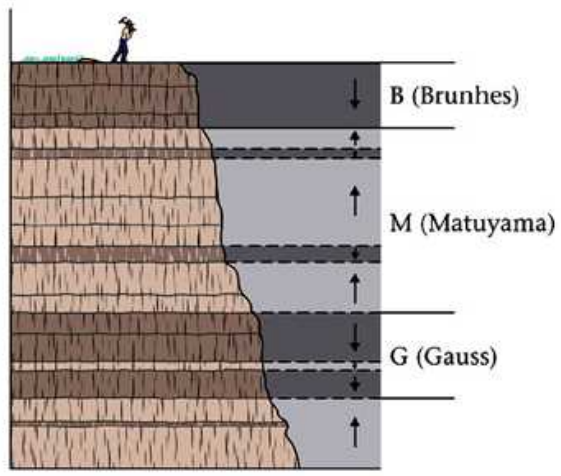
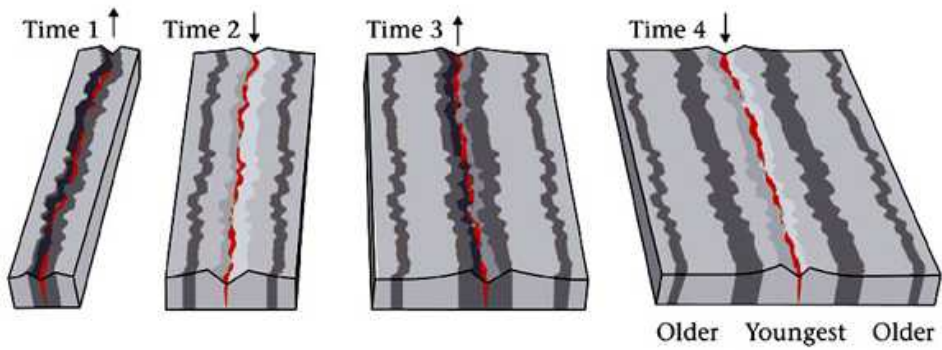


Fig. 1. Summary diagram of magnetic anomalies over the Juan De Fuca Ridge. Areas of positive polarity offsetting the anomaly within this area—from Fig. 15. (Based on Fig. 15.)



Magnetostratigraphie

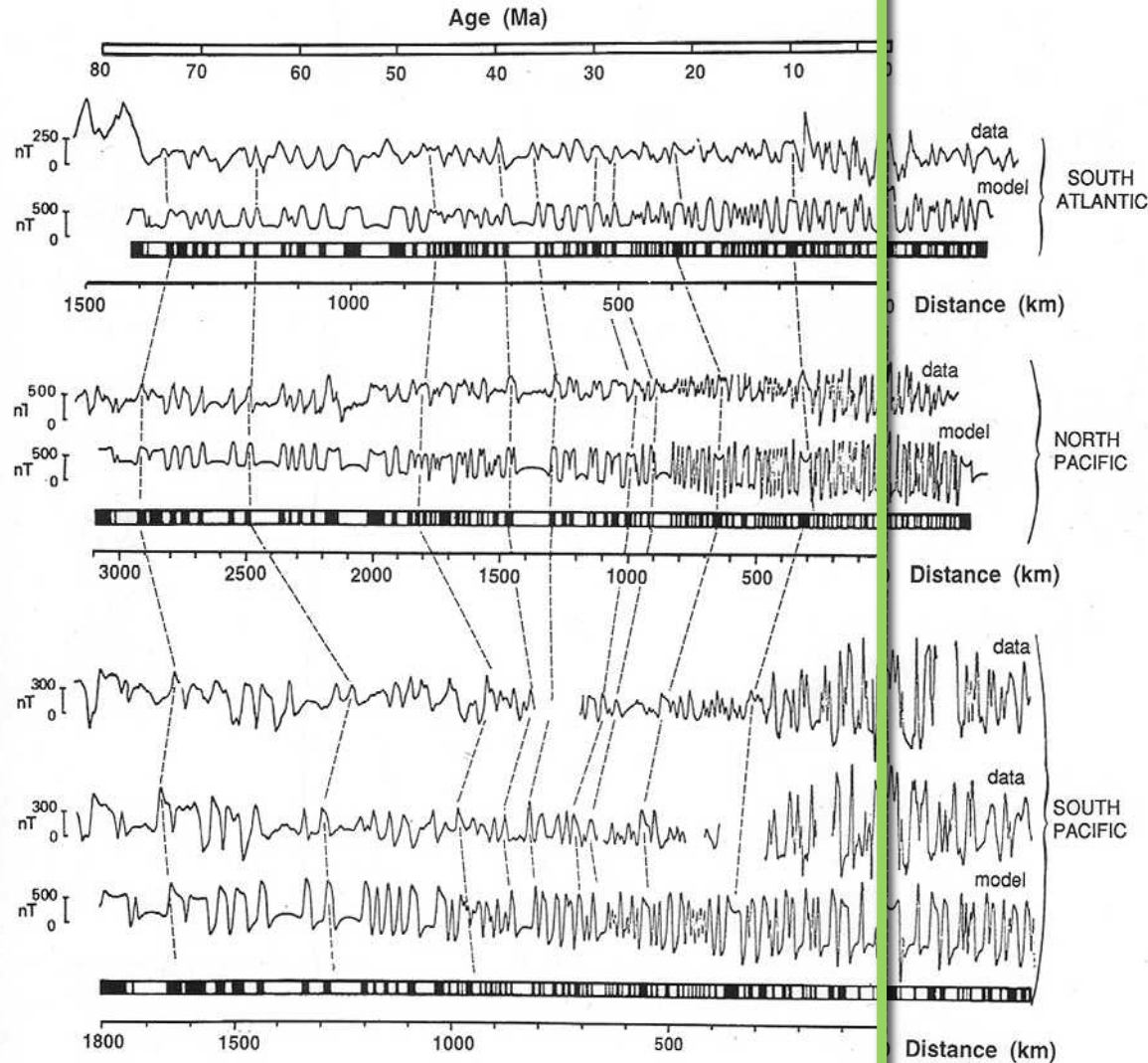


■ normale Magnetisierung

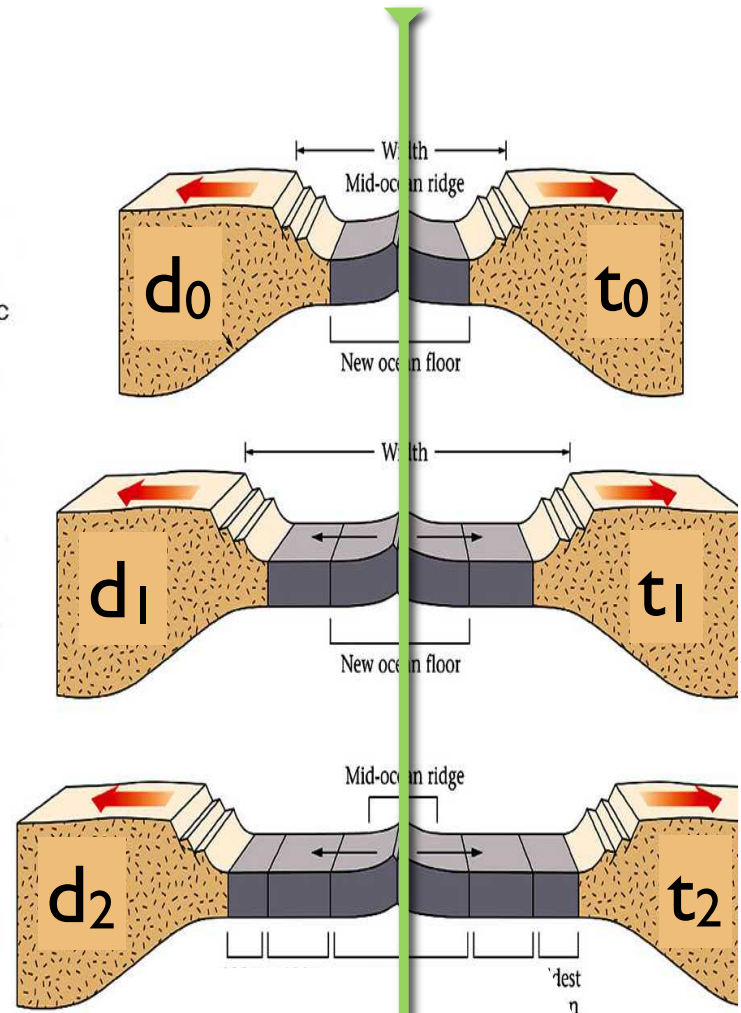
□ inverse Magnetisierung

unterschiedliche Spreizungsraten

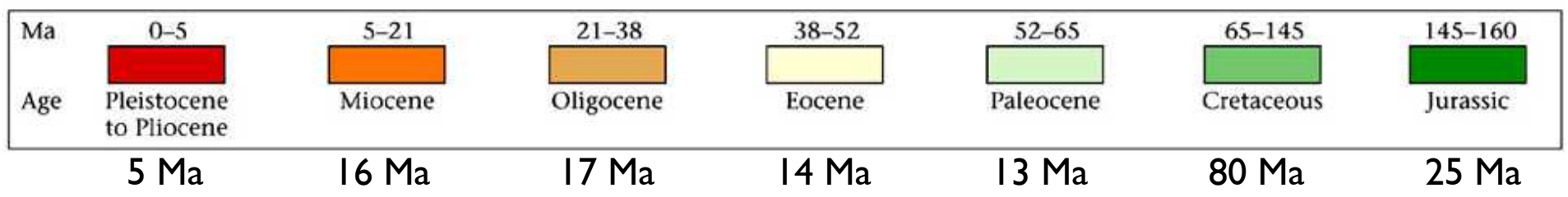
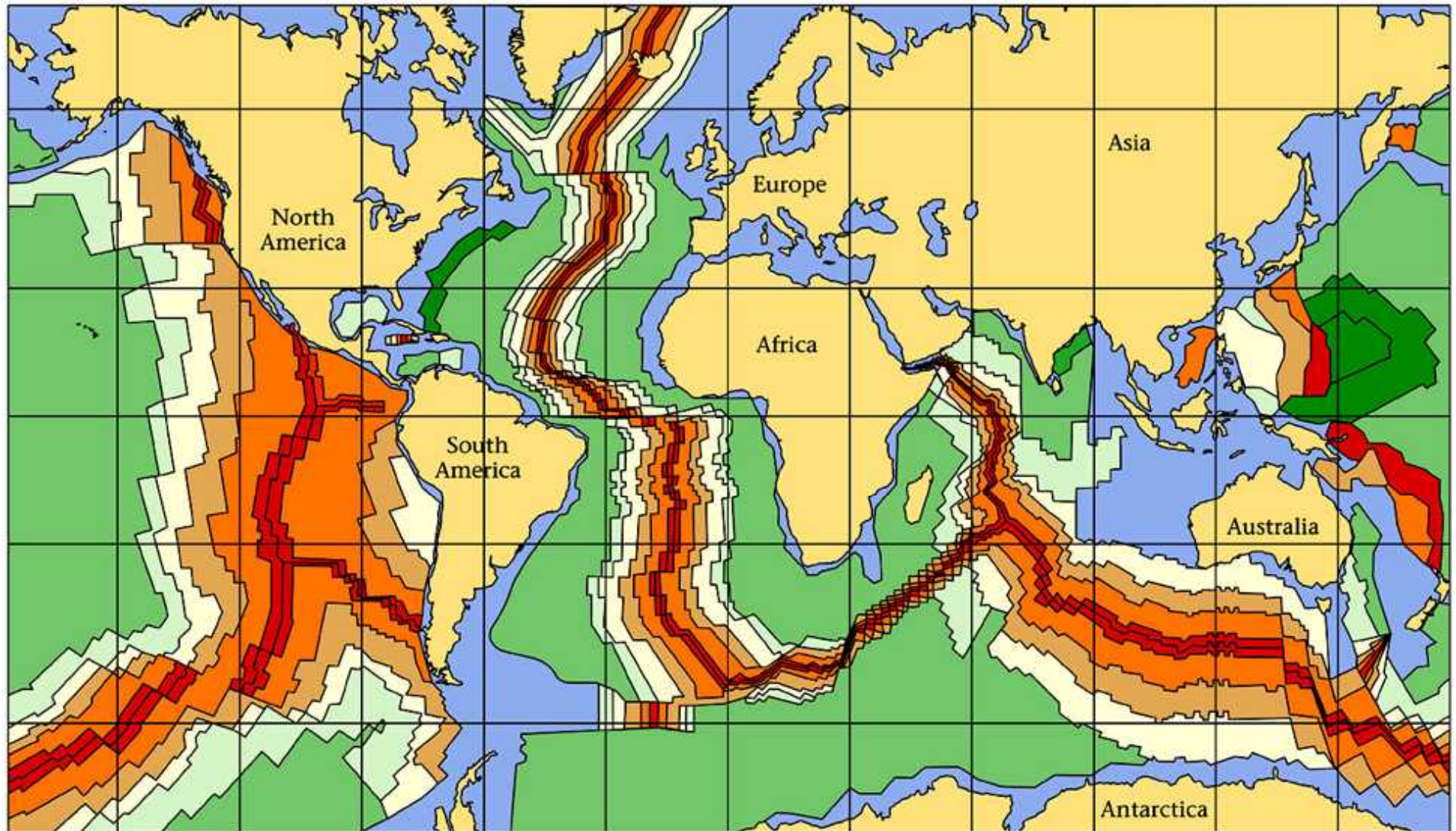
$t = \text{Alter}$



$d = \text{Distanz}$



Alter des Ozeanbodens



'anatomy of a
spreading ridge'

Spreizungsraten und Topographie

< 1 cm/a

ultra slow

Gakkel (Arktis) Nordamerika - Eurasien

1-5 cm/a

slow

Mittelatlantischer Rücken

ausgeprägter Kammgraben:

30 - 50 km breit 1500 - 300 m tief

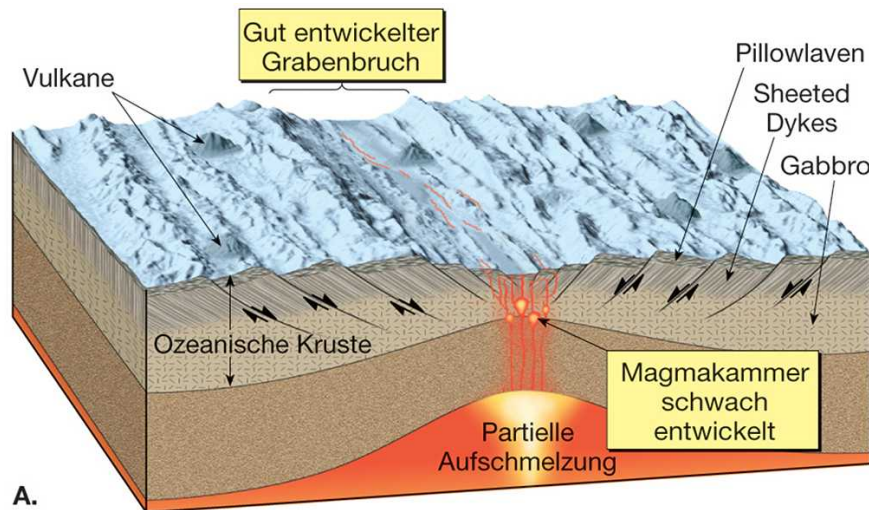
> 9 cm/a

fast

Ostpazifischer Rücken

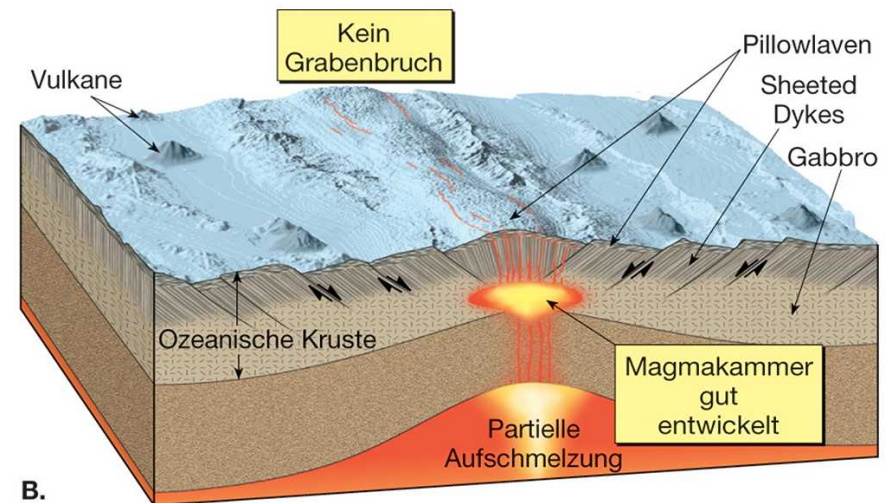
kein ausgeprägter Kammgraben

enge Zone mit Bruchbildung



A.

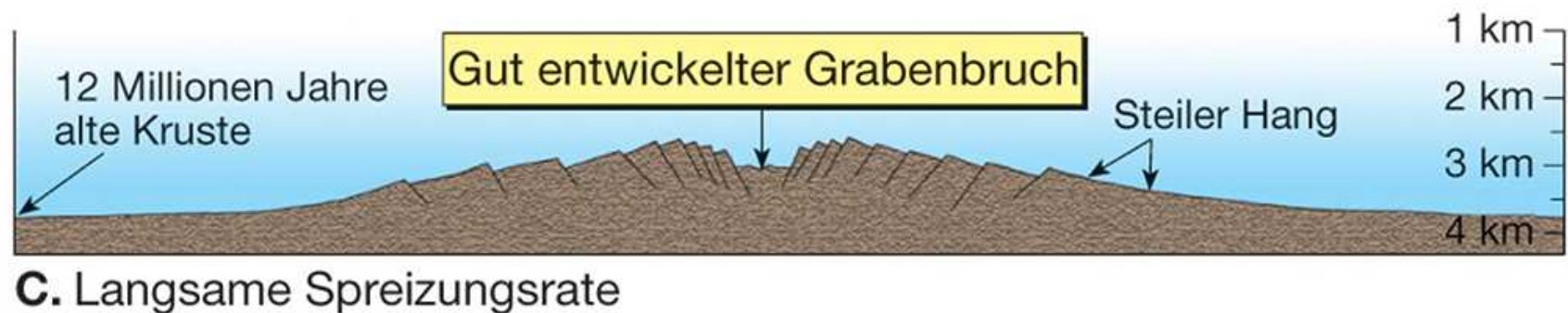
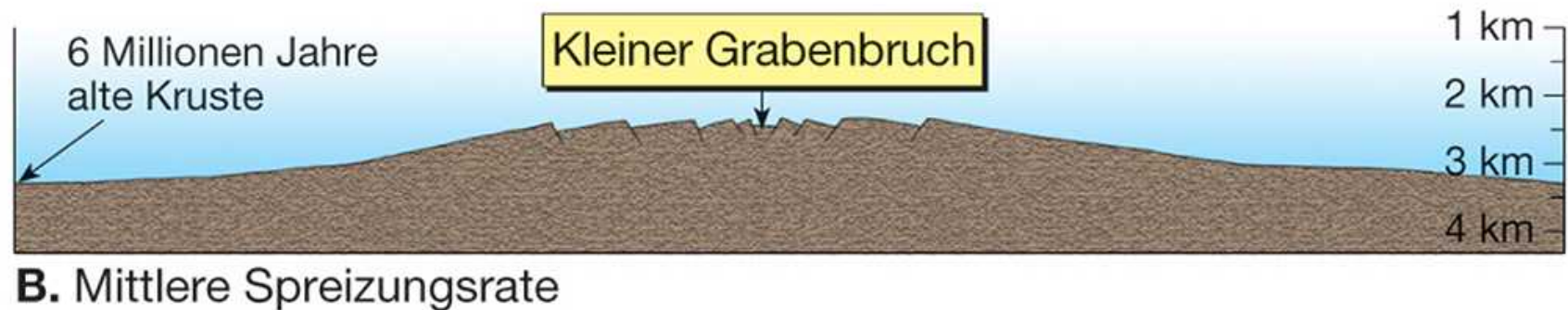
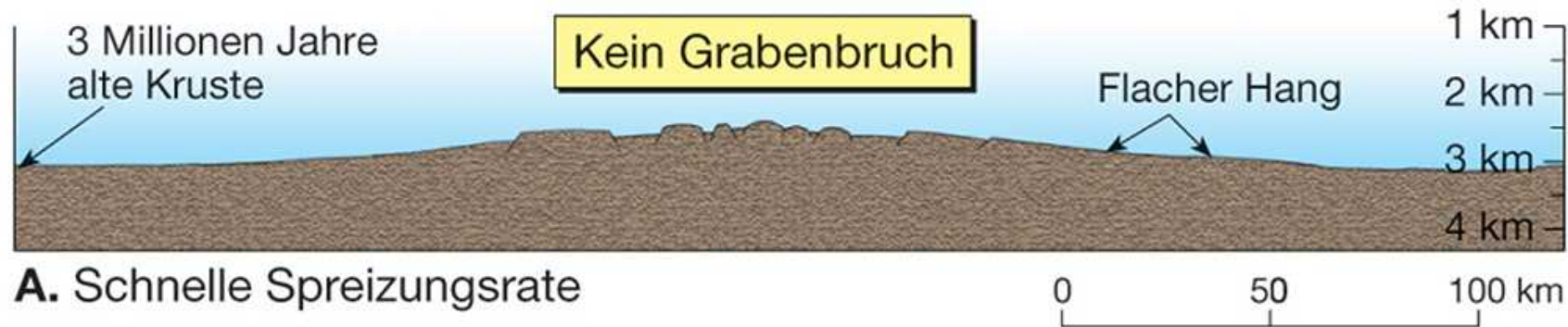
langsam



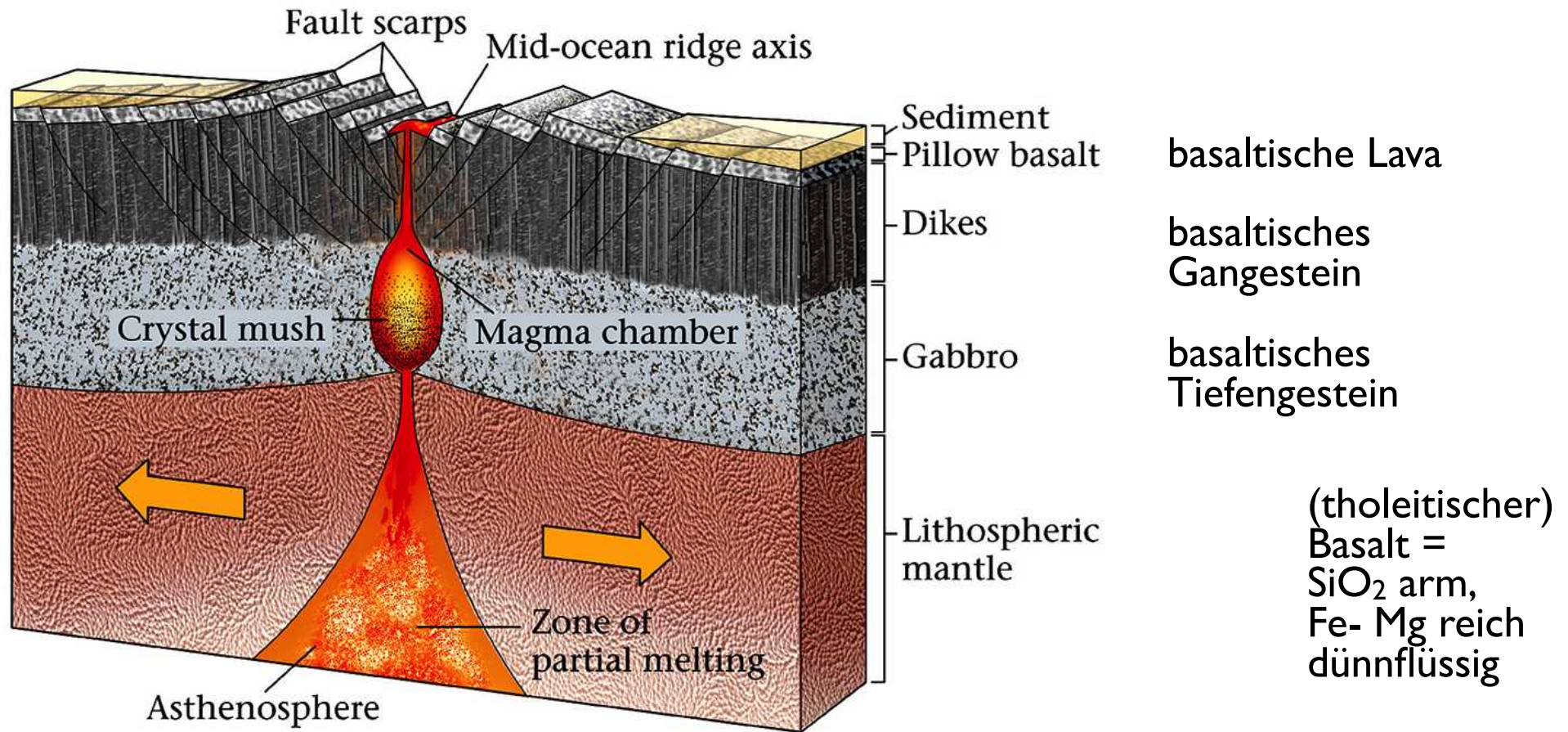
B.

schnell

schnell - mittel - langsam



Bildung ozeanischer Kruste

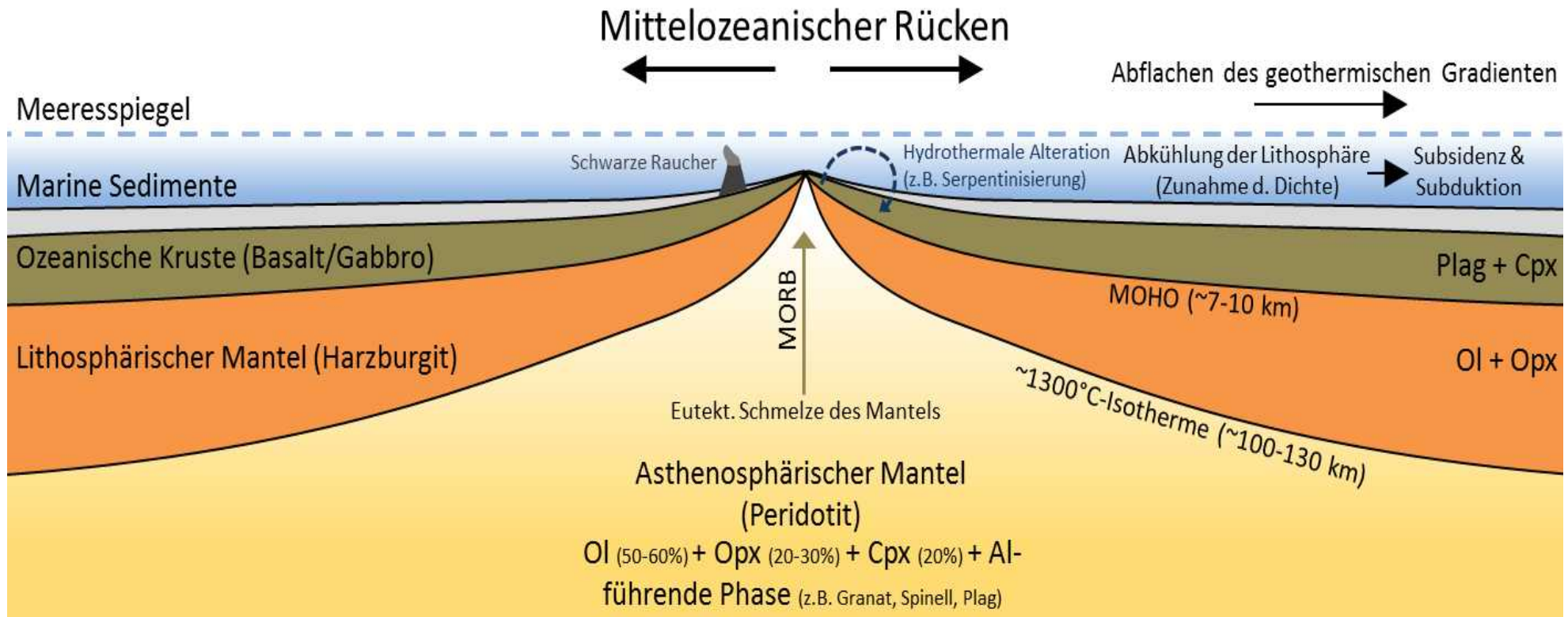


Basaltische Magmen aus partiell geschmolzenem Mantelperidotit

Injektion in Brüche → sheeted dyke complex

Submarine Laven werden abgeschreckt → Kissenlava (pillow basalt)

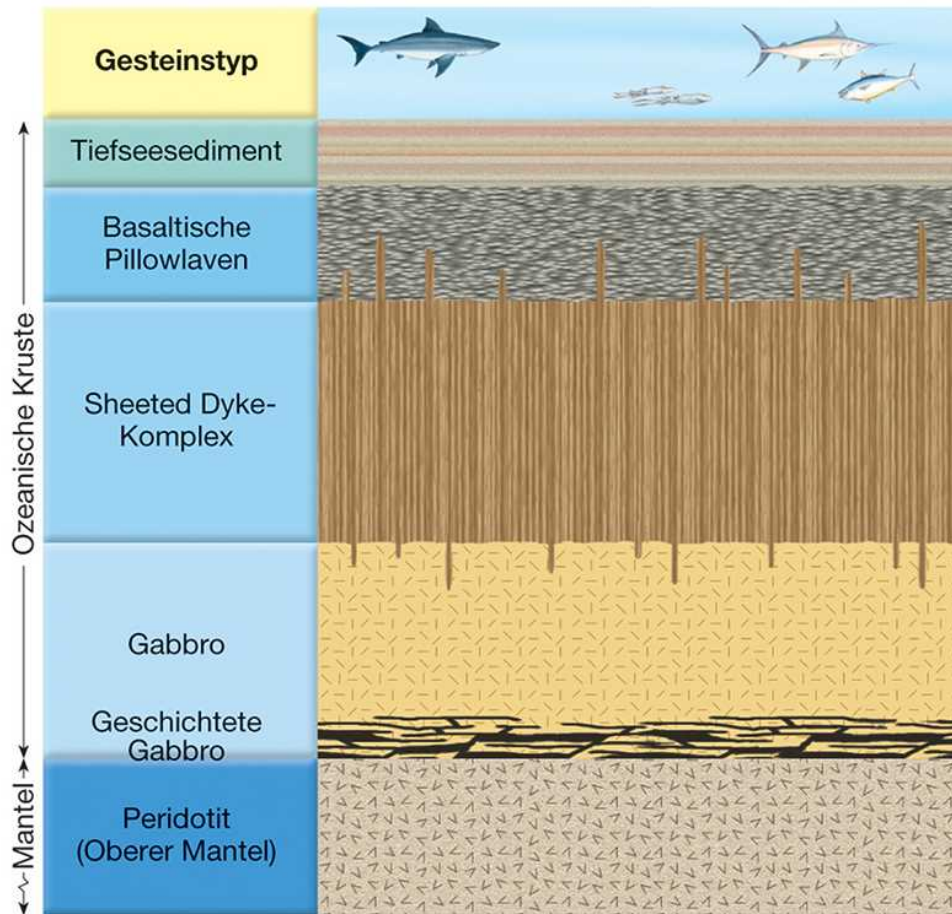
Mid-ocean ridge basalt (MORB)



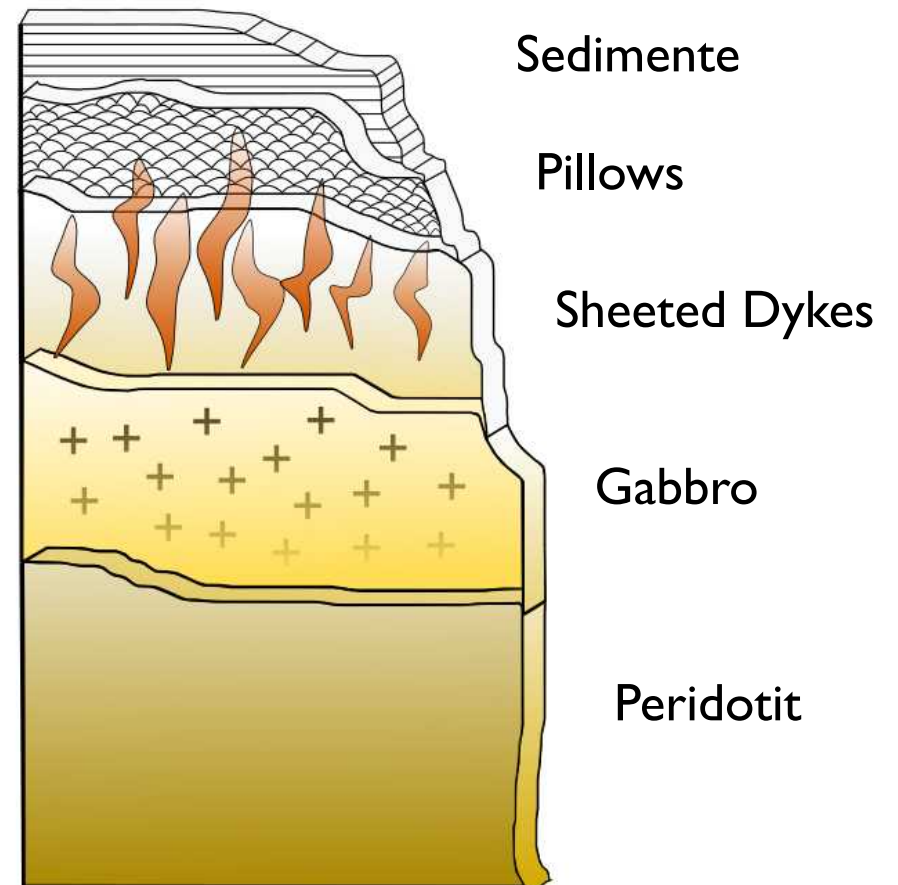
Druckentlastung: partielles Aufschmelzen des Mantelgesteins (= Peridotit)
Peridotit (Olivin, Ortho-, Klinopyroxene) → Basalte (Plagioklas, Clinopyroxen)
Zurück bleibt Harzburgit (Olivin, Orthopyroxen) (= depleted mantle)
MORB (mid-ocean ridge basalt) sind trocken <0.3 w% H₂O
zum Vergleich: Back-arc Basalte 1-1.5 w% H₂O

Ophiolite

Ozeanische Kruste



Ophiolit-Komplex: exhumierte ozeanische Kruste + Mantel



Bildung von Kissenlava (pillow lava)

<http://www.scilogs.de/wblogs/blog/mente-et-malleo/geologie/2011-07-07/geo-video-bildung-von-kissenlava>

<http://www.youtube.com/watch?v=DdIUuUY0L9c>



pillow lava (New Zealand)

4 aktive Plattengrenzen

Typ 2: Destruktive Plattengrenzen

- Ozean - Ozean
- Ozean - Kontinent
- Kontinent - Kontinent

Subduktion

Isostasie

Typ 3: Konservative Plattengrenzen

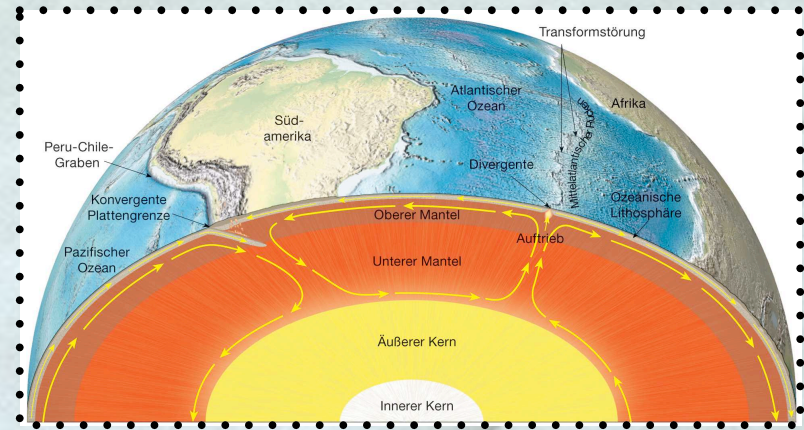
Hot Spots

Plattenbewegungen

- relative
- absolute

destruktive
Plattengrenzen

wohin mit der Lithosphäre ?



Produzierte Fläche pro Jahr:

= Länge aller Ozeanrücken (km) · Spreizungsrate (cm / a)

= 70 000 km · 7cm / a

= $70 \cdot 10^6 \text{ m} \cdot 0.07 \text{ m / a} \approx 5 \cdot 10^6 \text{ m}^2 / \text{a} \approx 5 \text{ km}^2 / \text{a}$

Erdoberfläche $\approx 500 \text{ Mio km}^2 \approx 5 \cdot 10^8 \text{ km}^2$

\Rightarrow Produzierte Fläche pro Jahr = 10^{-8} Erdoberfläche

Verdoppelung in 100 Ma !!

destruktive Plattengrenze: 3 Typen

Plattengrenzen: 3 Typen

konstruktive

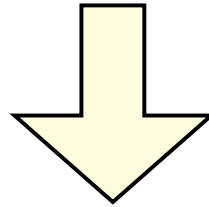
distensive

destruktive

kompressive

konservative

Transform-



Destruktive Plattengrenzen: 3 Typen

Ozean

↔

Ozean

Ozean

↔

Kontinent

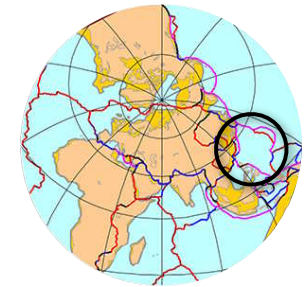
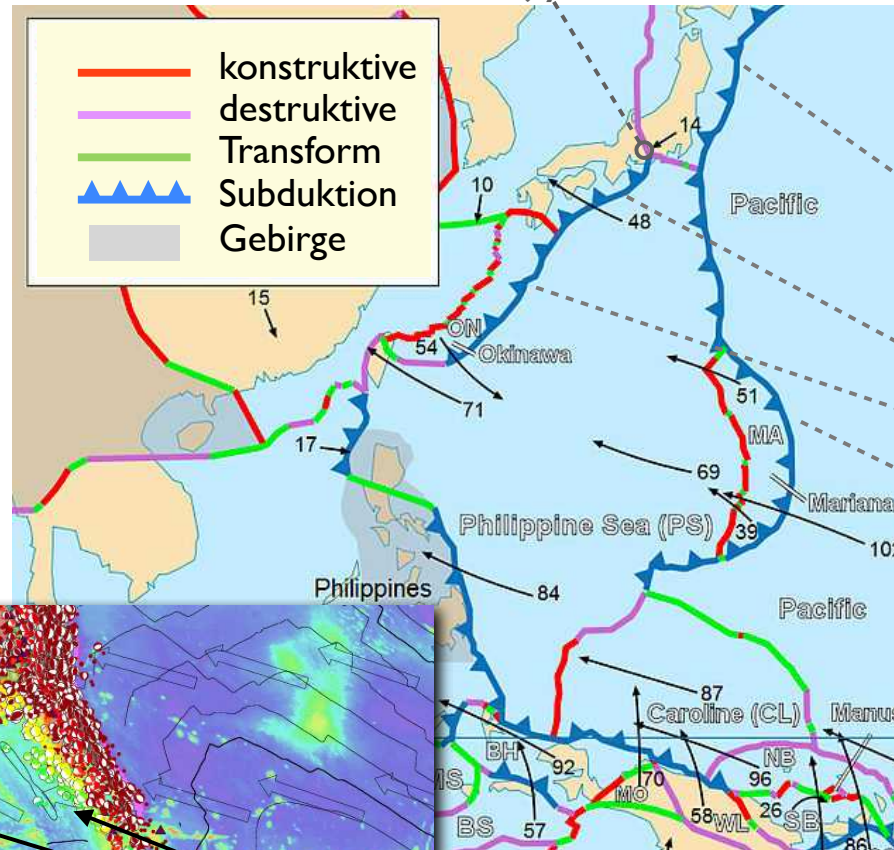
Kontinent

↔

Kontinent

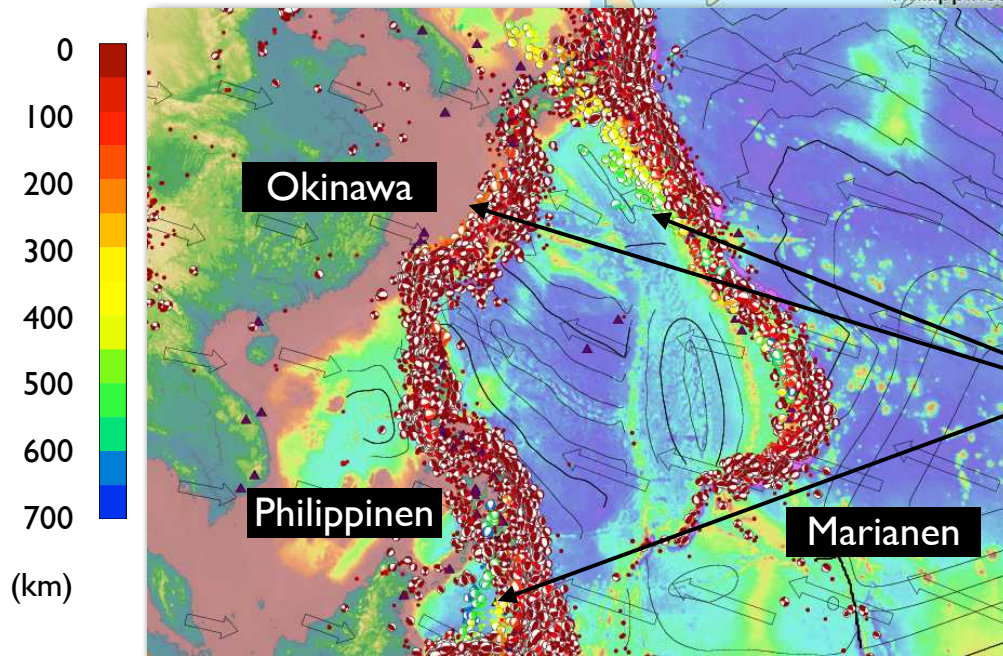
Ozean - Ozean

Fujiyama



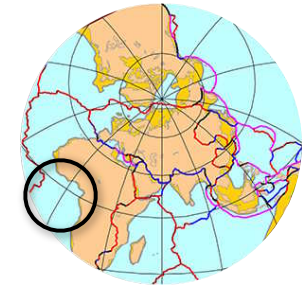
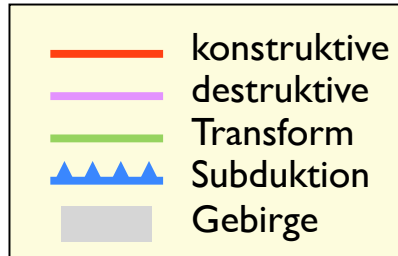
Kuril-Kamtschatka-Graben
Nankai-Graben
Ryukyu-Graben
Marianen-Graben

Plattenbewegung
(mm/Jahr)
bezüglich Afrika

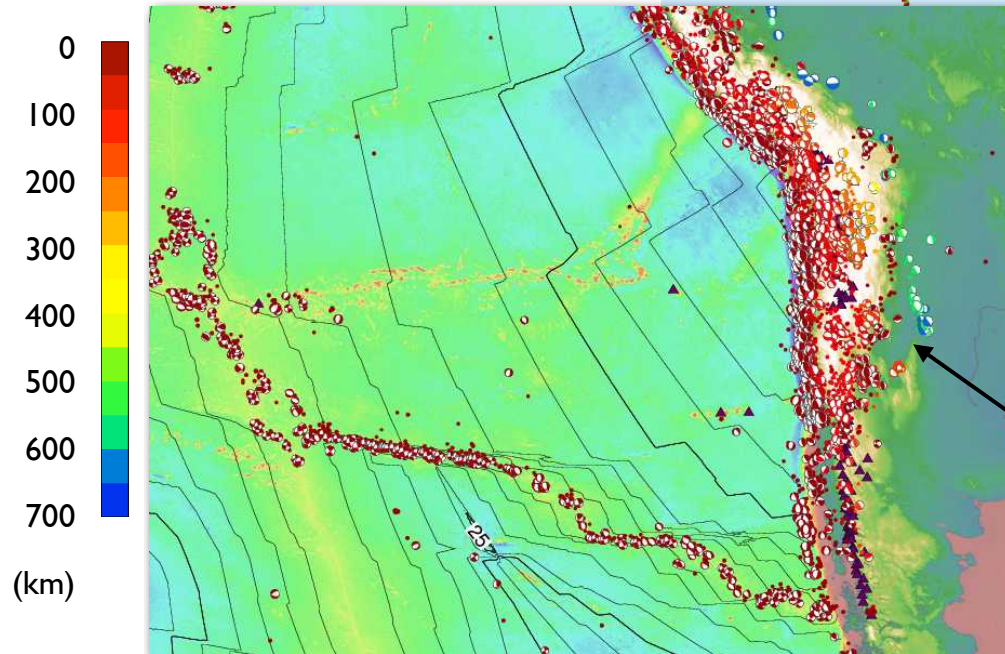


fortschreitend tiefere Beben

Ozean - Kontinent

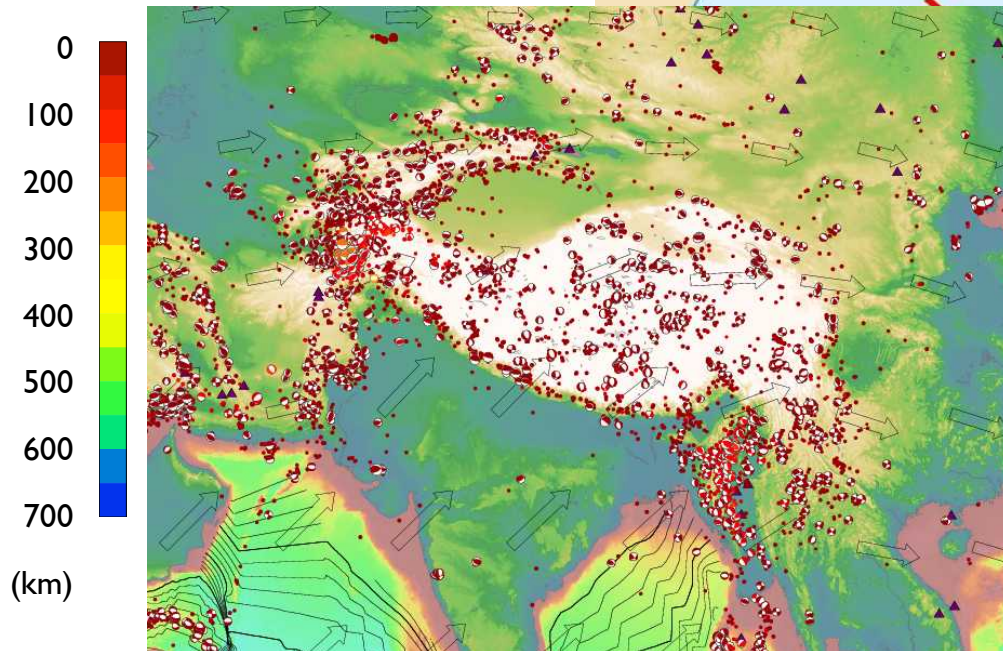
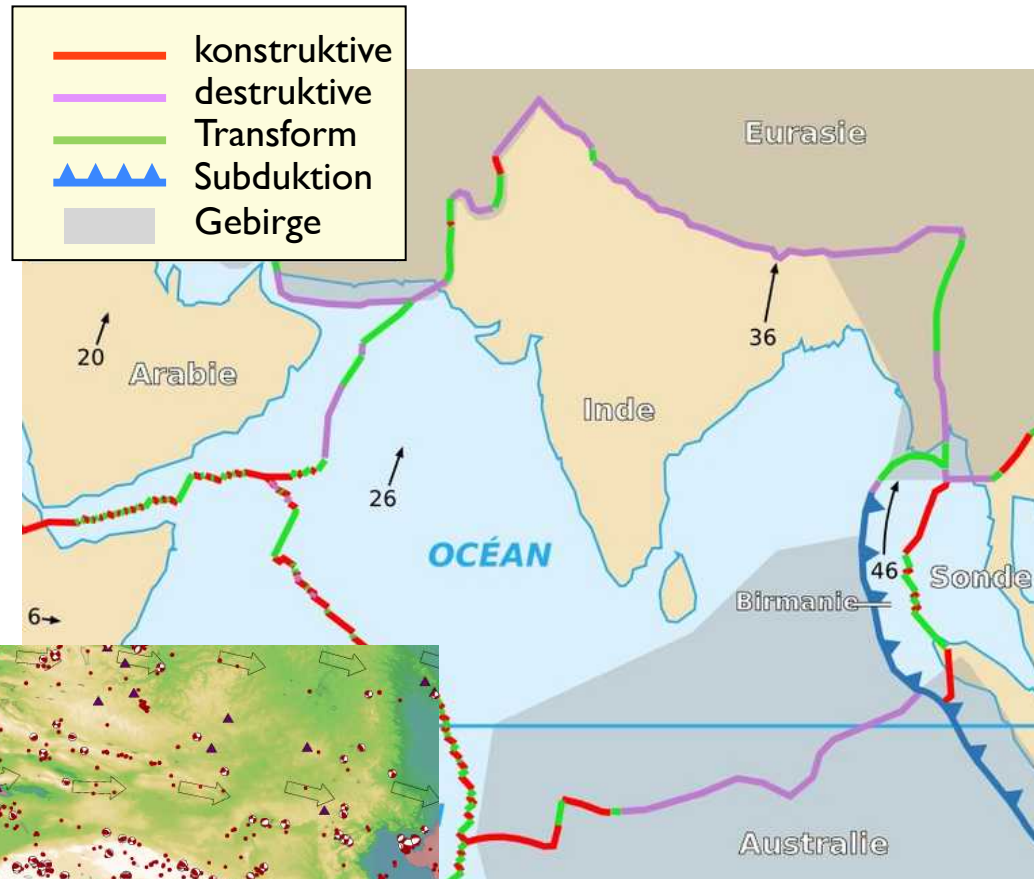


Plattenbewegung
(mm/Jahr)
bezüglich Afrika



fortschreitend tiefere Beben

Kontinent - Kontinent

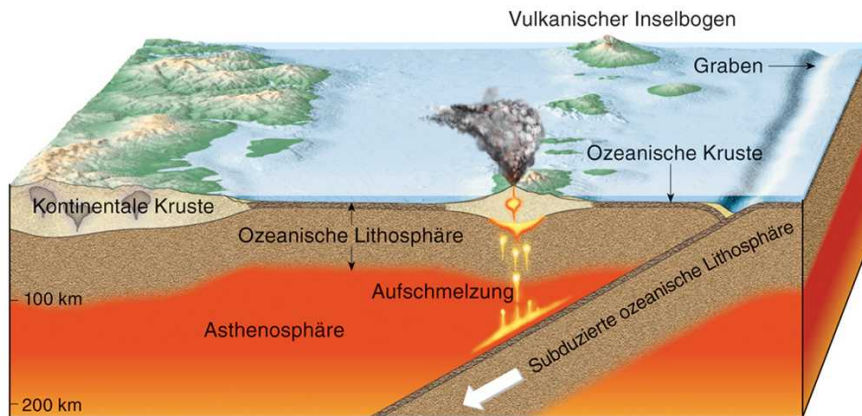


Plattenbewegung
(mm/Jahr)
bezüglich Afrika

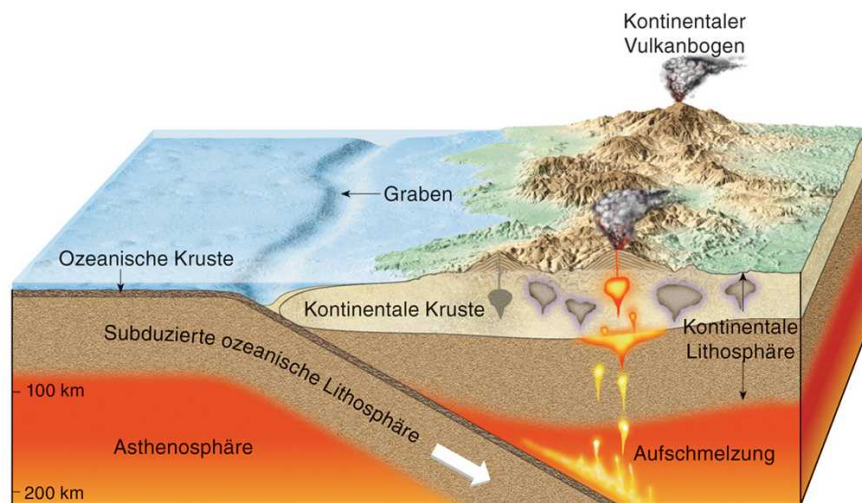
vorwiegend seichte Beben

Subduktion

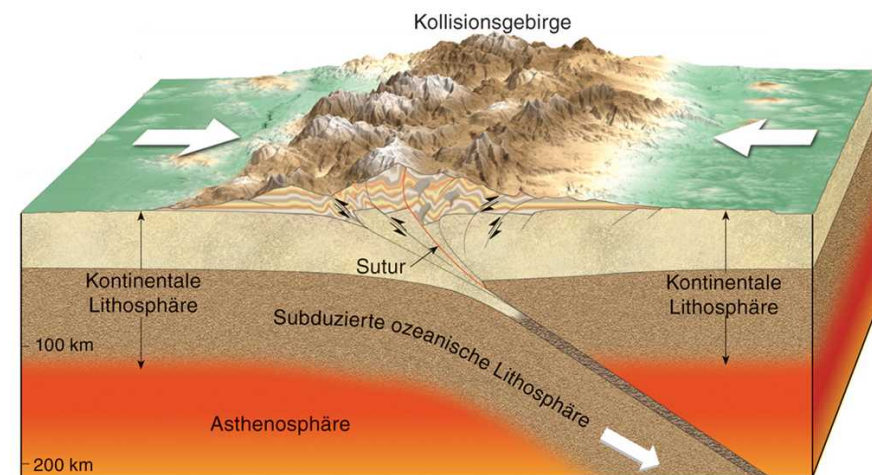
Plattenkonvergenz



(1) Ozean - Ozean
dichtere Platte sinkt hinunter
Vulkanismus am Ozeanboden
→ **Vulkanische Inselbögen**
Beispiele: Japan, Aleuten, Tonga

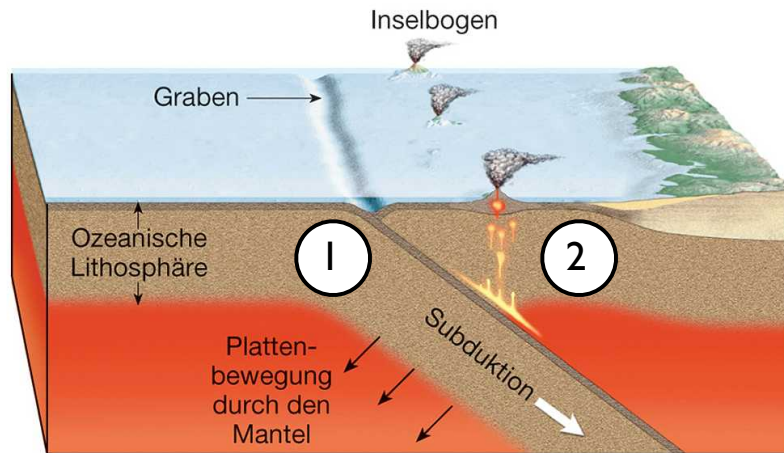


(2) Ozean - Kontinent
dichtere Platte (= ozeanische) sinkt hinunter
Aufschmelzung in überschobener Platte
→ **Kontinentale Vulkanbögen**
Beispiele: Anden, Cascades (USA)

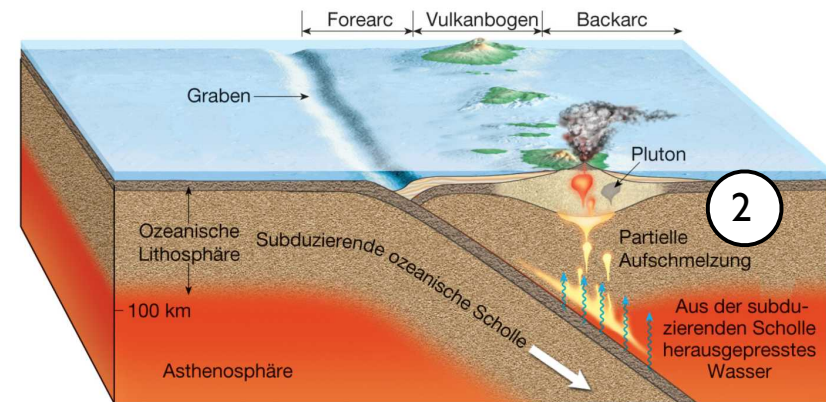


(3) Kontinent - Kontinent
fortgesetzte Subduktion → kontinentale
Kollision, dichtere Platte wird subduziert
→ **Kollisionsgebirge**
Beispiele: Himalaya, Alpen, Appalachen

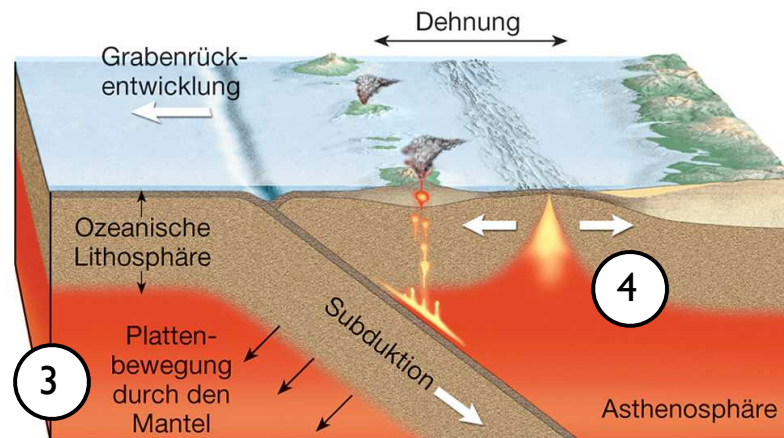
Vulkanische Inselbögen



1 Asymmetrie: eine Platte wird subduziert

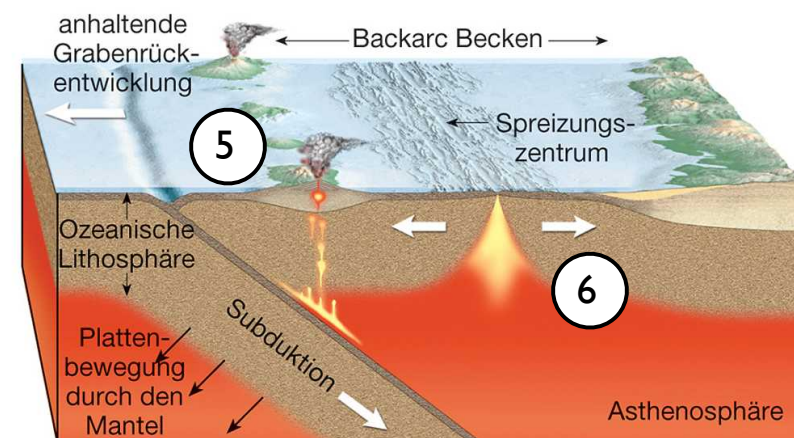


2 Wasser → Aufschmelzung und Vulkanismus (kalk-alkaliner Vulkanismus)



3 Subduzierte Platte sinkt ab: roll-back führt zu trench suction, deshalb:

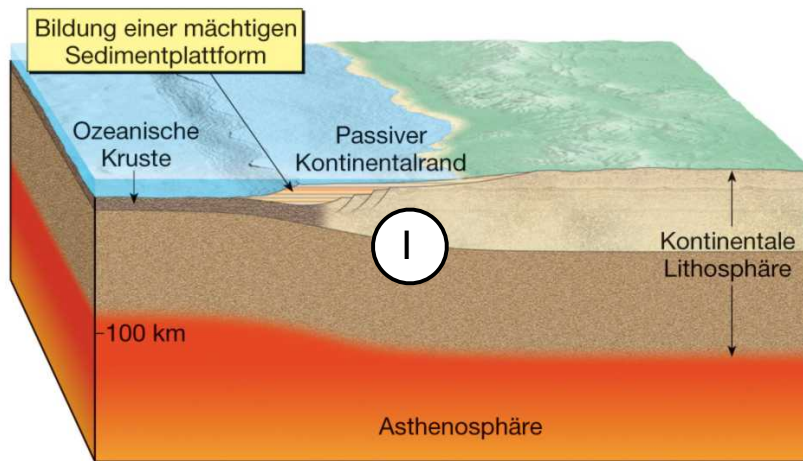
4 Kruste dehnt sich, Magma steigt auf



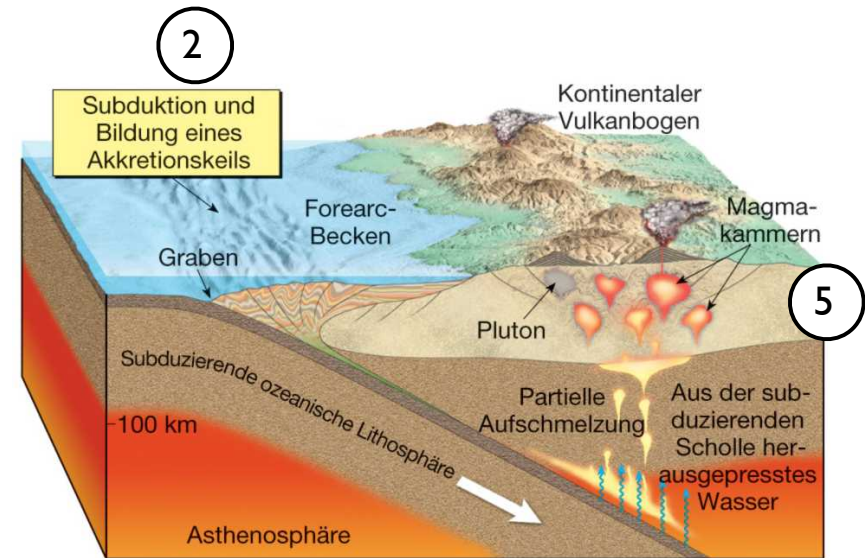
5 Vulkanismus führt zu Inseln

6 Ozeanbodenspreizung: back arc spreading

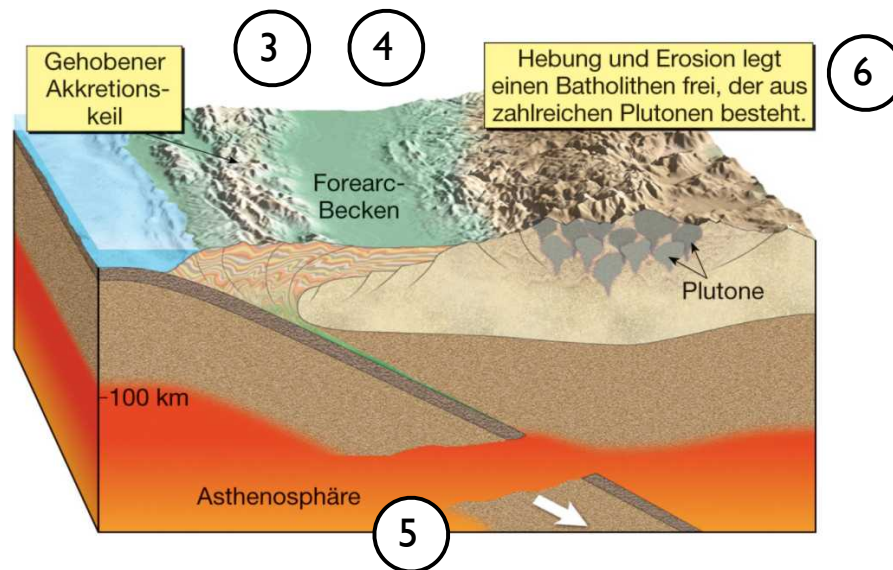
Kontinentale Vulkanbögen



1 Bildung einer Sedimentplattform
= Passiver Kontinentalrand

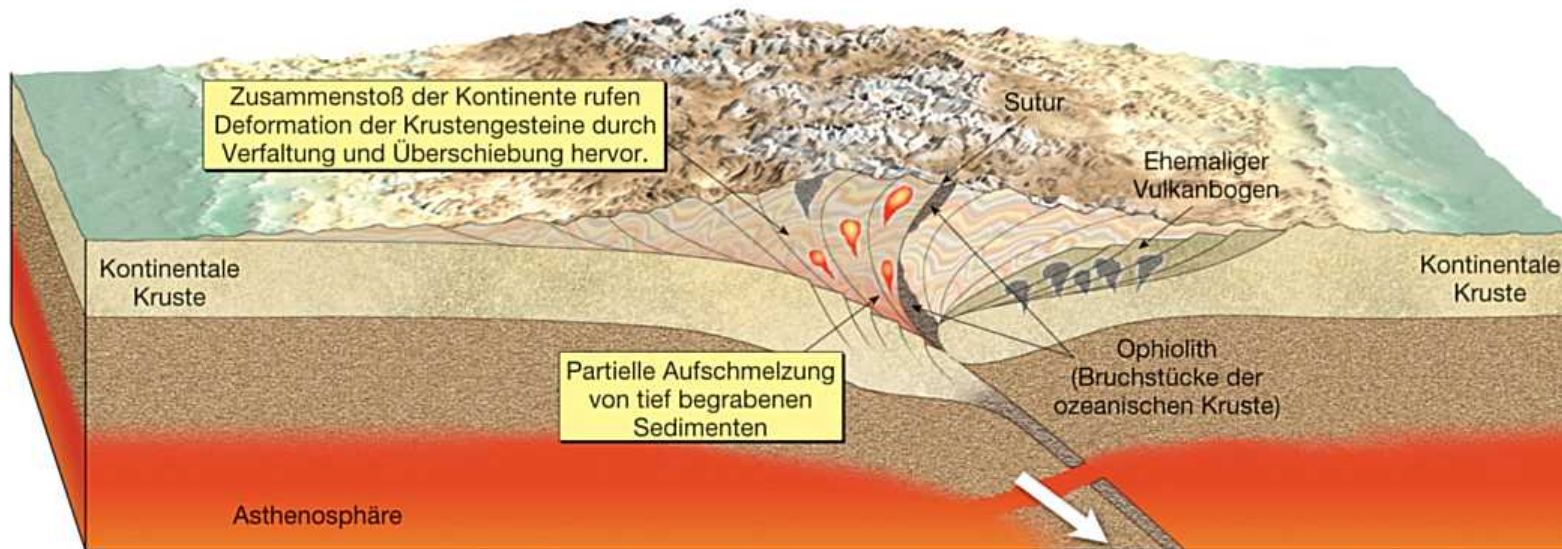
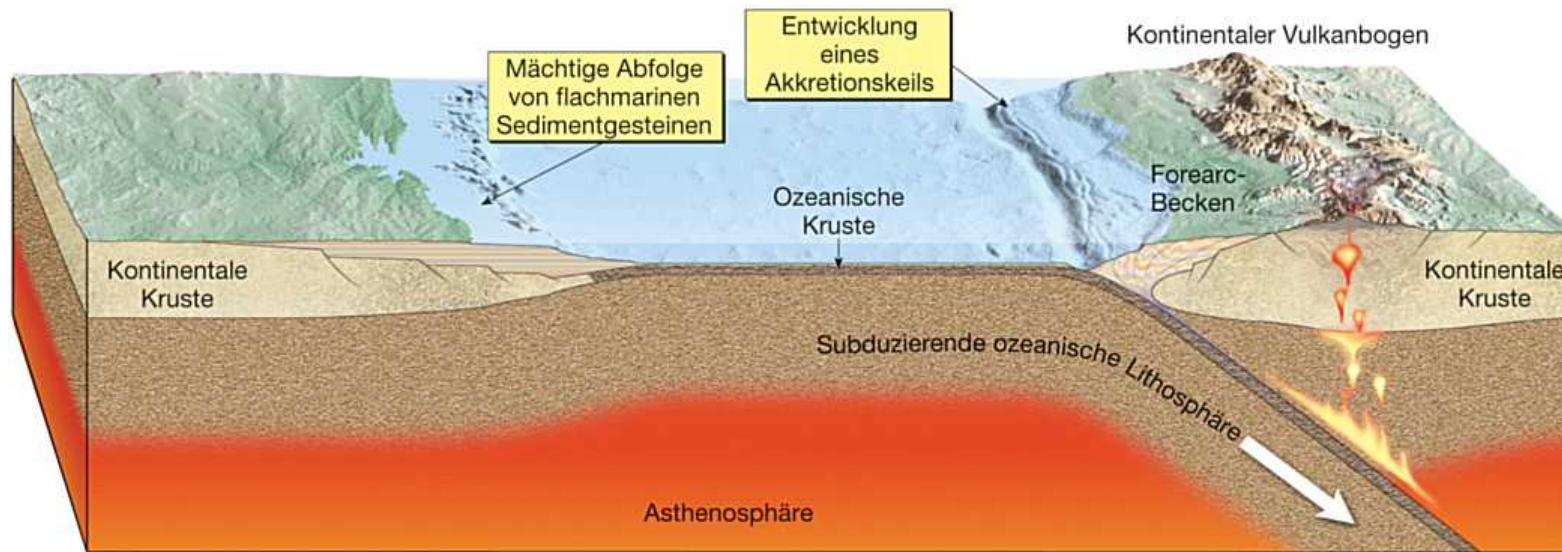


2 Subduktion → Graben →
Forearcbecken → Akkretionskeil

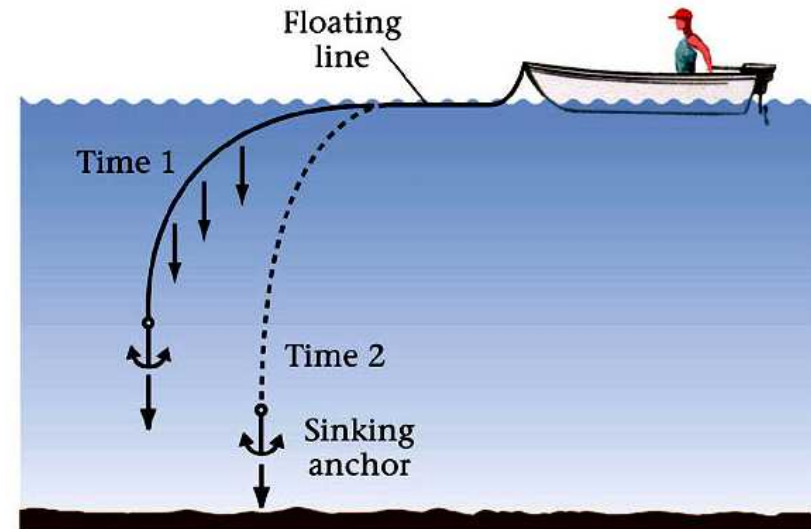
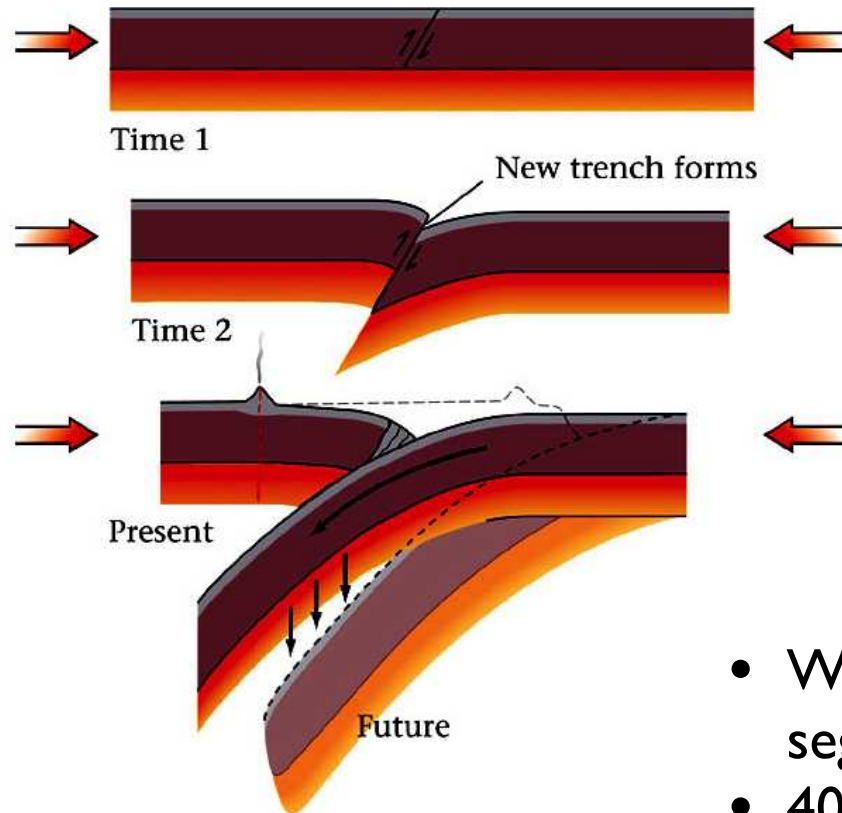


3 Hebung des Akkretionskeils
4 Forearcbecken gehoben
5 Slab break-off → Plutone
(kalk-alkaliner Magmatismus, Andesite)
6 Hebung und Erosion

Subduktion → Kollision → Orogenese



'hinge-rollback'



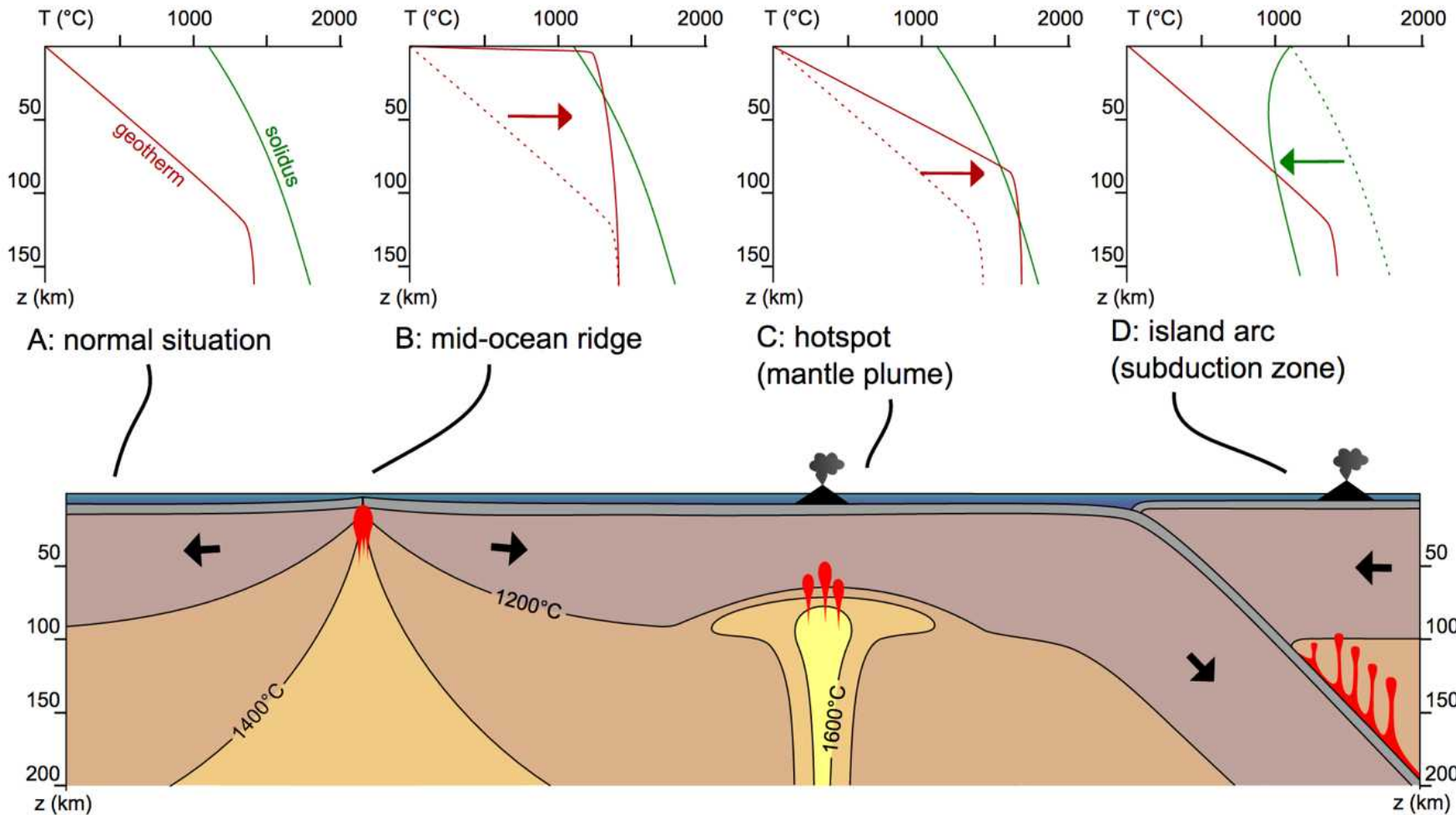
Stephen Marshak: Earth: Portrait of a planet

- Weltweit ca. 50 unterscheidbare Subduktions-segmente
- 40% sind vom Typ: Ozean-Ozean
- Alle ozean-ozean Systeme zeigen hinge-rollback (Ausnahme: Mariana, Kermadec)
- Schnellster hinge-rollback im Tonga Graben: 17 cm/Jahr

Entstehung von Magmen

erhöhte Temperatur

gesenkter Schmelzpunkt



MORB

mid-ocean ridge basalt

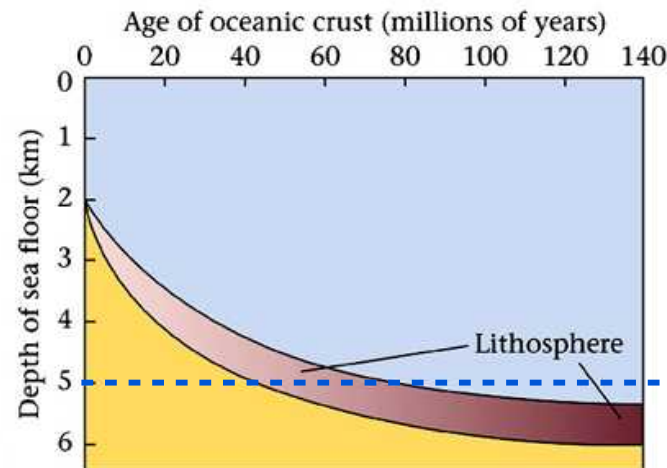
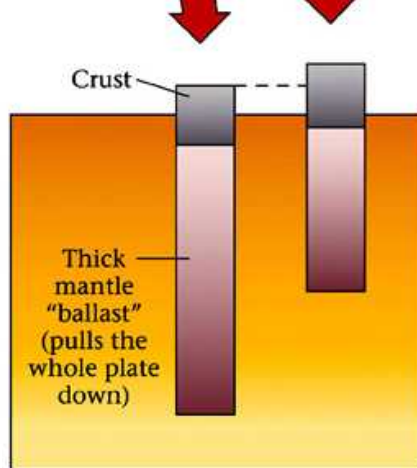
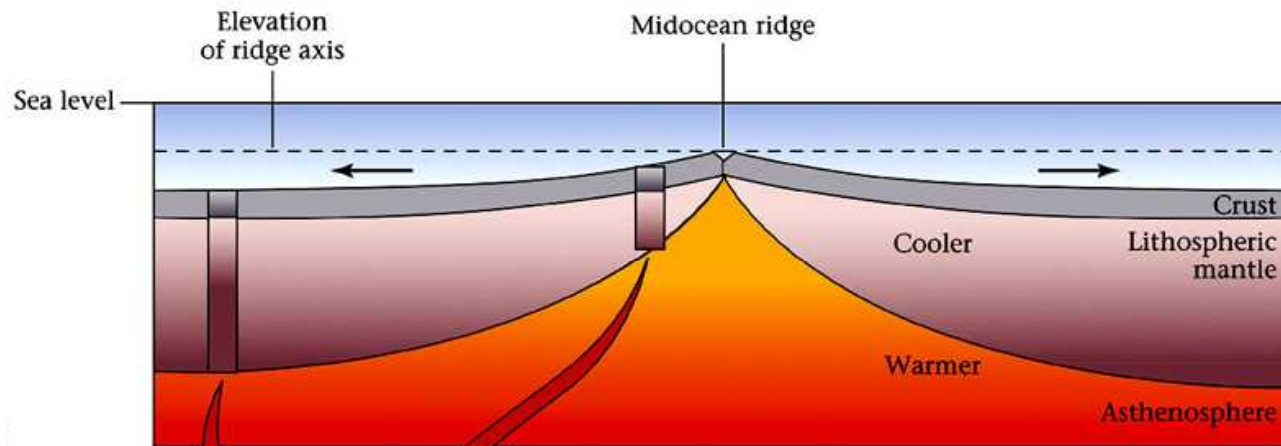
OIB

ocean island basalt

calc alkaline magmatism

Isostasie

Isostatisches Gleichgewicht

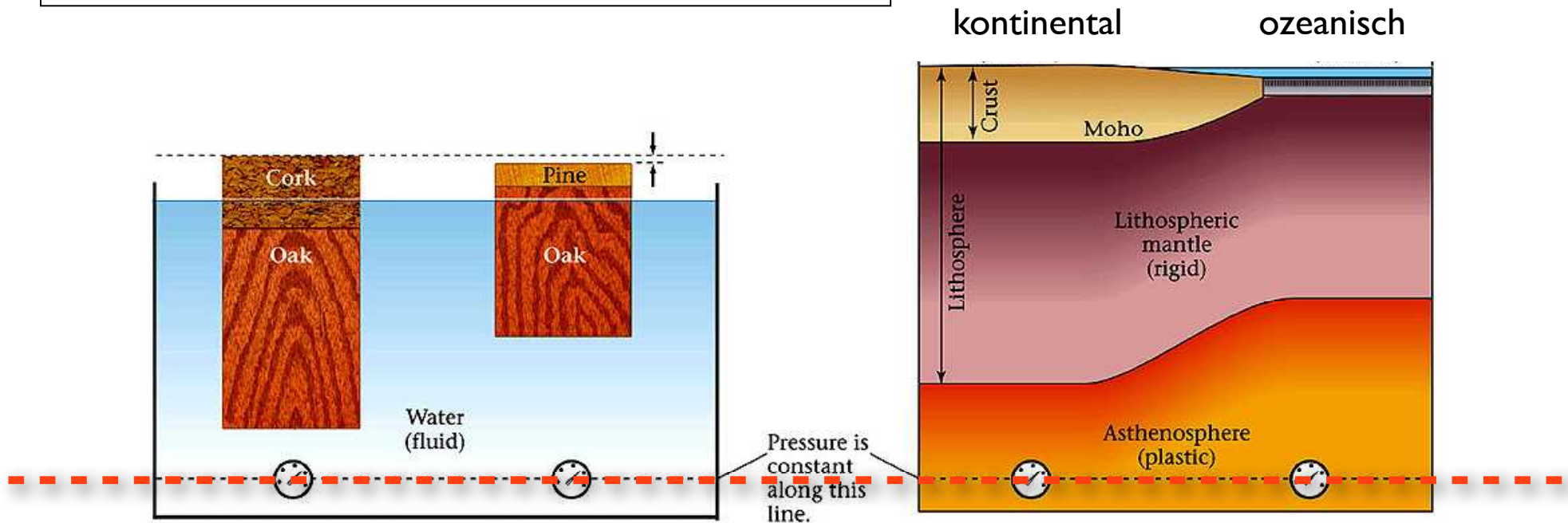


CCD:
calcite compensation depth
Kalzium-Kompensationstiefe

junge versus alte Lithosphärenplatte

Prinzip der Isostasie

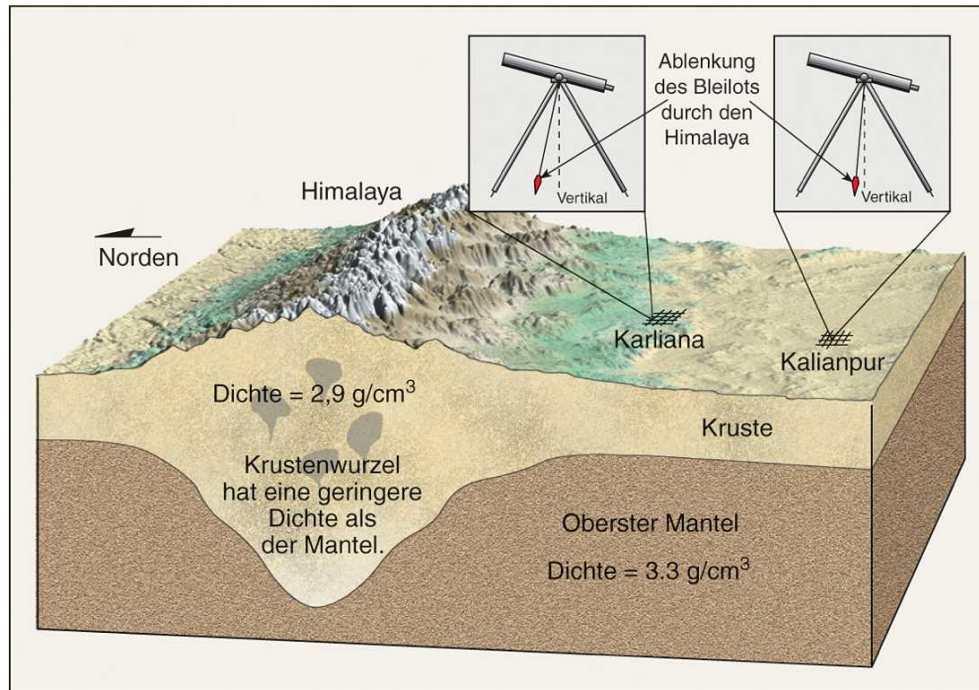
Kontinentale versus ozeanische Lithosphäre



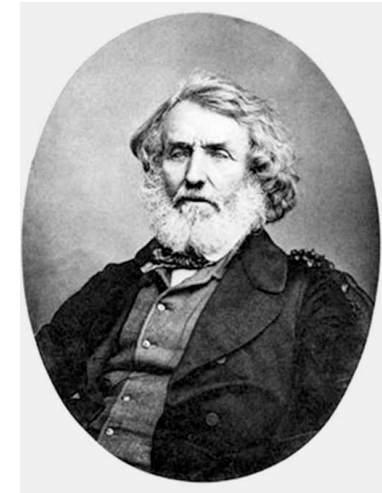
Kompensationstiefe = Referenzhorizont

- Weniger dichte Kruste / Lithosphäre / Schicht (ρ_L) schwimmt auf den dichteren Gesteinen des Mantels / der Asthenosphäre / des Substrates (ρ_S)
- Das Konzept eines Schwimmgleichgewichtes nennt man Isostasie.
- Wird Gewicht zugeführt oder weggenommen von der Kruste / Lithosphäre / Schicht, stellt sich das isostatische Gleichgewicht wieder ein, indem die Kruste / Lithosphäre / Schicht absinkt oder aufsteigt.

Schweremessungen



Pierre Bouguer
(1698 - 1758)



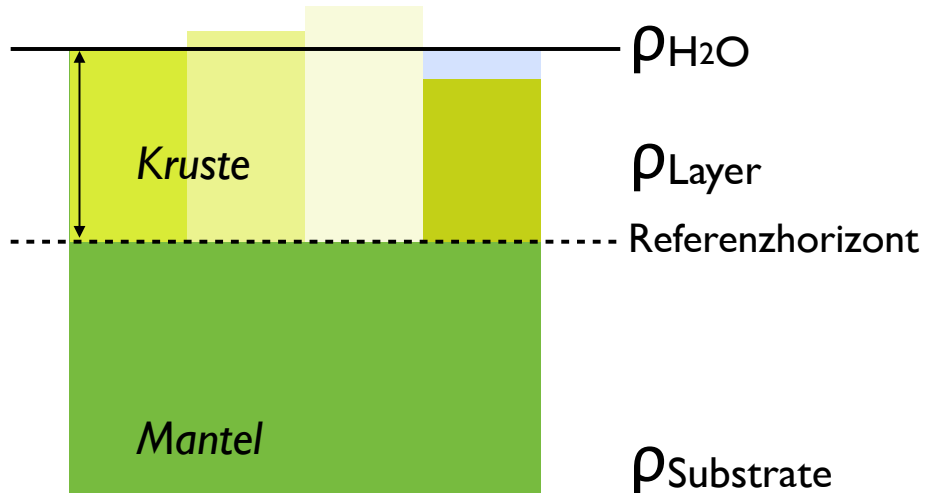
Sir George Everest
(1790 - 1866)

18. Jh. Bouguer misst in den Anden (1735-1745)

19. Jh. Everest misst im Himalaya (1823-1843)

Beide messen zu wenig Lotabweichung

Isostasie-Modelle

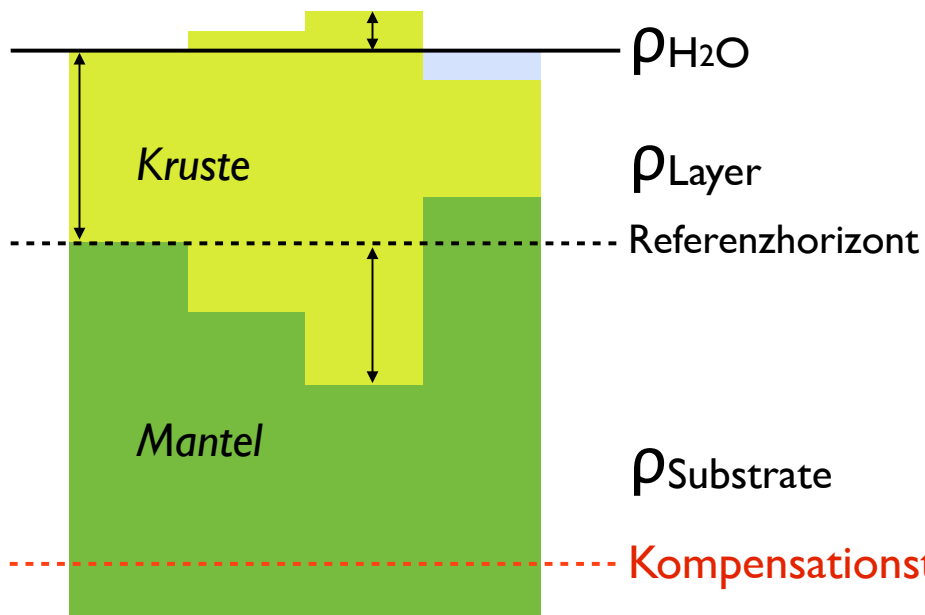


Pratt Modell

verschiedene Dichte
selbe Tiefe

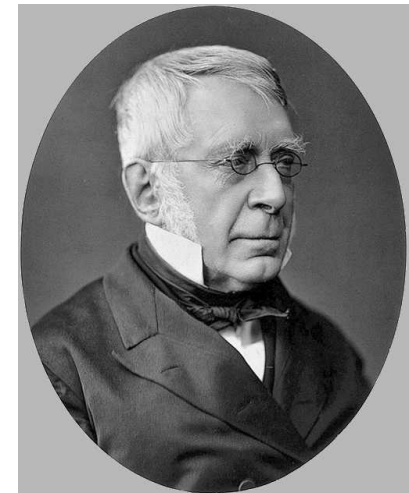


John Henry Pratt
(1809 - 1871)



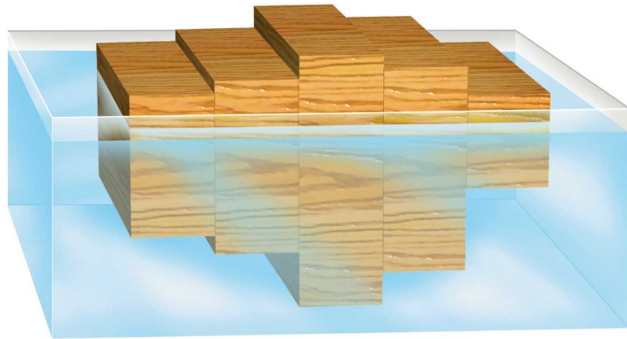
Airy Modell

selbe Dichte
verschiedene Tiefe

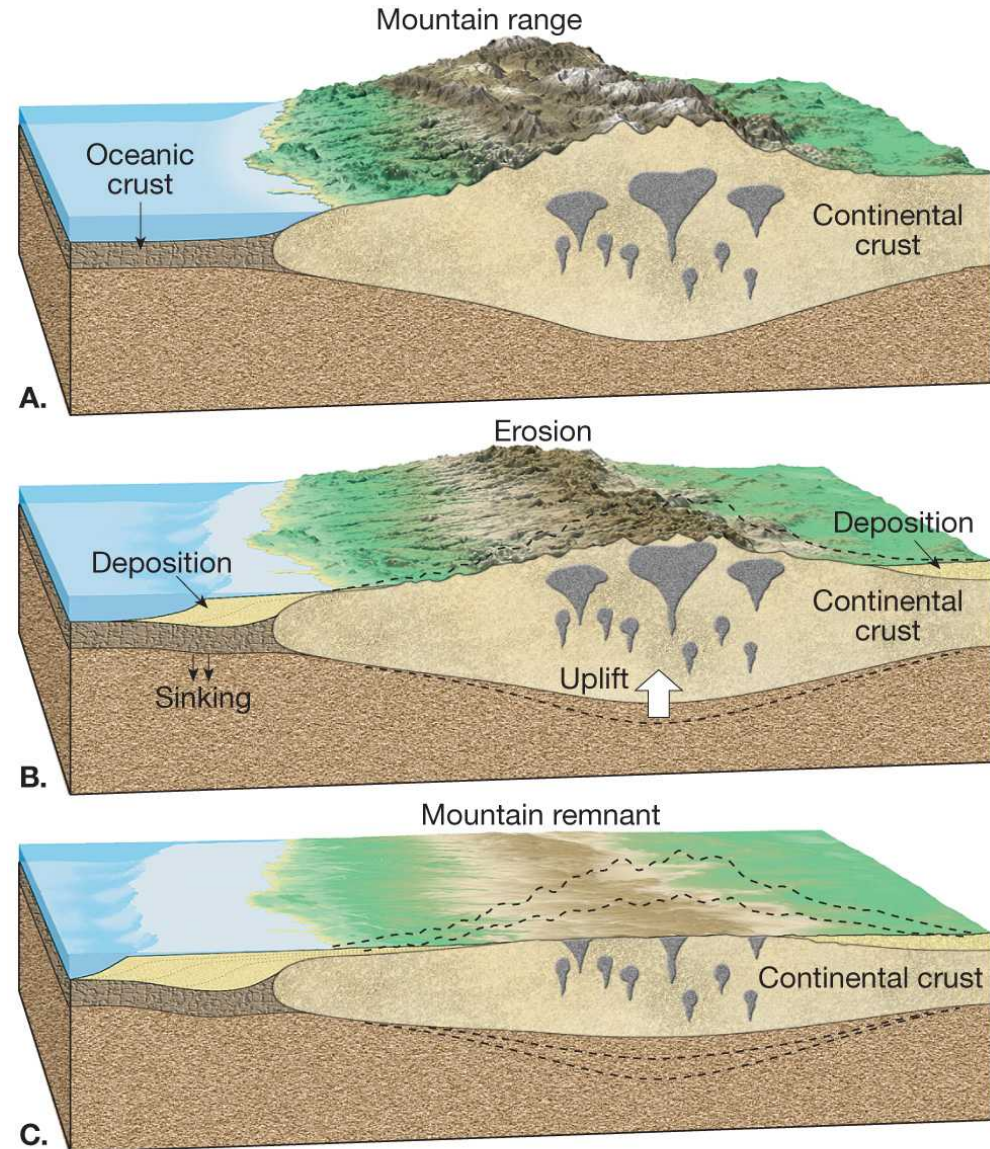


George Biddell Airy
(1801 - 1892)

Isostasie - Gebirgswurzel

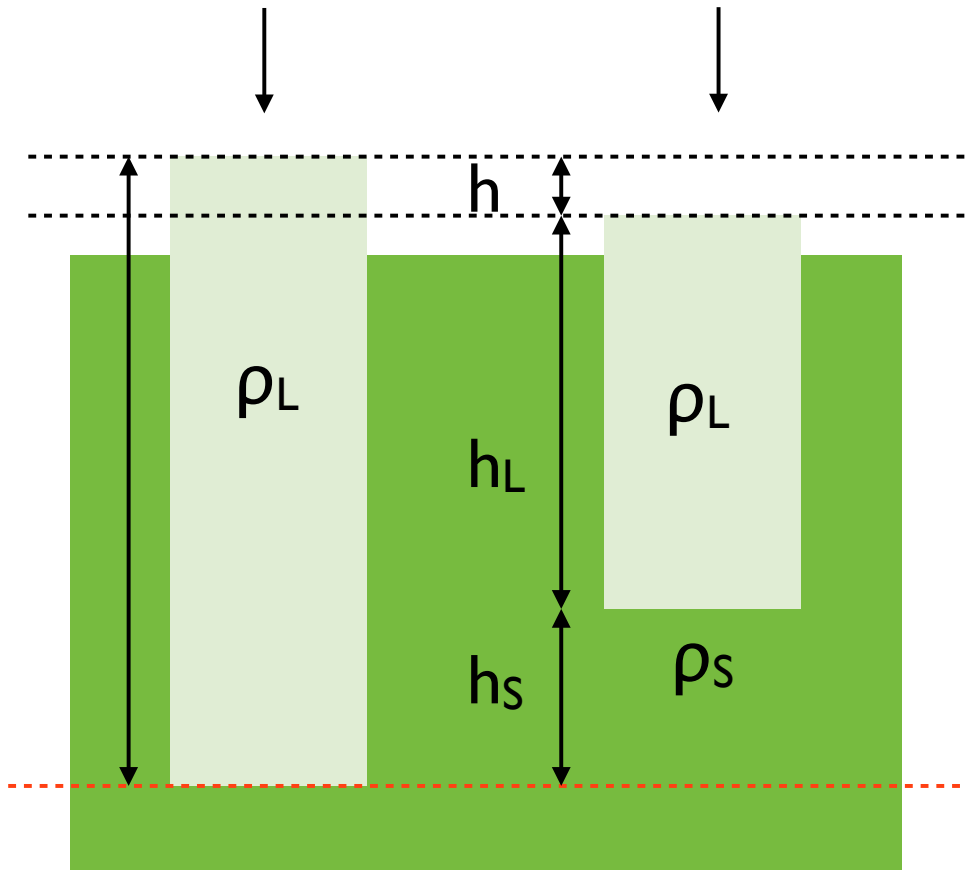


Beispiel:
Wird Gewicht weggenommen von der Kruste (Erosion), stellt sich das isostatische Gleichgewicht wieder ein, indem Lithosphäre aufsteigt.



Gebirgswurzel

$$\rho_L \cdot (h + h_L + h_S) = \rho_S \cdot h_S + \rho_L \cdot h_L$$



Referenzhorizont
Kompensationstiefe

Berechne das Verhältnis
Gebirgshöhe : Gebirgswurzel

$$\rho_L \cdot (h + h_L + h_S) = \rho_S \cdot h_S + \rho_L \cdot h_L$$

$$\rho_L \cdot (h + h_S) = \rho_S \cdot h_S$$

$$\rho_L \cdot h + \rho_L \cdot h_S = \rho_S \cdot h_S$$

$$\rho_L \cdot h = (\rho_S - \rho_L) \cdot h_S$$

$$h / h_S = (\rho_S - \rho_L) / \rho_L$$

$$\text{für } \rho_S = 3300 \text{ kgm}^{-3}$$

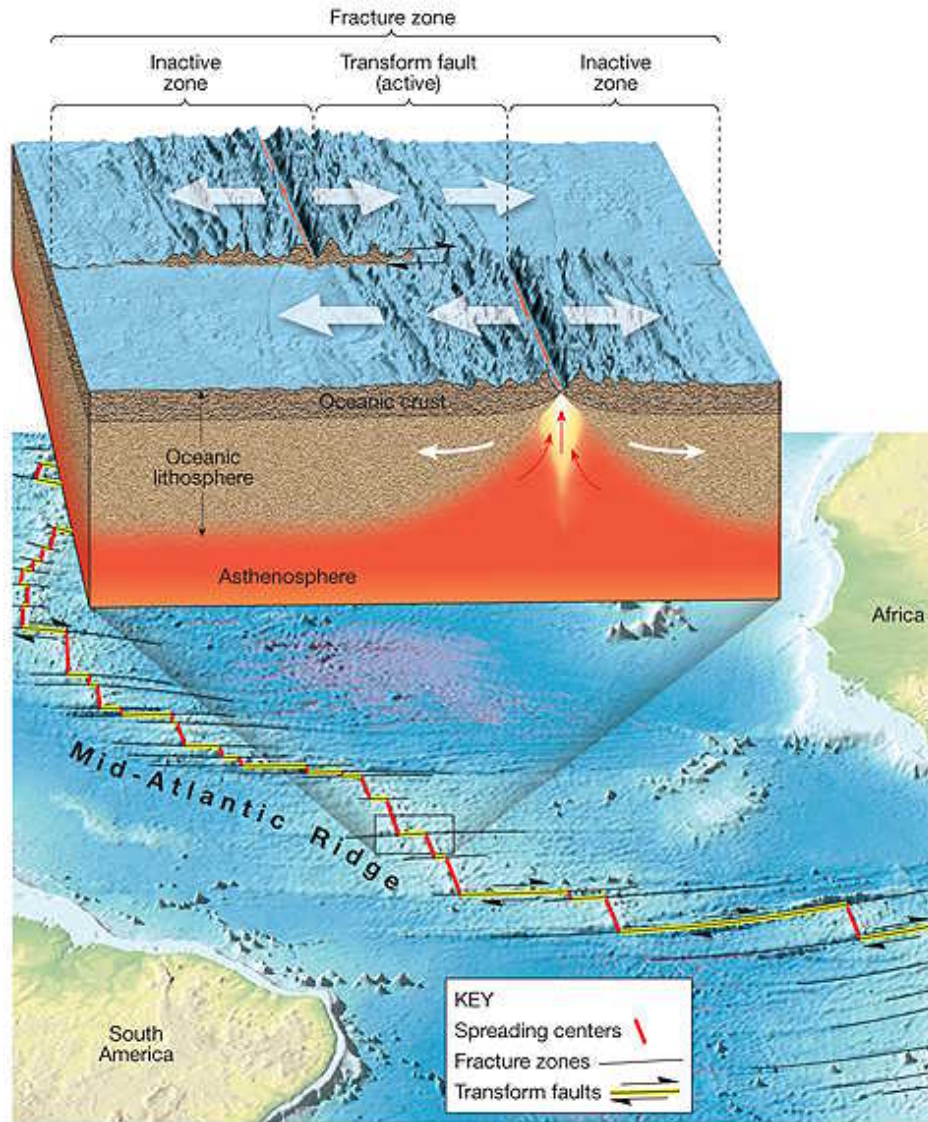
$$\text{und } \rho_L = 2750 \text{ kgm}^{-3}$$

$$h / h_S = 550 / 2750 = 1 / 5$$

$$h : h_S = 1 : 5$$

**konservative
(Transform-)
Plattengrenzen**

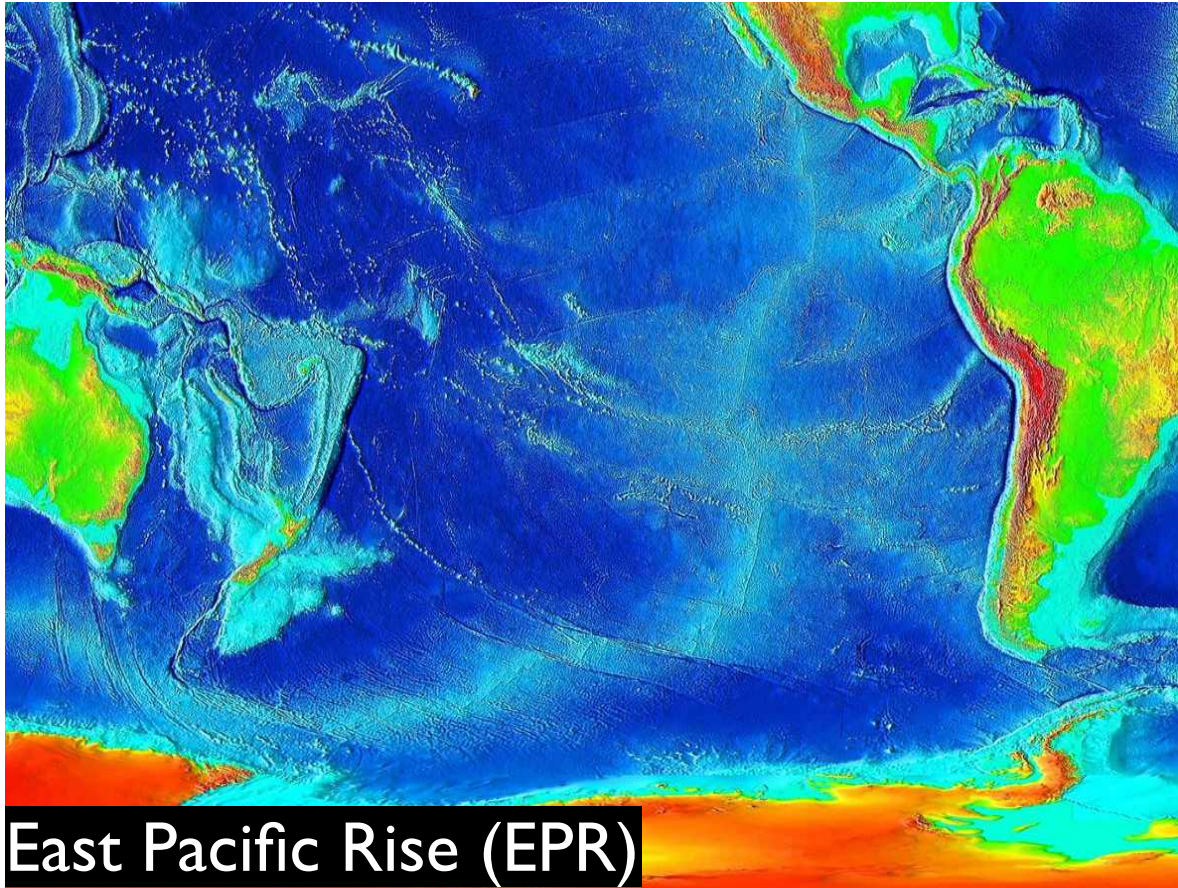
Konservative Plattengrenzen



Copyright © 2008 Pearson Prentice Hall, Inc.

Transform-Plattengrenzen

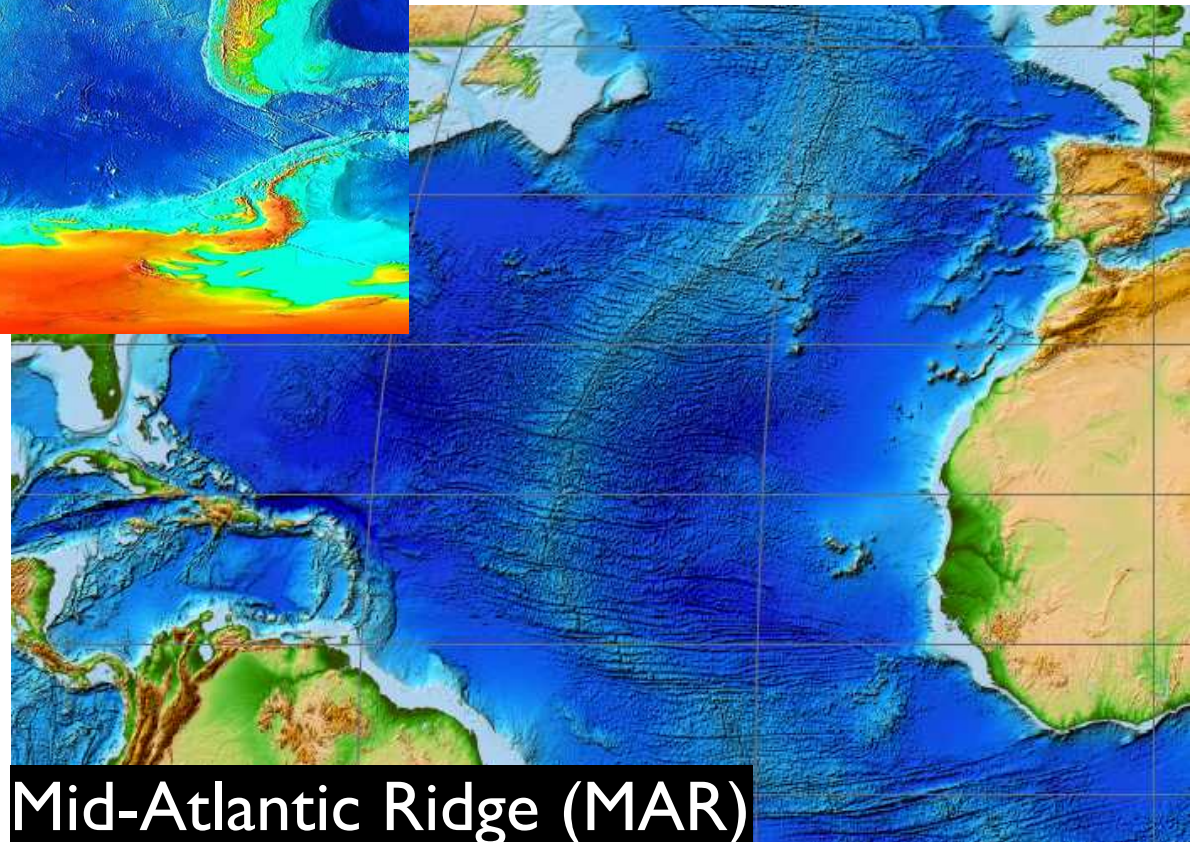
- Platten gleiten aneinander vorbei
- keine neue Oberfläche wird gebildet
- Transform Brüche:
 - die meisten verbinden Segmente von Ozeanrücken (fracture zones)
 - einige wenige (San Andreas fault, Alpine fault, New Zealand) durchschneiden kontinentale Kruste



East Pacific Rise (EPR)

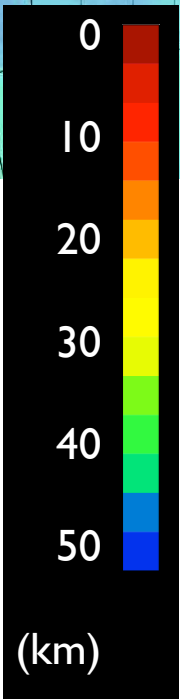
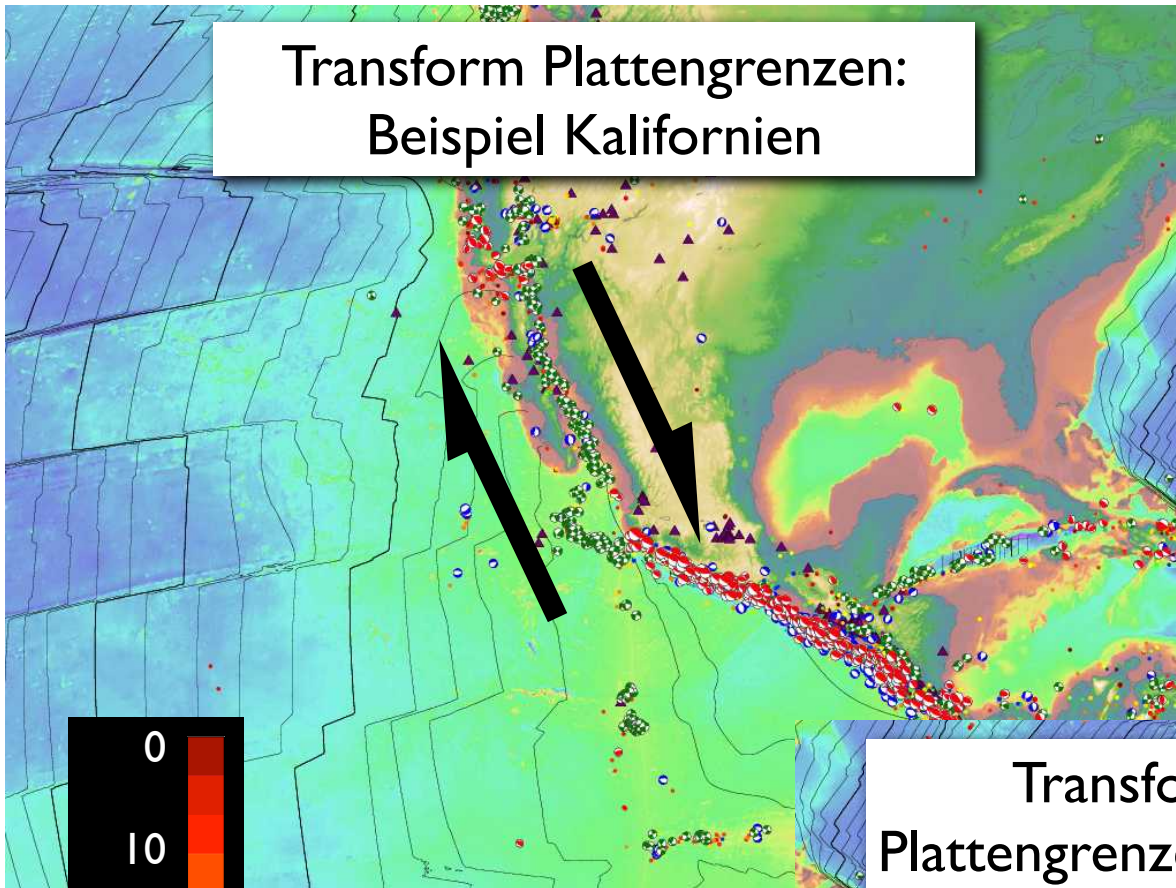
fast spreading:
Transformbrüche sind
weit auseinander,
bis zu 1000km lang

slow spreading:
Transformbrüche sind
nahe beieinander,
oft < 100 km Abstand

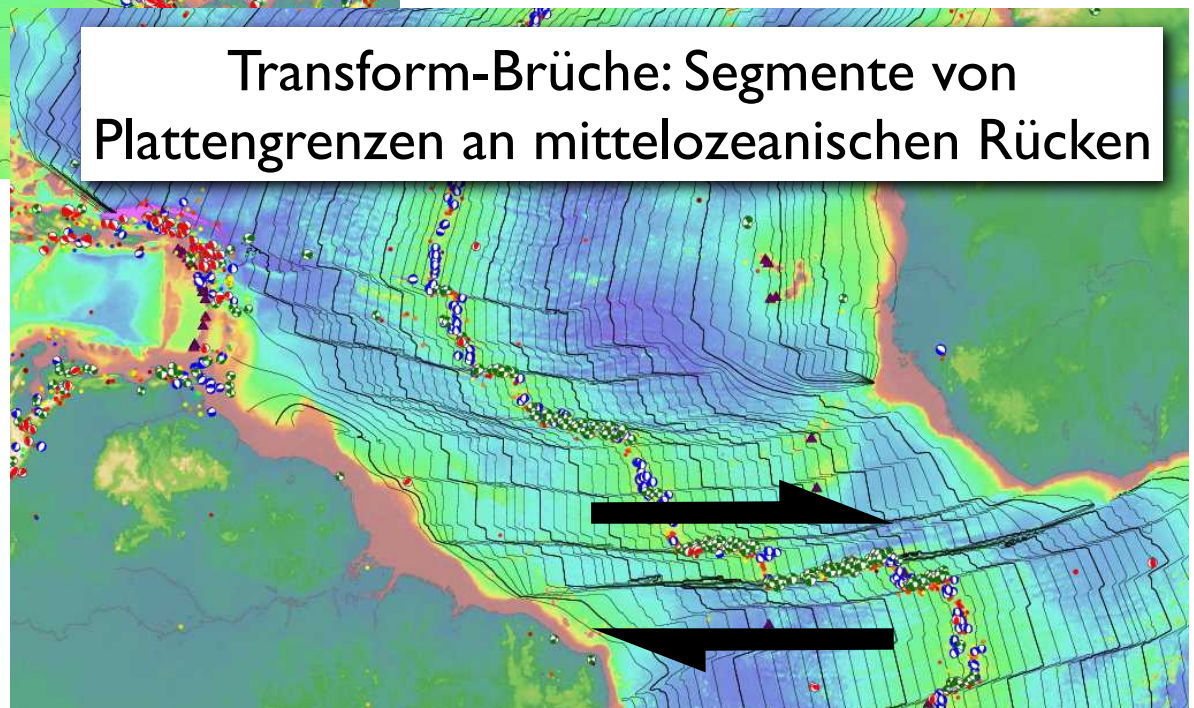


Mid-Atlantic Ridge (MAR)

Transform Plattengrenzen:
Beispiel Kalifornien



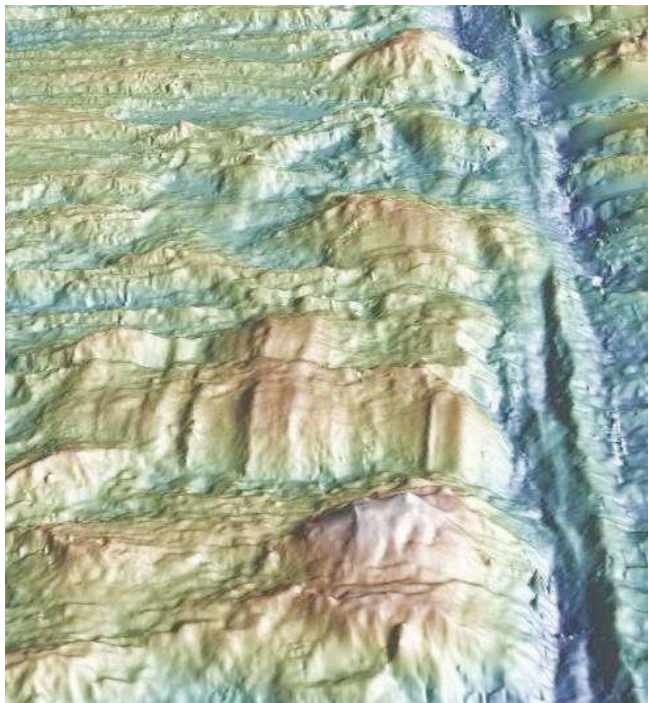
Transform-Brüche: Segmente von
Plattengrenzen an mittelozeanischen Rücken



Topographie der Transformbrüche

Bruchzonen und mittelatlantische Rücken haben erhöhte Ränder

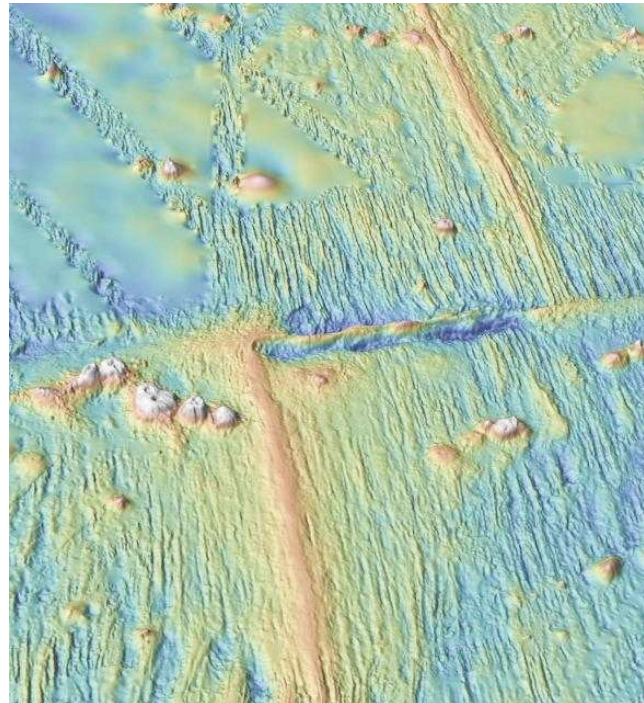
W-E Blickrichtung →
parallel zu Transformbruch



MAR Mid-Atlantic ridge

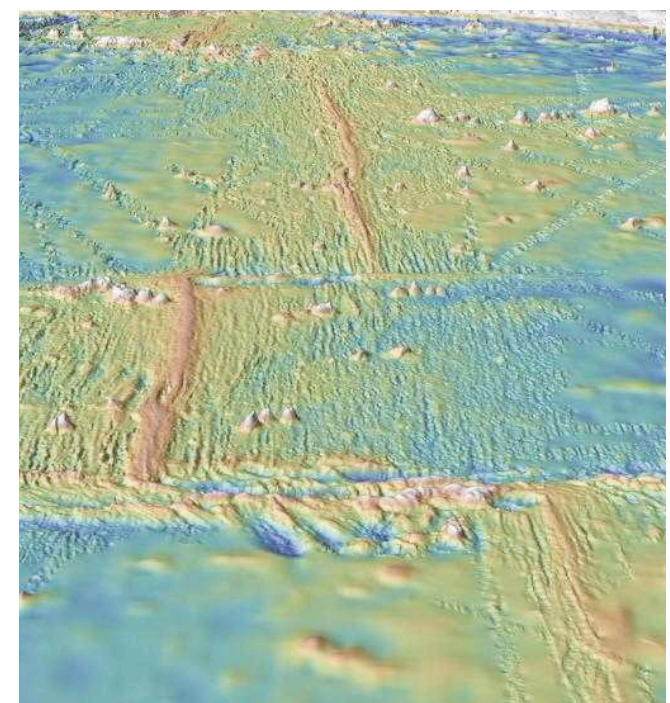
Kane Fracture zone

S-N Blickrichtung ↑
senkrecht auf Transformbruch



EPR East Pacific rise

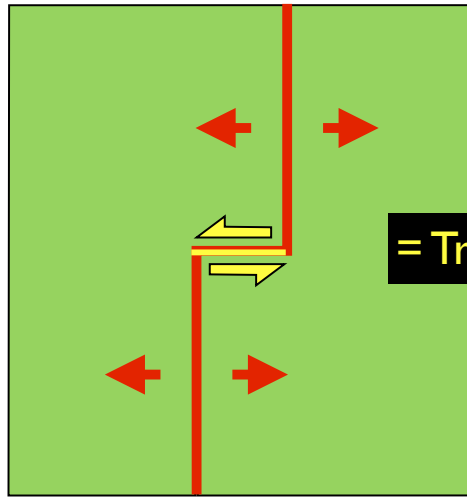
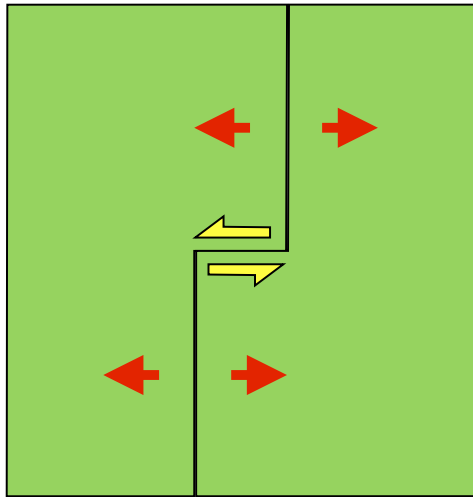
S-N Blickrichtung ↑
senkrecht auf Transformbruch



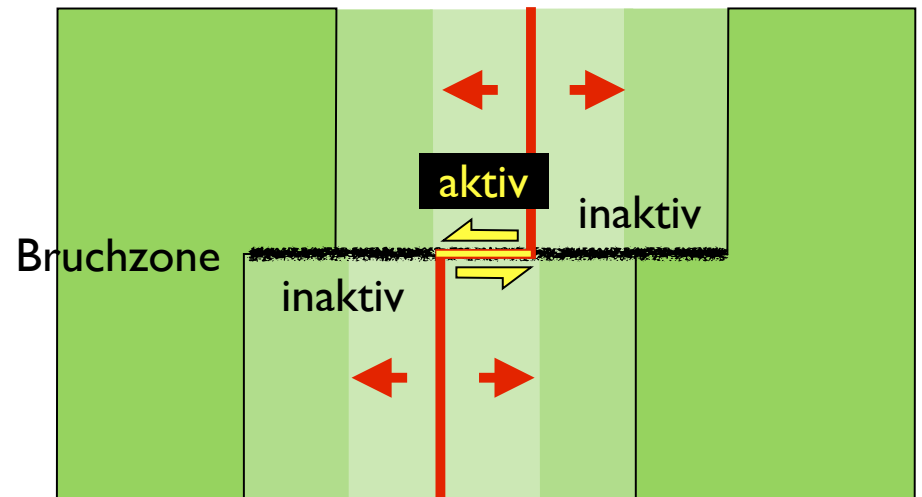
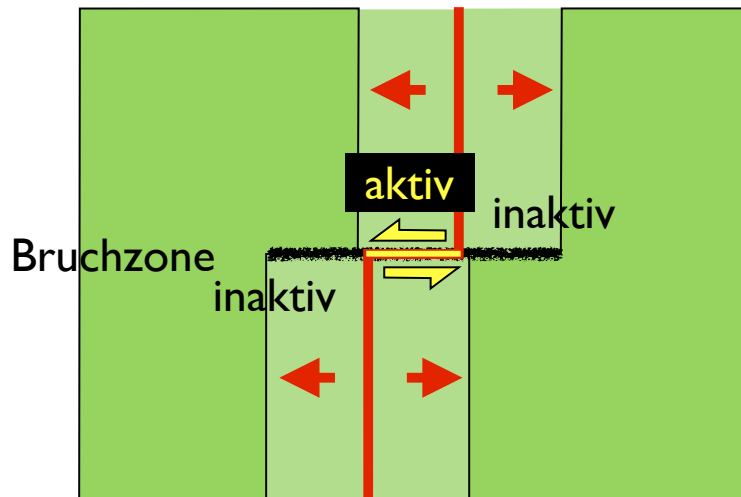
EPR East Pacific rise

(Google Earth)

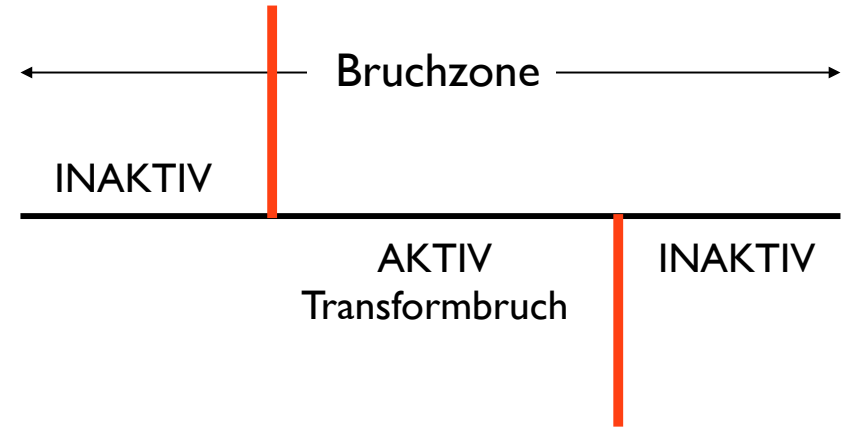
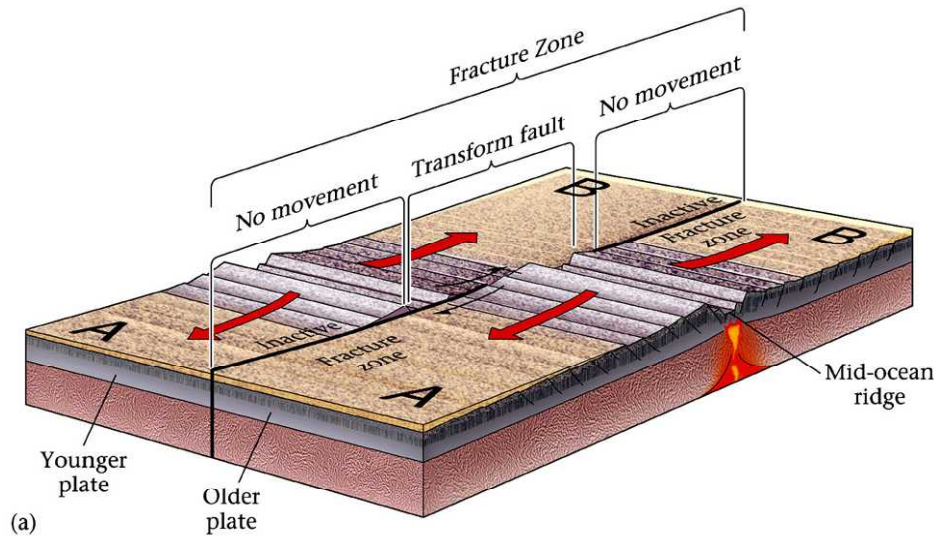
Bewegung an Transformstörungen



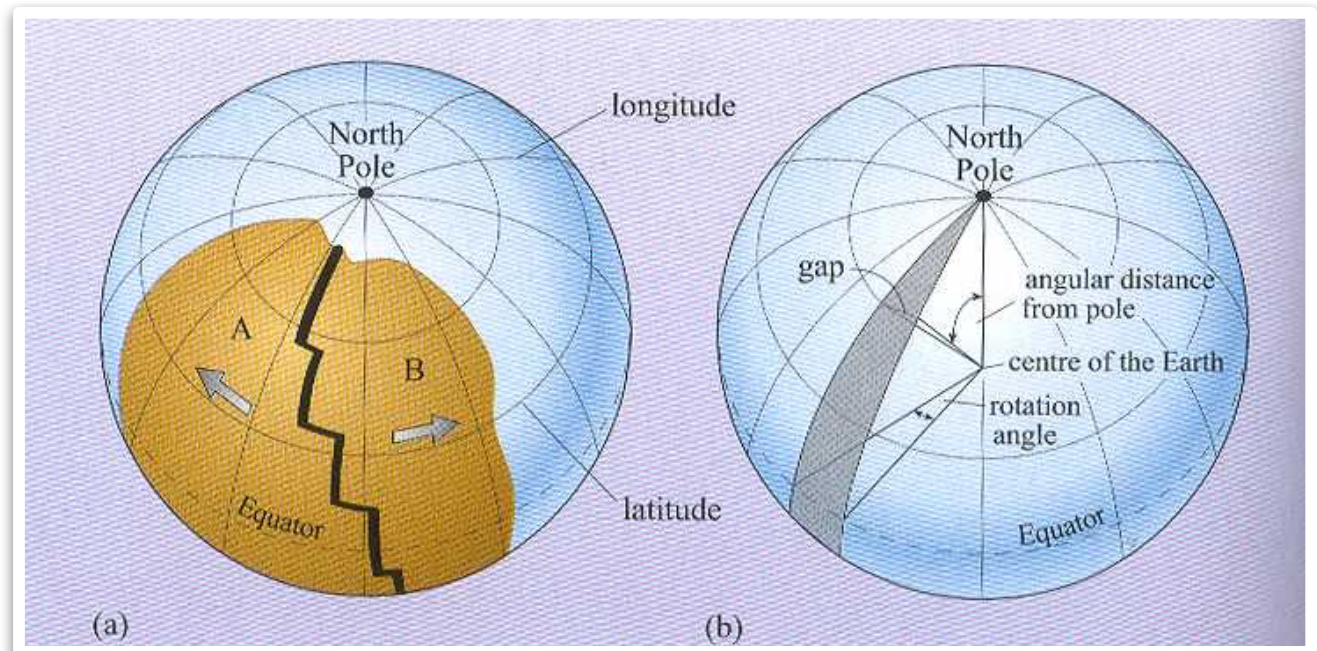
= Transformbruch



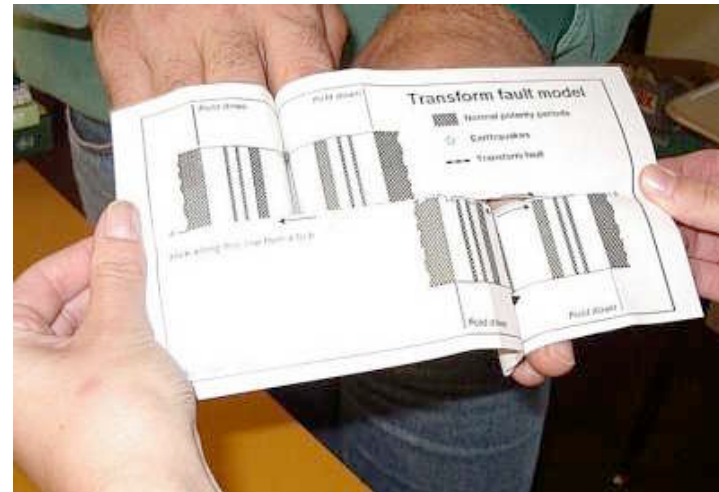
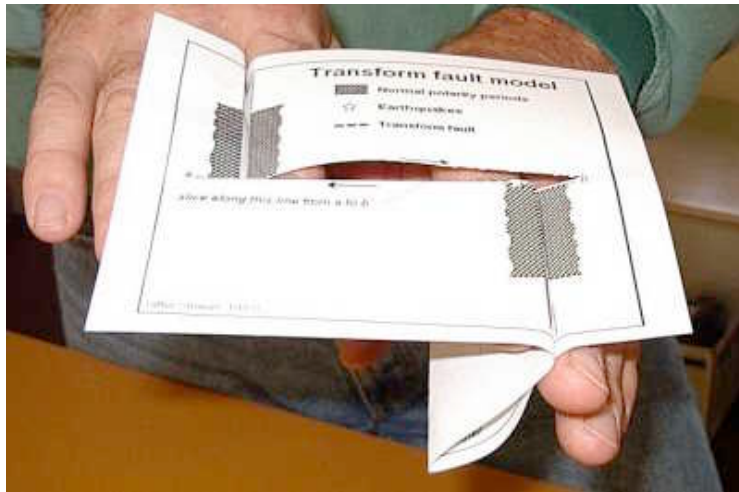
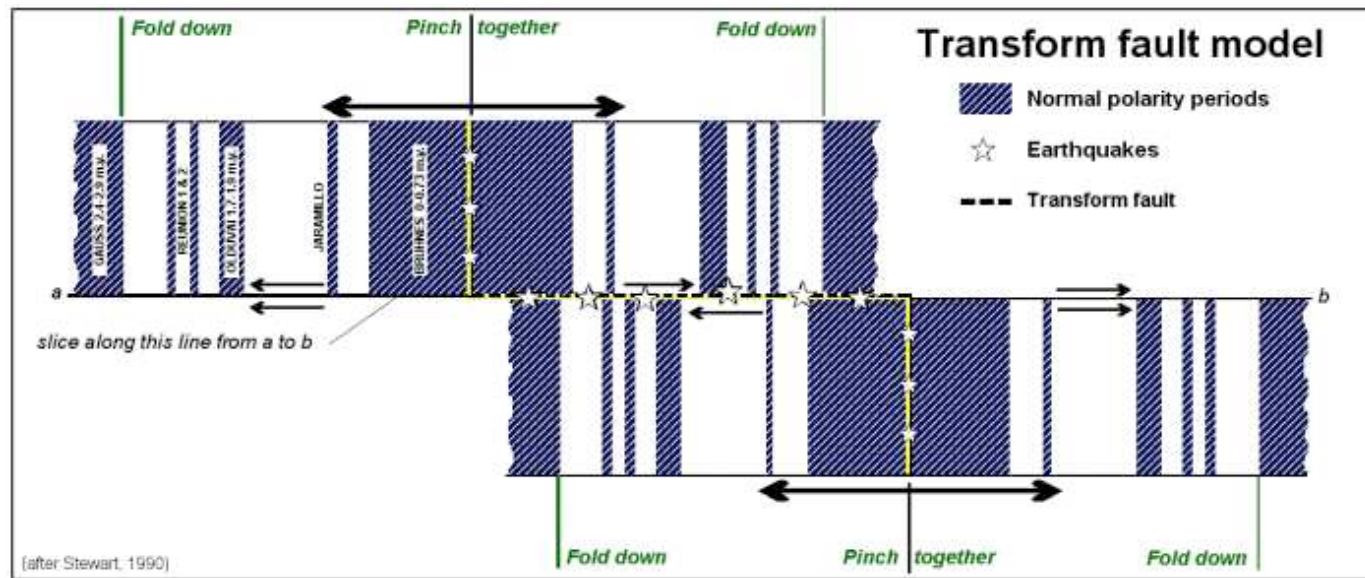
Bewegung am Transformbruch



Transformbrüche sind nicht gerade, sondern gekrümmt. Bei konstanter Spreizungsrate ist die Bogenlänge abhängig von der Breite: sie ist minimal am Pol, maximal am Äquator



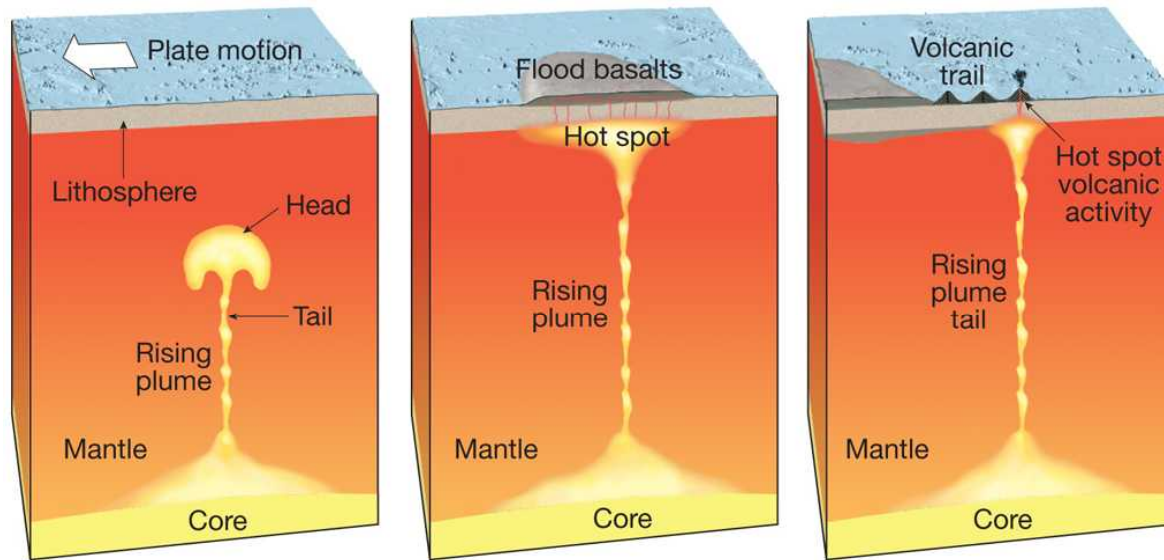
Transform fault boundaries in plane



<http://web.viu.ca/earle/transform-model/>
<http://www.fault-analysis-group.ucd.ie/>

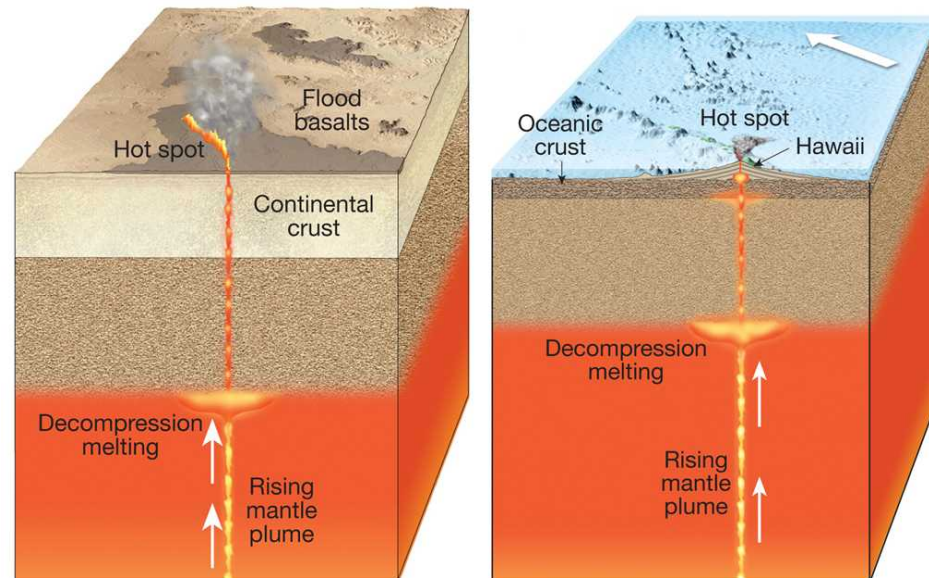
hot spots

mantle plumes - hot spots - flood basalts

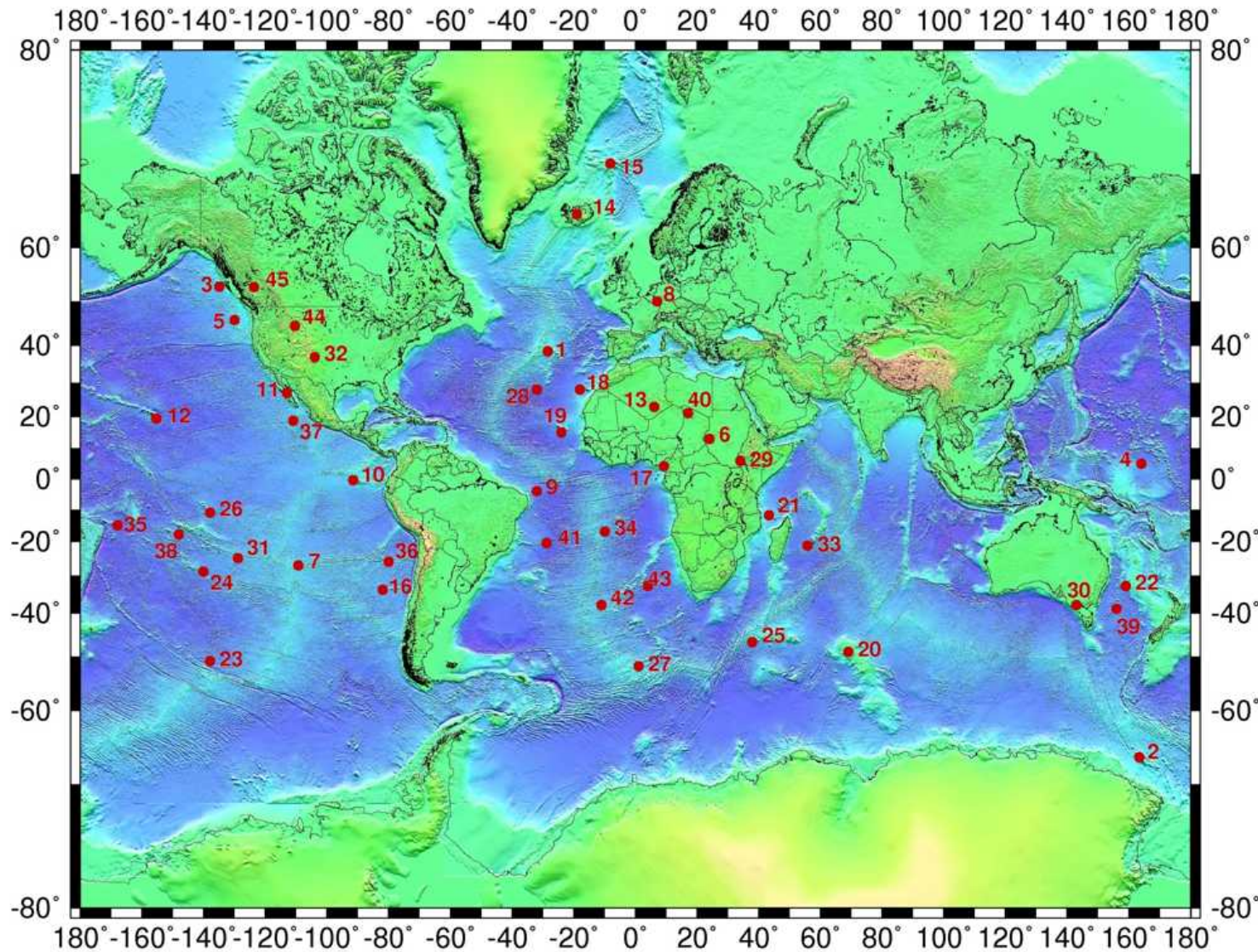


- Ursache für Hotspots: Aufsteigende Mantle Plumes
- Vulkane bilden sich darüber (Hawaiian Island chain)
- Mantle plumes sind langlebige Strukturen; viele kommen aus grosser Tiefe

- Hotspots sind nicht an plattenspezifischen Ort gebunden
- Kontinentale Kruste
- Ozeanische Kruste
- Tholeitische basaltische Magmen
- Niedere Viskosität
- Partialschmelze von Peridotit



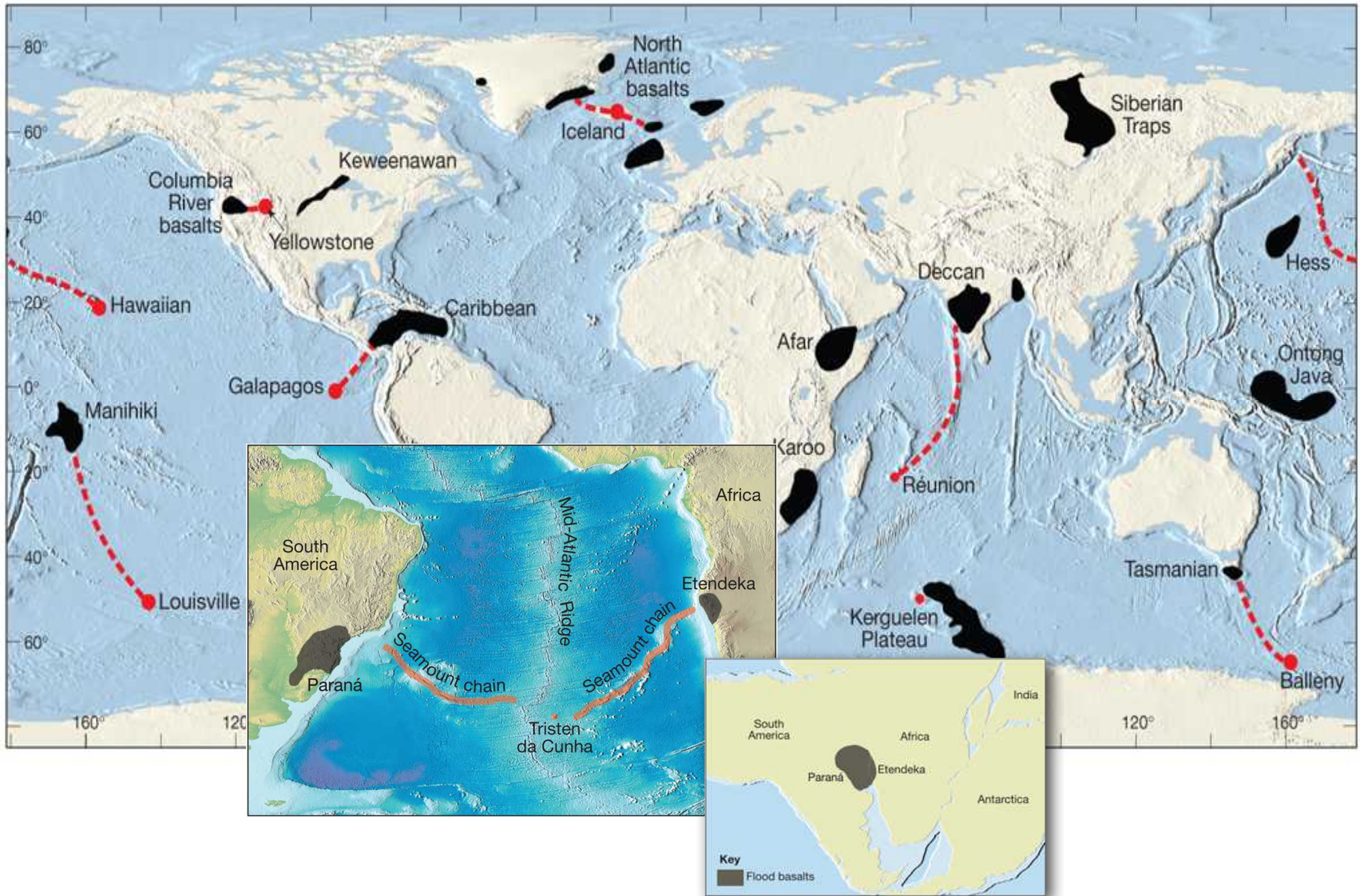
Hot Spots



- 1 Azoren
- 7 Oster Inseln
- 8 Eifel
- 9 Cap Verde
- 12 Hawaii
- 14 Island
- 18 Kanarische
- 42 Tristan da Cunha

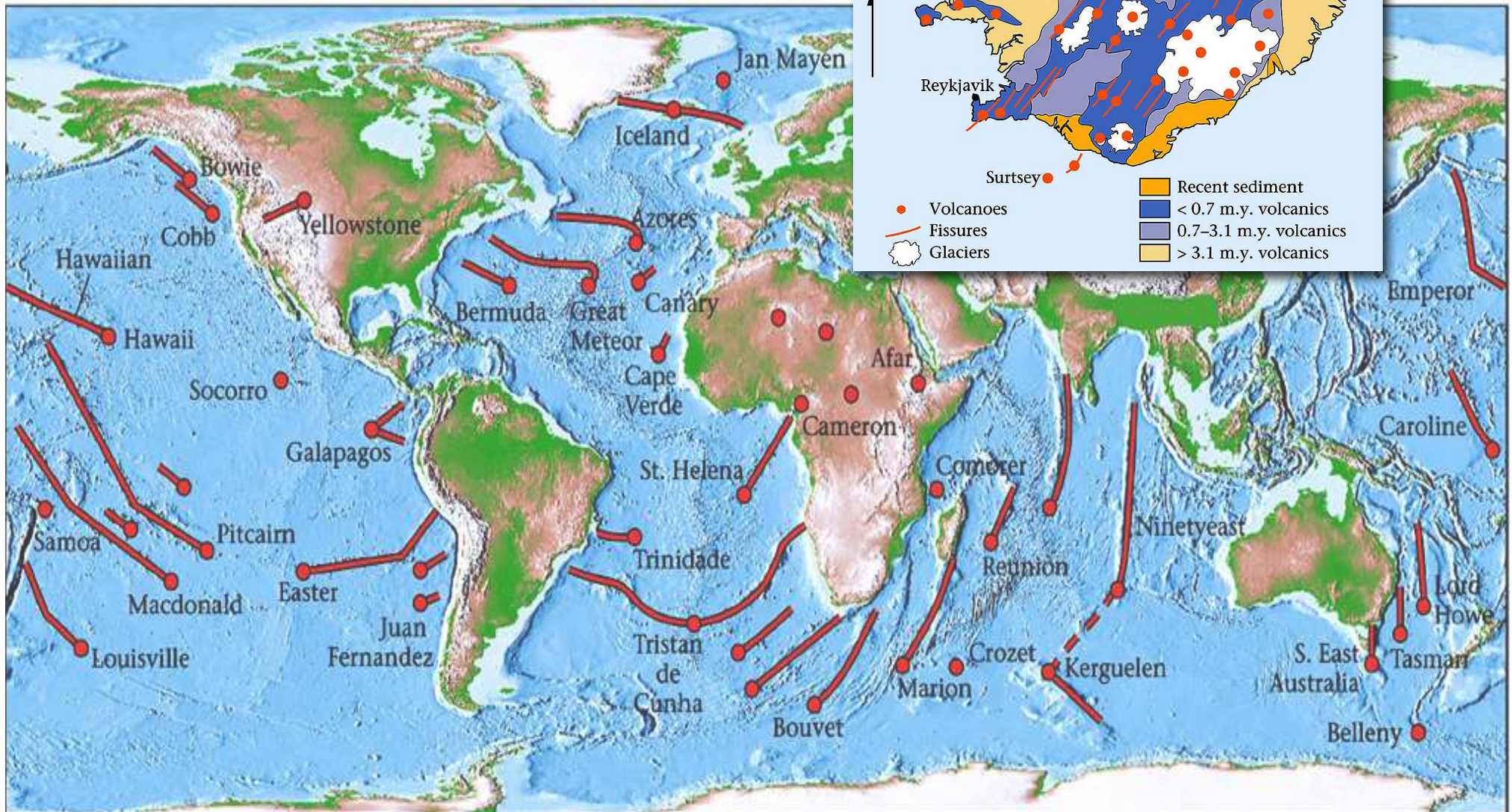
https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_identifizierter_Hot_Spots

Hot Spots und Plateaubasalte



Spuren von Hot Spots

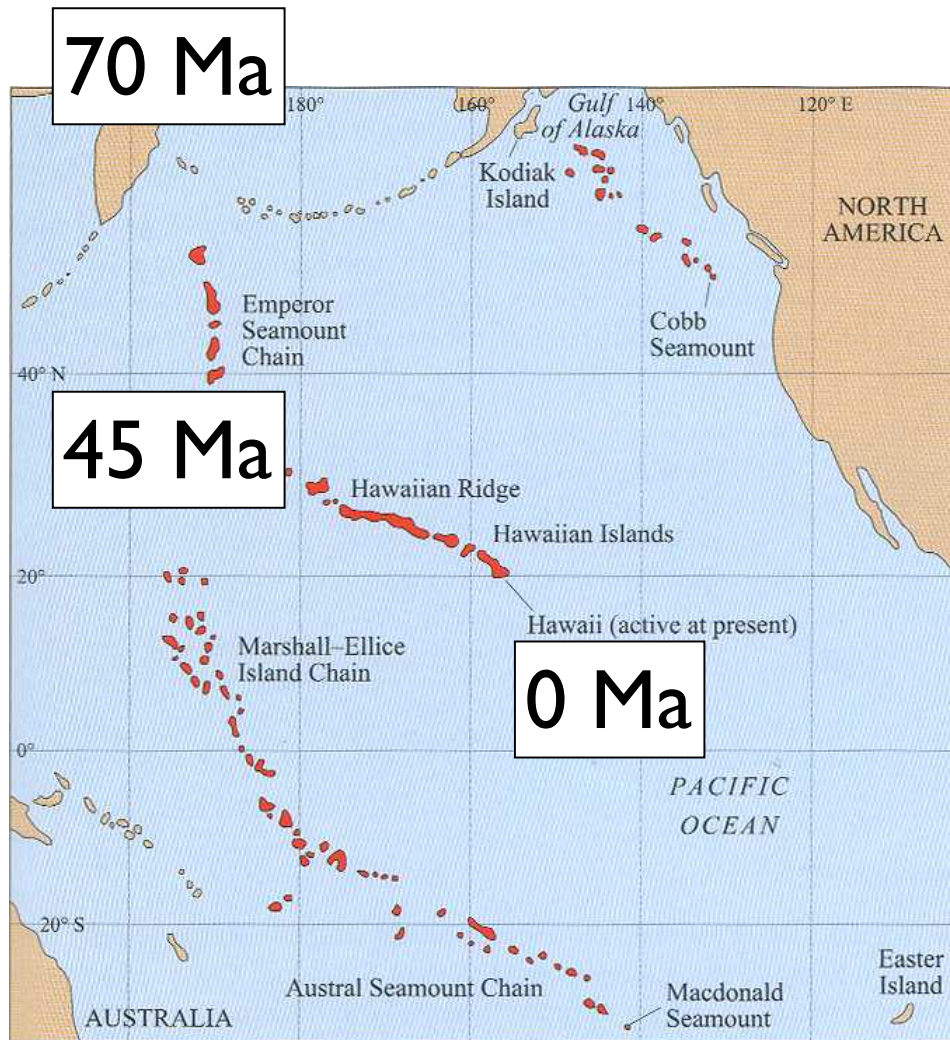
hot spots ohne Plateaubasalte
Beispiel Azoren, Hawaii



Plattenbewegung

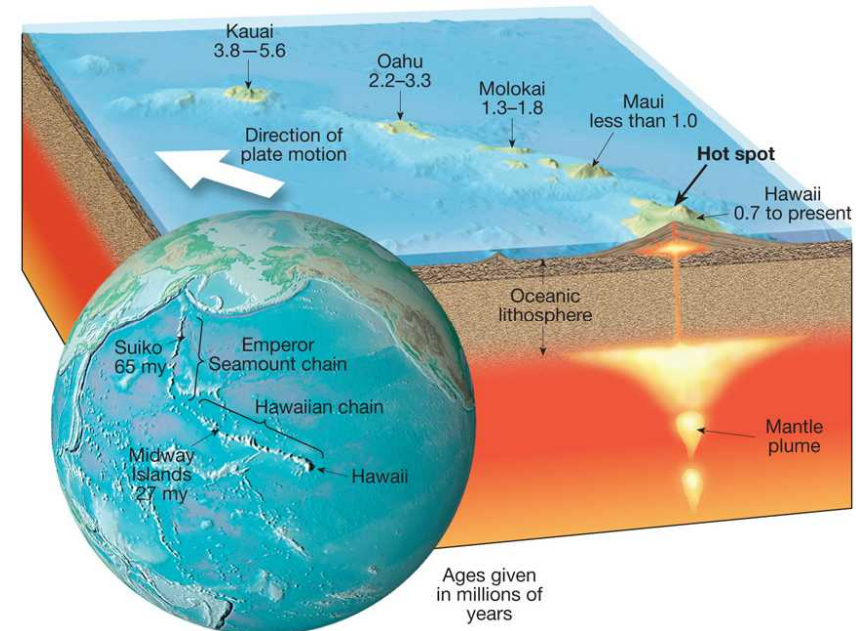
'absolute' Plattenbewegung

= Plattenbewegung relativ zu Hotspot



Messung der Plattengeschwindigkeit anhand Alter der Seamounts:

	Alter (Ma)
Hawaii	0.7
Maui	1.0
Molokai	1.3-1.8
Oahu	2.2-3.3
Kauai	3.8-5.6



Hawaii - Emperor chain

Plattengeschwindigkeit

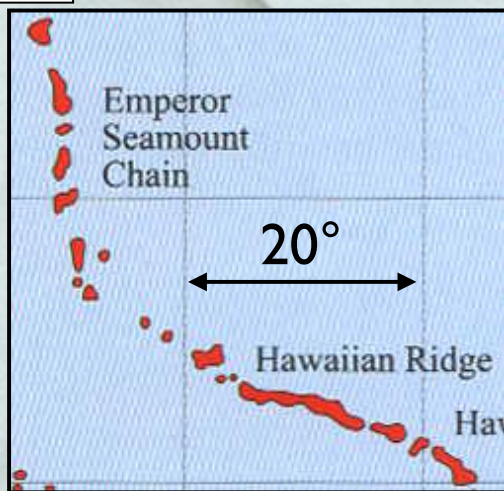
Mit welcher Geschwindigkeit bewegt sich die Pazifische Platte über den Hot Spot, der heute Hawaii ist ?

Altersdatierung: NW: 70 Ma

SE (Hawaii): 0 Ma

$$\Rightarrow t \approx 7 \cdot 10^7 \text{ a}$$

70 Ma



0 Ma

10° am Äquator entspricht etwa
 $40'075 \text{ km} / 36 \approx 1000 \text{ km}$

zurückgelegter Weg $\approx 3 \cdot 20$

$$\Rightarrow d \approx 6 \cdot 10^6 \text{ m}$$

Geschwindigkeit: $\frac{6 \cdot 10^6 \text{ m}}{7 \cdot 10^7 \text{ a}} \approx 9 \text{ cm / Jahr} \approx 10^{-1} \text{ ma}^{-1}$

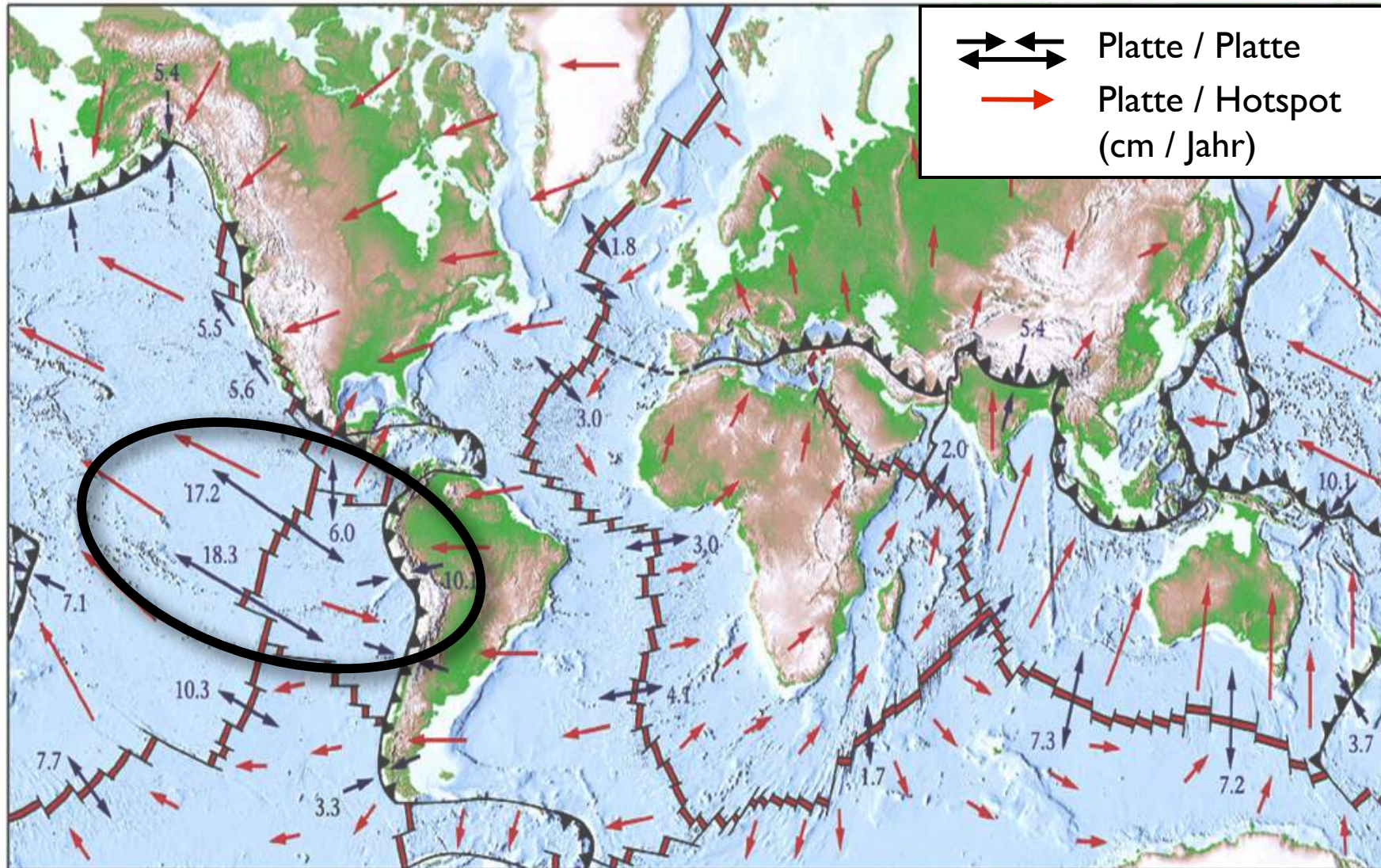
Plattenbewegungen

relativ

absolut

Spreizungsraten

Relativbewegung: Platte - Platte



destruktive



konstruktive

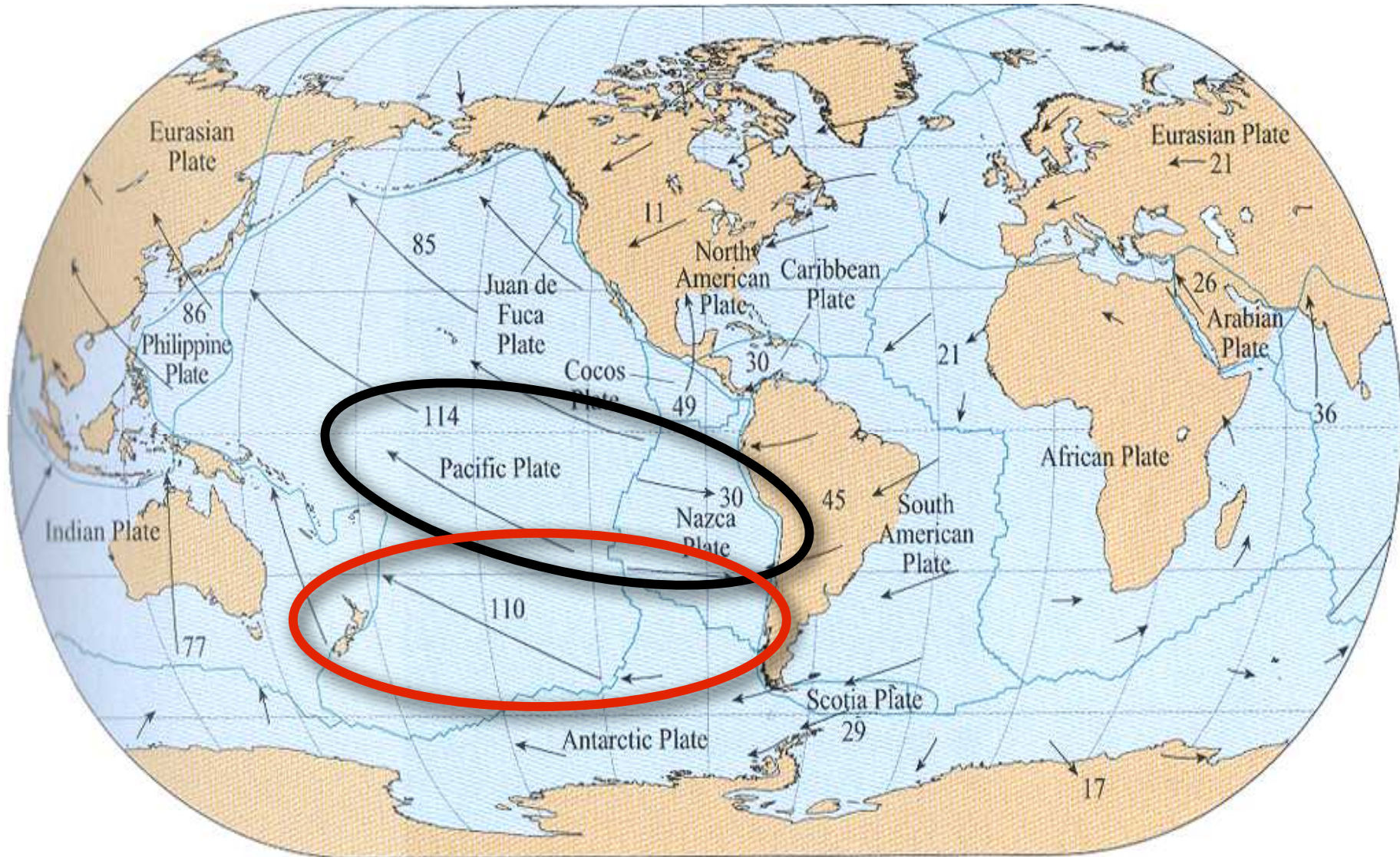


Transform

172 mm

Absolutbewegung

Platte relativ zu Hotspot



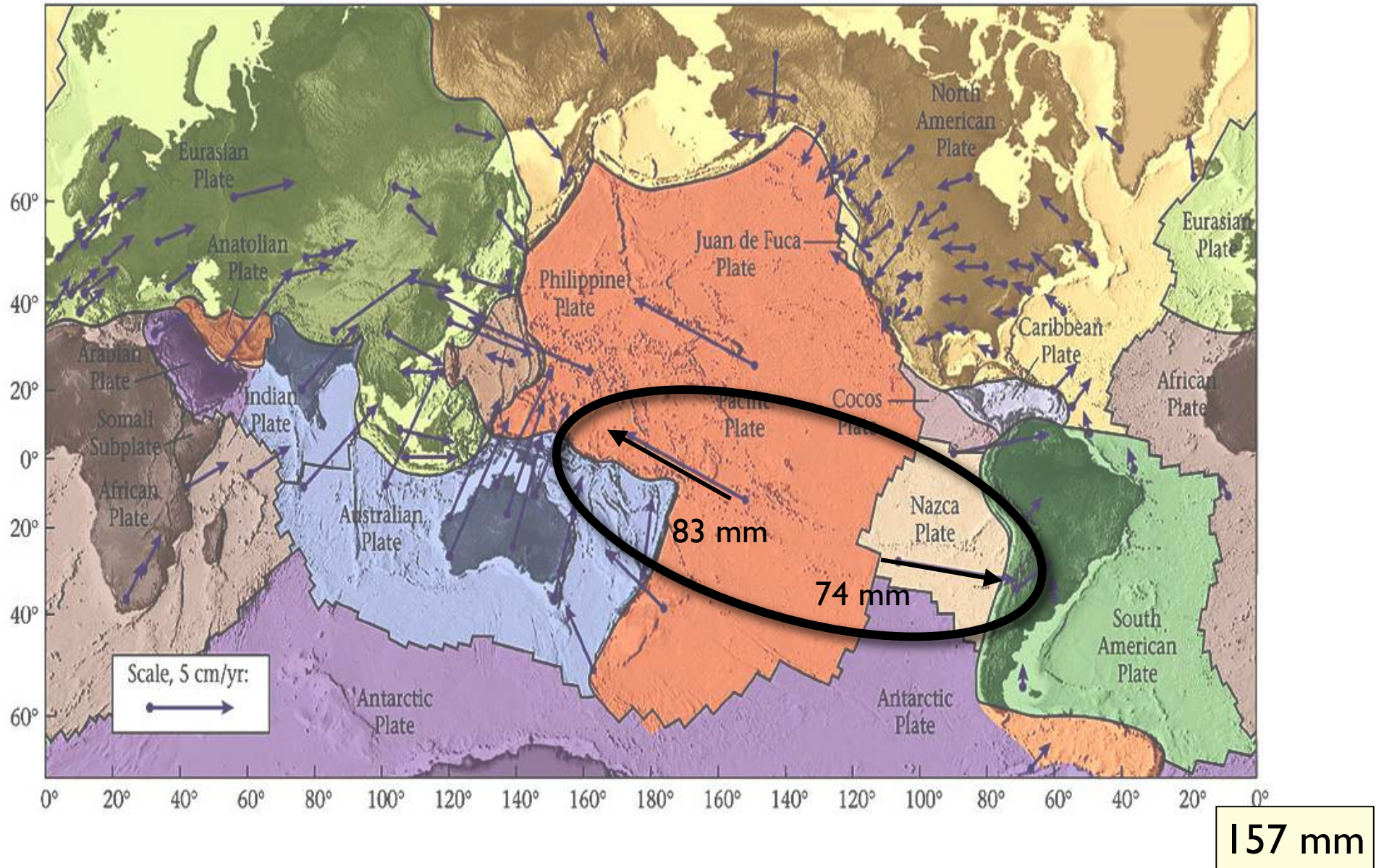
Geschwindigkeiten bezüglich Hot Spots (mm a⁻¹)

144 mm

Absolutbewegung

Platte relativ zu Satellit

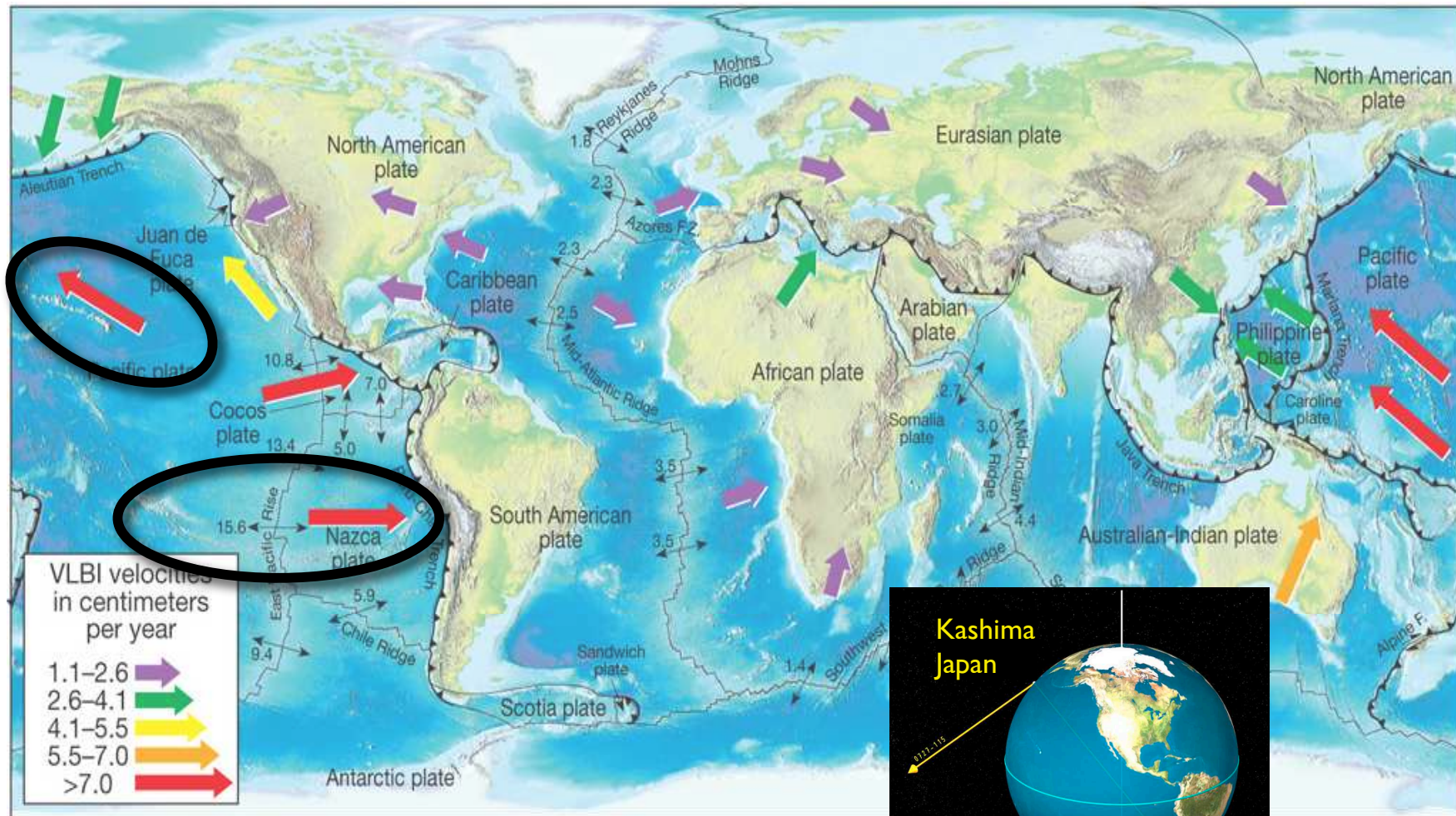
Methode: global positioning system (GPS)



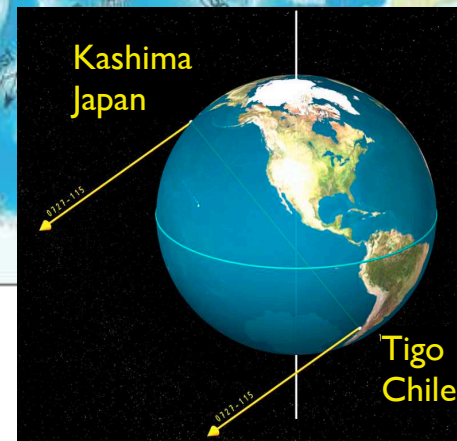
Absolutbewegung

Platte relative zu Quasaren

Methode: very large baseline interferometry (VLBI)



(cm a⁻¹)



> 140 mm

5 Erdbeben

Internet-Informationen zu Erdbeben

Plattentektonische Settings für Erdbeben
Physik und zeitlicher Ablauf

Seismische Wellen

- Körperwellen: Primär- und Sekundär-Wellen (P und S)
- Oberflächenwellen: Love- und Raleighwellen (Q und R)

Aufzeichnung - Seismographen

- Lokalisierung von Erdbeben
- Herdflächen
- Spannungsfeld

Info zu Erdbeben

Erdbebendienste /-info im Internet

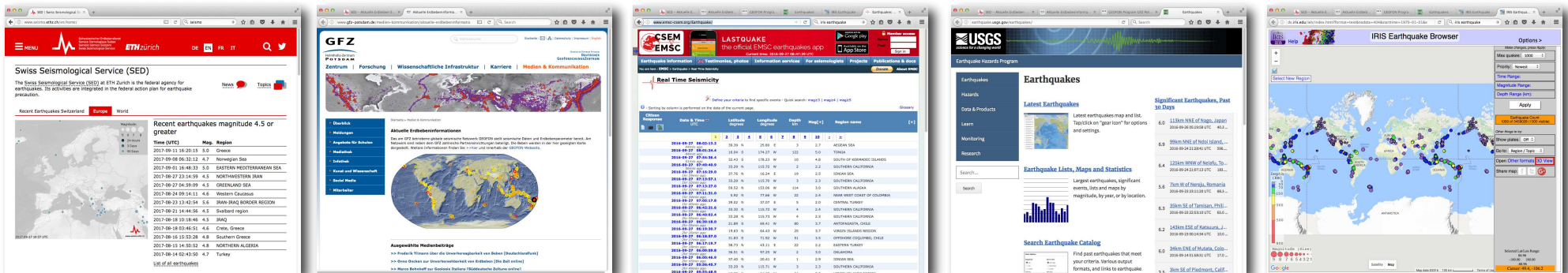
SED Schweizerischer Erdbebendienst
www.seismo.ethz.ch/

DFG Deutsches Geoforschungszentrum
www.gfz-potsdam.de/medien-kommunikation/aktuelle-erdbebeninformationen/

EMSC European-Mediterranean Seismological Centre
www.emsc-csem.org/Earthquake/

USGS United States Geological Survey
earthquake.usgs.gov/earthquakes/

IRIS Incorporated Research Institutions for Seismology
ds.iris.edu/ieb/



unser tägliches Erdbeben

SED | Swiss Seismological Service

www.seismo.ethz.ch/en/home/

Schweizerischer Erdbebendienst
Service Sismologique Suisse
Servizio Sismico Svizzero
Swiss Seismological Service

ETH zürich

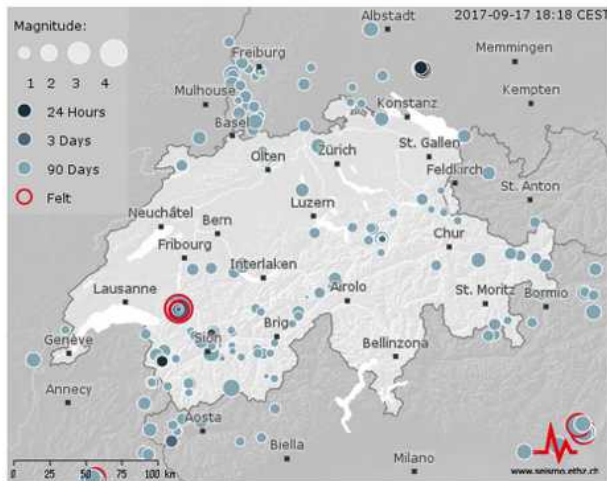
DE **EN** FR IT

Swiss Seismological Service (SED)

The Swiss Seismological Service (SED) at ETH Zurich is the federal agency for earthquakes. Its activities are integrated in the federal action plan for earthquake precaution.

News Topics

Recent Earthquakes Switzerland Europe World



Felt Earthquakes in Switzerland

Local Time	Mag.	Location	Felt?
2017-09-14 21:16	2.5	CHATEAU-D'OEX VD	Felt
2017-09-10 20:00	3.7	6 km N Morfasso (PC)	Probably not felt
2017-09-08 07:46	1.6	Goeschenen UR	Probably felt
2017-09-06 14:22	3.8	Belluno I	Probably felt
2017-09-06 14:22	3.8	Bolzano I	Probably felt
2017-09-03 11:15	3.4	Lago di Garda I	Probably felt

Latest Earthquakes

Local Time	Magnitude	Location
2017-09-17 16:06	1.2	CHAM
2017-09-17 11:43	1.5	CHAM
2017-09-17 10:54	1.9	CHAM
2017-09-17 09:33	1.7	CHAM

List of all earthquakes

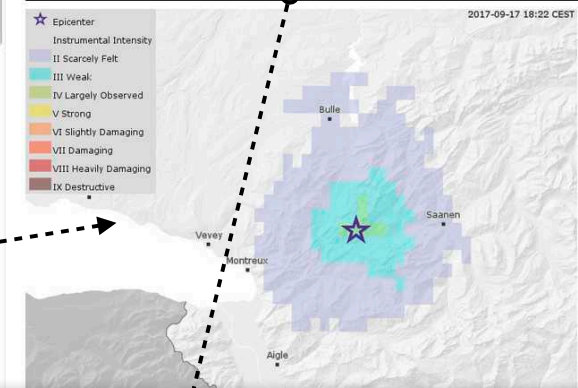
- Did you feel an earthquake? Report an earthquake
- Help, the earth is shaking! What to do in case of an incident?

Event Information

Map Details Data Earthquake Announcement

Event on 2017-09-14 21:16, CHATEAU-D'OEX VD, Magnitude 2.5

Click on map for interactive viewer



Swiss Seismological Service

'CHATEAU-D'OEX VD', Magnitude 2.5, 2017-09-14 21:16

Legend Layers Select

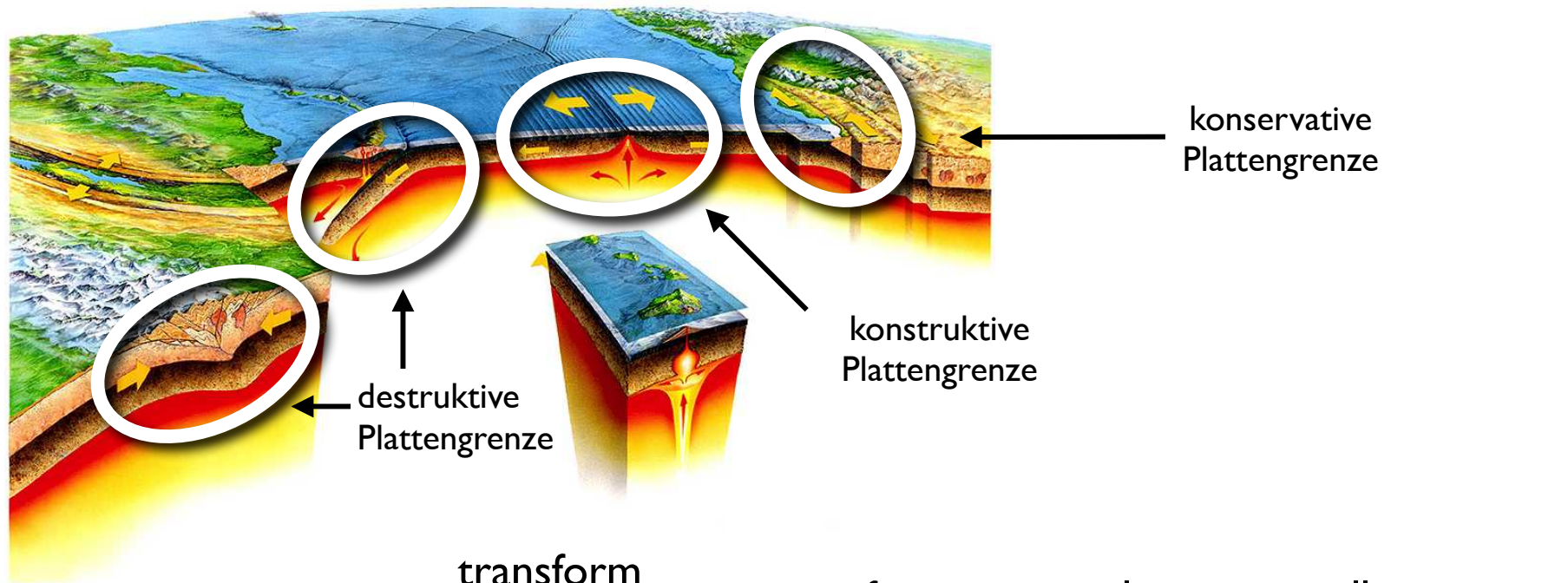
Epicenter

ShakeMap, Instrumental Intensity

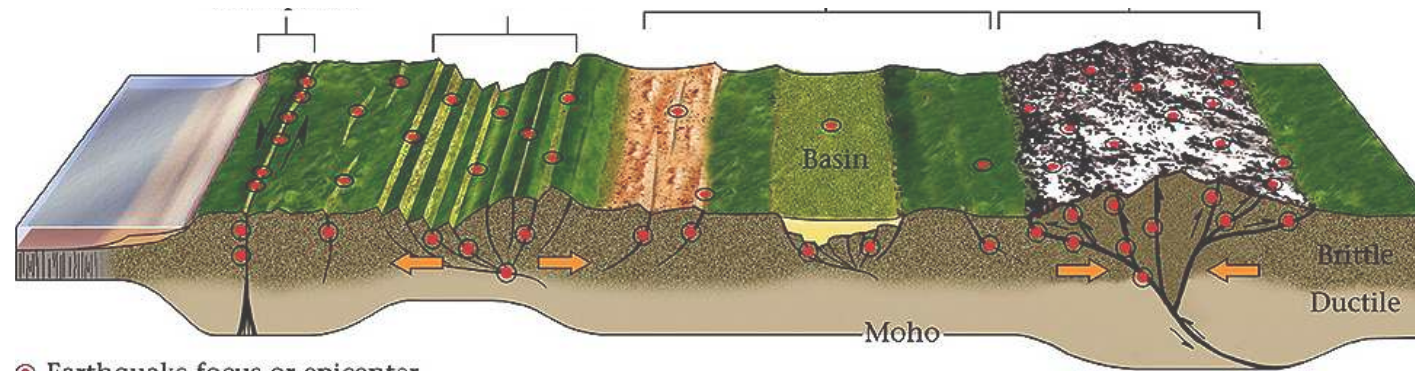
II Scarcely Felt
III Weak
IV Largely Observed
V Strong
VI Slightly Damaging
VII Damaging
VIII Heavily Damaging
IX Destructive

Erdbeben und Plattentektonik

Erdbeben wo?



transform faults active rifts intraplate collision zone



spröd

duktil

● Earthquake focus or epicenter

Blattverschiebung

Horizontalverwerfung

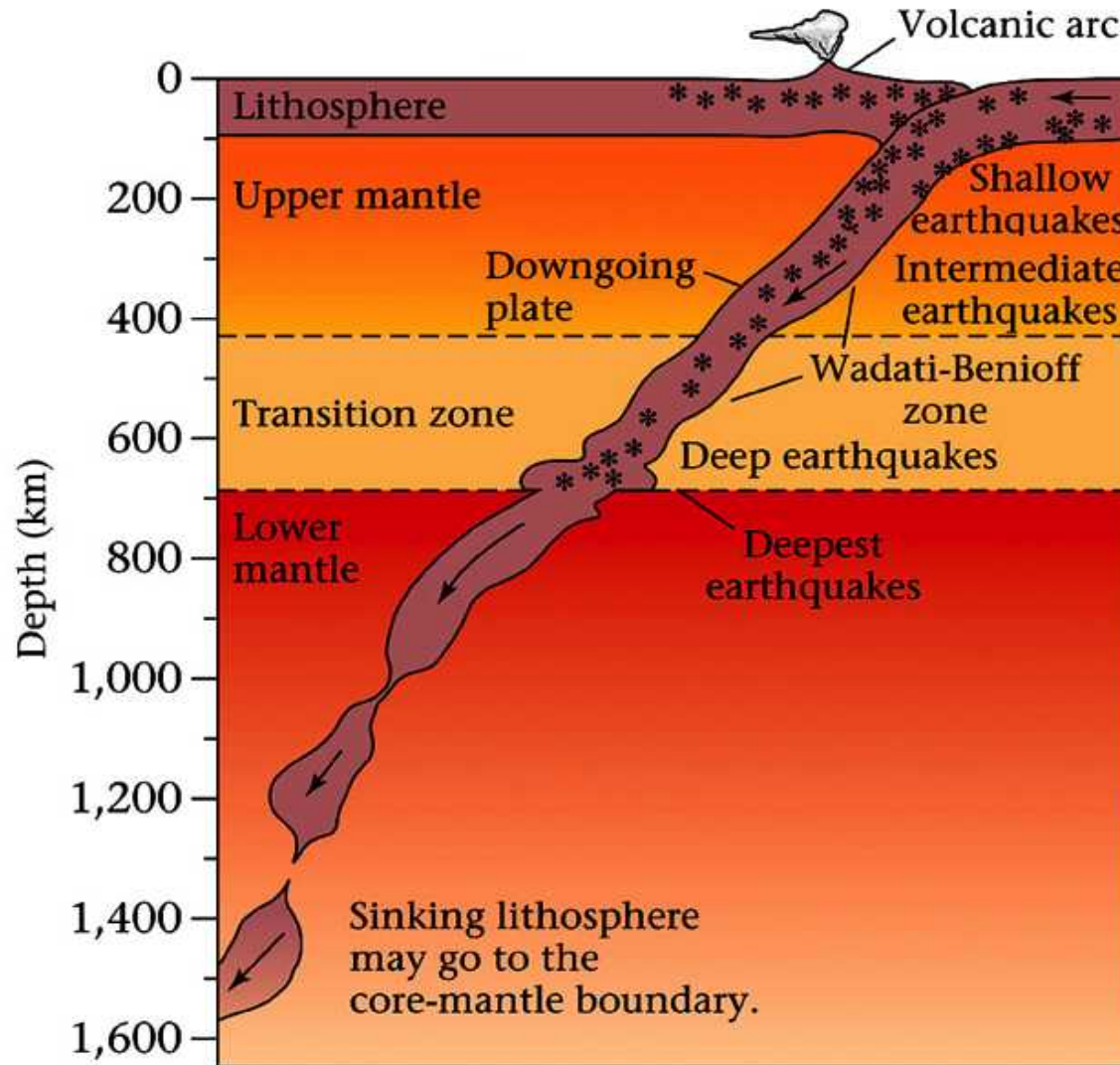
Extension

Abschiebung

Kompression

Auf-(Über-)schiebung

Seismic structure of lithosphere

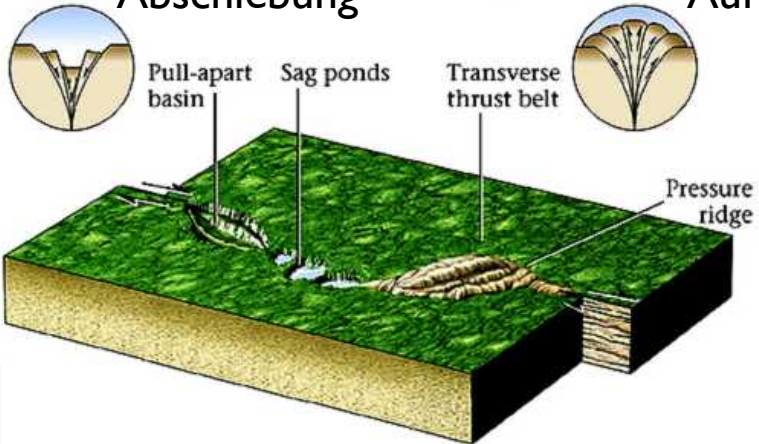


Seichtbeben

Tiefbeben

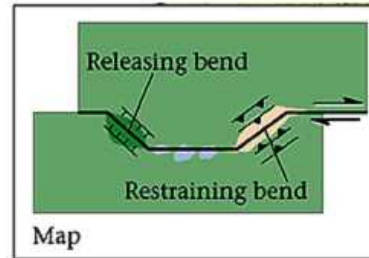
Topographische Ausprägung

Abschiebung

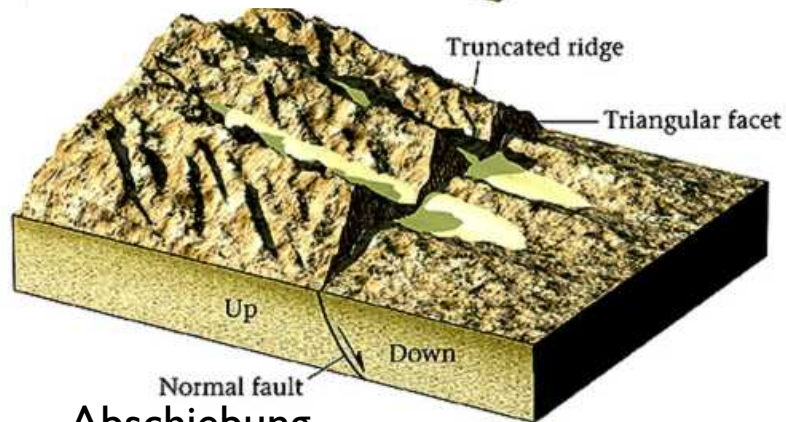


Auf-(Über-)schiebung

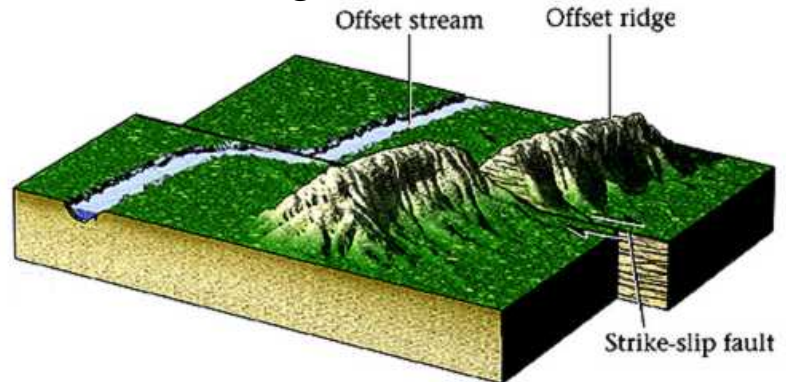
Transtension



Transpression



Abschiebung



Horizontalverwerfung

Beispiel: Hector Mine, 1999

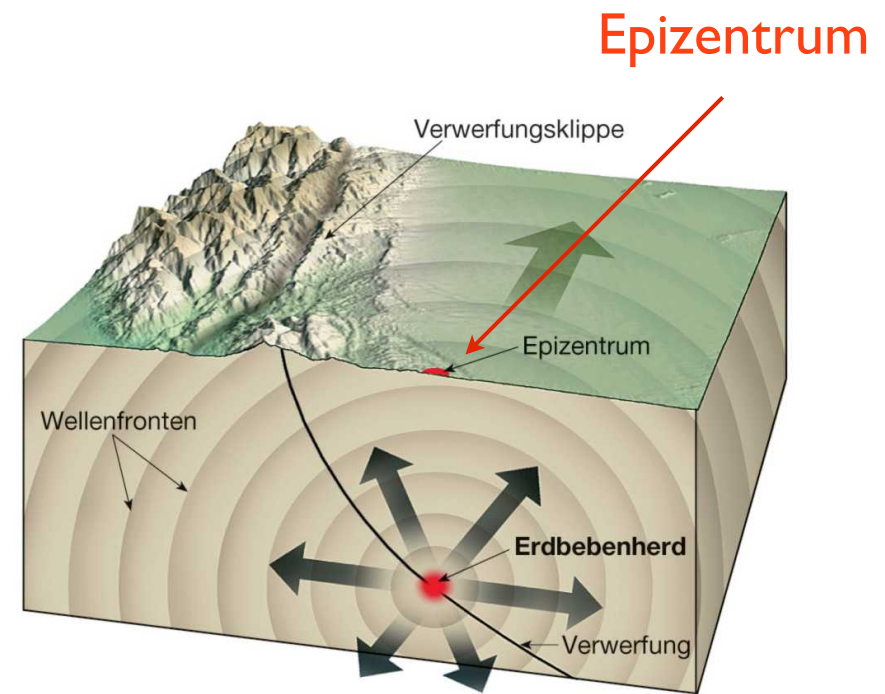
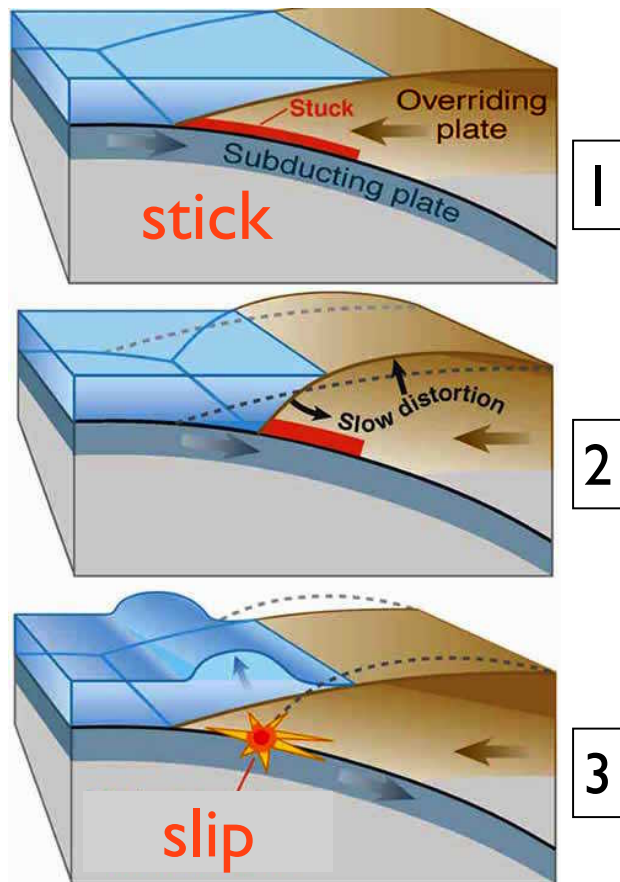


Physik und zeitlicher Ablauf

Aufbau elastischer Spannung

Beispiele:

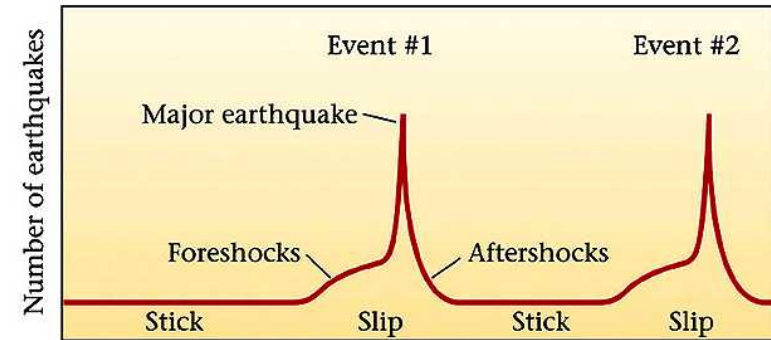
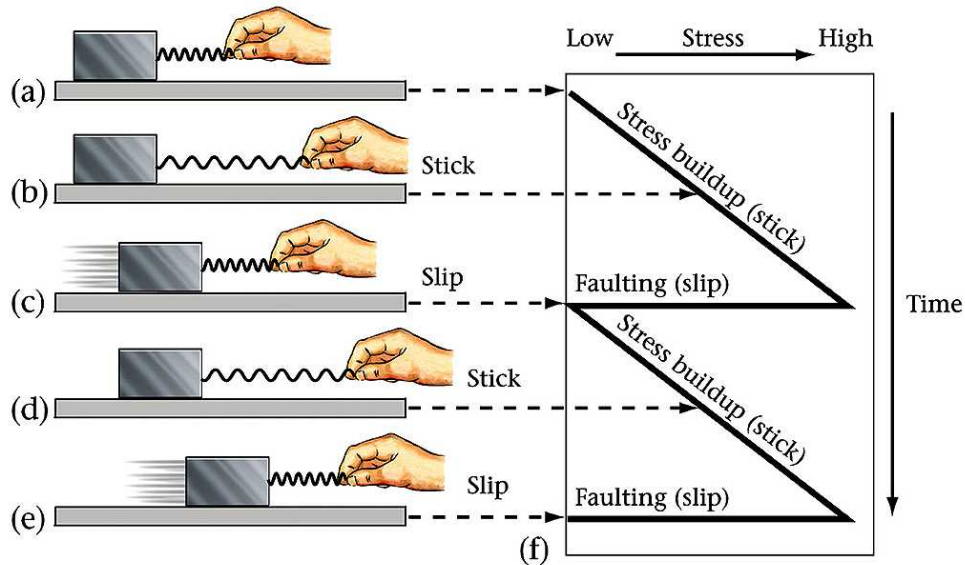
- Nazca - S-Amerikanische (O-K)
- Pazifische - Philippinische (O-O)



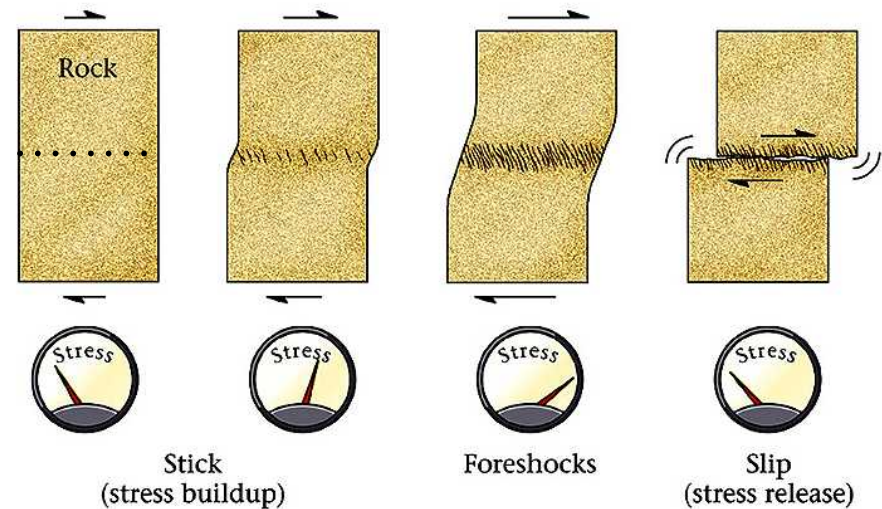
Hypozentrum

Rupture velocity $\approx 3-4$ km/s
Slip velocity ≈ 1 m/s
Elastische Wellen $\approx 4-5$ km/s

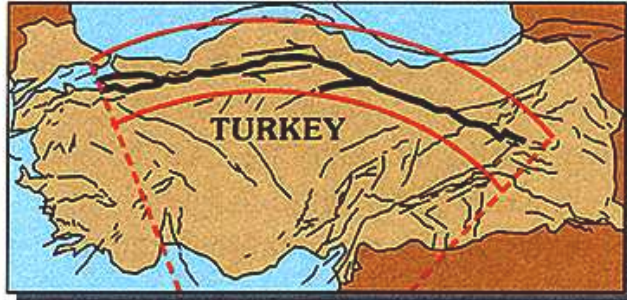
Stick-slip Modell



Bruchfläche existiert in der Regel bereits, hat aber grosse Festigkeit, da verheilt

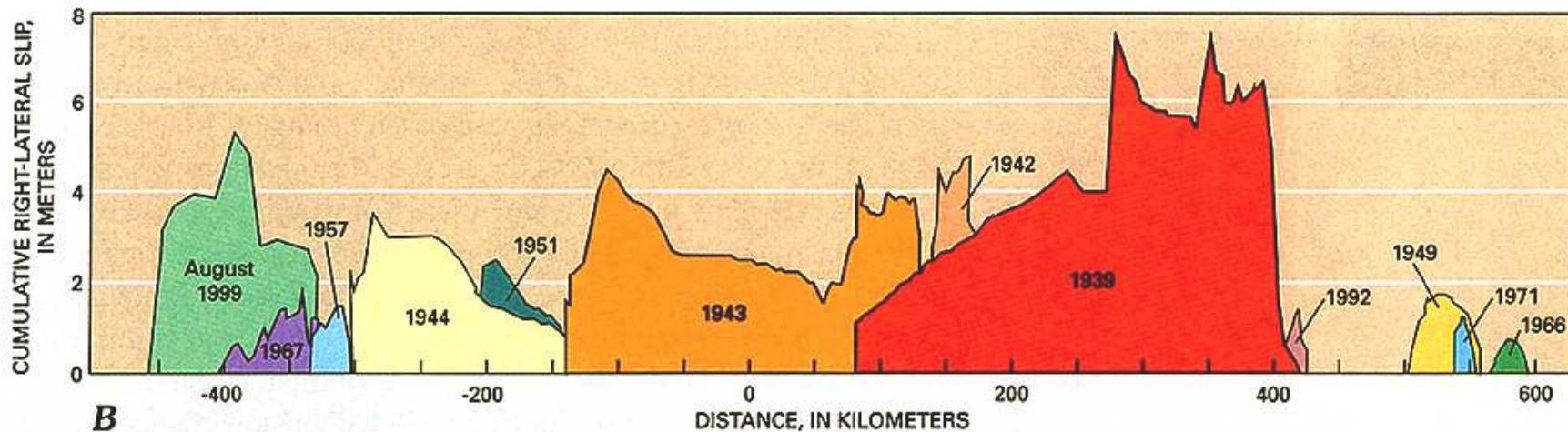


Slip distance → Erdbebenmagnitude



A

Beispiel:
Nordanatolischer Bruch

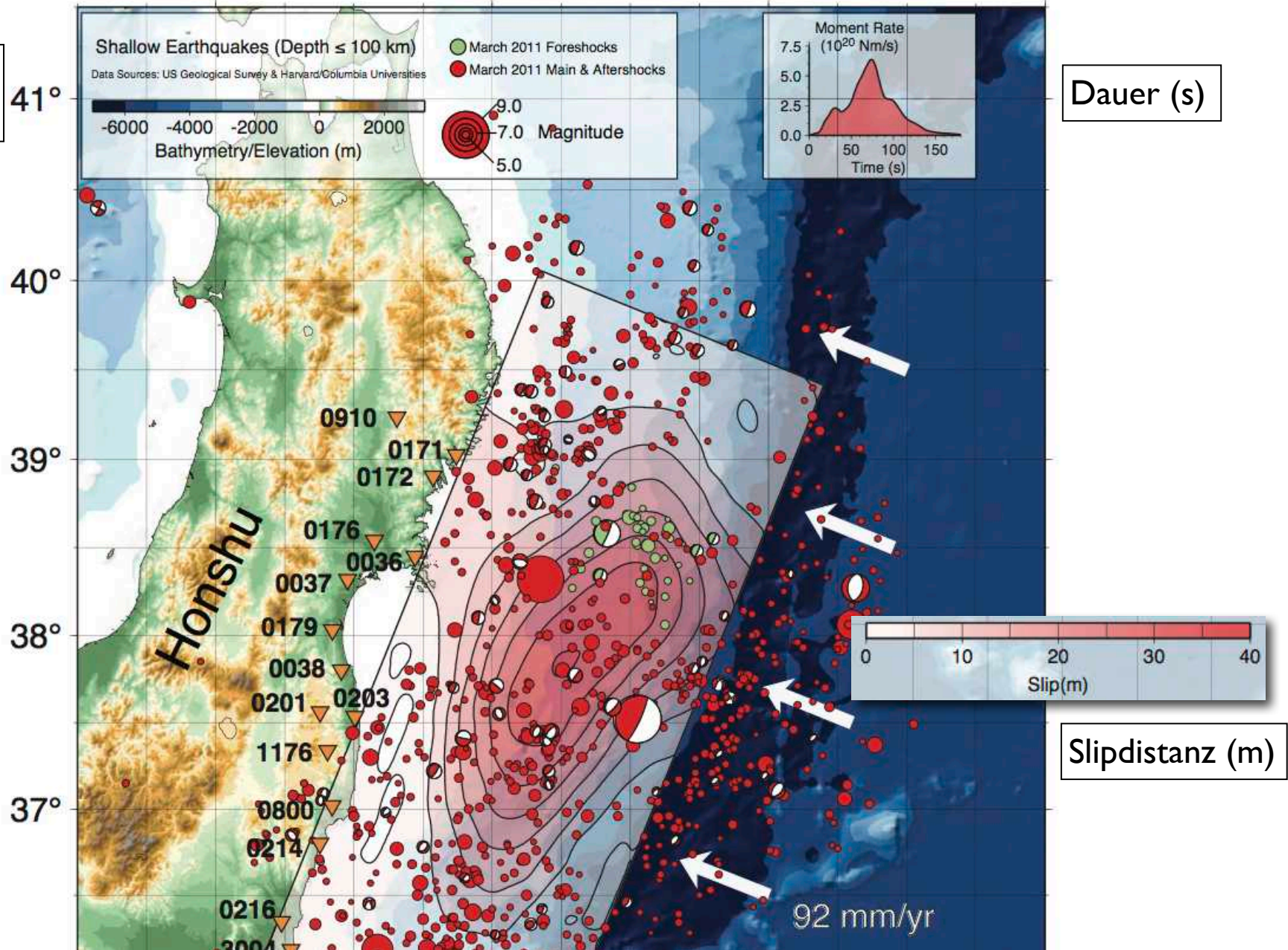


B

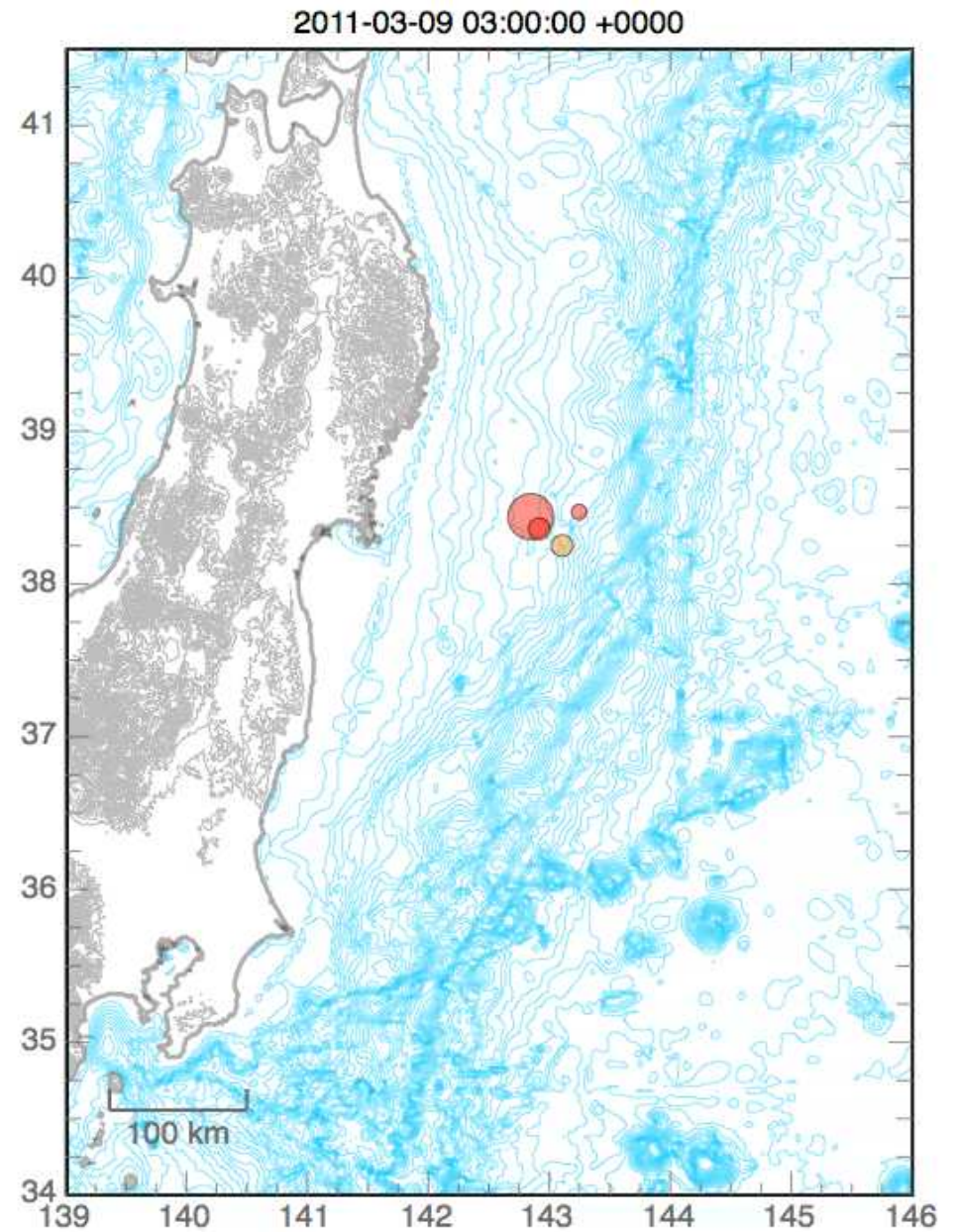
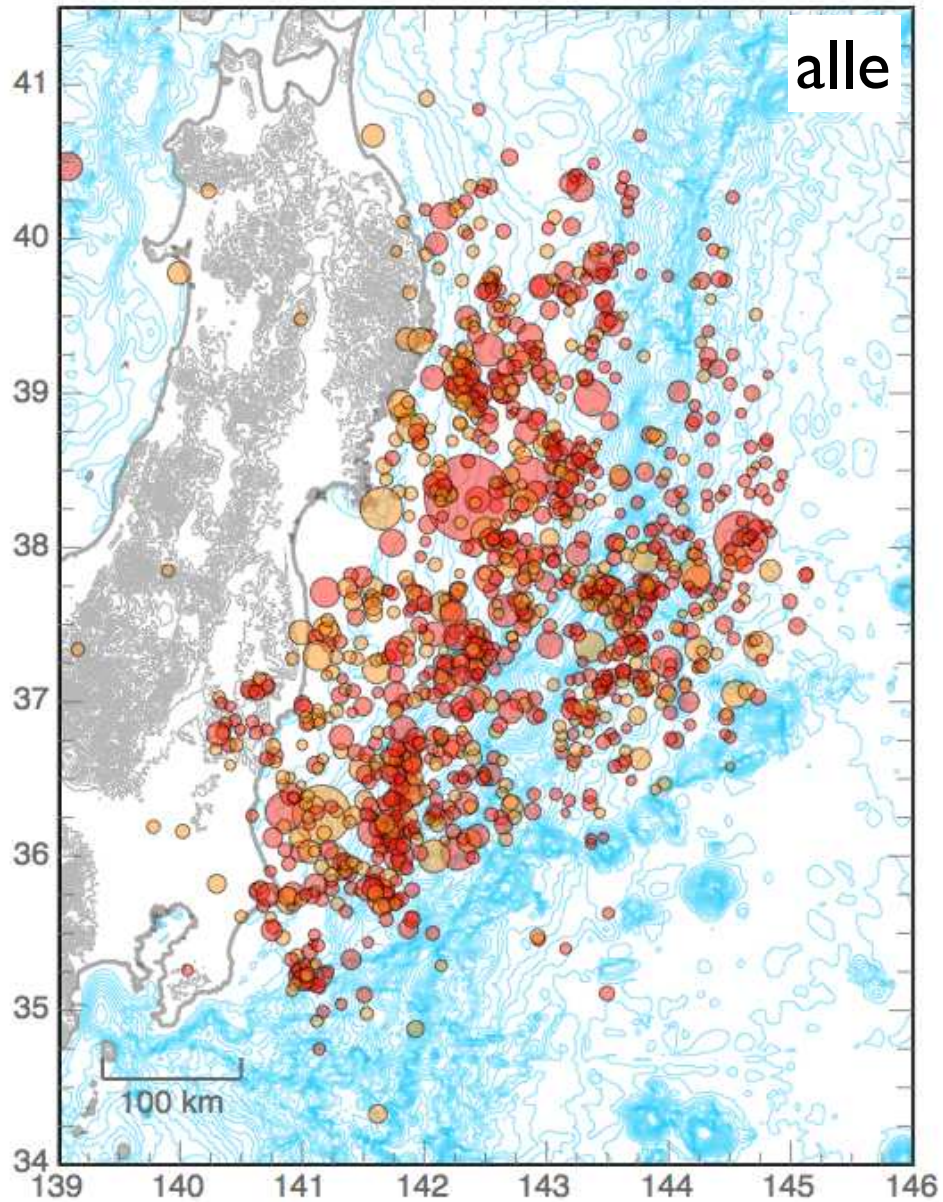
- Wichtige Grössen für Berechnung der Stärke eines Erdbebens:
- (1) Slip-Distanz (mittlere Verschiebung)
 - (2) Grösse der Bruchfläche

Foreshocks - aftershocks

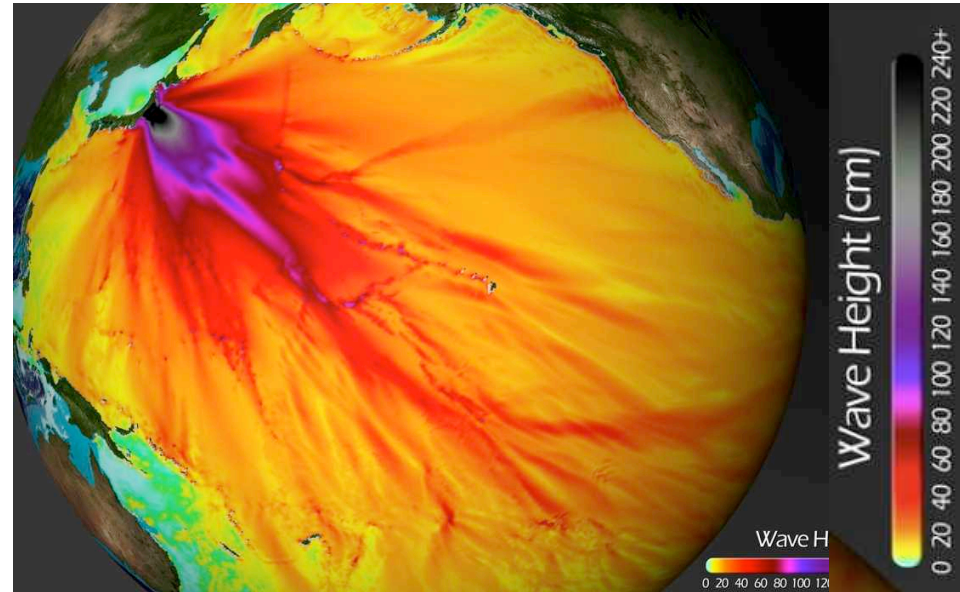
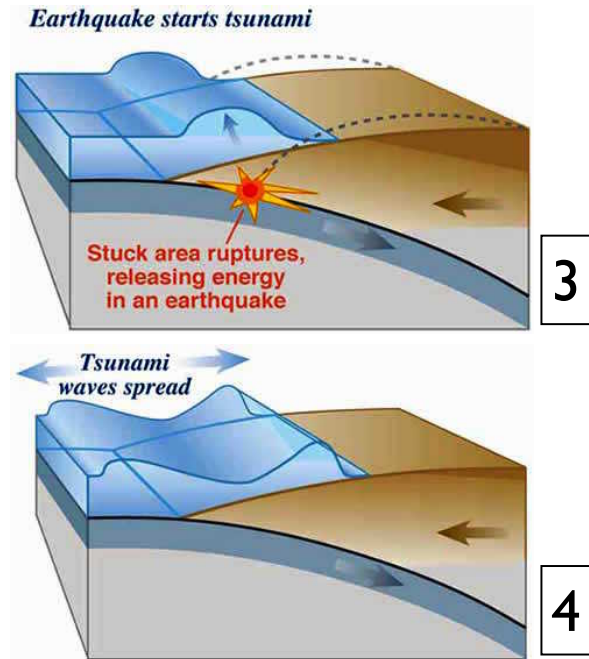
Vorbeben
Nachbeben



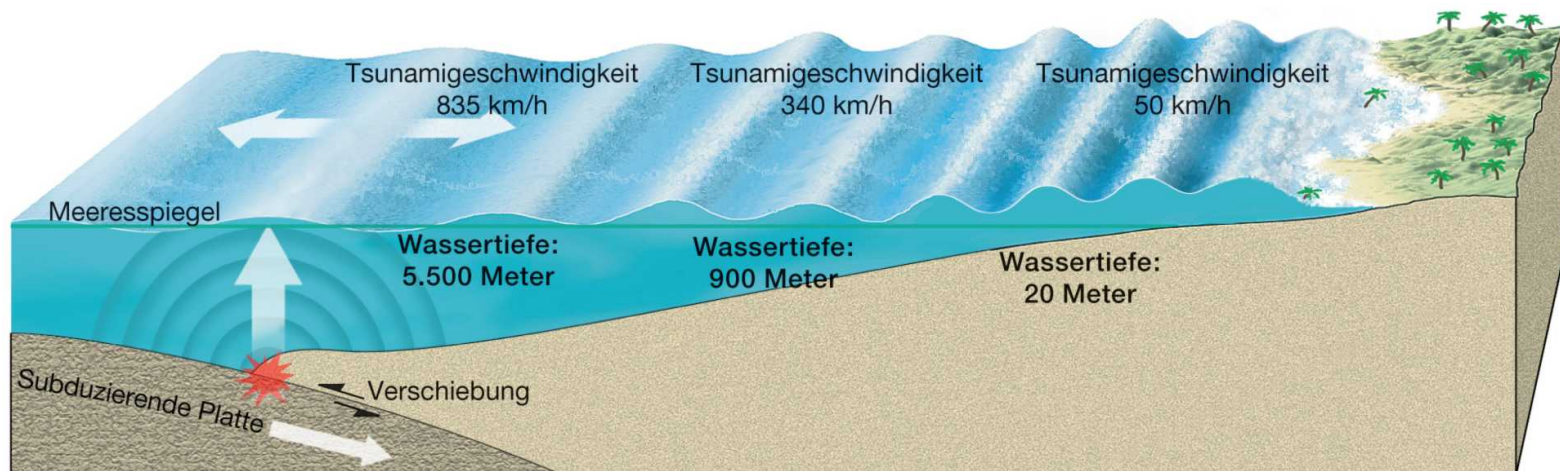
zeitlicher Ablauf



Tsunami

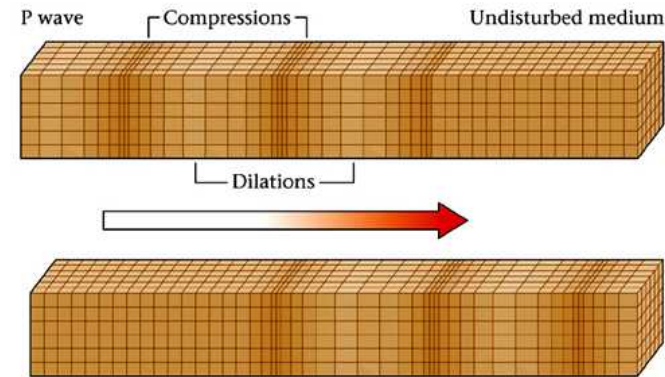
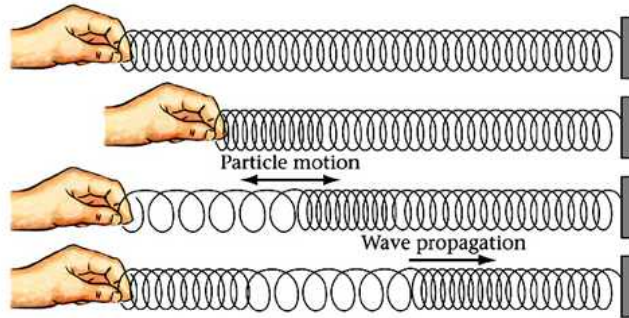


Tsunami Tohoku EQ 2011



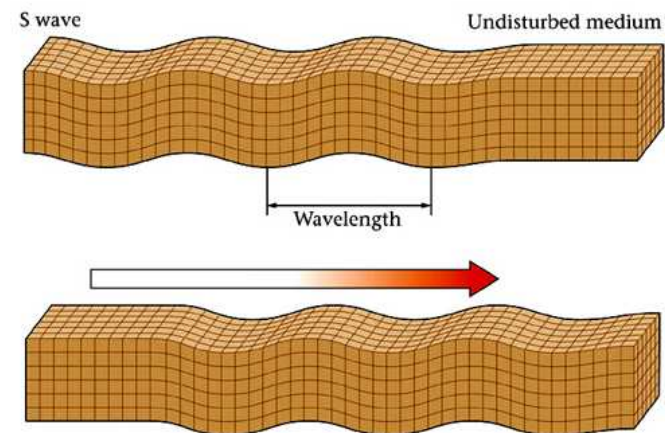
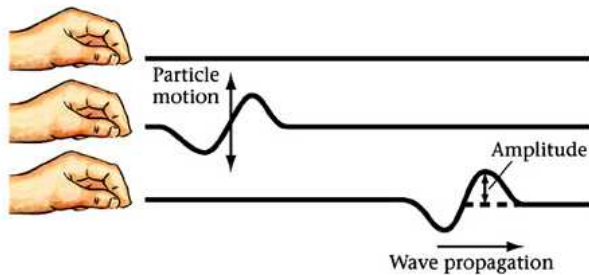
Seismische Wellen

P- und S-Wellen



P - Wellen: kompressiv

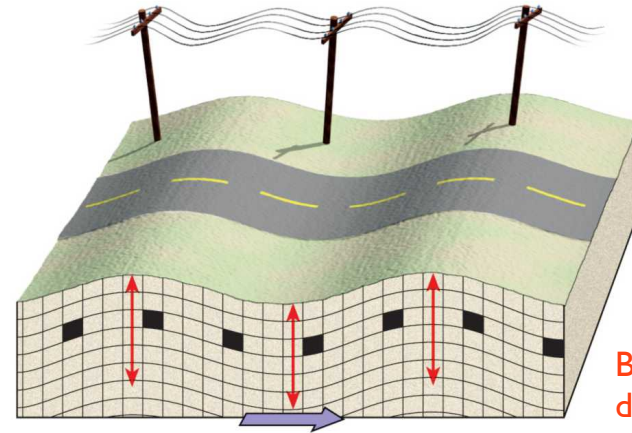
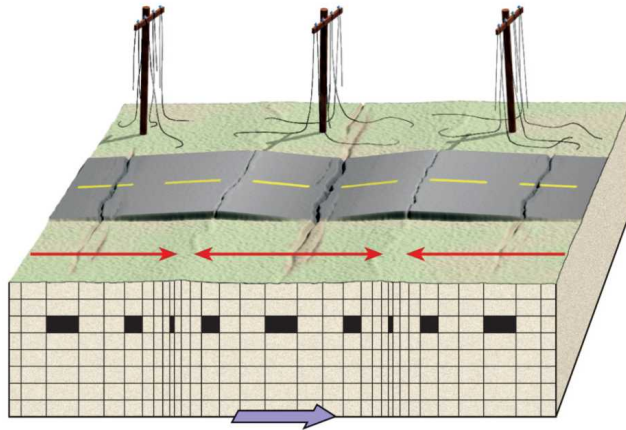
ϵ Verdichtung - Verdünnung



S - Wellen: Scherwellen

γ Auslenkung

Seismische Wellen



Bewegungsrichtung
der Teilchen im Körper

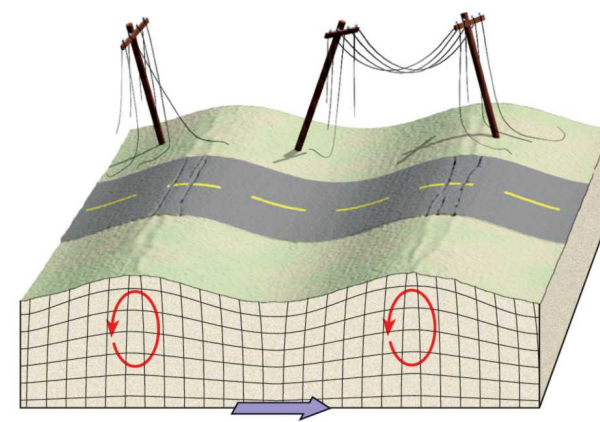
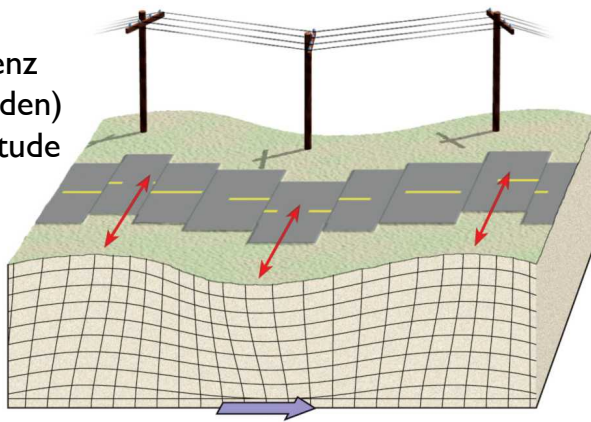
Fortpflanzungsrichtung der Welle

Körperwellen

P Kompressionswellen
P(rimär) - Wellen

S Scherwellen
S(ekundär) - Wellen

Love-Wellen:
≤ 40 km Tiefe
sehr tiefe Frequenz
(bis zu 20s Perioden)
sehr hohe Amplitude
langsamste

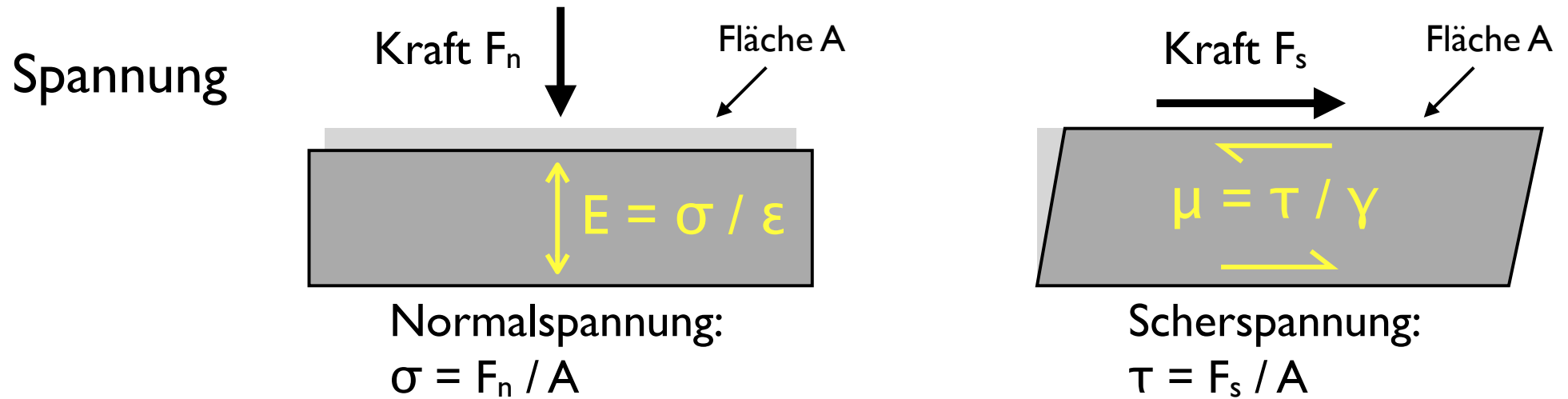


Oberflächenwellen

Q Love Wellen

R (LR) Raleigh Wellen

crash course Mechanik



Einheit für Spannung: Kraft / Fläche = $\text{N} / \text{m}^2 = \text{Nm}^{-2} = \text{Pa}$

Verformung

Verkürzung: ϵ
Spannung: σ

Scherung: γ
Scherspannung: τ

Einheit für Verformung: Länge / Länge = dimensionslos

Modul

$\sigma = E \cdot \epsilon$
 $E = \text{Elastischer Modul}$

$\tau = \mu \cdot \gamma$
 $\mu = \text{Schermodul}$

Einheit für Moduli: Spannung / Verformung = Pa bzw. GPa

Wellengeschwindigkeit

$$\text{speed} = \sqrt{\frac{\text{elastic modulus}}{\text{density}}}$$

$$\text{P-Wellen } v_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \quad \text{S-Wellen } v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

$\sigma = E \cdot \varepsilon$
 $E = \text{Elastischer Modul}$
 $K = \text{Kompressionsmodul (3D)}$

$\tau = \mu \cdot \gamma$
 $\mu = \text{Schermodul}$

P-Wellen immer schneller als S-Wellen

$$v_p > v_s$$

Geschwindigkeit seismischer Wellen

geg.: Kompressionsmodul $K \sim 0.6 \cdot 10^{11}$ Pa (60 GPa) Pa : $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}$

Schermodul $\mu \sim 0.3 \cdot 10^{11}$ Pa (30 GPa)

Dichte $\rho \sim 3 \cdot 10^3$ kg m^{-3}

ges.: seismische Geschwindigkeiten v_s und v_p

$$v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \approx \sqrt{\frac{30 \cdot 10^9 \text{ kg m}^{-1} \text{s}^{-2}}{3 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-3}}}$$

$$\approx \sqrt{1 \cdot 10^7 \frac{\text{s}^{-2}}{\text{m}^{-2}}} \approx 3.2 \cdot 10^3 \text{ ms}^{-1}$$

$$v_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3} \mu}{\rho}} \approx \sqrt{\frac{(60+40) \cdot 10^9 \text{ kg m}^{-1} \text{s}^{-2}}{3 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-3}}}$$

$$\approx \sqrt{33 \cdot 10^6 \frac{\text{s}^{-2}}{\text{m}^{-2}}} \approx 5.7 \cdot 10^3 \text{ ms}^{-1}$$

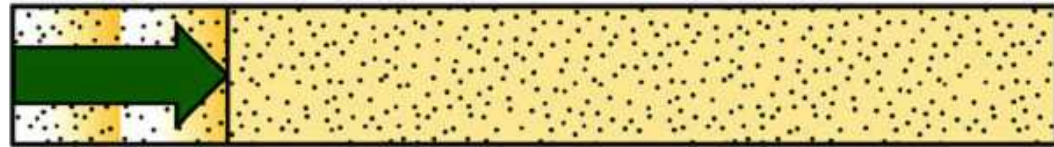
seismische Geschwindigkeiten

	v_p (ms ⁻¹)	v_s (ms ⁻¹)
Air	332	
Water	1400-1500	
Petroleum	1300-1400	
Concrete	3600	2000
Granite	5500-5900	2800-3000
Basalt	6400	3200
Sandstone	1400-4300	700-2800
Limestone	5900-6100	2800-3000
Sand (Unsaturated)	200-1000	80-400
Sand (Saturated)	800-2200	320-880
Clay	1000-2500	400-1000
Glacial Till (Saturated)	1500-2500	600-1000

seismische Geschwindigkeiten

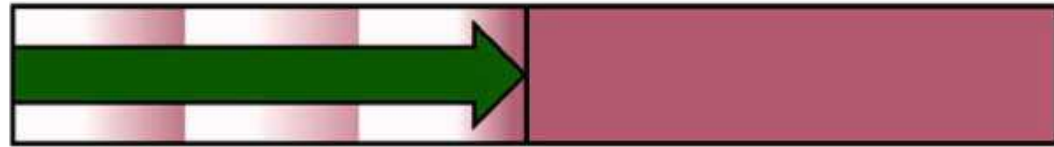
weniger steif

Less stiff



Sandstone
(upper crust)

More stiff



Peridotite
(upper mantle)

steifer

$$\text{speed} = \sqrt{\frac{\text{stiffness}}{\text{density}}}$$

Solid



Peridotite
(lower mantle)

Liquid



Molten iron
alloy
(outer core)

p-Wellen

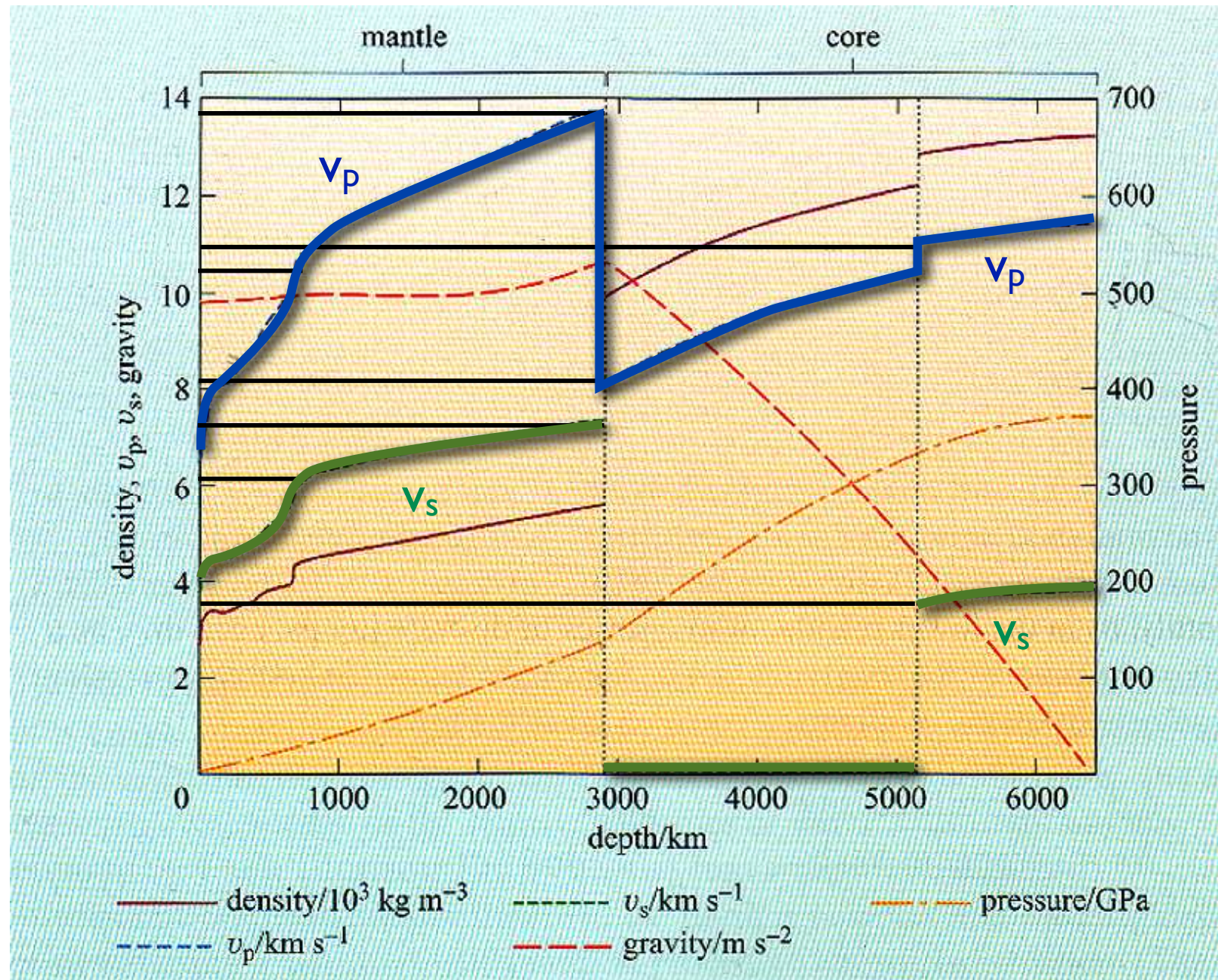
Preliminary Reference Earth Model

P-waves
seismic
velocity
[kms⁻¹]

$$v_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}}$$

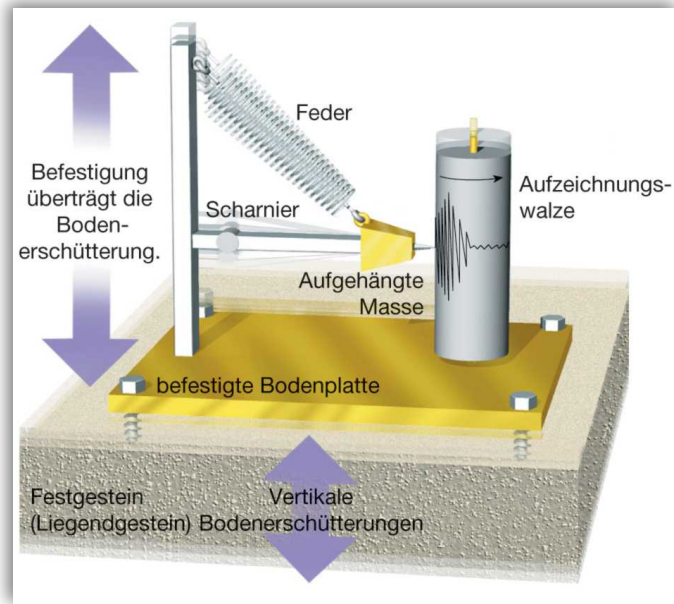
S-waves
seismic
velocity
[kms⁻¹]

$$v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

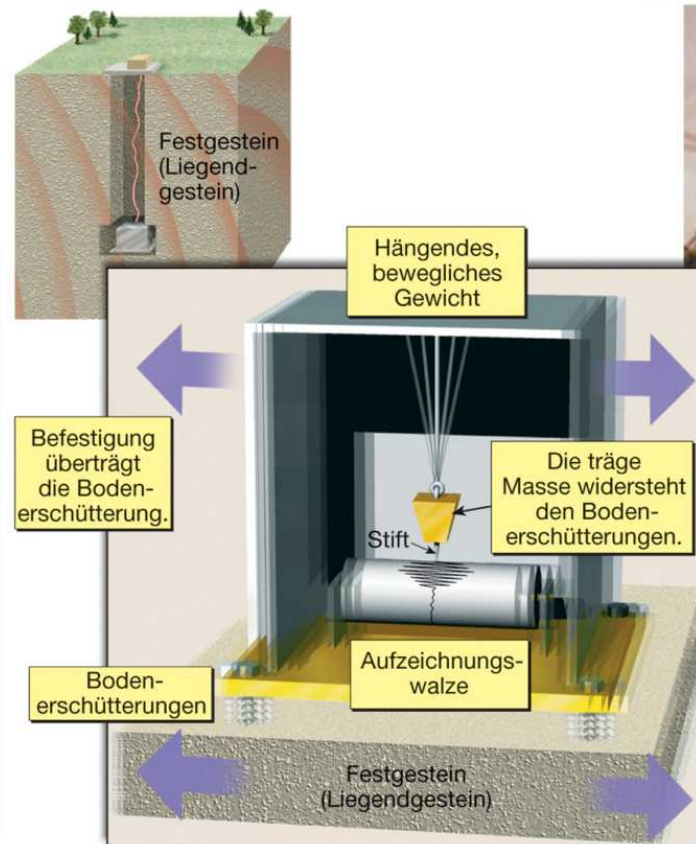


Aufzeichnung

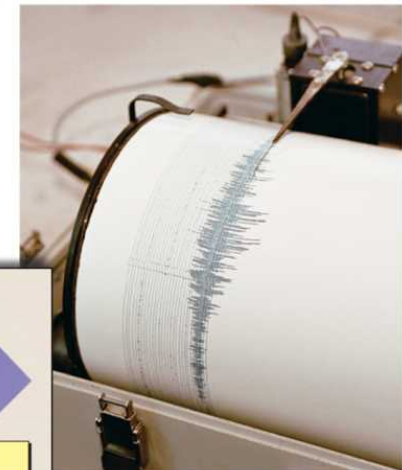
Seismometer (Seismograph)



vertikal

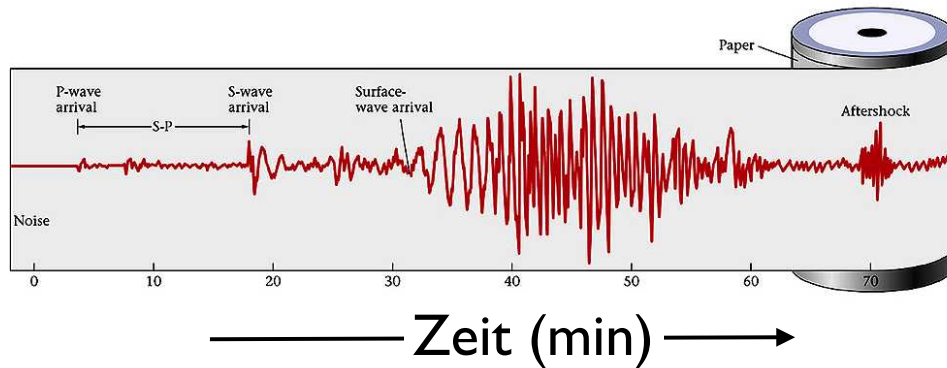


horizontal

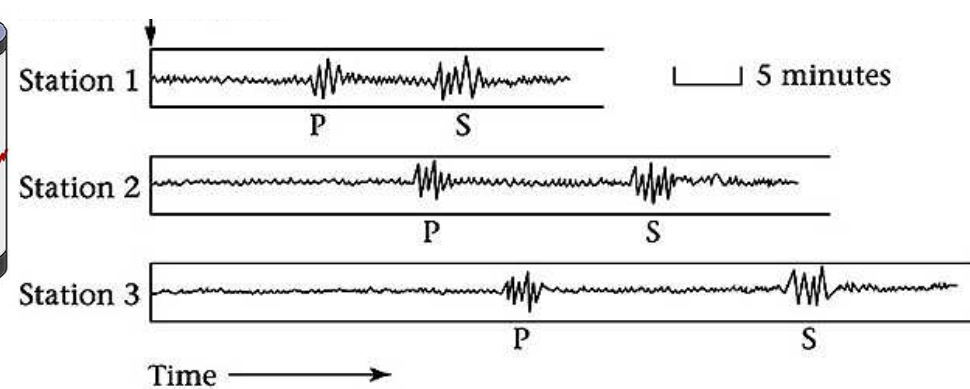


Breitbandseismometer

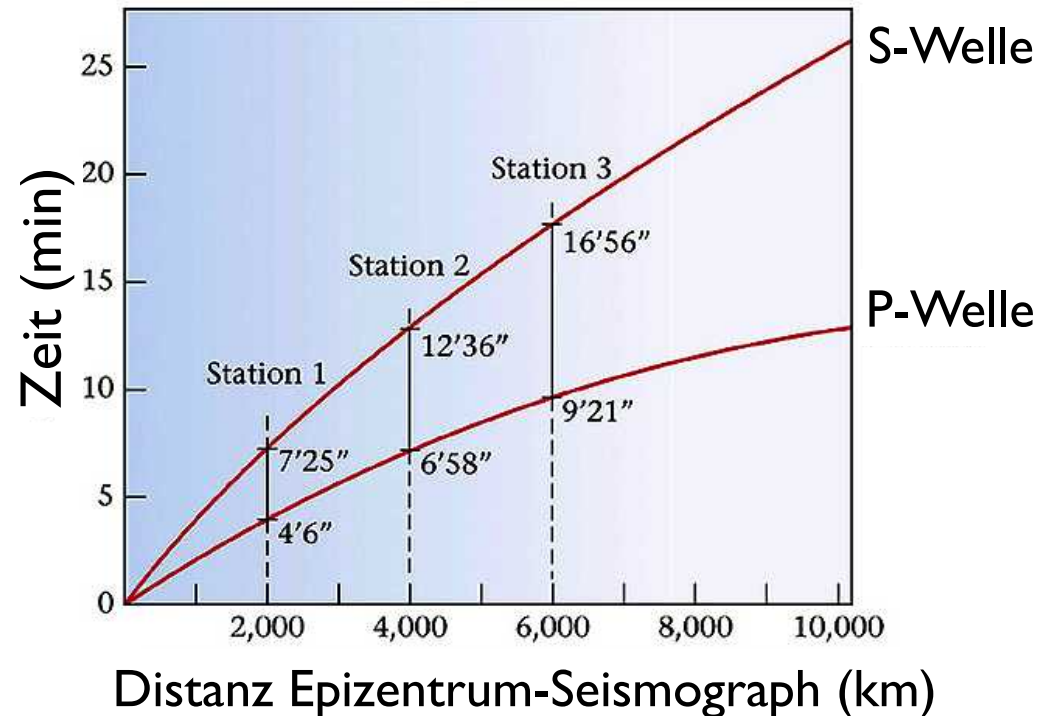
Erdbebenwellen - Laufzeiten



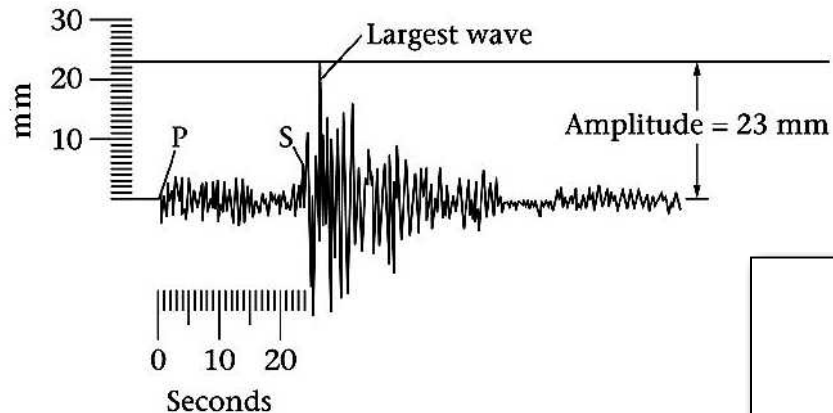
Ankunftszeiten



P - Welle schneller
S - Welle langsamer



Magnitude

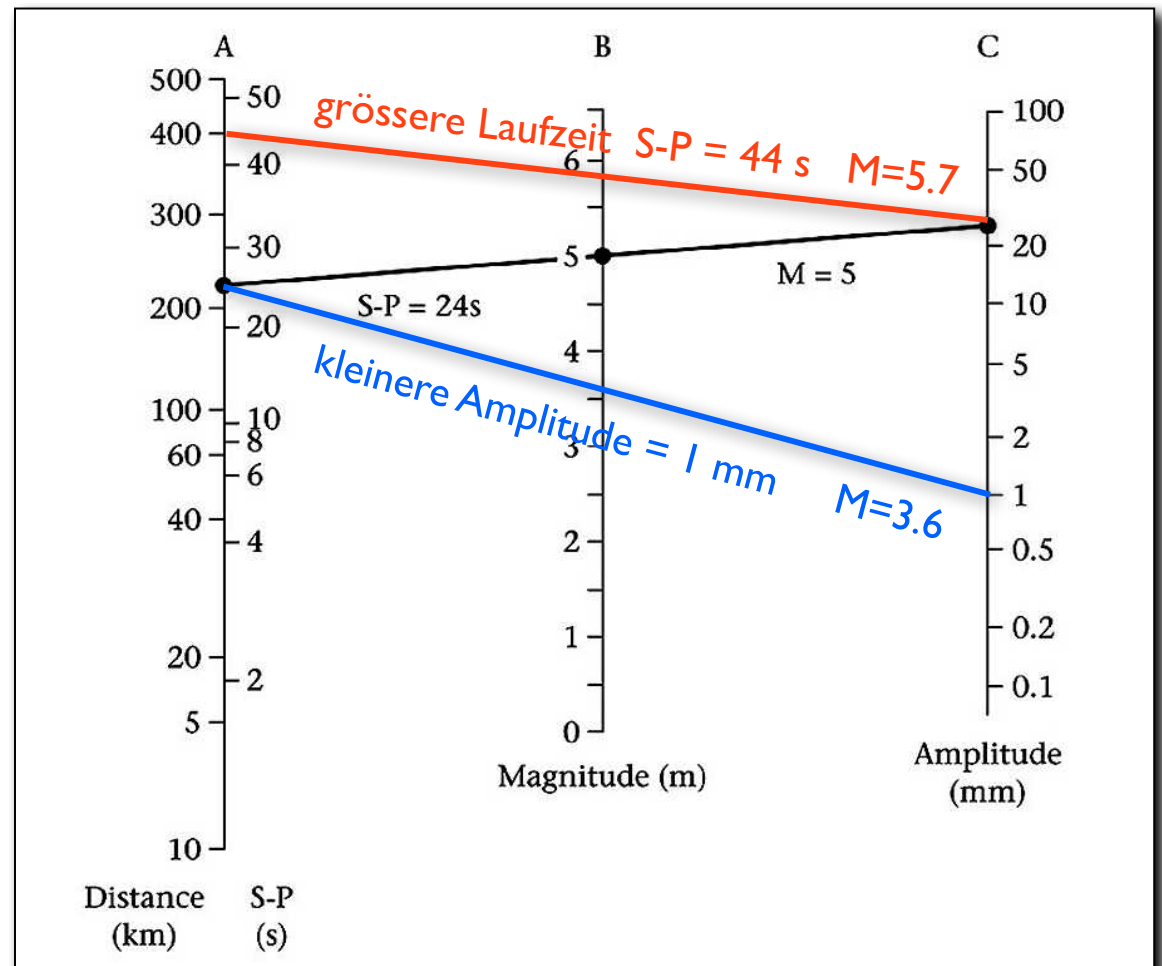


Amplitude = 23 mm

Laufzeitenunterschied S-P = 24 s

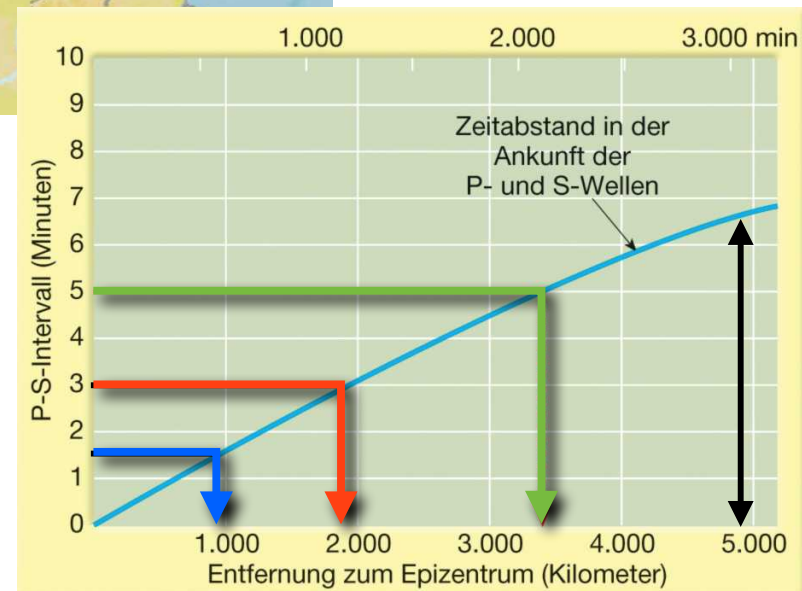
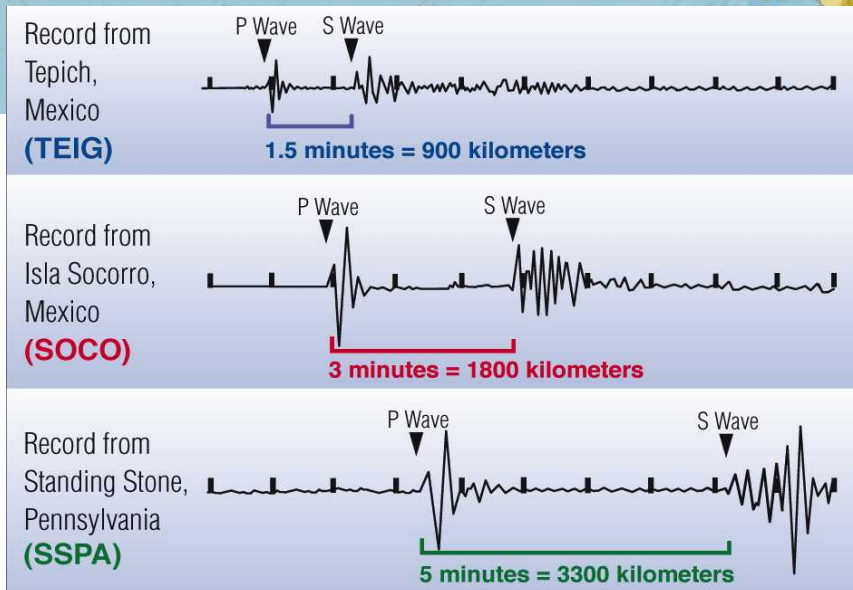
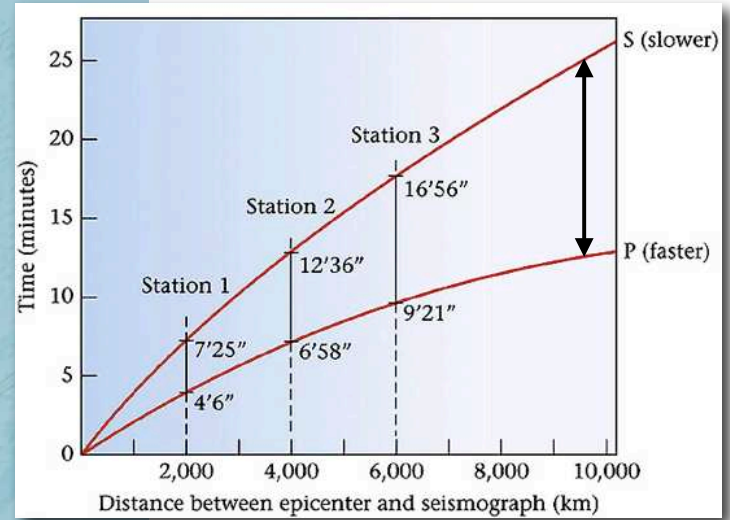
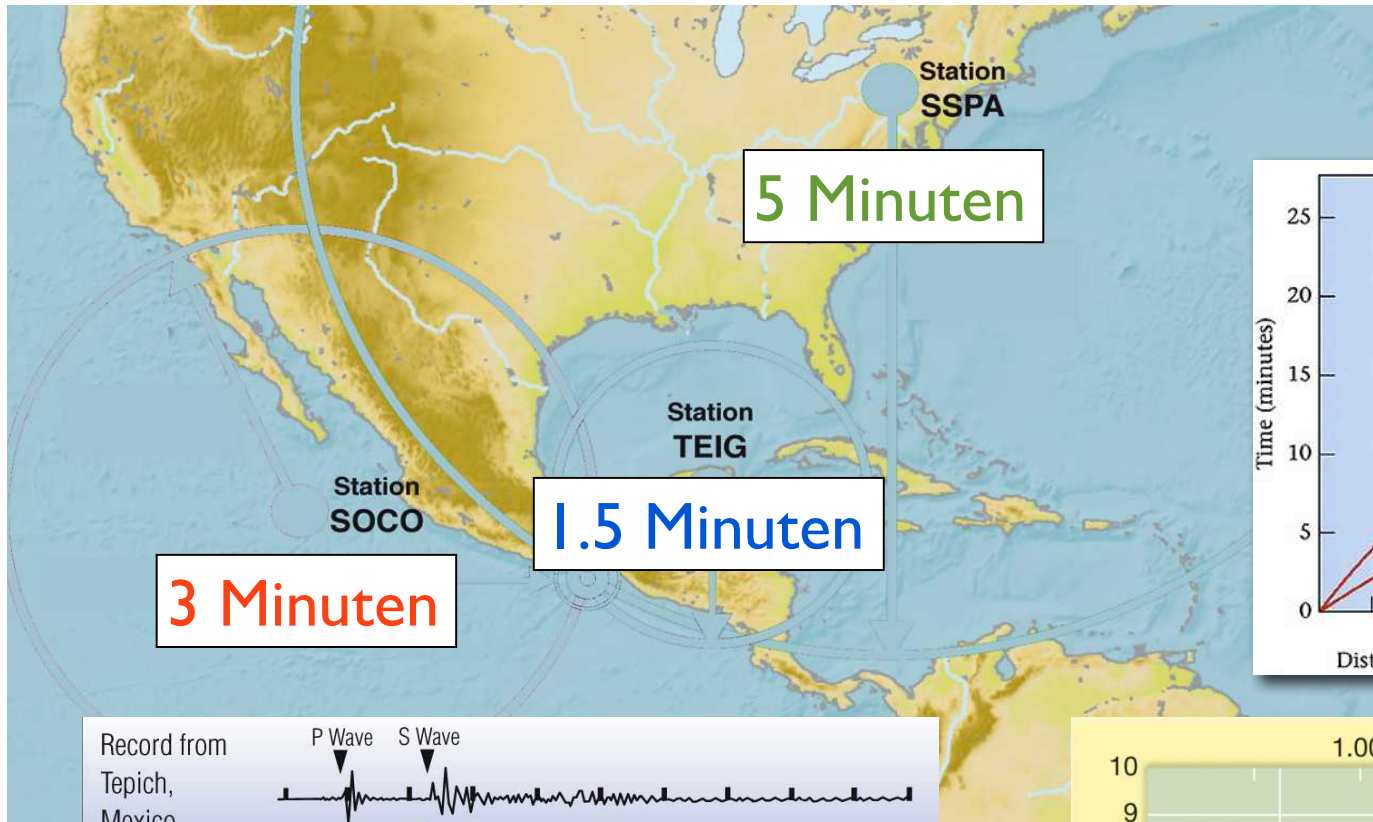
Erdbeben ist gross:

- je grösser die Amplitude (bei gleichem Abstand S-P)
- je grösser der Abstand S-P (bei gleicher Amplitude)

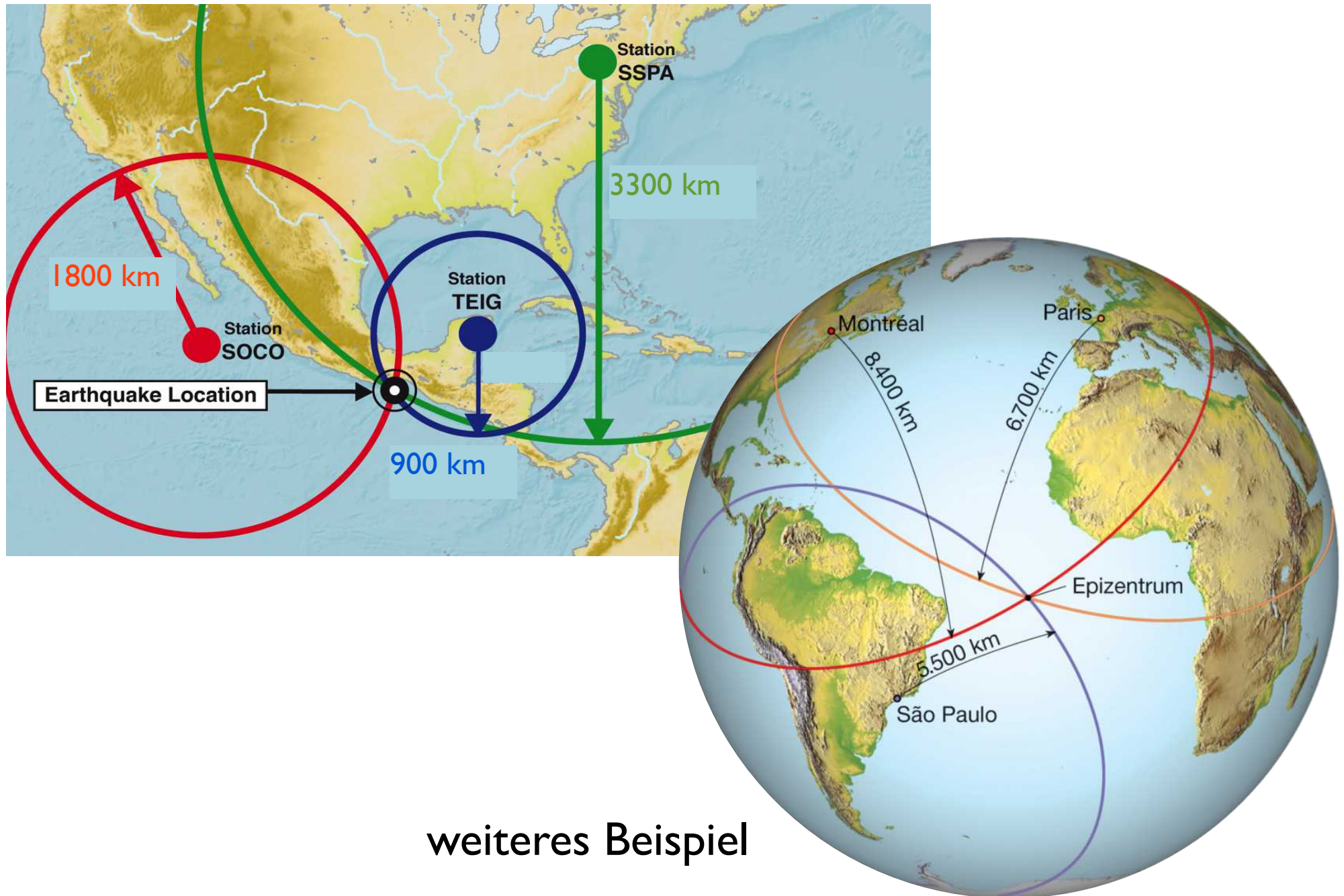


Lokalisierung Herdflächen

Laufzeitenunterschiede

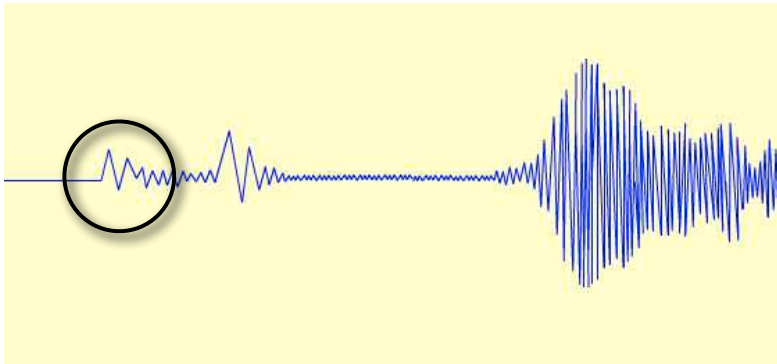


wo ist das Epizentrum ?

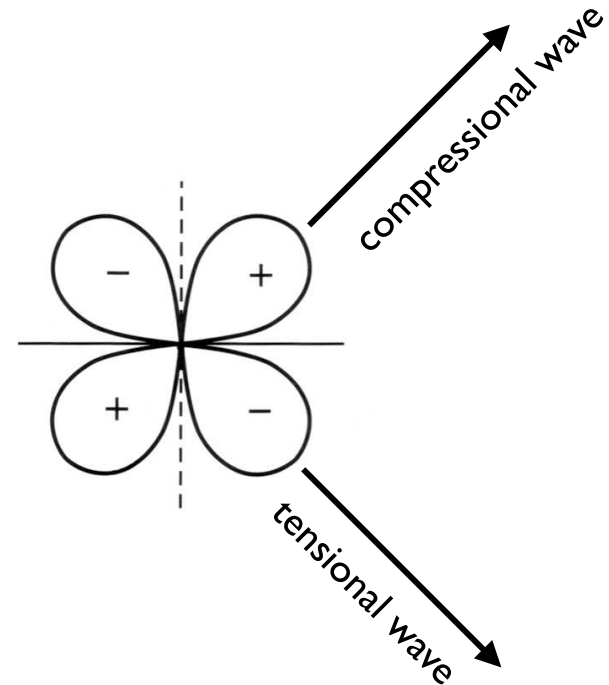
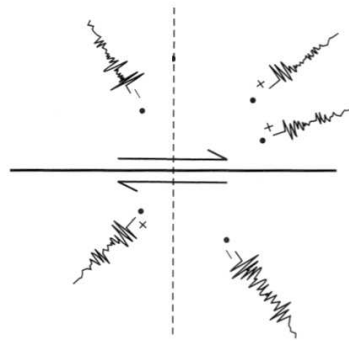
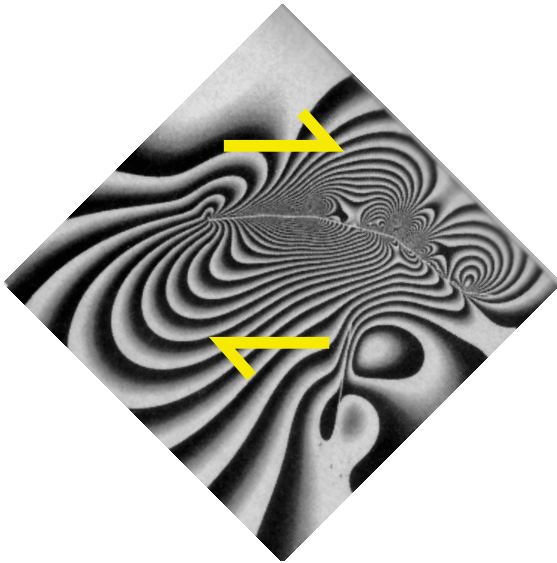


weiteres Beispiel

Erstausschlag

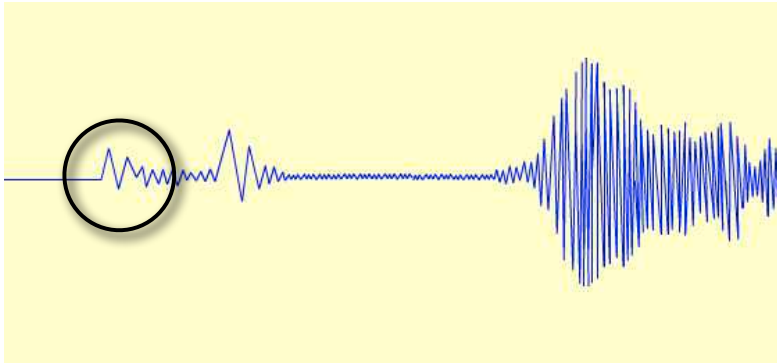


up = push = compression
down = pull = tension



Kraft bewirkt Kompressionswelle quer dazu
=> (scheinbar paradox:) Tension // zur einwirkenden Kraft
bzw. // zu σ_1 (grösste kompressiven Hauptspannung)

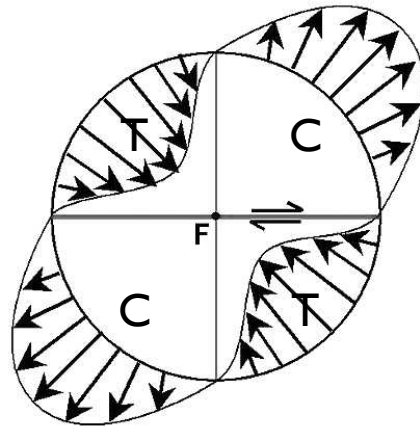
Erstausschlag



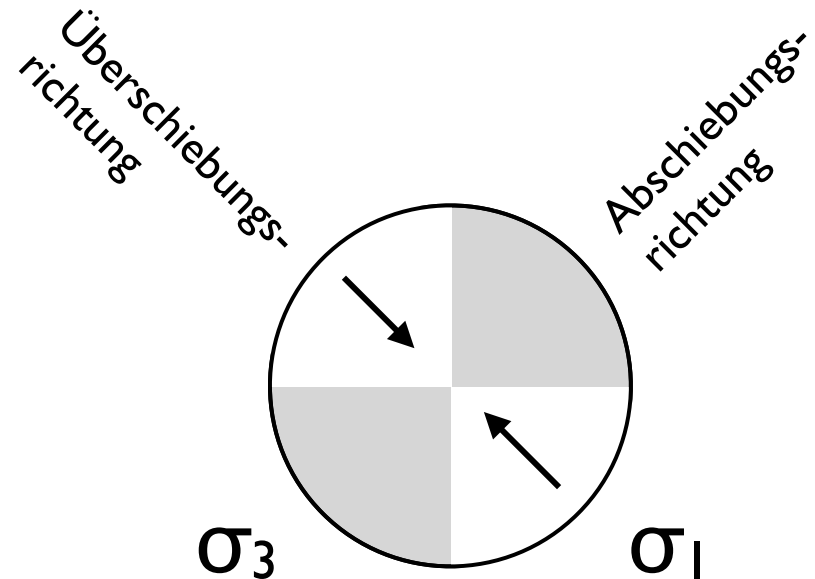
Bewegungssinn der vom Herd (F) abgestrahlten Welle:

Tension =
hin zur Messtation
= DOWN

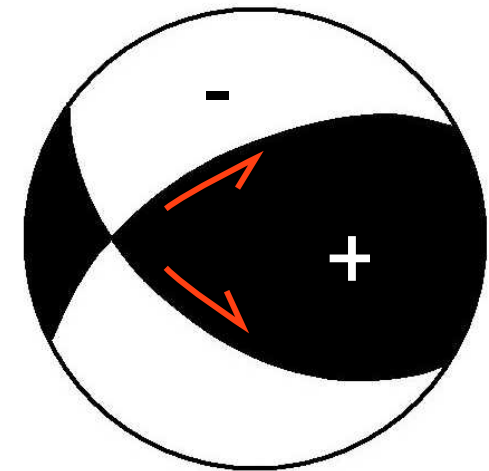
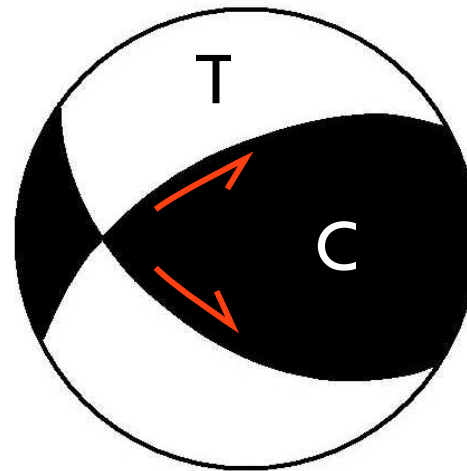
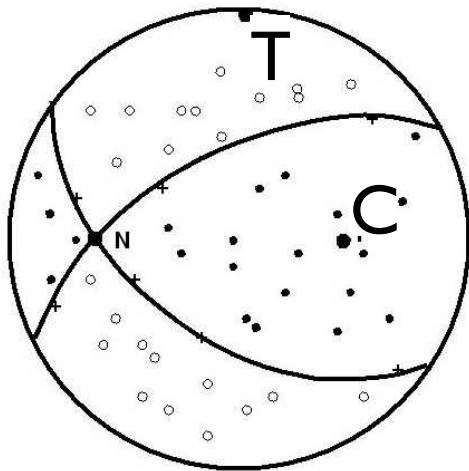
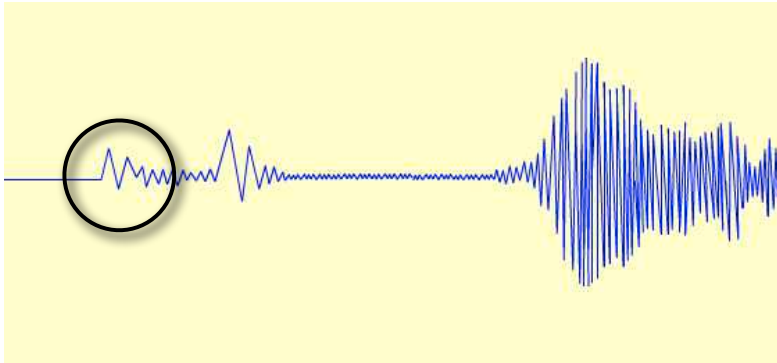
Kompression =
weg von der Messtation
= UP



Hauptspannungsrichtungen:



Erstausschlag



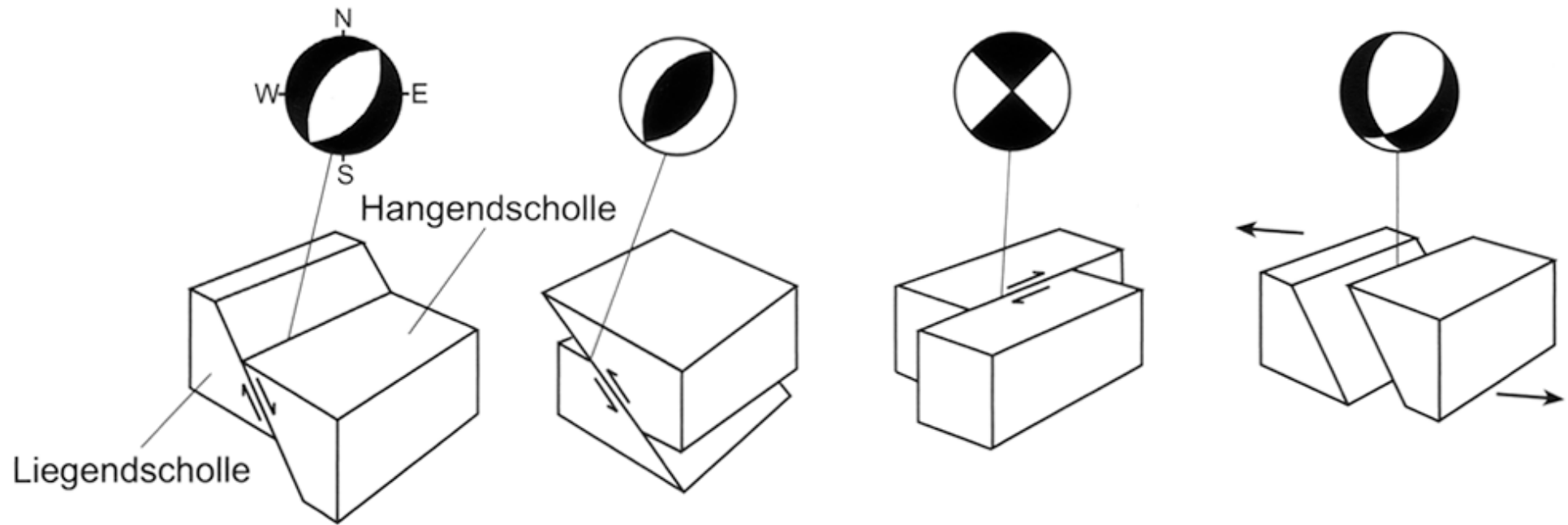
○	= up
●	= down
+	= too weak

+	= up	= push	= compression
-	= down	= pull	= tension

schiefe Aufschiebung
an zwei möglichen Flächen

lower-hemisphere
stereographic projection

Erdbeben - Herdflächenlösungen



Abschiebung

Aufschiebung
Überschiebung

Blattverschiebung
Seitenverschiebung

Transtension

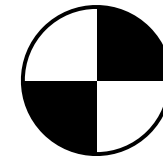
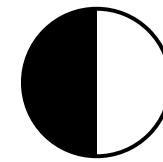
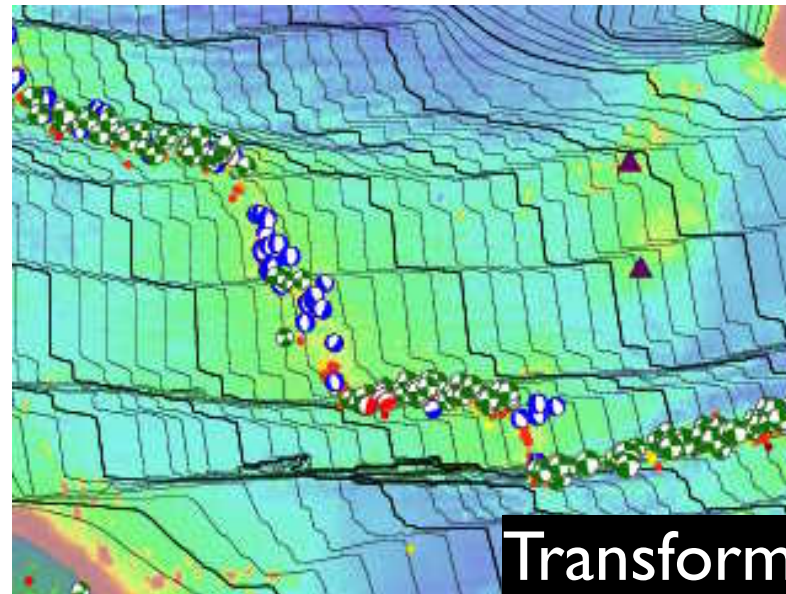
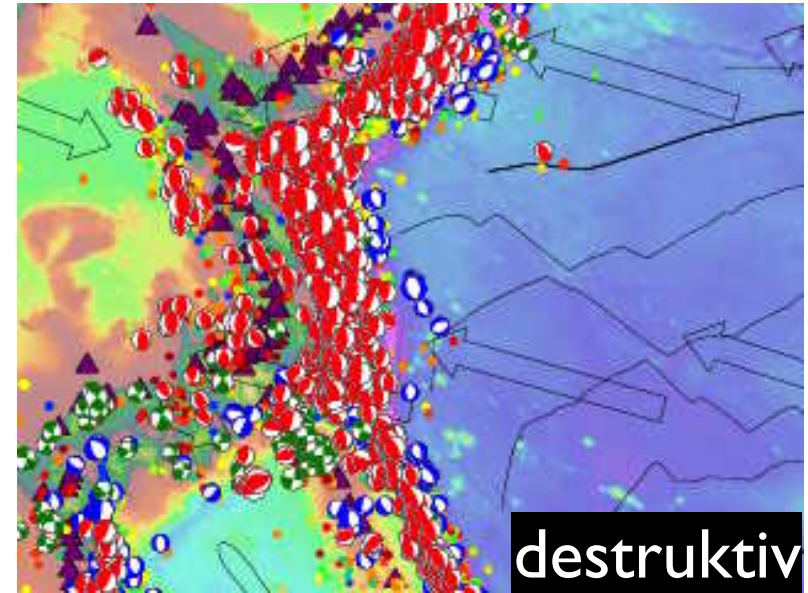
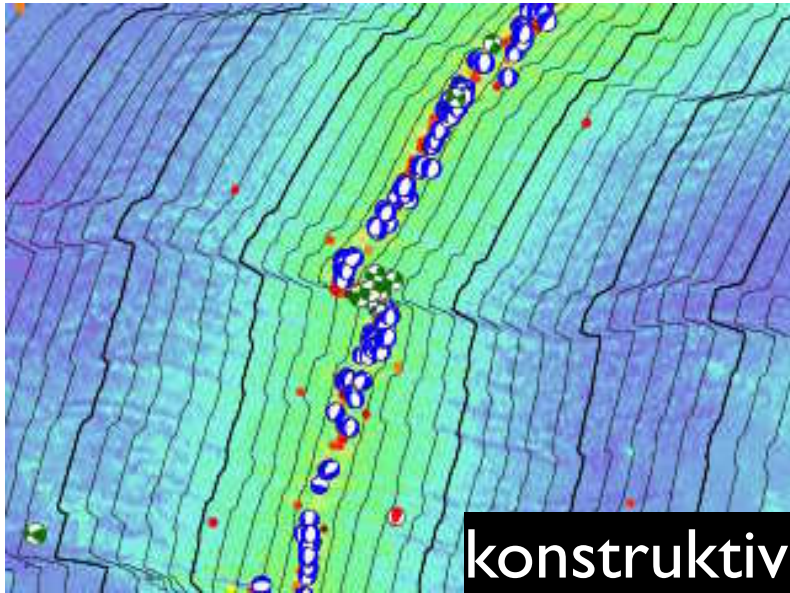
Konstruktive...

Destruktive...

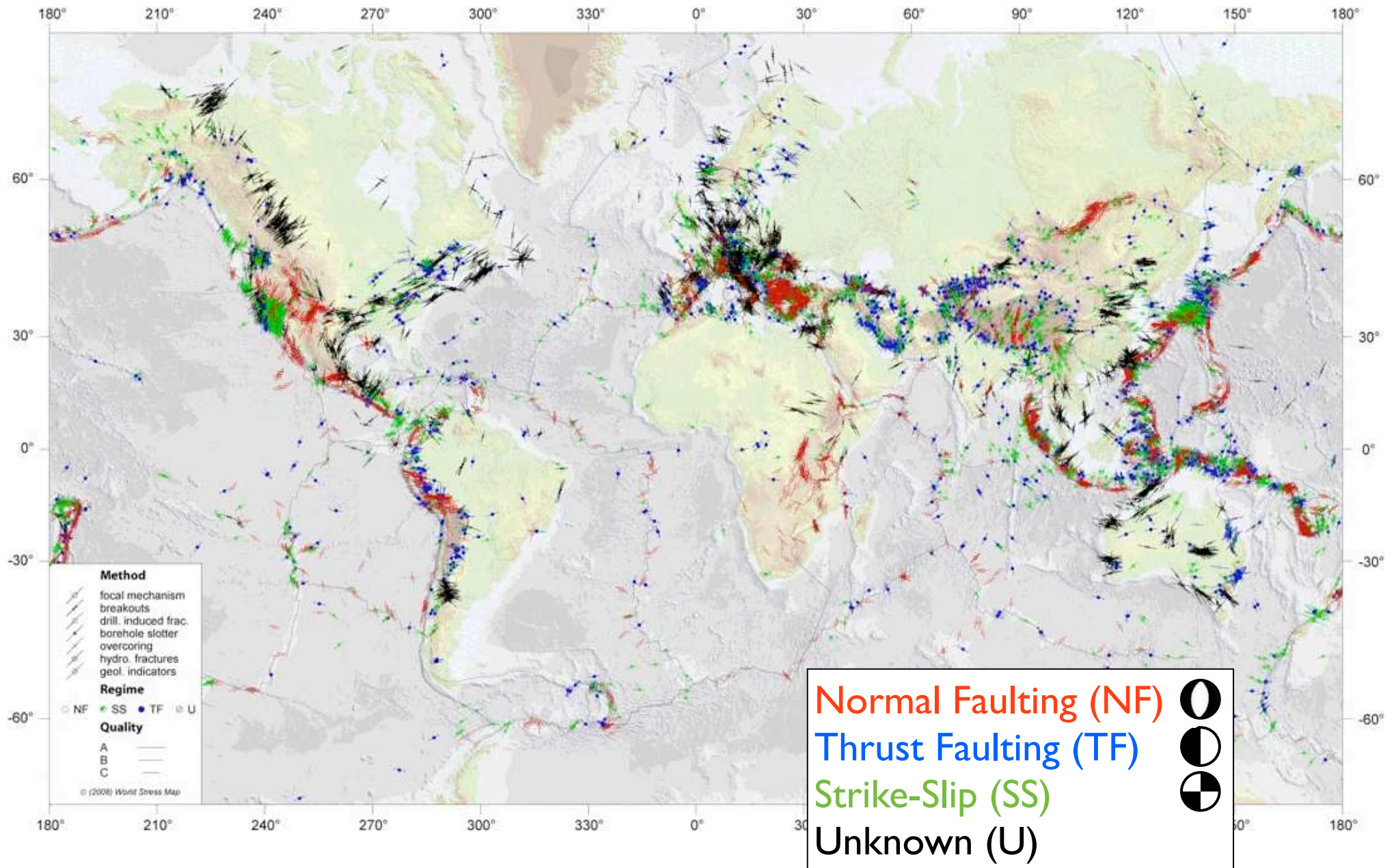
Konservative...

Plattengrenze

Plattengrenzen - Erdbehebentypen



Global stress map



6 Seismik

Erdbeben Magnituden (seismische Energie)

- Richterskala RL
- Moment magnitude MMS

Erdbeben Intensität (Zerstörungsgrad)

- Mercalli Skala, EMS

Refraktionsseismik

Seismische Grenzflächen

Seismische Tomographie

IRIS Teachable Moments, OnePager

Erdbeben: Magnitude

Richterskala (1935)

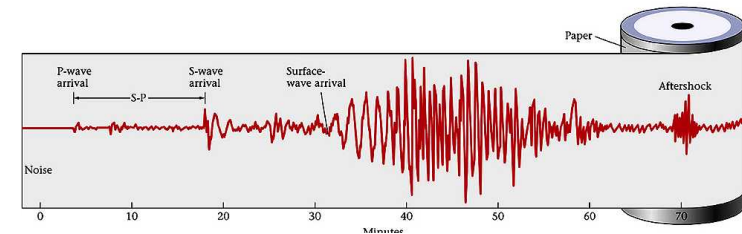
$$M_L = \log_{10} (A) - \log_{10} (A_0(\delta))$$

A Maximaler Ausschlag des Wood-Anderson Seismographen

A_0 empirische Korrektur-Funktion, abhängig vom Abstand des Epizentrums zur Messstation, δ

Lokale Magnitude

Geeignet für Distanzen von wenigen 100 km



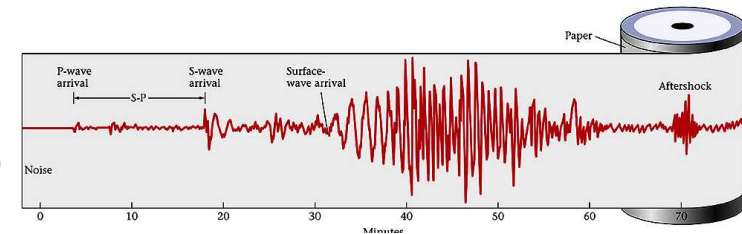
	Bezeichnung	Entfernung	Periodenbereich (s)
M_L	Richterskala	lokal	0.1 – 1.0
M_S	Oberflächenwellenmagnitude	weltweit	20
M_W	Momenten-Magnitude	weltweit	> 200

Oberflächenwellen - Magnitude

$$M_s = \log_{10} (A / T)_{\max} + \log_{10} (\Delta) + 3.3$$

- M_s Magnitude (surface magnitude)
- A maximale Amplitude (μm)
- T Periode (s)
- Δ Winkelabstand Seismograph - Herd ($^\circ$)

Für seichte Erdbeben
($h < 50 \text{ km}$) ($20^\circ < \Delta < 160^\circ$) ($18\text{s} < T < 22\text{s}$)



	Bezeichnung	Entfernung	Periodenbereich (s)
M_L	Richterskala	lokal	0.1 – 1.0
M_s	Oberflächenwellenmagnitude	weltweit	20
M_W	Momenten-Magnitude	weltweit	> 200

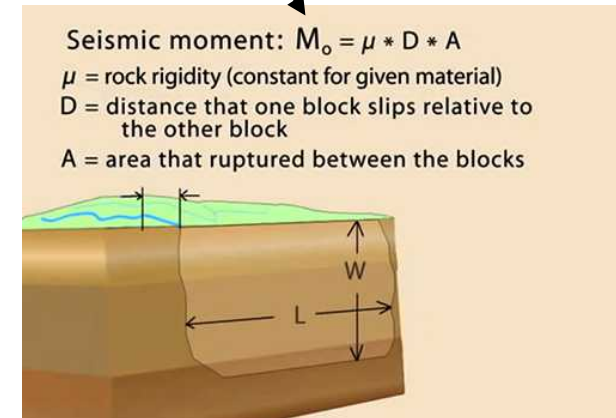
s. Pfiffner et al. 2016

Moment magnitude scale MMS (1970)

$$M_W = \frac{2}{3} \cdot \log_{10} (M_0) - 10.7$$

Produkt aus Steifigkeit (Schermodul)
mal durchschnittlicher Slip-Distanz (m)
mal Bruchfläche (m²)

M_0 Magnitude des seismischen Moments
in dyne centimeter (10^{-7} Nm)



Konsistent mit der Richterskala

www.youtube.com/watch?v=HL3K GK5eqaw

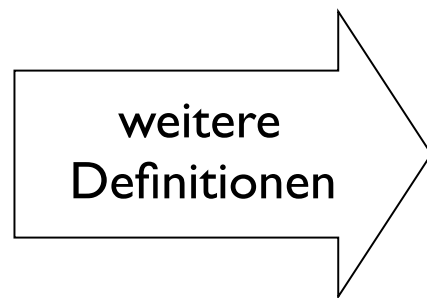
	Bezeichnung	Entfernung	Periodenbereich (s)
M_L	Richterskala	lokal	0.1 – 1.0
M_S	Oberflächenwellenmagnitude	weltweit	20
M_W	Momenten-Magnitude	weltweit	> 200

Magnituden

allgemeine Formulierung:

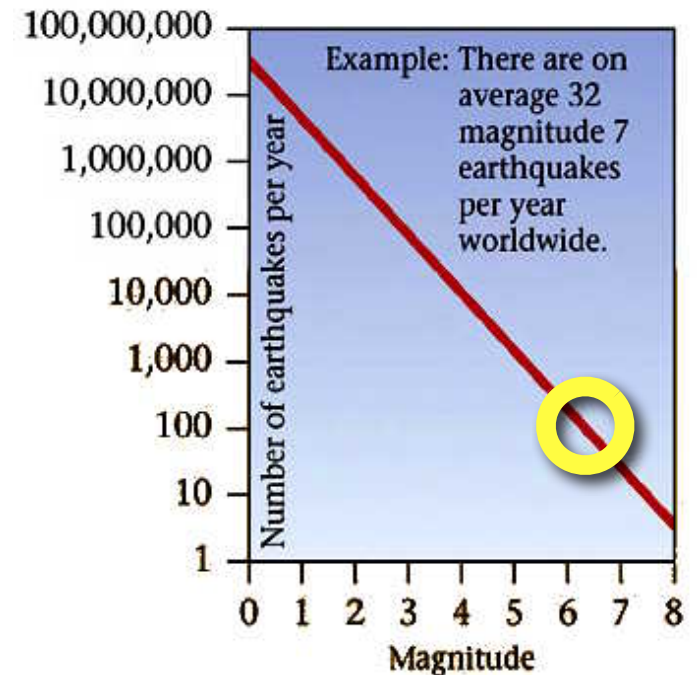
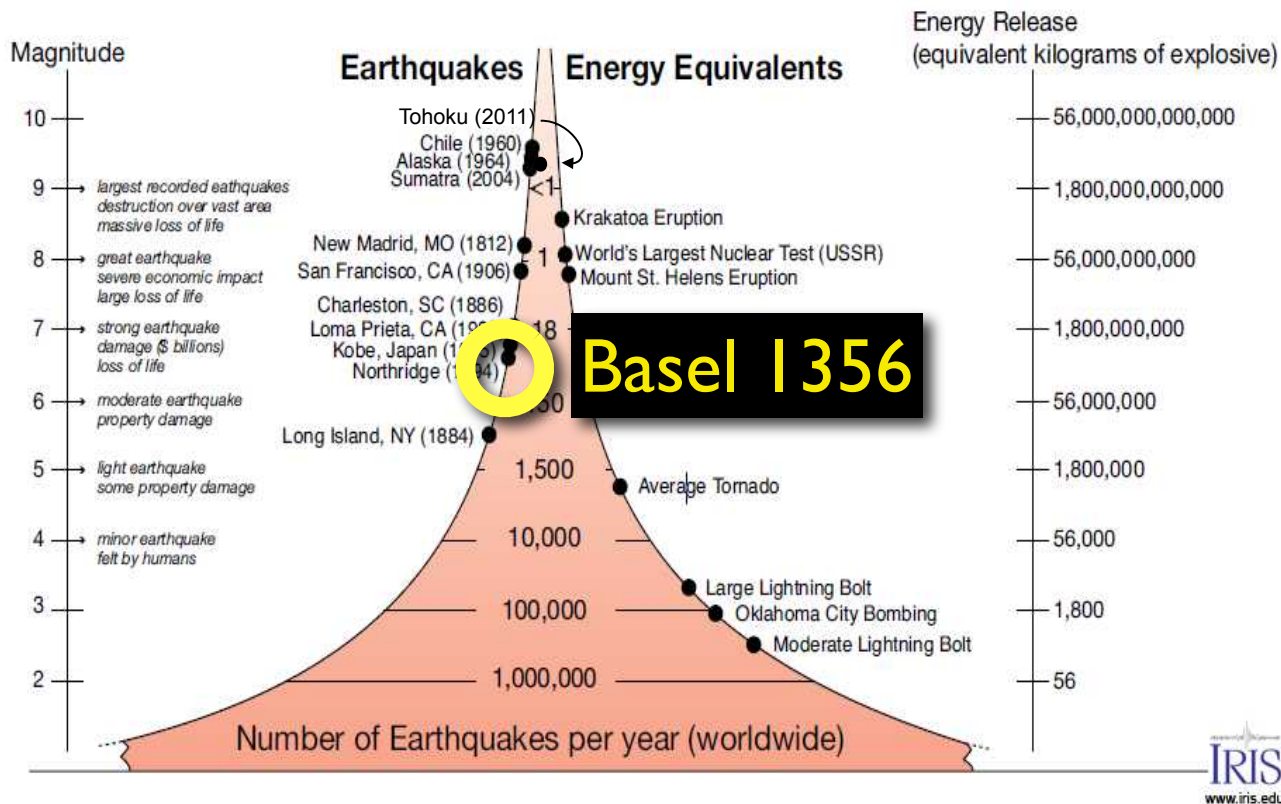
$$M = \log_{10} (A / T) + q(\Delta, h) + \alpha$$

- M Magnitude
A maximale Amplitude (μm)
T Periode (s)
q Korrekturfunktion
 Δ Winkelabstand Seismograph - Herd ($^\circ$)
h Herdtiefe (km)
 α empirische Konstante (Korrektur) für Seismographen



	Bezeichnung	Messung
M_L	Richterskala	Amplitude
M_S	Oberflächenwellenmagnitude	Amplitude
M_W	Momenten-Magnitude	seism. Moment

Erdbebenmagnituden -häufigkeiten



Erdbeben: Intensität

Intensität - 'gefühlte Magnitude'

Europäische Makroseismische Skala EMS

EMS	Intensität	Beschreibung der maximalen Wirkung	Ungefähr entsprechende Magnitude
I	nicht fühlbar	Nicht fühlbar, <u>nur durch Instrumente nachweisbar.</u>	1
II	kaum bemerkbar	Nur sehr vereinzelt von ruhenden Personen wahrgenommen.	2
III	schwach (verspürt)	Von wenigen Personen in Gebäuden wahrgenommen. Ruhende Personen fühlen ein leichtes Schwingen oder Erschüttern.	3
IV	deutlich (verspürt)	Im Freien vereinzelt, in Gebäuden von vielen Personen wahrgenommen. Einigen Schlafende erwachen. <u>Geschirr und Fenster klirren, Türen klappern.</u>	4
V	stark (verspürt)	Im Freien von wenigen, in Gebäuden von den meisten Personen wahrgenommen. Viele Schlafende erwachen. Wenige reagieren verängstigt. Gebäude werden insgesamt erschüttert. Hängende Gegenstände pendeln stark, kleine Gegenstände werden verschoben. Türen und Fenster schlagen auf oder zu.	5
VI	Leichte Gebäudeschäden	Viele Personen erschrecken und flüchten ins Freie. Einige Gegenstände fallen um. An vielen Häusern, vornehmlich in schlechterem Zustand, entstehen leichte Schäden wie feine Mauerrisse und das Abfallen von z.B. kleinen Verputzteilen.	5,3 - 5,9
VII	Gebäudeschäden	Die meisten Personen erschrecken und flüchten ins Freie. Möbel werden verschoben. <u>Gegenstände fallen in grossen Mengen aus Regalen.</u> An vielen Häusern soliderer Bauart treten mässige Schäden auf (kleine Mauerrisse, Abfallen von Putz, Herabfallen von Schornsteinteilen). Vornehmlich Gebäude in schlechterem Zustand zeigen grössere Mauerrisse und Einsturz von Zwischenwänden.	6,0 - 6,9
VIII	schwere Gebäudeschäden	Viele Personen verlieren das Gleichgewicht. An vielen Gebäuden einfacherer Bausubstanz treten schwere Schäden auf; d.h. Giebelteile und Dachgesimse stürzen ein. Einige Gebäude sehr einfacher Bauart stürzen ein.	7,0 - 7,3
IX	zerstörernd	Allgemeine Panik unter den Betroffenen. Sogar gut gebaute, gewöhnliche Bauten zeigen sehr schwere Schäden, teilweise Einsturz tragender Bauteile. Viele schwächere Bauten stürzen ein.	7,4 - 7,7
X	sehr zerstörernd	Viele gut gebaute <u>Häuser werden zerstört oder erleiden schwere Beschädigungen.</u>	7,8 - 8,4
XI	verwüstend	Die meisten Bauwerke, selbst einige mit gutem, erdbebengerechtem Konstruktionsentwurf und guter Konstruktionsausführung, werden zerstört.	8,5 - 8,9
XII	vollständig verwüstend	<u>Nahezu alle Konstruktionen werden zerstört (landschaftsverändernd).</u>	ab 9

Magnitude \neq Intensität

https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_earthquakes_in_2017
abgerufen am 19.9.2017

Rank \blacktriangleleft	Magnitude \blacktriangledown	Death toll \blacktriangleleft	Location \blacktriangleleft	MMI \blacktriangleleft	Depth (km) \blacktriangleleft	Date \blacktriangleleft
1	8.1	98	 Mexico	IX (<i>Violent</i>)	69.7	September 8
2	7.9	3	 Papua New Guinea	VIII (<i>Severe</i>)	135.0	January 22
3	7.7	0	 Russia	VII (<i>Very strong</i>)	11.0	July 17
4	7.3	0	 Philippines	III (<i>Weak</i>)	627.2	January 10

Rank \blacktriangleleft	Magnitude \blacktriangleleft	Death toll \blacktriangleleft	Location \blacktriangleleft	MMI \blacktriangledown	Depth (km) \blacktriangleleft	Date \blacktriangleleft
4	7.3	0	 Philippines	III (<i>Weak</i>)	627.2	January 10
3	7.7	0	 Russia	VII (<i>Very strong</i>)	11.0	July 17
2	7.9	3	 Papua New Guinea	VIII (<i>Severe</i>)	135.0	January 22
1	8.1	98	 Mexico	IX (<i>Violent</i>)	69.7	September 8

siehe auch

https://de.wikipedia.org/wiki/Liste_von_Erdbeben_des_21._Jahrhunderts

Risiko und Gefährdung

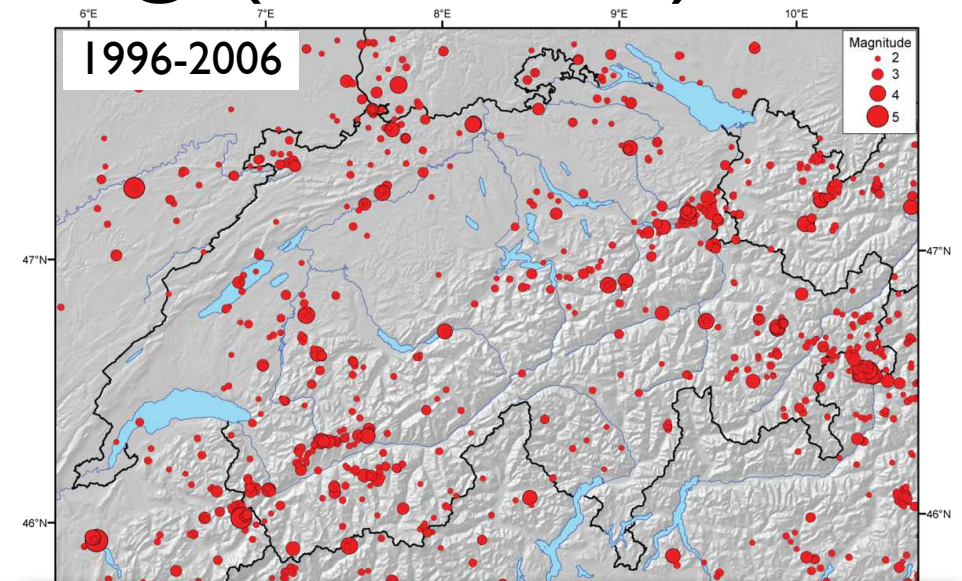
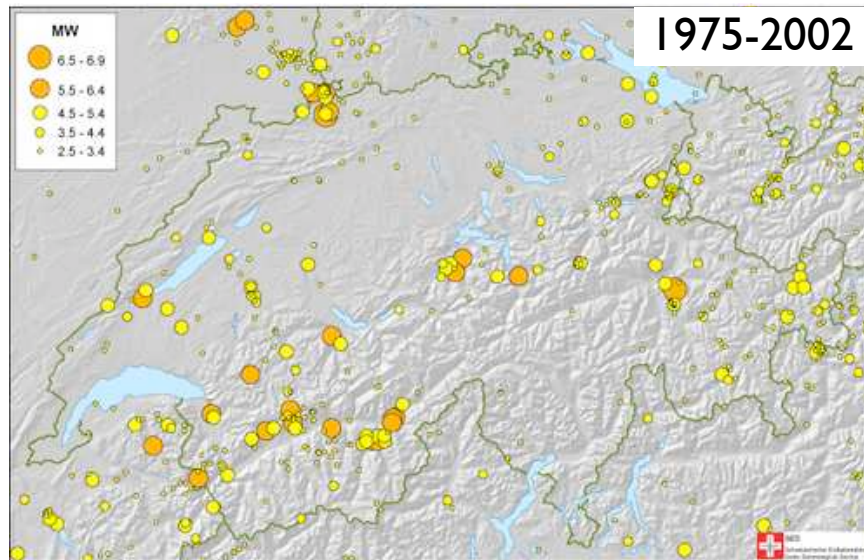
Intensität \neq Gefährdung

https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_earthquakes_in_2017
abgerufen am 19.9.2017

Rank \blacktriangleleft	Magnitude \blacktriangleleft	Death toll \blacktriangleleft	Location \blacktriangleleft	MMI \blacktriangleleft	Depth (km) \blacktriangleleft	Date \blacktriangleleft
4	7.3	0	 Philippines	III (<i>Weak</i>)	627.2	January 10
3	7.7	0	 Russia	VII (<i>Very strong</i>)	11.0	July 17
2	7.9	3	 Papua New Guinea	VIII (<i>Severe</i>)	135.0	January 22
1	8.1	98	 Mexico	IX (<i>Violent</i>)	69.7	September 8

Rank \blacktriangleleft	Death toll \blacktriangleleft	Magnitude \blacktriangleleft	Location \blacktriangleleft	MMI \blacktriangleleft	Depth (km) \blacktriangleleft	Date \blacktriangleleft
1	98	8.1	 Mexico	IX (<i>Violent</i>)	69.7	September 8
2	34	5.7	 Italy	VIII (<i>Severe</i>)	7.0	January 18
3	25	6.5	 China	VII (<i>Very strong</i>)	9.0	August 8

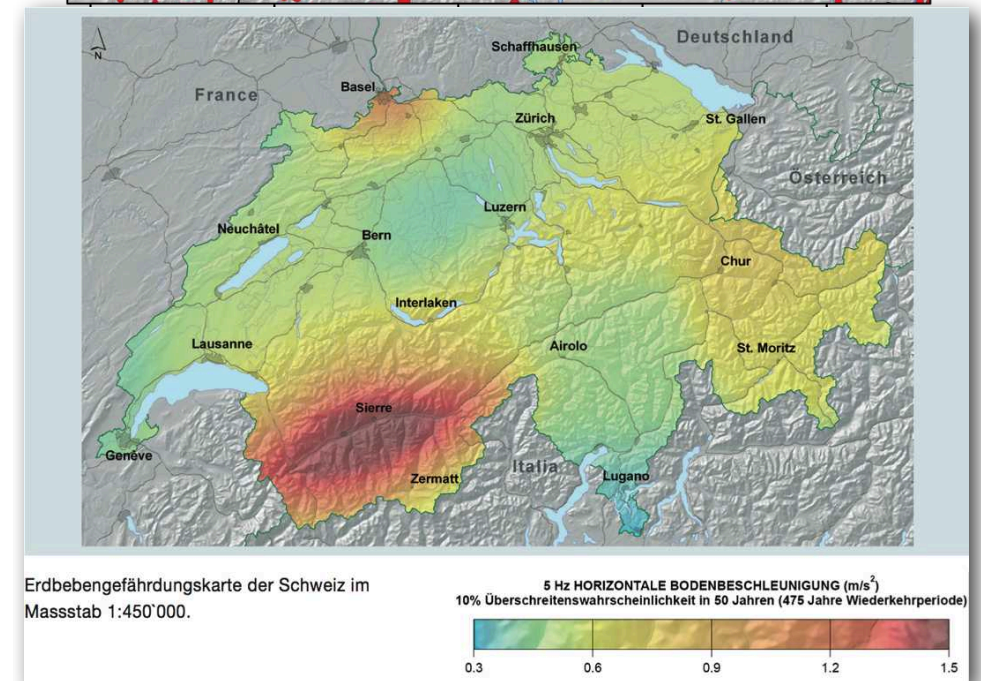
Seismische Gefährdung (Modelle)



www.seismo.ethz.ch

Die seismische Gefährdungskarte für die Schweiz stellt den zu erwartenden Wert der horizontalen Bodenbeschleunigung für eine Wiederkehrperiode von 475 Jahren dar.

www.seismo.ethz.ch/eq_swiss/haz_risk/index



s. auch webtool: www.seismo.ethz.ch/static/swisshazard2015/video/SUIhz15.html

Erdbeben Risiko

Die seismische
Gefährdung



Abb. 2: Erdbebengefährdung in der Schweiz. Rot: hohe Gefährdung, blau/grün: moderate Gefährdung. Quelle: SED

Beschaffenheit
des Untergrundes

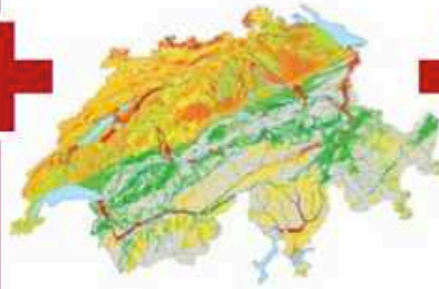


Abb. 3: Karte des lokalen Untergrundes. Besonders gefährdete Gebiete sind rot markiert. Quelle: SED

Betroffene
Werte

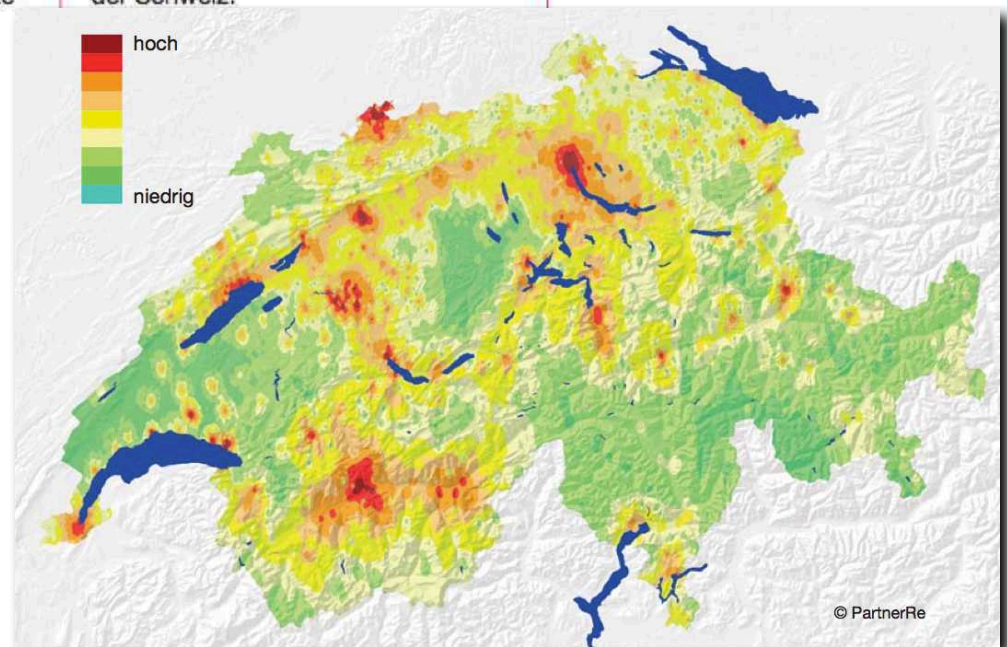


Abb. 4: Verteilung der Siedlungen in der Schweiz.

Verletzbarkeit
der Gebäude



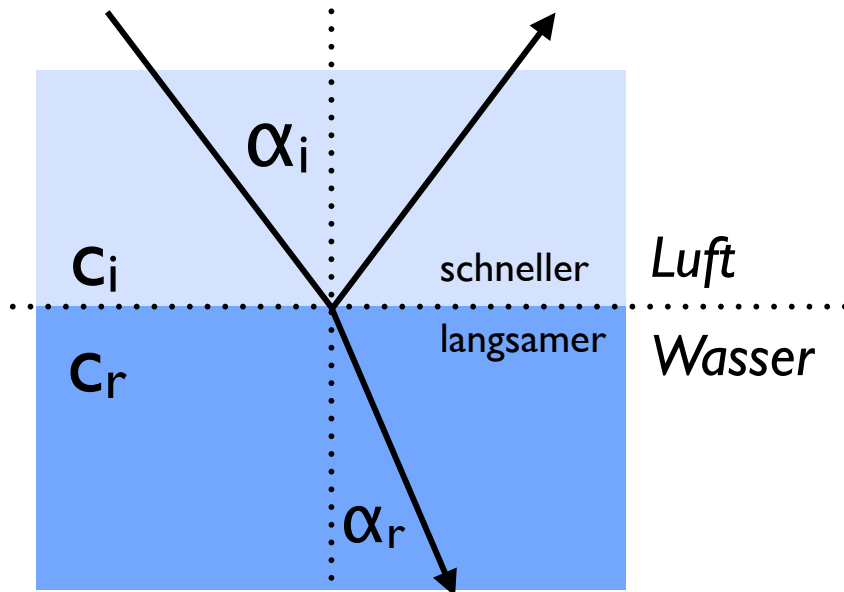
www.seismo.ethz.ch/eq_swiss/haz_risk/weltweit/index



Verteilung der finanziellen Erdbebenrisikos
Quelle: CatFocus ParnterRe

Refraktionsseismik

Refraktion (Brechung)



Optisch

$$c_i > c_r$$

$$\sin\alpha_i > \sin\alpha_r$$

$$\frac{c_i}{c_r} = \frac{\sin\alpha_i}{\sin\alpha_r}$$

optisch 'dicht' = langsam

Lichtgeschwindigkeit

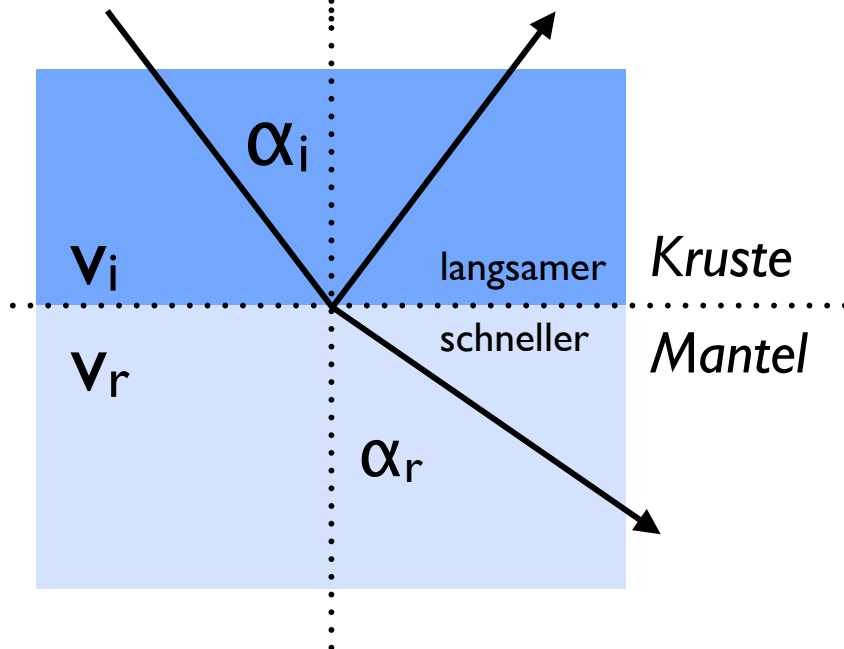
c_i = einfallend

c_r = gebrochen

Winkel

α_i = einfallend

α_r = gebrochen



Seismisch

$$v_i < v_r$$

$$\sin\alpha_i < \sin\alpha_r$$

$$\frac{v_i}{v_r} = \frac{\sin\alpha_i}{\sin\alpha_r}$$

mechanisch 'dicht' = schnell

Seism. Geschwindigkeit

v_i = einfallend

v_r = gebrochen

Winkel

α_i = einfallend

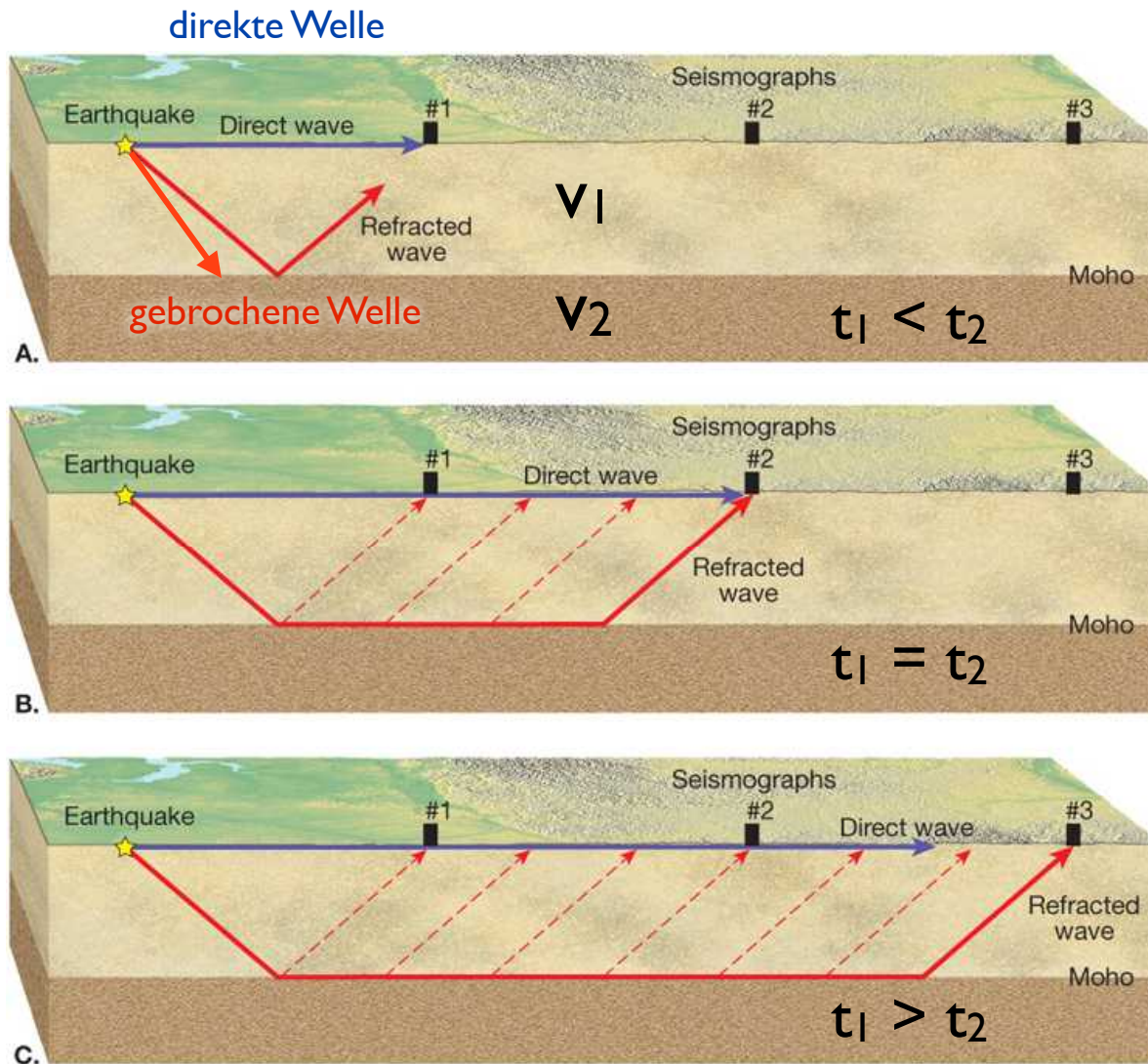
α_r = gebrochen

$$E_i < E_r \quad \rho_i < \rho_r$$

pro memoria:

'dicht' heisst hier 'steif', K nicht ρ

Seismische Refraktion



v_1 = langsamer

v_2 = schneller

t_1 Ankunftszeit
direkte Welle (Welle 1)

t_2 Ankunftszeit
gebrochene Welle (Welle 2)

bei Totalreflexion:

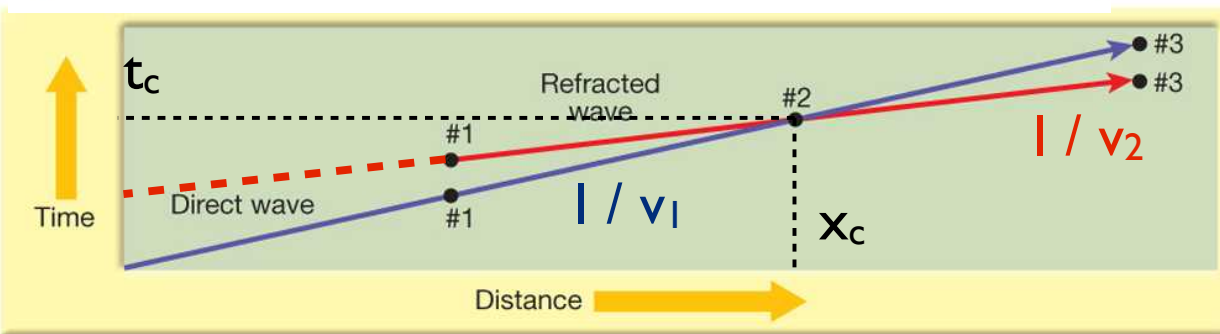
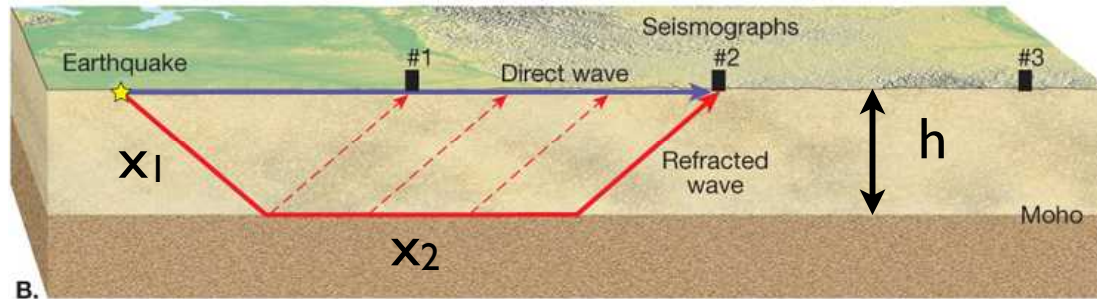
$$\sin_r = 1.00 \quad (90^\circ)$$

$$\frac{\sin_i}{\sin_r} = \frac{v_1}{v_2}$$

$$\Rightarrow \sin_i = \frac{v_1}{v_2}$$

Welle 2 läuft auf
der Grenze mit v_2

direkte / indirekte Welle



geg:
 Geschwindigkeiten v_1, v_2
 Crossover distanz x_c
 ges:
 Tiefe h des Reflektors
 (= Dicke der Schicht)

x_c / t_c (crossover): direkte und gebrochene Welle treffen gleichzeitig ein

Weg und Zeit der direkten Welle: $d_1 = x_c$

Weg und Zeit der gebrochenen Welle: $d_2 = 2x_1 + x_2$

Tiefe der reflektierenden Fläche:
 (= Dicke der Schicht)

$$t_c = x_c / v_1$$

$$t_c = 2x_1 / v_1 + x_2 / v_2$$

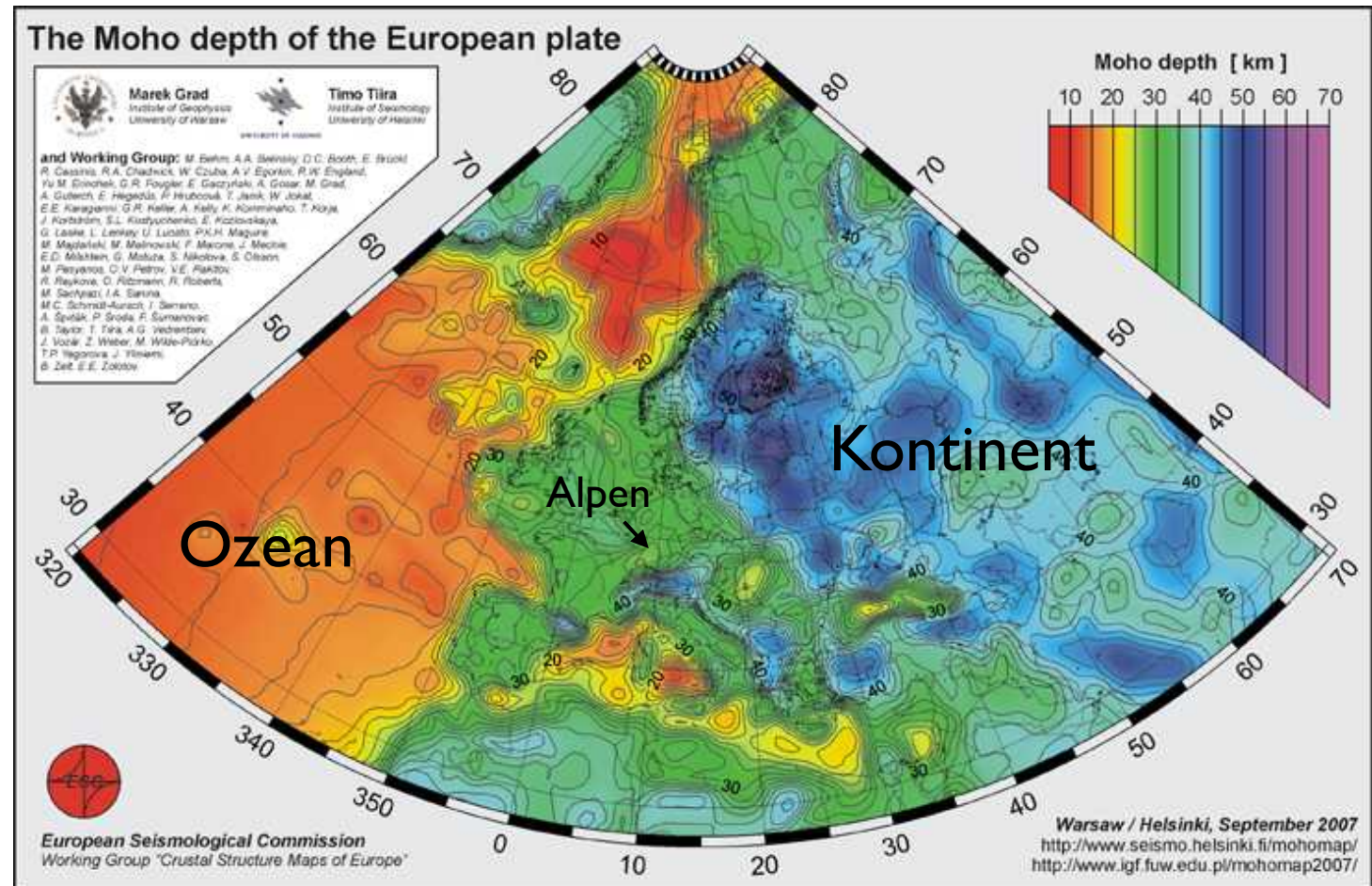
$$h = \frac{x_c}{2} \sqrt{\frac{v_2 - v_1}{v_2 + v_1}}$$

Mohorovičić Diskontinuität

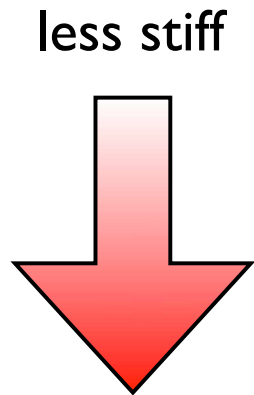


Andrija Mohorovičić
(1857 - 1936)

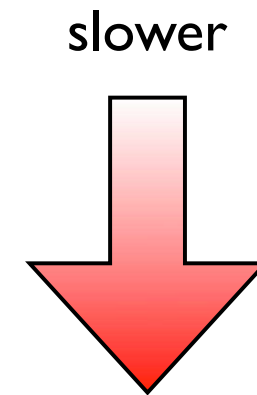
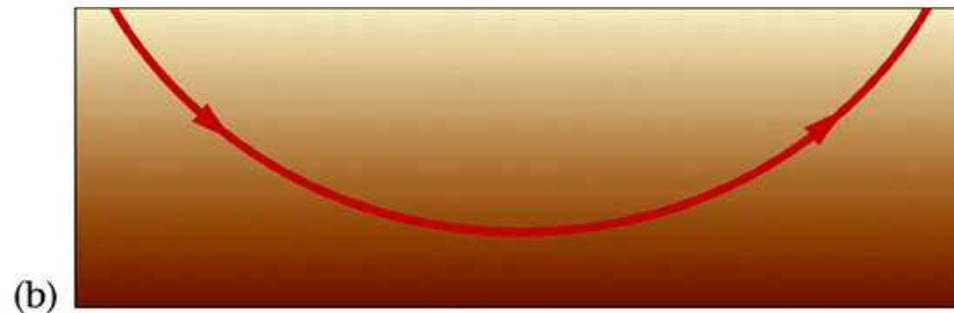
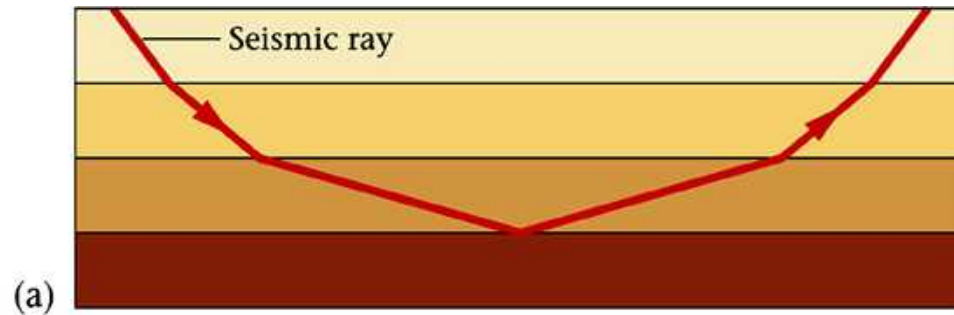
Mohorovičić entdeckt 1909 zwei verschiedene Ankunftszeiten: schliesst auf Schicht-Struktur und schätzt Tiefe auf 54 km → "Mohorovičić-Diskontinuität" ("Moho", "seismic moho")



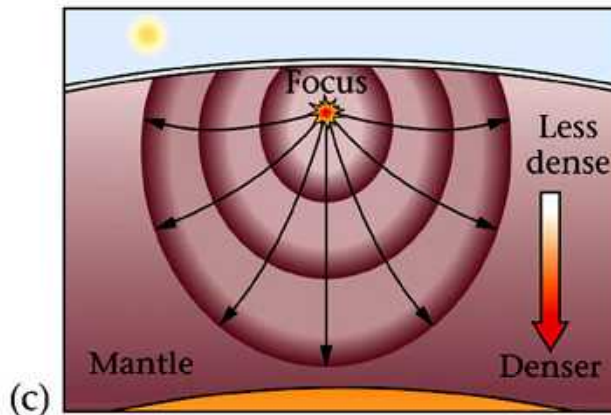
Fortpflanzung seismischer Wellen



stiffer



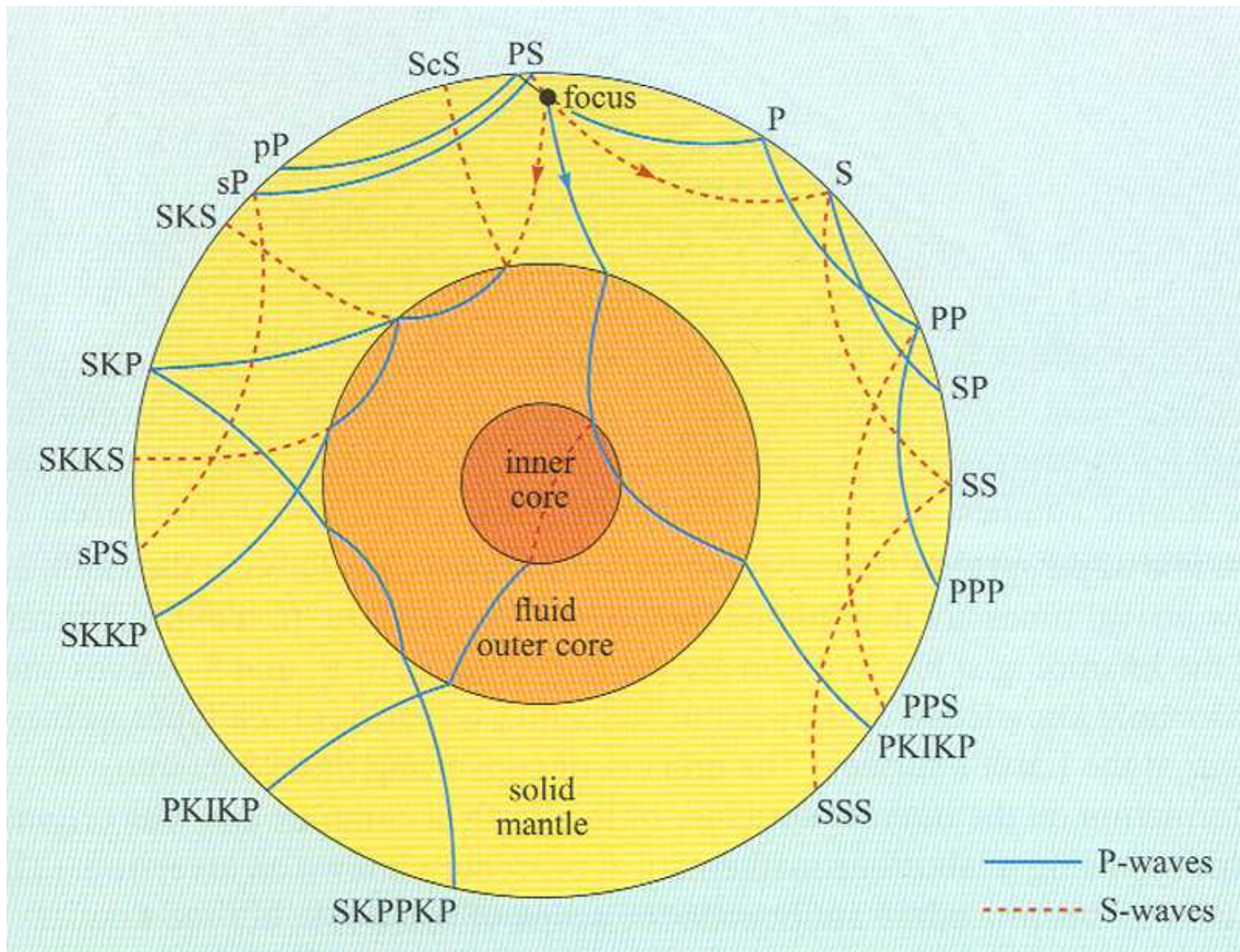
faster



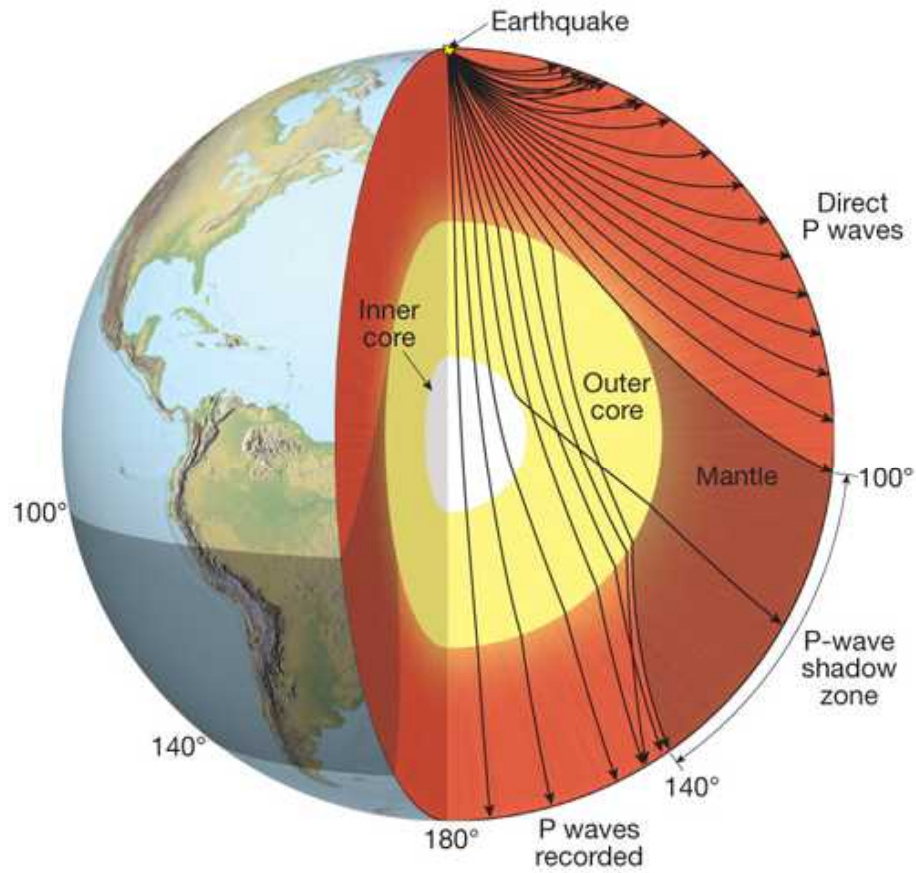
Curved rays in a mantle whose density increases gradually with depth

$$\text{speed} = \sqrt{\frac{\text{elastic modulus}}{\text{density}}}$$

Seismic wave trajectories

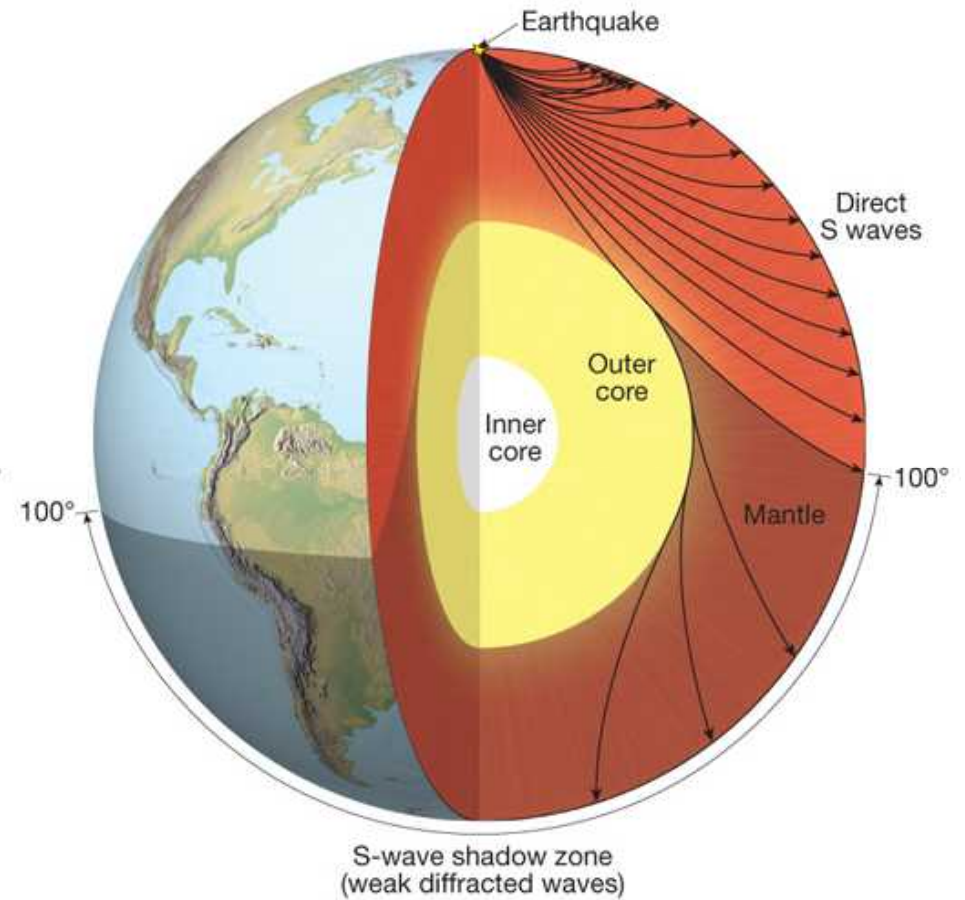


P - Wellen



P-wave shadow zone = ring

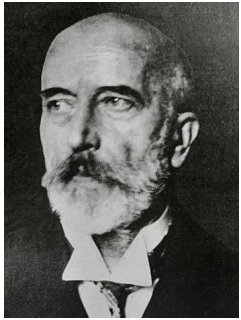
S - Wellen



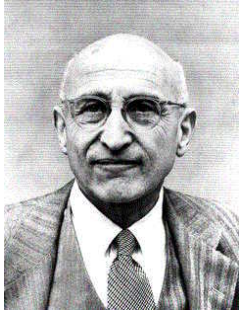
S-wave shadow zone = circular

Seismische Grenzflächen

Seismische Grenzflächen



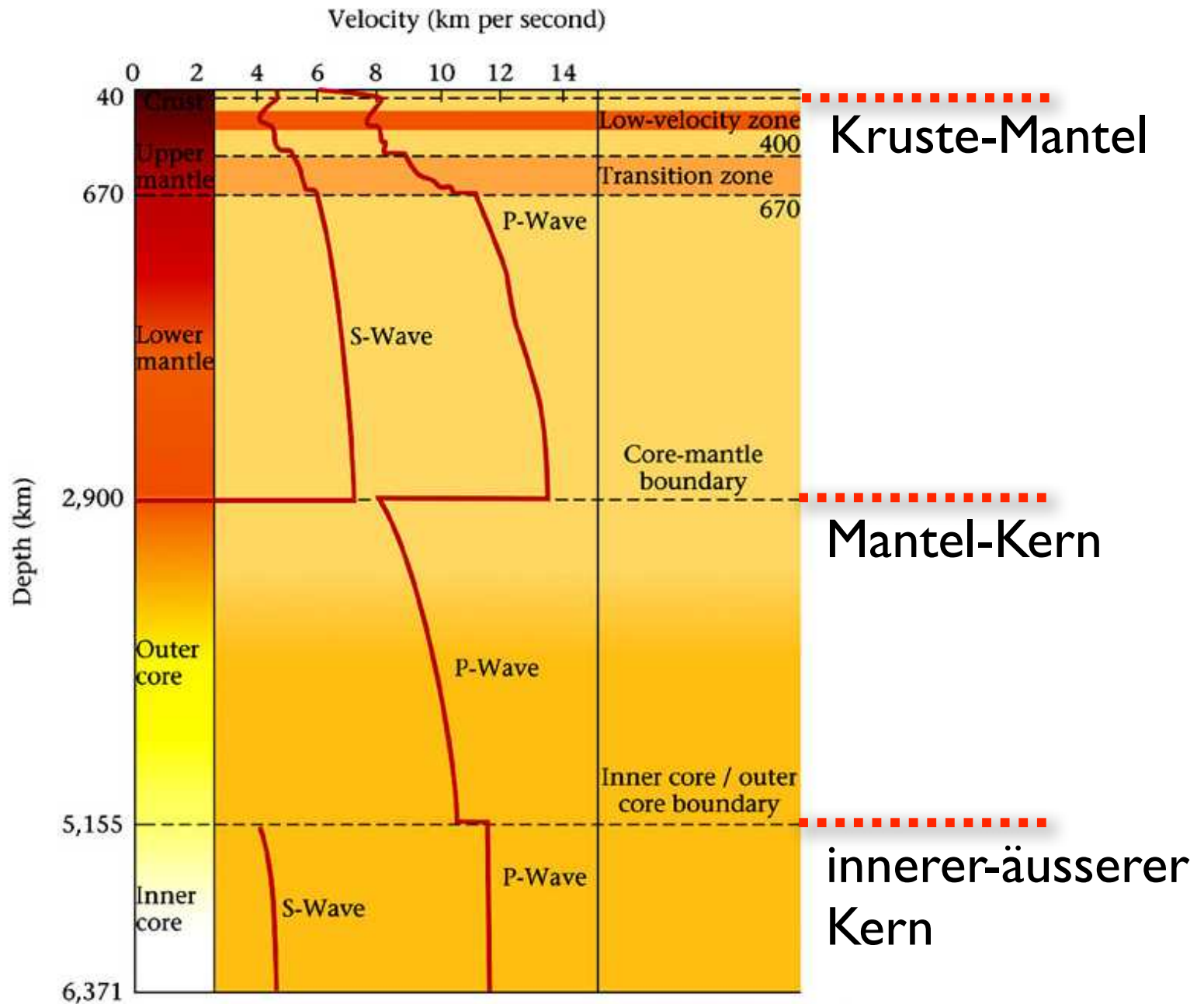
Andrija Mohorovičić
(1857 - 1936)



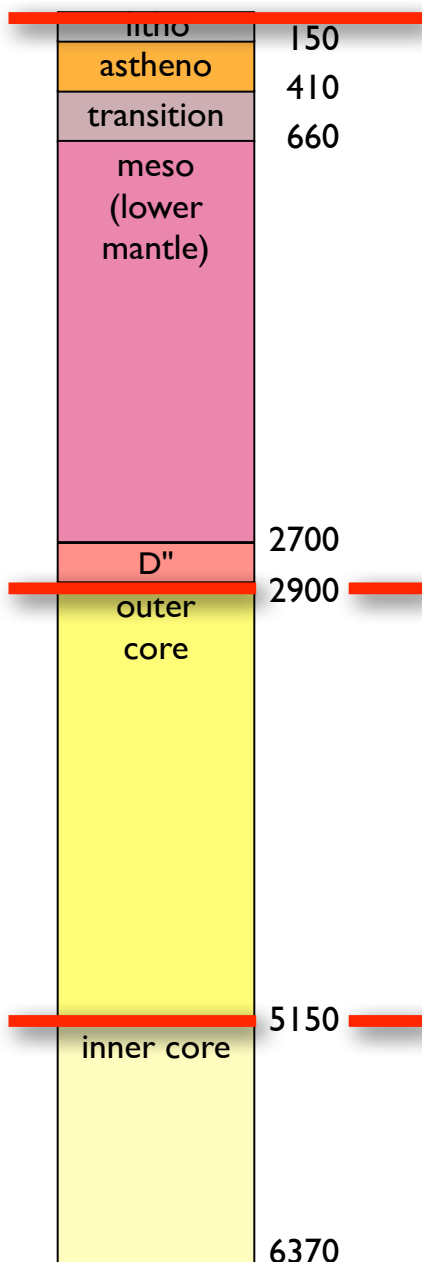
Beno Gutenberg
(1889 - 1960)



Inge Lehmann
(1888 - 1993)



Seismische Grenzflächen



Kruste-Mantel - Grenze

= Moho (Mohorovicic Diskontinuität)

1909 von Andrija Mohorovicic entdeckt

aufgrund einer starken Zunahme der P-Wellen-Geschwindigkeit
typischerweise: von $< 7000 \text{ ms}^{-1}$ auf $> 8000 \text{ ms}^{-1}$

Kern-Mantel - Grenze

1914 von Beno Gutenberg entdeckt

aufgrund der 35° breiten P-Wellen- Schattenzone

(Totalreflexion der P-Wellen an der Oberfläche des Kerns)

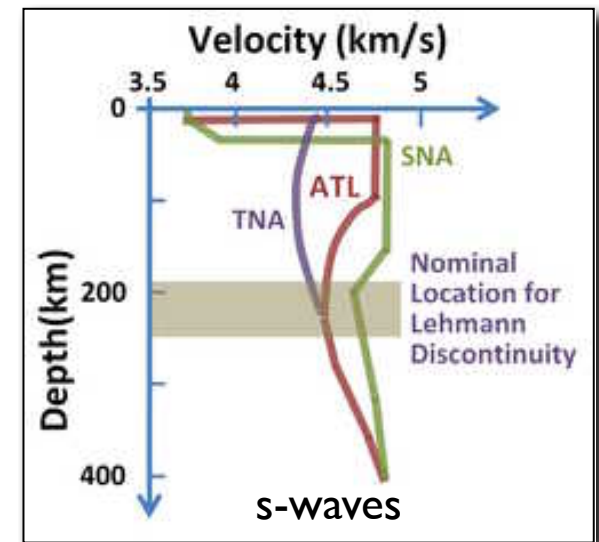
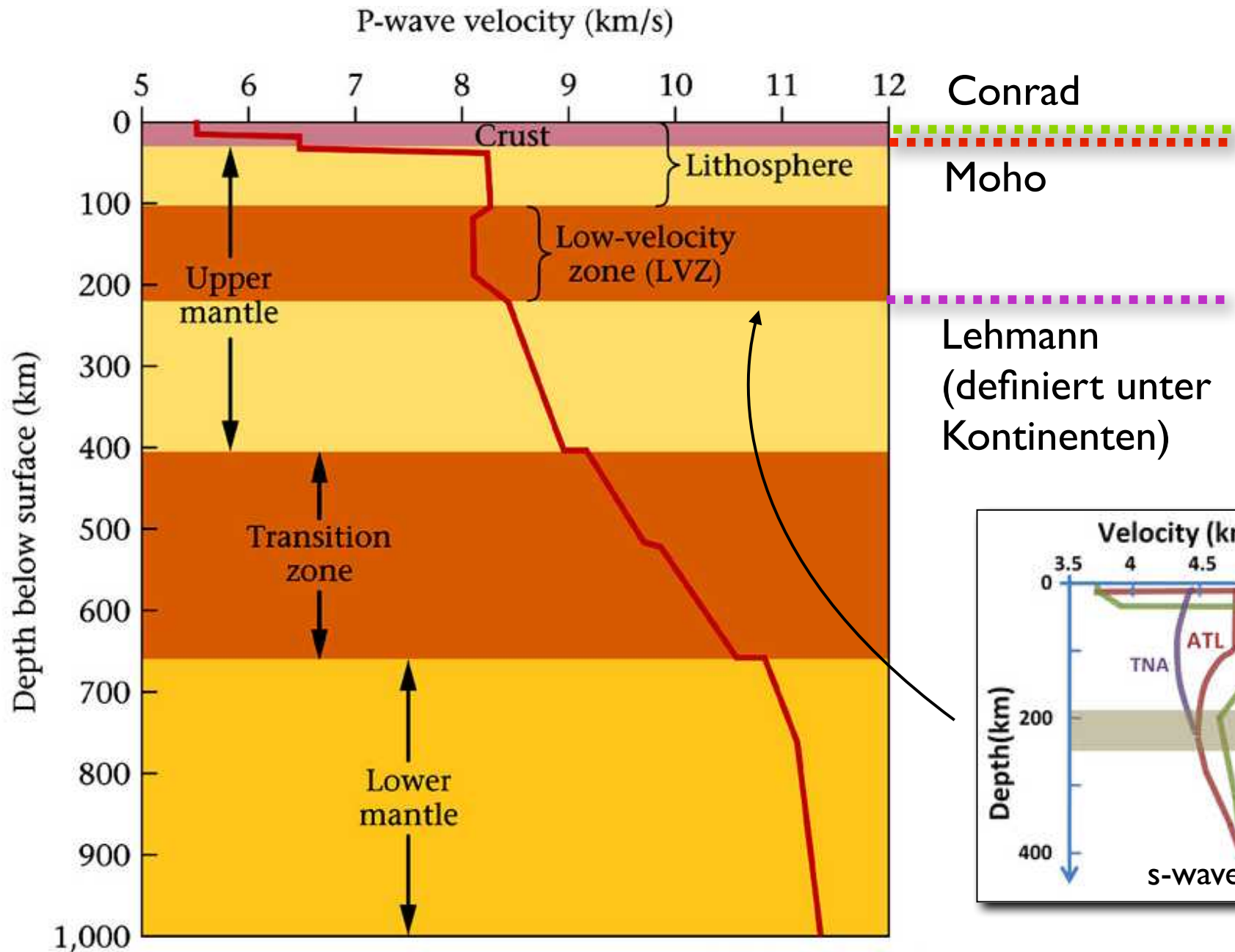
bedeutet auch, dass der Kern flüssig, der Mantel aber fest ist

Grenze äusserer-innerer Kern

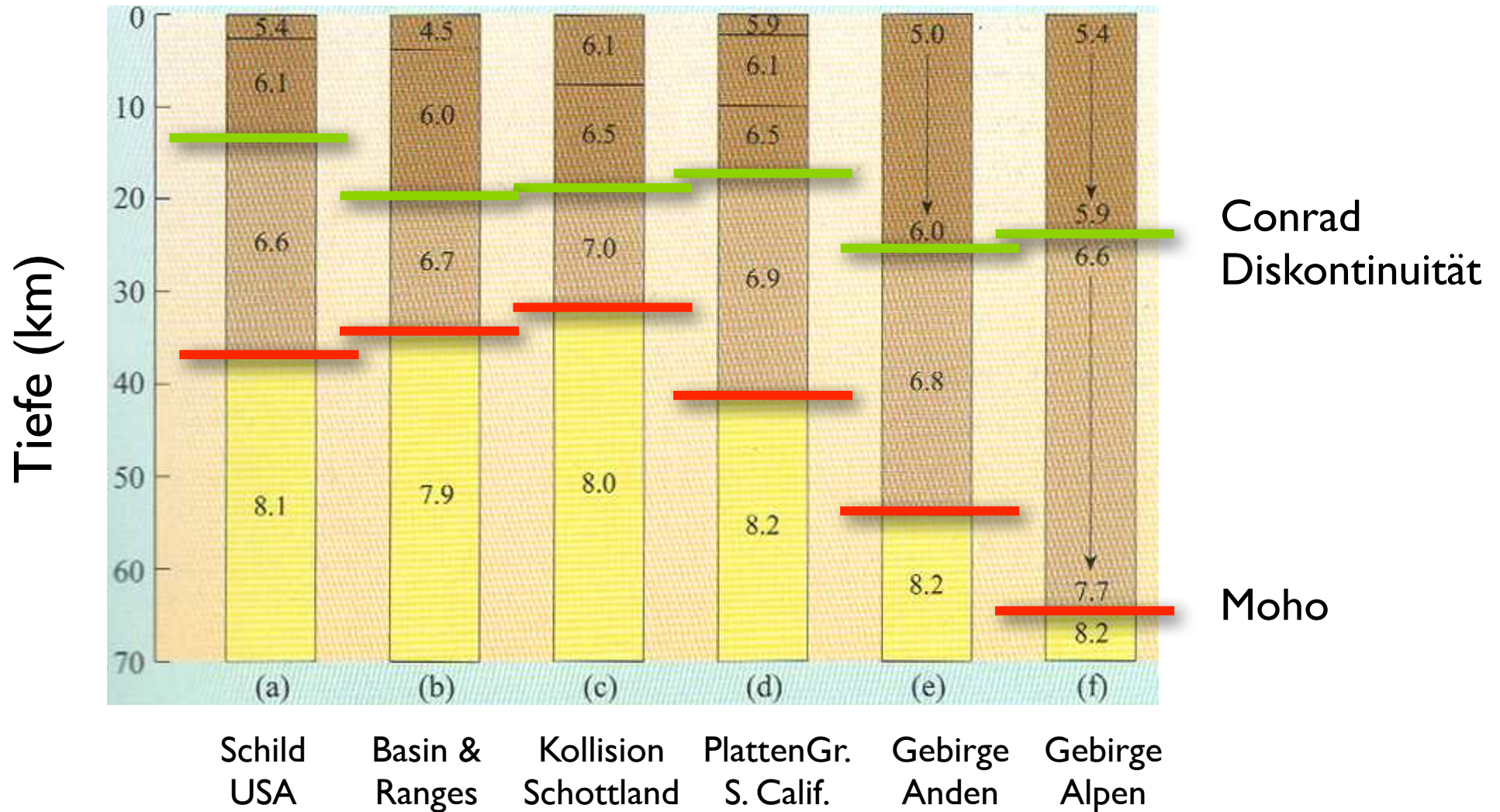
1936 von Inge Lehmann prognostiziert

höhere Geschwindigkeit von P-Wellen, welche den inneren Kern durchqueren deuten darauf hin, dass der innere Kern fest ist.

weitere Diskontinuitäten

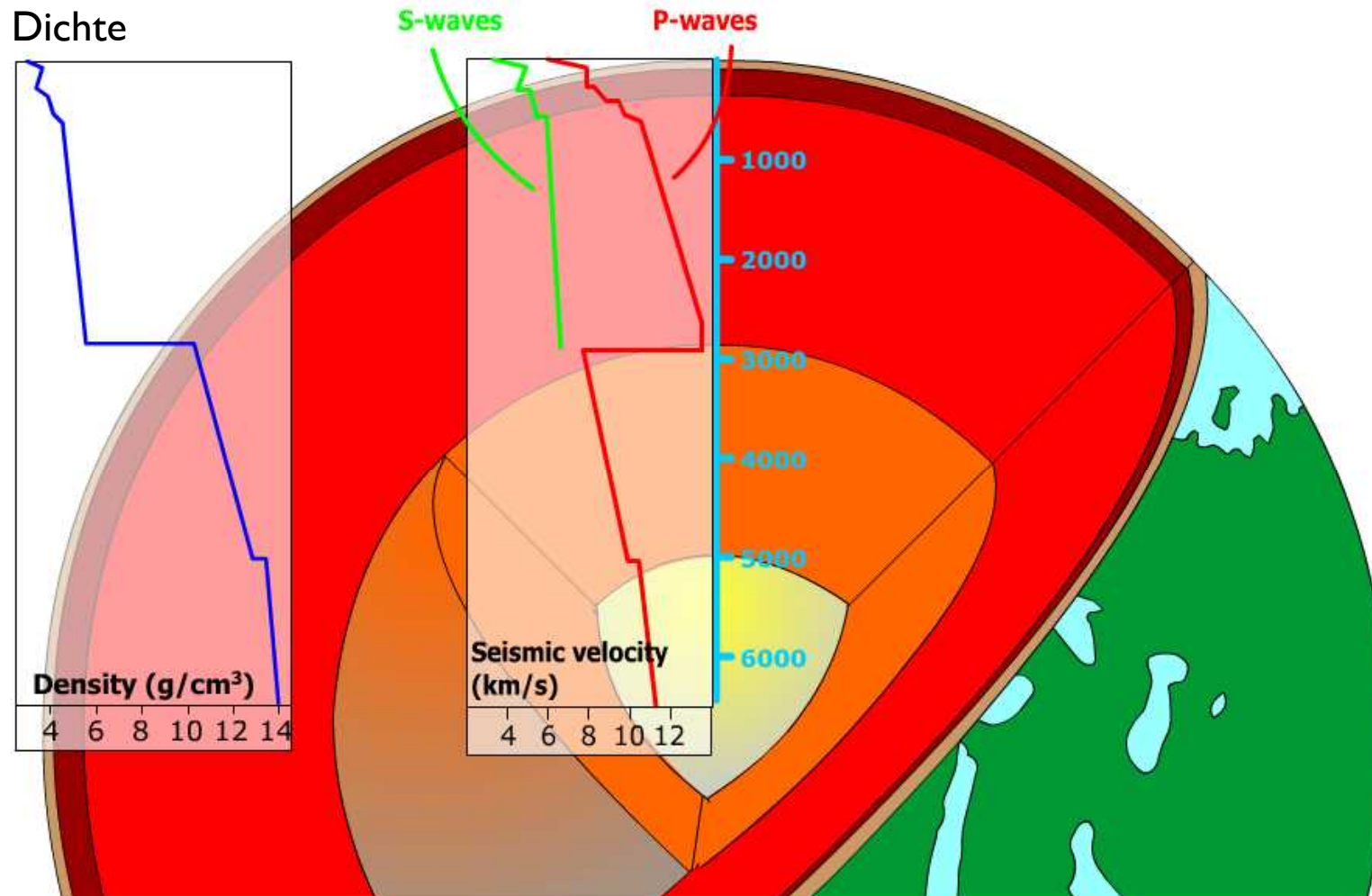


Diskontinuität in der Kruste



seismische Tomographie

Dichte & seismische Geschwindigkeit

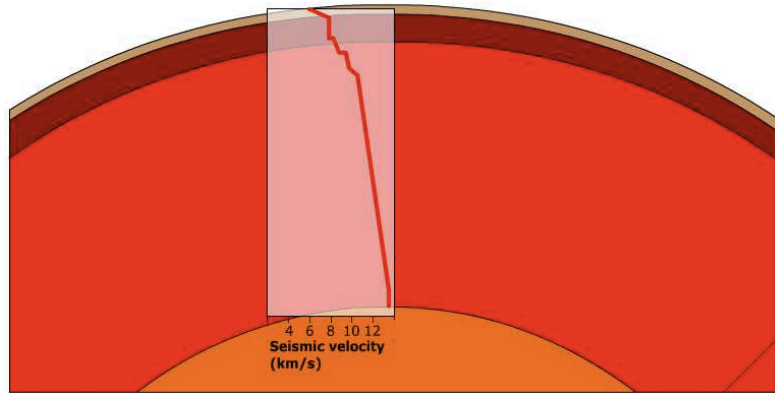


<http://ansatte.uit.no/kku000/webgeology/> (Kåre Kullerud)
module: Mantle dynamics and plate tectonics

P-Wellengeschwindigkeit = f (T)

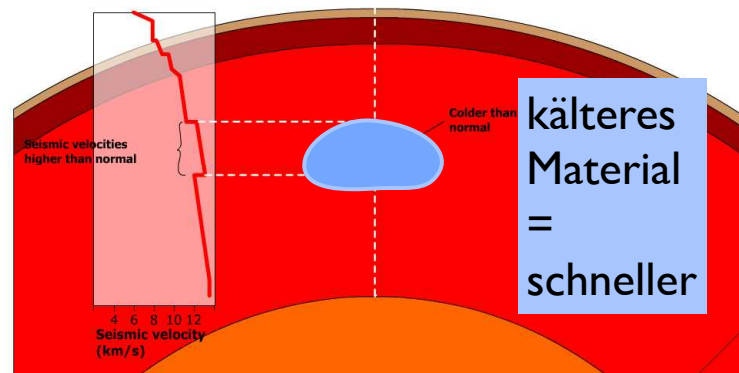
Normale P-Wellengeschwindigkeiten im Mantel

P-waves

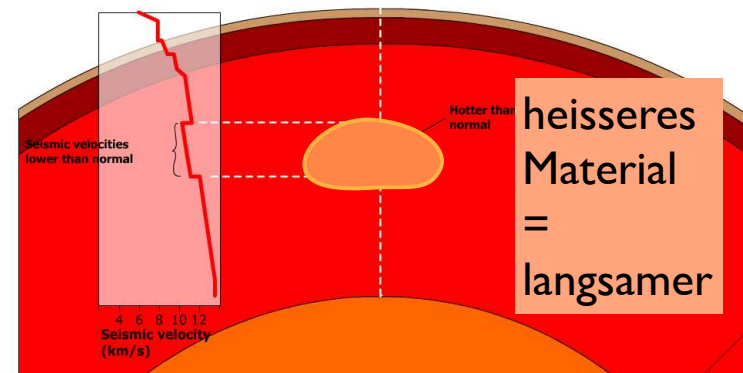


Einfluss von Temperaturvariationen

Temperature variations in the mantle



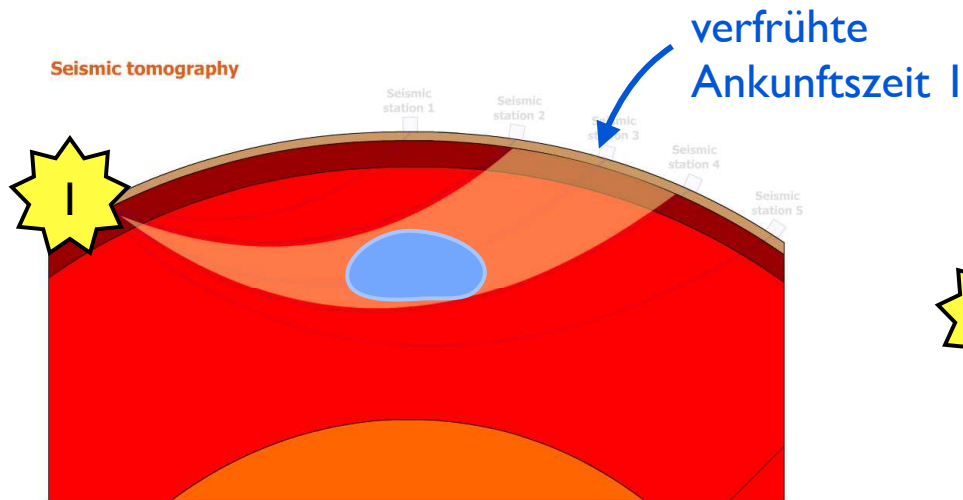
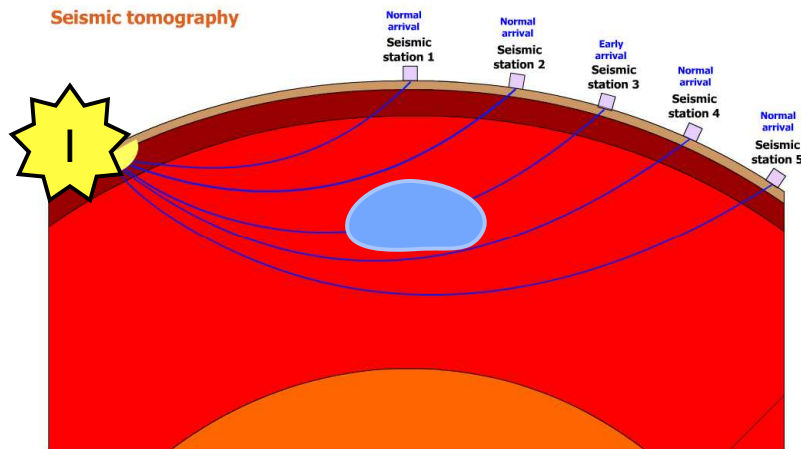
Temperature variations in the mantle



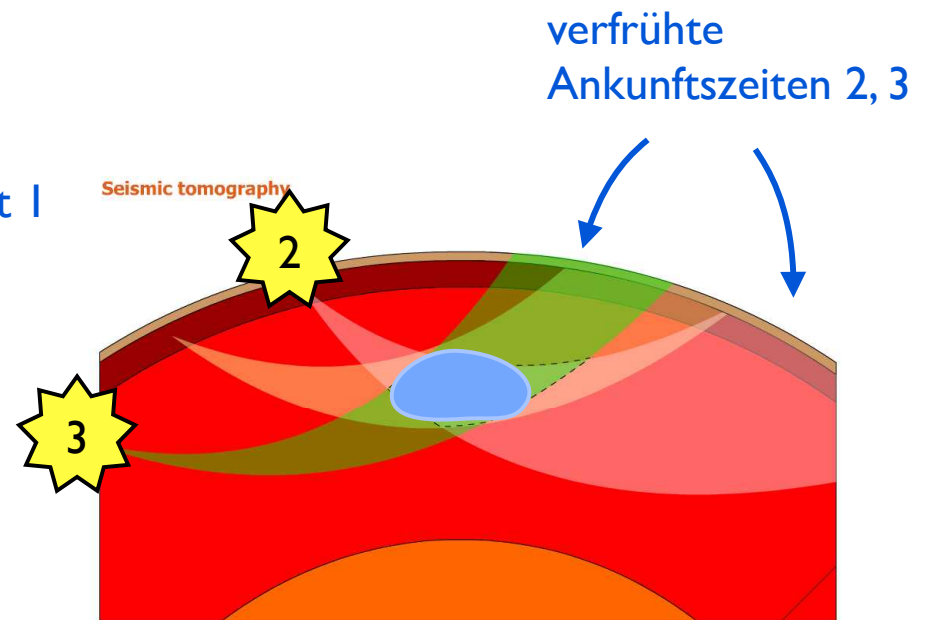
P-Wellen-Ankunftszeiten

↙ verspätete / verfrühte Ankunftszeiten

⇒ warmer / kalter Körper

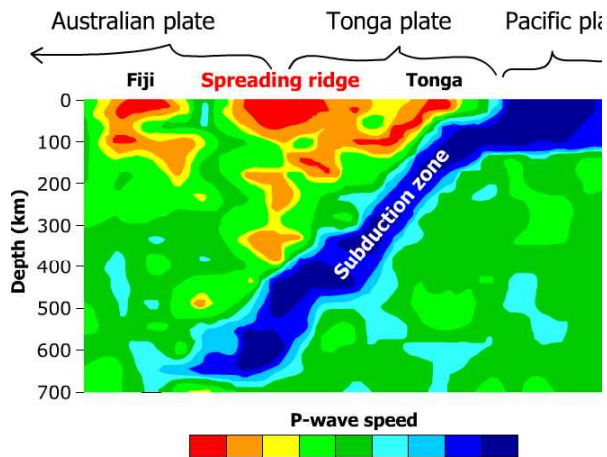
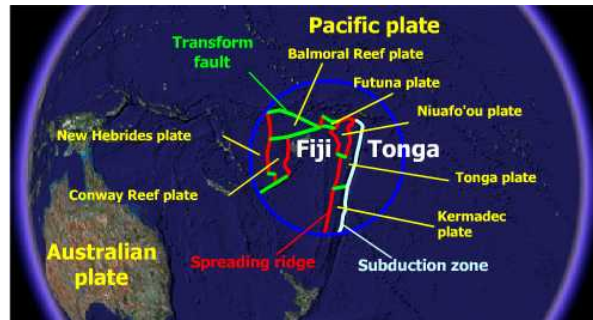


1. Erdbeben

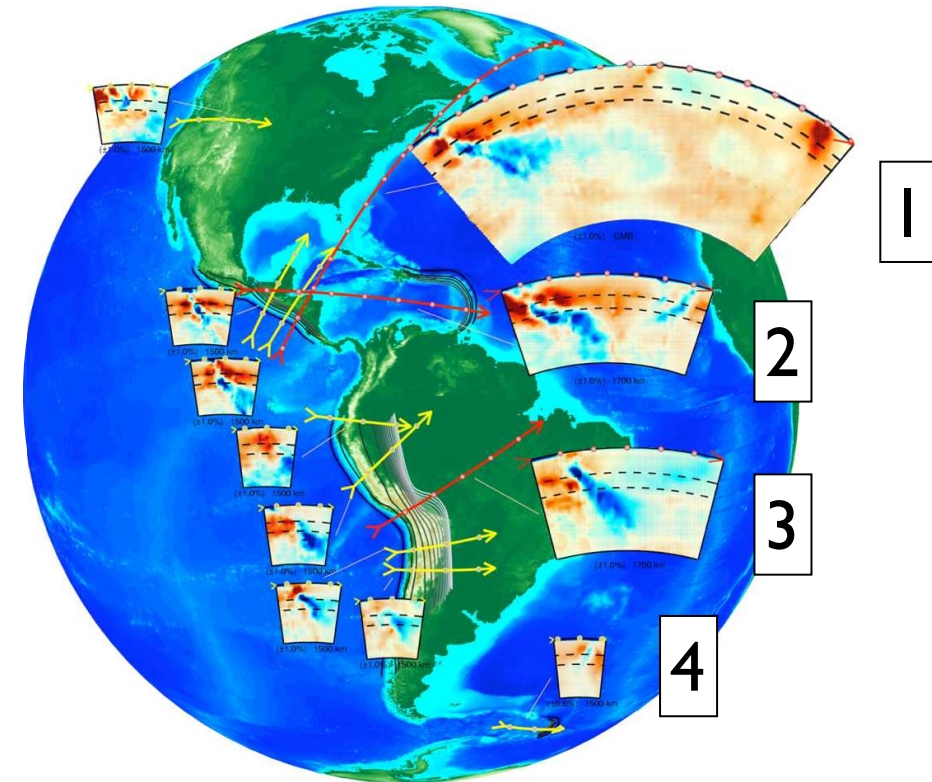


2., 3. Erdbeben

Tomographie von Subduktionszonen



<http://ansatte.uit.no/kku000/webgeology>
 module: Mantle dynamics and plate tectonics

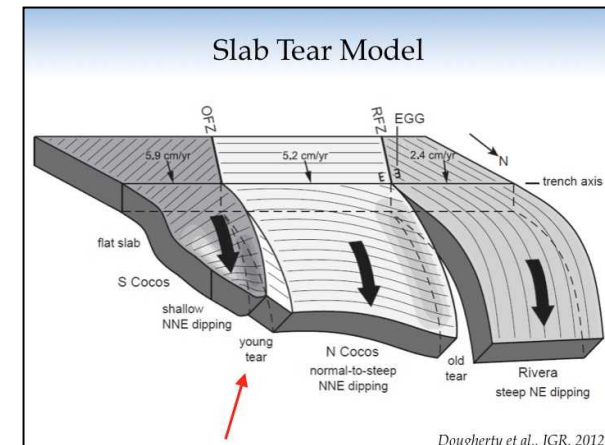
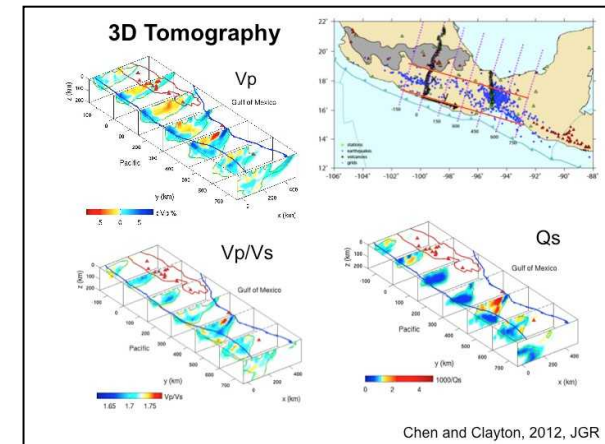
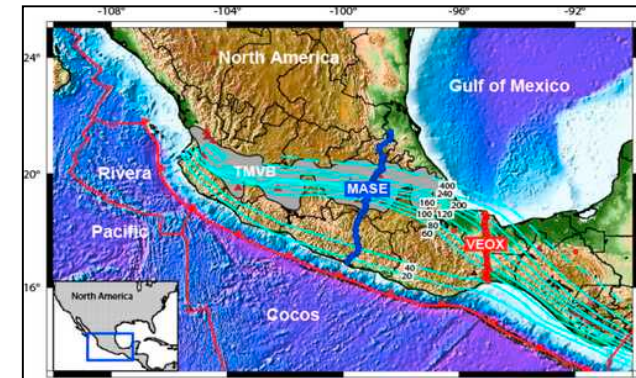
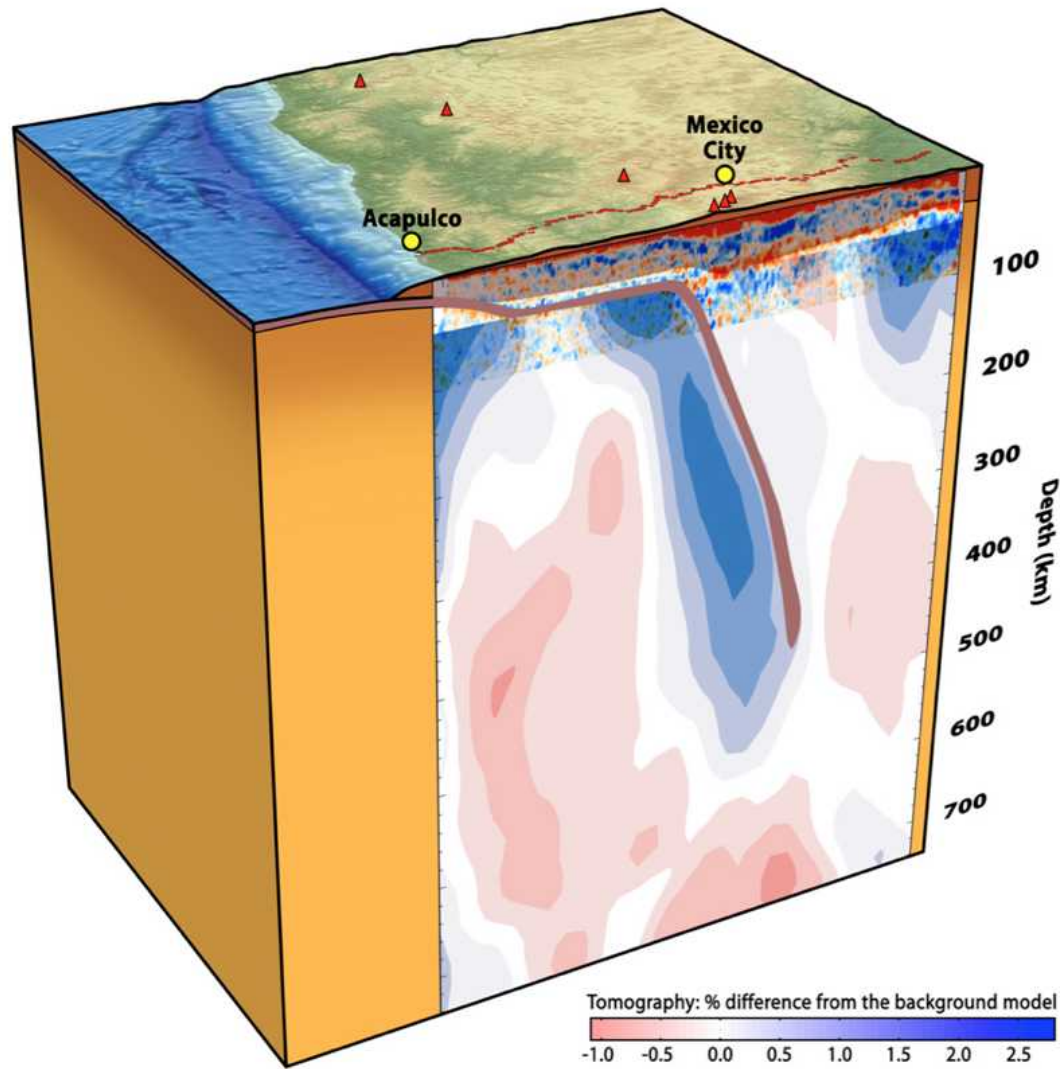


gestrichelt: Untergrenze Lithosphäre, Asthenosphäre
 Untergrenze Profil 1 500 km - 1: CMB - 2,3: 1700 km

1. Middle America Trench, Cocos / N-America
2. Puerto Rico Trench, Caribbean / N-America
3. Peru-Chile Trench, Nazca / S-America
4. Sandwich Trench, Scotia / S-America

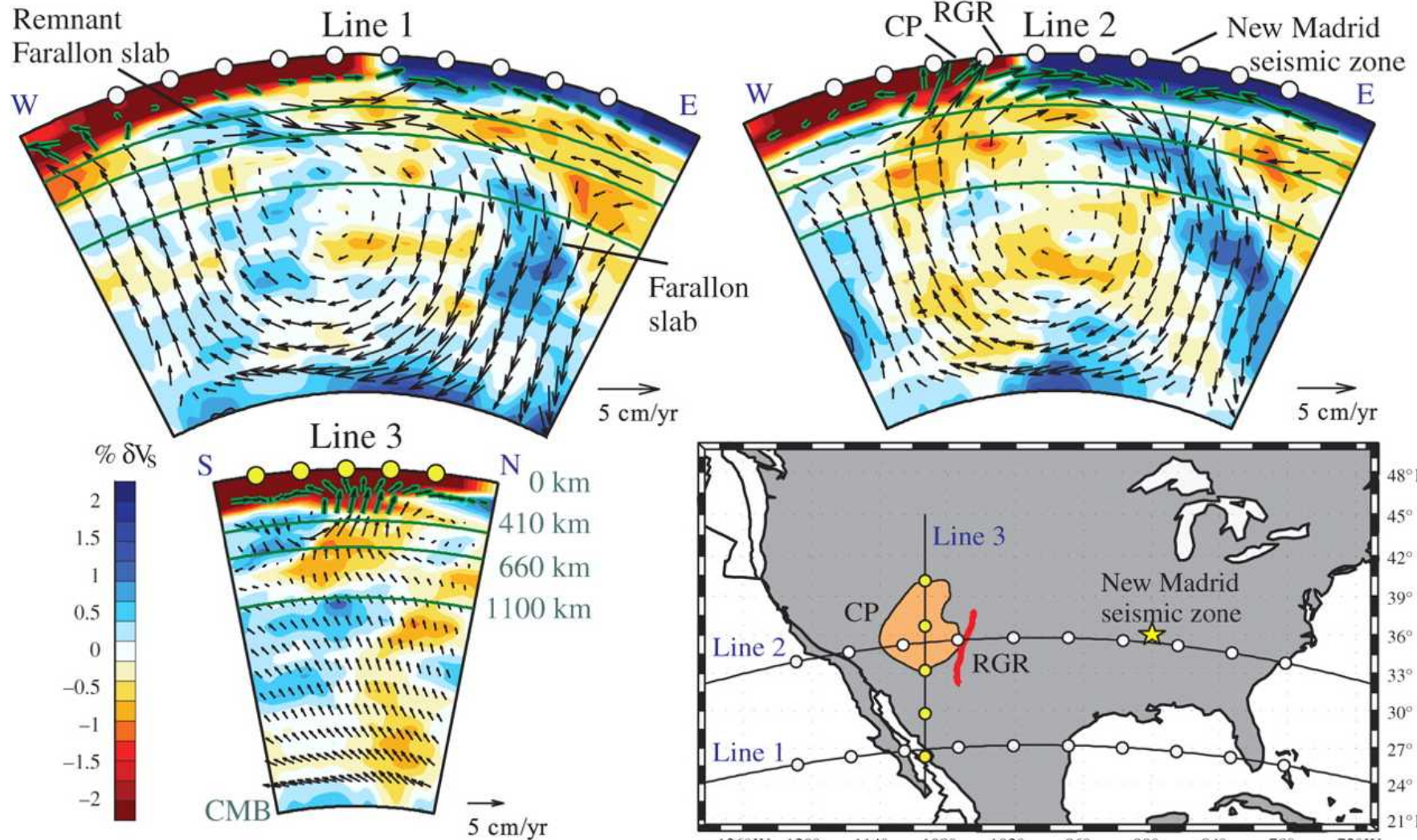
<http://web.gps.caltech.edu/~clay/MexWeb/MexSubduction.html>

3D Tomographie



MASE - Meso-America Subduction Experiment
<http://web.gps.caltech.edu/~clay/MexWeb/MexSubduction.html>

Tomographie → Mantelkonvektion



<http://www.iris.edu/hq/retm>

IRIS

Teachable moments



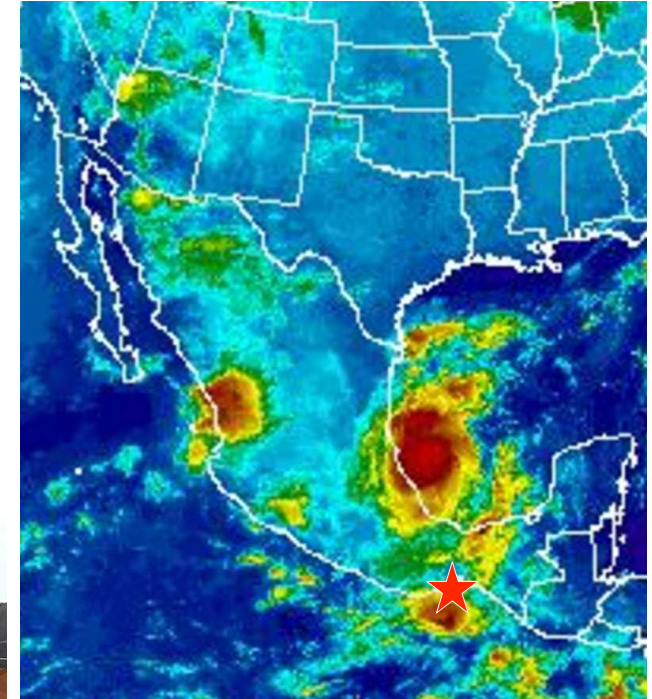
INCORPORATED RESEARCH INSTITUTIONS FOR SEISMOLOGY

8. September 2017	M8.1 Off-shore Chiapas, Mexico
19. September 2017	M7.1 Puebla, Mexico

Magnitude 8.1 OFFSHORE CHIAPAS, MEXICO

Friday, September 8, 2017 at 04:49:21 UTC

A magnitude 8.1 earthquake has occurred offshore Mexico. It was felt as far away as Mexico City and Guatemala City. This occurred as heavy rains from Hurricane Katia were approaching from the east. There are early reports of 32 deaths from this earthquake, with homes, schools and hospitals damaged.



*Red star is epicenter from USGS
Image of Hurricane Katia courtesy
NOAA*

Left: Residents in Juchitan, Oaxaca state, Mexico stand on debris of a partially collapsed building felled by this earthquake, one of the most powerful ever to strike Mexico. AP image

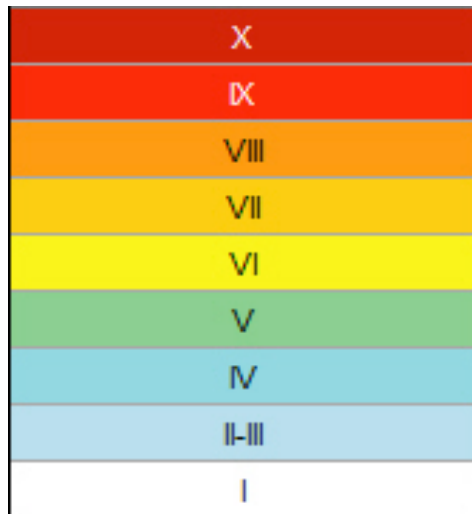
Magnitude 8.1 OFFSHORE CHIAPAS, MEXICO

Friday, September 8, 2017 at 04:49:21 UTC

The Modified-Mercalli Intensity scale is a twelve-stage scale, from I to XII, that indicates the severity of ground shaking.

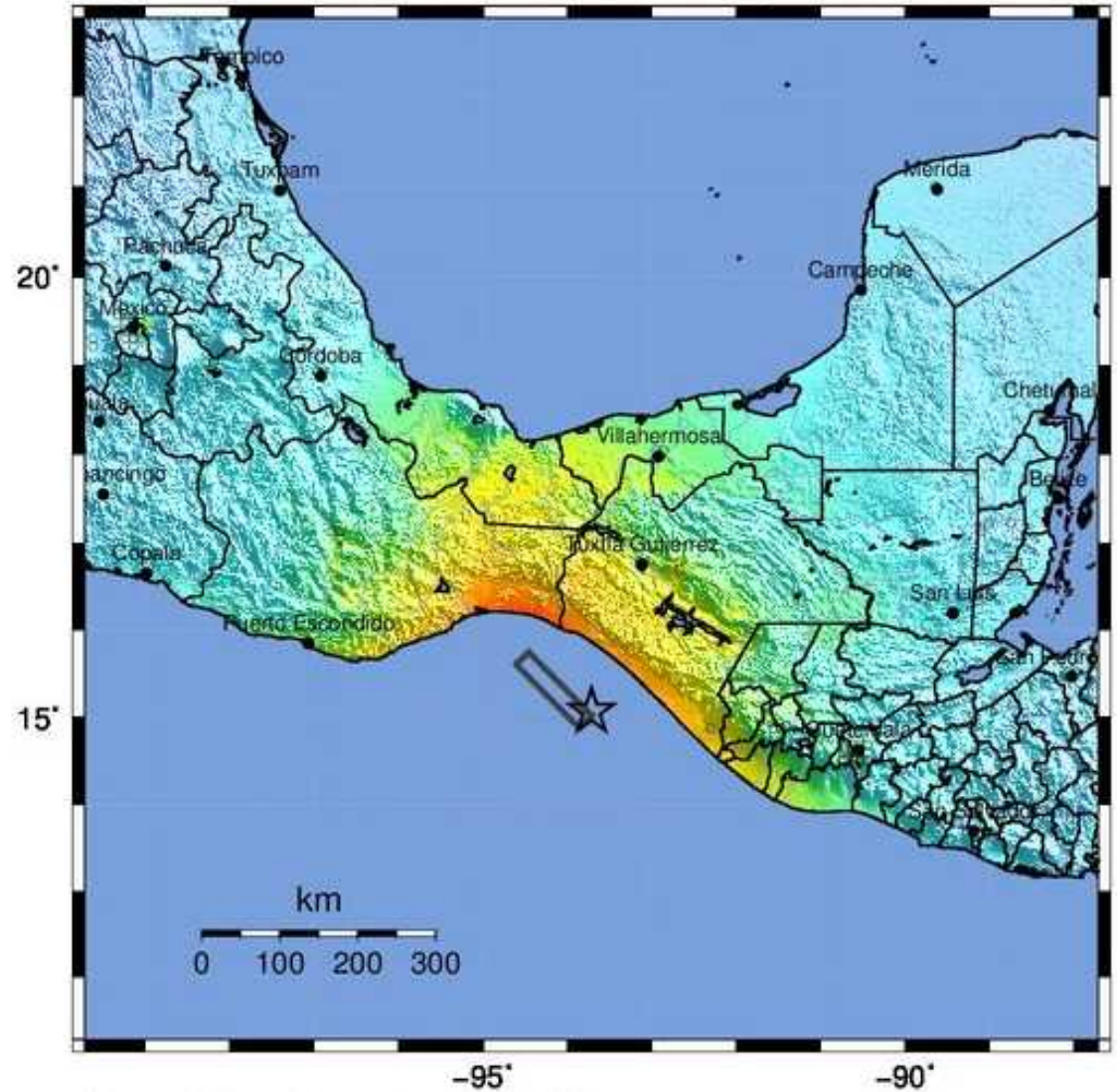
The coastline near the earthquake experienced severe shaking.

Modified Mercalli Intensity



Perceived Shaking

- Extreme
- Violent
- Severe
- Very Strong
- Strong
- Moderate
- Light
- Weak
- Not Felt



USGS Estimated shaking intensity from M 8.1 Earthquake

Magnitude 8.1 OFFSHORE CHIAPAS, MEXICO

Friday, September 8, 2017 at 04:49:21 UTC

USGS PAGER

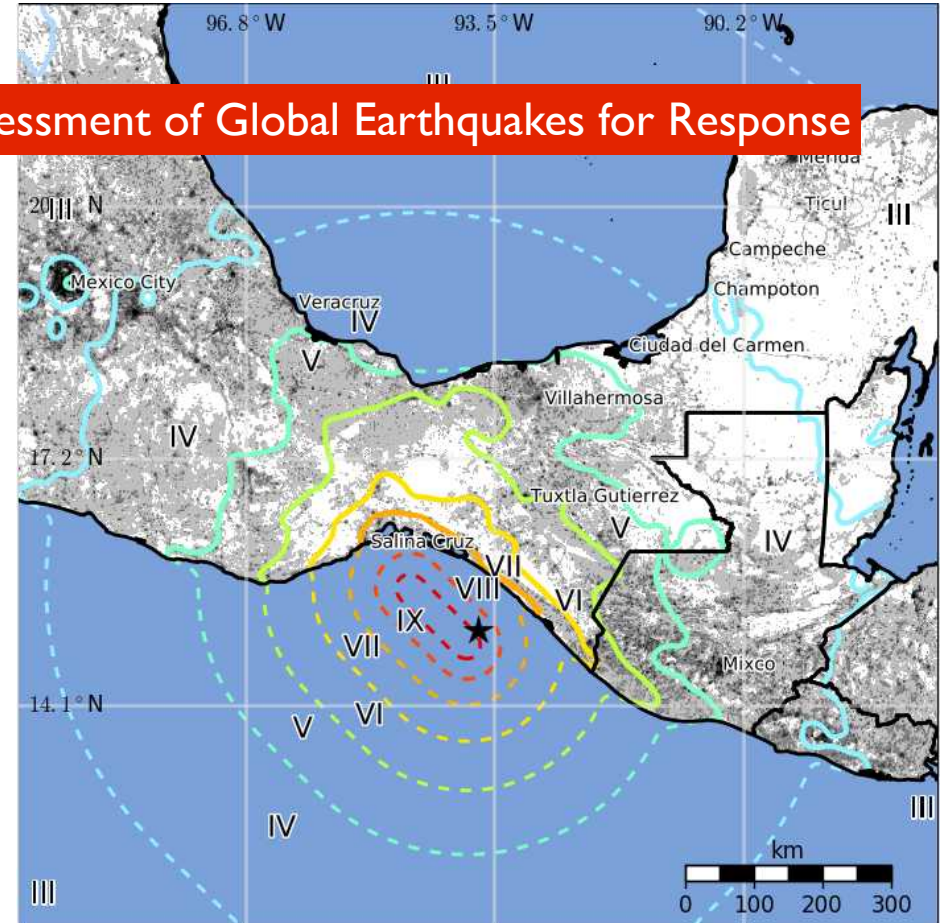
Population Exposed to Earthquake Shaking

The USGS PAGER map shows the population exposed to different Modified Mercalli Intensity (MMI) levels.

PAGER = Prompt Assessment of Global Earthquakes for Response

The USGS estimates that 547,000 people felt severe shaking from this earthquake.

MMI	Shaking	Pop.
I	Not Felt	--*
II-III	Weak	22,225 k*
IV	Light	40,108 k
V	Moderate	22,031 k
VI	Strong	4,325 k
VII	Very Strong	972 k
VIII	Severe	547 k
IX	Violent	0 k
X	Extreme	0 k



The color coded contour lines outline regions of MMI intensity. The total population exposure to a given MMI value is obtained by summing the population between the contour lines. The estimated population exposure to each MMI Intensity is shown in the table.

Image courtesy of the US Geological Survey

Magnitude 8.1 OFFSHORE CHIAPAS, MEXICO

Friday, September 8, 2017 at 04:49:21 UTC

The red star shows the epicenter of this earthquake.

Southwest of the epicenter, the Cocos Plate subducts beneath the North American Plate along the Middle America Trench.

To the southeast, the Cocos Plate subducts beneath the Caribbean Plate along the trench.

The transform boundary between the Caribbean and North American plates intersects the Middle America Trench near the epicenter.



Many earthquakes on the continental side of the Middle America Trench result from thrust faulting. However, this earthquake resulted from normal faulting. Given the 70 km depth, this earthquake most likely occurred within the top of the Cocos Plate due to extensional forces as the subducting plate bends as it dives beneath the continent.

Magnitude 8.1 OFFSHORE CHIAPAS, MEXICO

Friday, September 8, 2017 at 04:49:21 UTC

This magnitude 8.1 earthquake is shown by the blue star on the map and cross section. The epicenter of the 1985 magnitude 8.0 earthquake that damaged Mexico City is also shown. Map shows historic seismicity that indicates shallow earthquakes near the trench and deeper away from the trench as reflected also in the cross section as the Cocos plate dives.

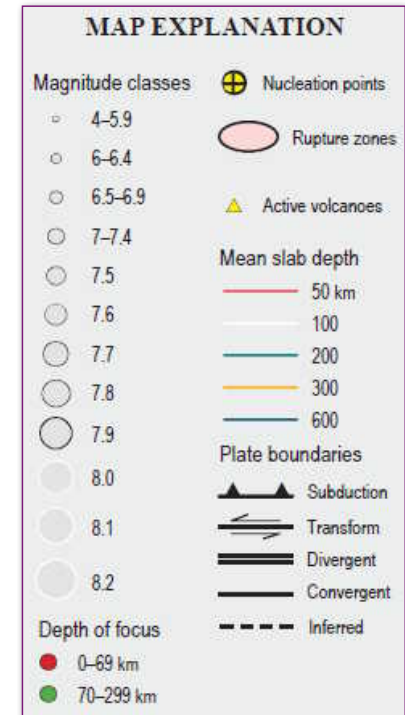
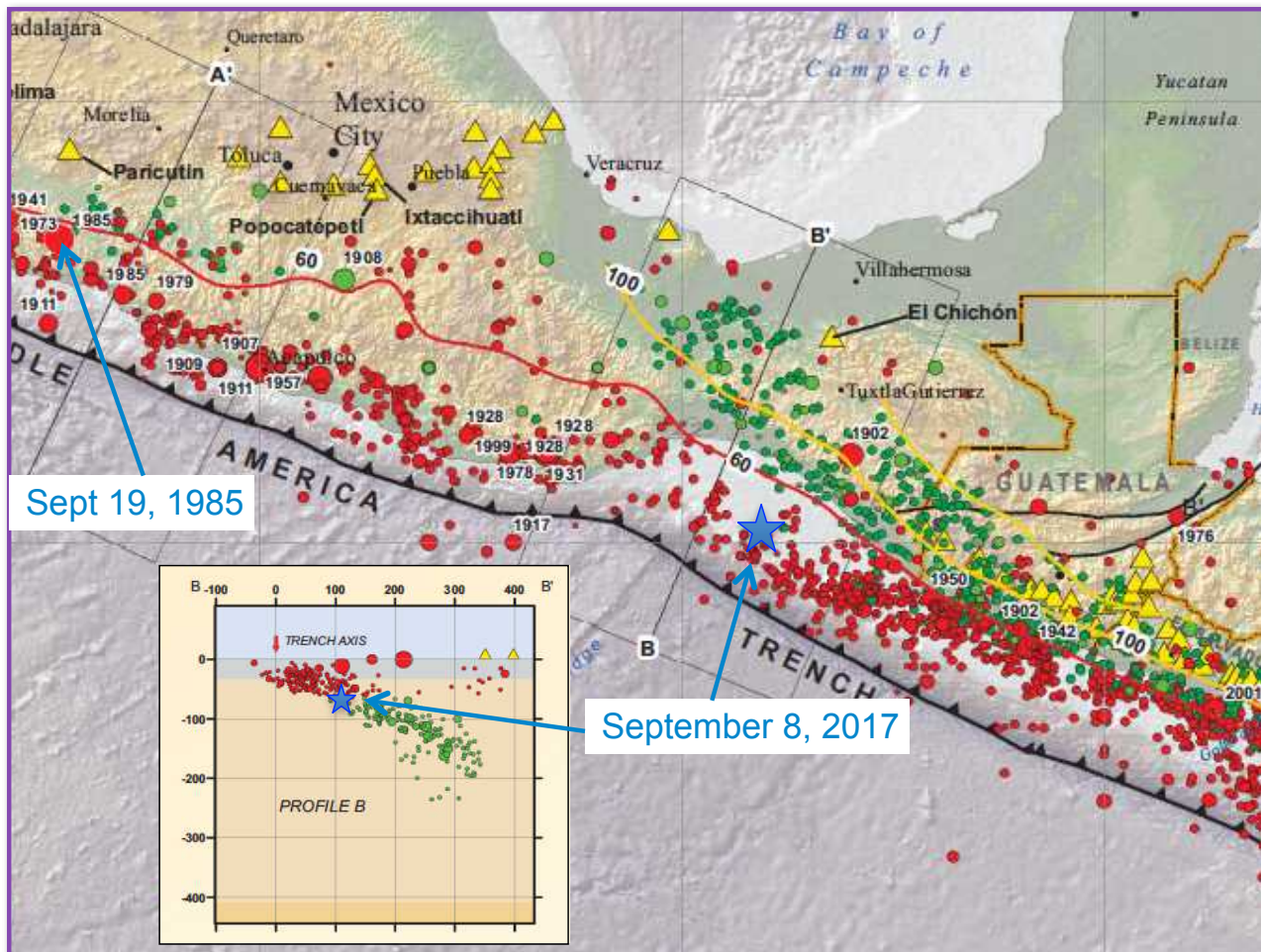


Image source:
U.S. Geological Survey
Open-File Report 2010-1083-F

Magnitude 8.1 OFFSHORE CHIAPAS, MEXICO

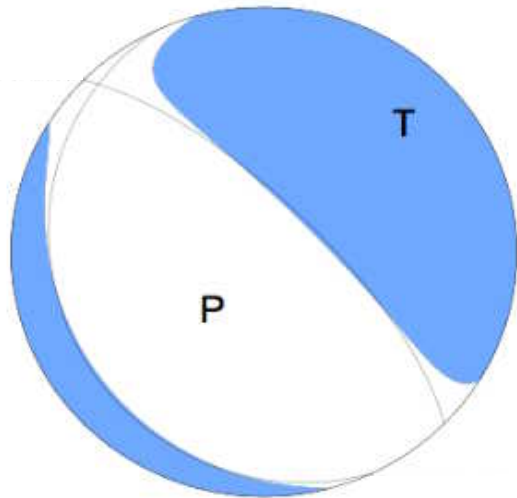
Friday, September 8, 2017 at 04:49:21 UTC

Animation of the regional tectonics of SW Mexico.



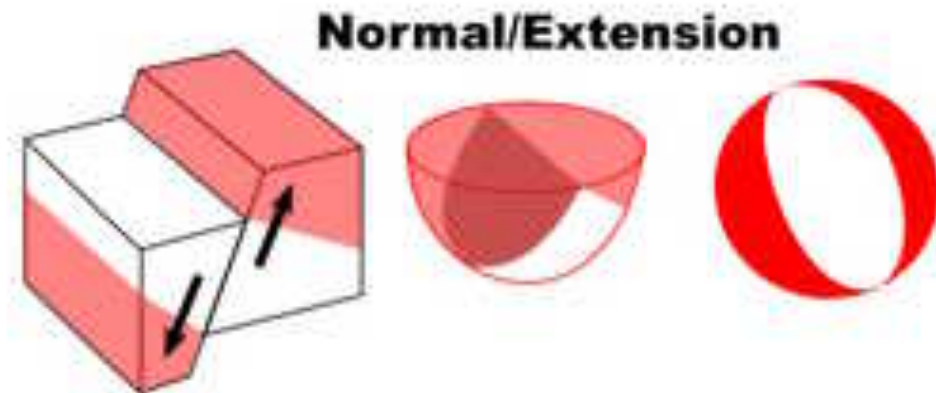
(Extracted from: <http://www.iris.edu/hq/inclass/animation/235>)

The focal mechanism is how seismologists plot the 3-D stress orientations of an earthquake. Because an earthquake occurs as slip on a fault, it generates primary (P) waves in quadrants where the first pulse is compressional (shaded) and quadrants where the first pulse is extensional (white). The orientation of these quadrants determined from recorded seismic waves determines the type of fault that produced the earthquake.



USGS W-phase Moment Tensor Solution

The tension axis (T) reflects the minimum compressive stress direction. The pressure axis (P) reflects the maximum compressive stress direction.



In this case, the focal mechanism indicates this earthquake occurred as the result of normal faulting.

Magnitude 8.1 OFFSHORE CHIAPAS, MEXICO

Friday, September 8, 2017 at 04:49:21 UTC

Aftershocks can result in additional damage and disruption to recovery efforts. Aftershocks following this earthquake are fairly evenly distributed across a trench-parallel 80km x 50km region. Aftershocks often define the full area of fault rupture.

Aftershock sequences follow predictable patterns as a group, although the individual earthquakes are themselves not predictable. The graph shows how the number of aftershocks and the magnitude of aftershocks decay with increasing time since the main shock. The number of aftershocks also decreases with distance from the main shock.

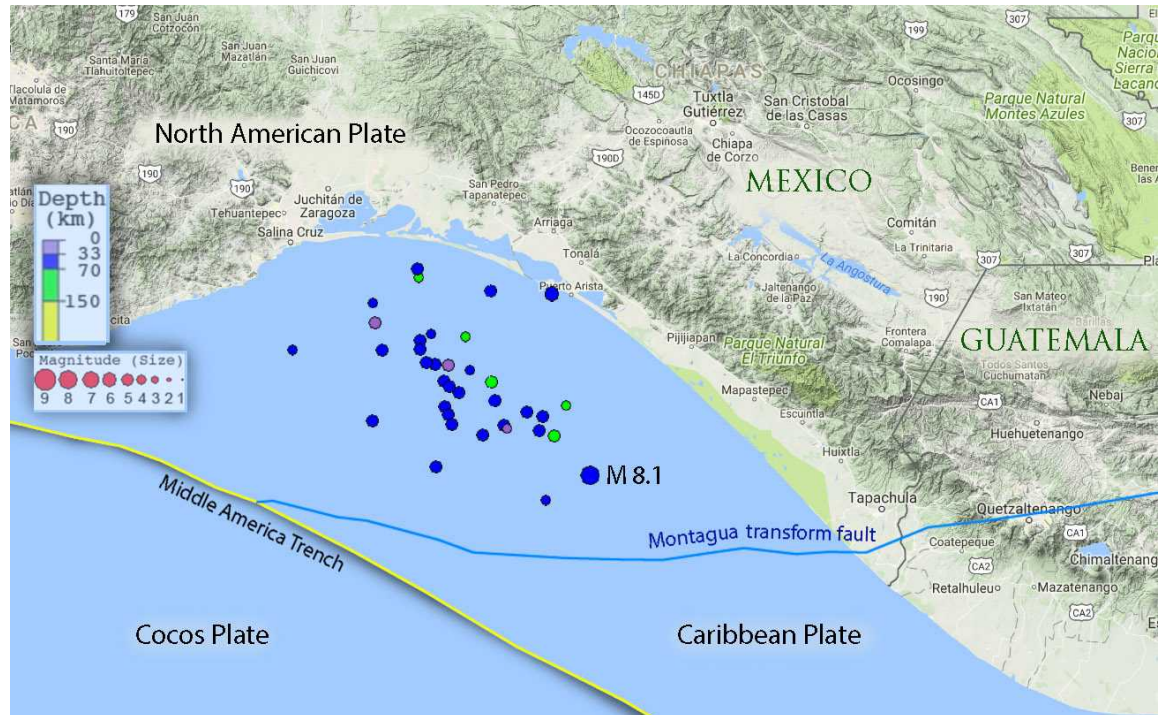


Image created in the IRIS Earthquake Browser

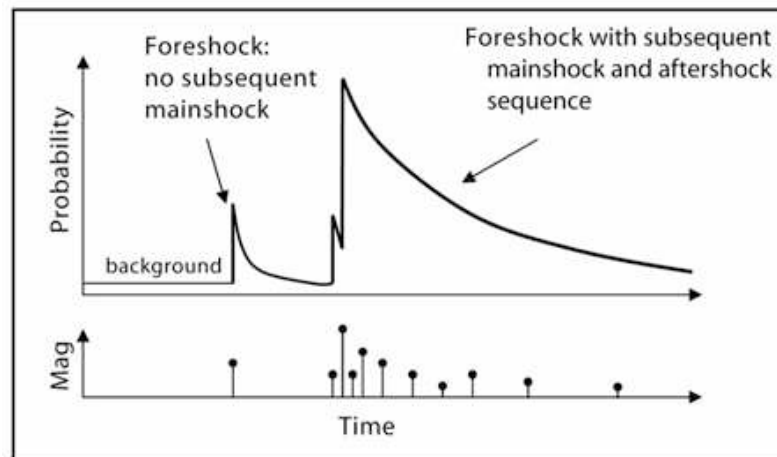


Image and text courtesy of the US Geological Survey

The surface projection of the slip distribution is superimposed on bathymetry in this map.

The amount of slip in meters is shown in color along the fault surface.

The star is the epicenter location whereas black circles are aftershock locations, sized by magnitude.

The thick white line indicates the major plate boundary

Magnitude 8.1 OFFSHORE CHIAPAS, MEXICO

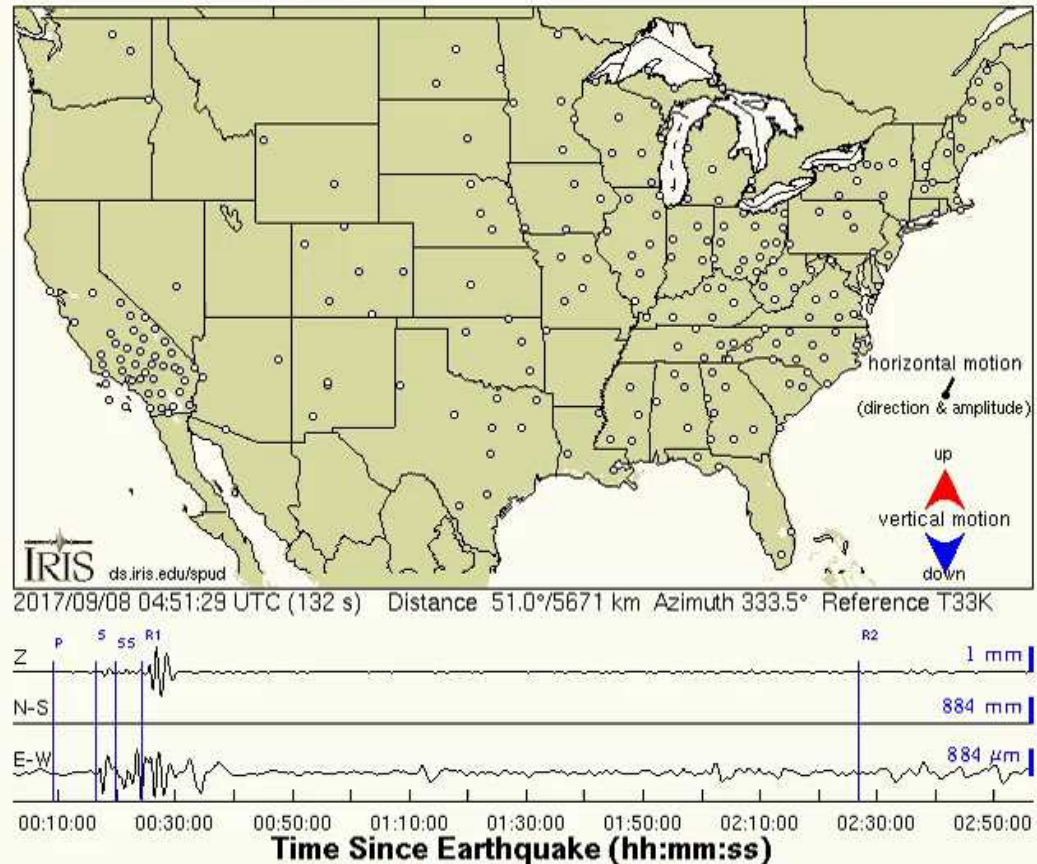
Friday, September 8, 2017 at 04:49:21 UTC

As earthquake waves travel along the surface of the Earth, they cause the ground to move.

The USArray Ground Motion Visualization displays ground motions using the actual data recorded from the earthquake.

The color of each symbol depicts the amplitude of the vertical ground motion. Blue indicates downward ground motion while red represents upward ground motion. The symbols are “tailed” with the direction and length of the tail representing the direction and amplitude of the horizontal ground motion.

September 08, 2017, NEAR COAST OF CHIAPAS, MEXICO, M=8.0



Animation of seismic waves crossing the US recorded by the USArray

Magnitude 7.1 PUEBLA, MEXICO

Tuesday, September 19, 2017 at 18:14:39 UTC

A magnitude 7.1 earthquake has occurred 120 km SE of Mexico City collapsing buildings, homes, and bridges across hundreds of miles. Nearly 140 people had been reported killed across the country, but that figure was expected to climb as rescue and recovery proceeds.



This earthquake occurred on the 32nd anniversary of the devastating 1985 M8.0 Michoacan earthquake, which caused extensive damage to Mexico City and the surrounding region.

A car sits crushed, engulfed in a pile of rubble from a building felled by a 7.1 earthquake, in Jojutla, Morelos state, Mexico. The earthquake stunned central Mexico, killing at least 139 people as buildings collapsed in plumes of dust. (AP Photo/Carlos Rodriguez)

Mexico City is prone to major damage in earthquakes because it sits on an old lake bed. Portions of the city are built on young unconsolidated sediments where seismic waves are amplified. This earthquake caused heavy and prolonged shaking in the capital. While building standards have improved over the years, there are many old buildings in the city.



Mexico City

The capital of the Aztec empire was Tenochtitlan, built on an island in Lake Texcoco. Mexico City was built by the Spanish on the ruins of Tenochtitlan. Both the Aztecs and the Spaniards extended the island; the Aztecs first to create fertile land for planting, and the Spaniards eventually draining the lake to allow the city to grow.



Tenochtitlan- from *The Broken Spears*, Miguel León-Portilla

7 Druck und Spannung

Druck

- lithostatischer Druck
- Porendruck - hydrostatischer Druck

Spannung

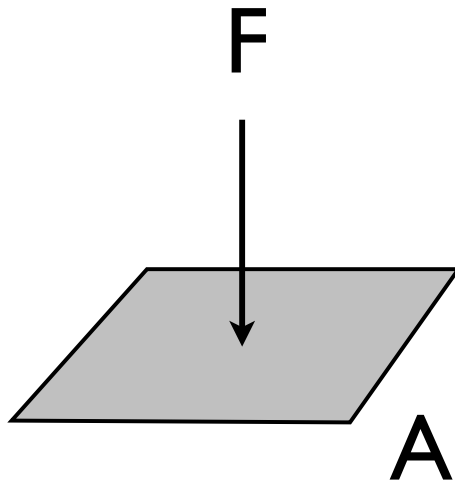
- Normalspannung - Scherspannung: σ_n, τ
- Hauptspannungen 3D $\sigma_1, > \sigma_2 > \sigma_3$
- 2D Mohr Kreis $\sigma_1, > \sigma_3$
- Druck- und Spannungszustände

Elastizität

Reibung

Druck

Druck - Spannung



Druck = Kraft / Fläche

Dimensionen:

Kraft: Newton

$$1 \text{ N} = 1 \text{ kg m s}^{-2}$$

Druck: Pascal

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N} / \text{m}^2 = 1 \text{ kg m}^{-1} \text{s}^{-2}$$

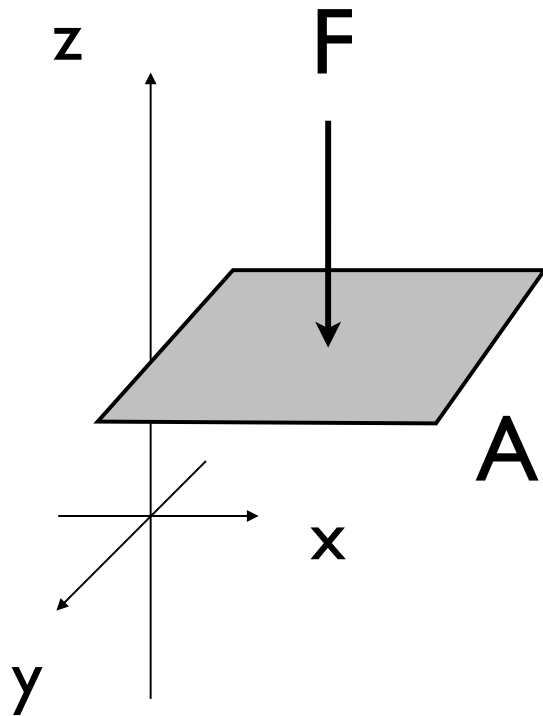
Umrechnung:

$$1 \text{ kb} = 100 \text{ MPa}$$

$$0.1 \text{ MPa} = 1 \text{ bar} \approx 1 \text{ atm}$$

	Pa	bar	Torr	atm (phys)	at (tech)
Pa	1	10^{-5}	$7.5 \cdot 10^{-3}$	$9.87 \cdot 10^{-6}$	$1.02 \cdot 10^{-5}$
bar	10^5	1	750	0.987	1.02
Torr	133	$1.33 \cdot 10^{-3}$	1	$1.32 \cdot 10^{-3}$	$1.36 \cdot 10^{-3}$
atm (phys)	101'330	1.0133	760	1	1.033
at (tech)	98'100	0.981	736	0.968	1

Lithostatischer Druck



$$\text{Druck} = \text{Kraft} / \text{Fläche}$$

$$\text{Masse} = m \quad (\text{"Gewicht"})$$

$$\text{Kraft} = m \cdot g$$

(Gewichtskraft)

$$= V \cdot \rho \cdot g$$

$$= x \cdot y \cdot z \cdot \rho \cdot g$$

$$\text{Fläche} = x \cdot y$$

$$\text{Druck} = (x \cdot y \cdot z) \cdot \rho \cdot g / (x \cdot y)$$

$$\text{Druck} = \rho \cdot g \cdot z$$

Lithostatischer Druck

Druck in 1 km Tiefe in granitischer Kruste ?

$$\text{Dichte } \rho_{\text{Granit}} = 2.75 \cdot 10^3 \text{ kgm}^{-3}$$

$$\text{Erdbeschleunigung } g = 9.81 \text{ ms}^{-2}$$

$$\rho \cdot g \cdot z = 2.75 \cdot 10^3 \text{ kgm}^{-3} \cdot 9.81 \text{ ms}^{-2} \cdot 10^3 \text{ m}$$

$$\approx 2.7 \cdot 10^4 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-2}$$

$$\approx 2.7 \cdot 10^7 \text{ Pa}$$

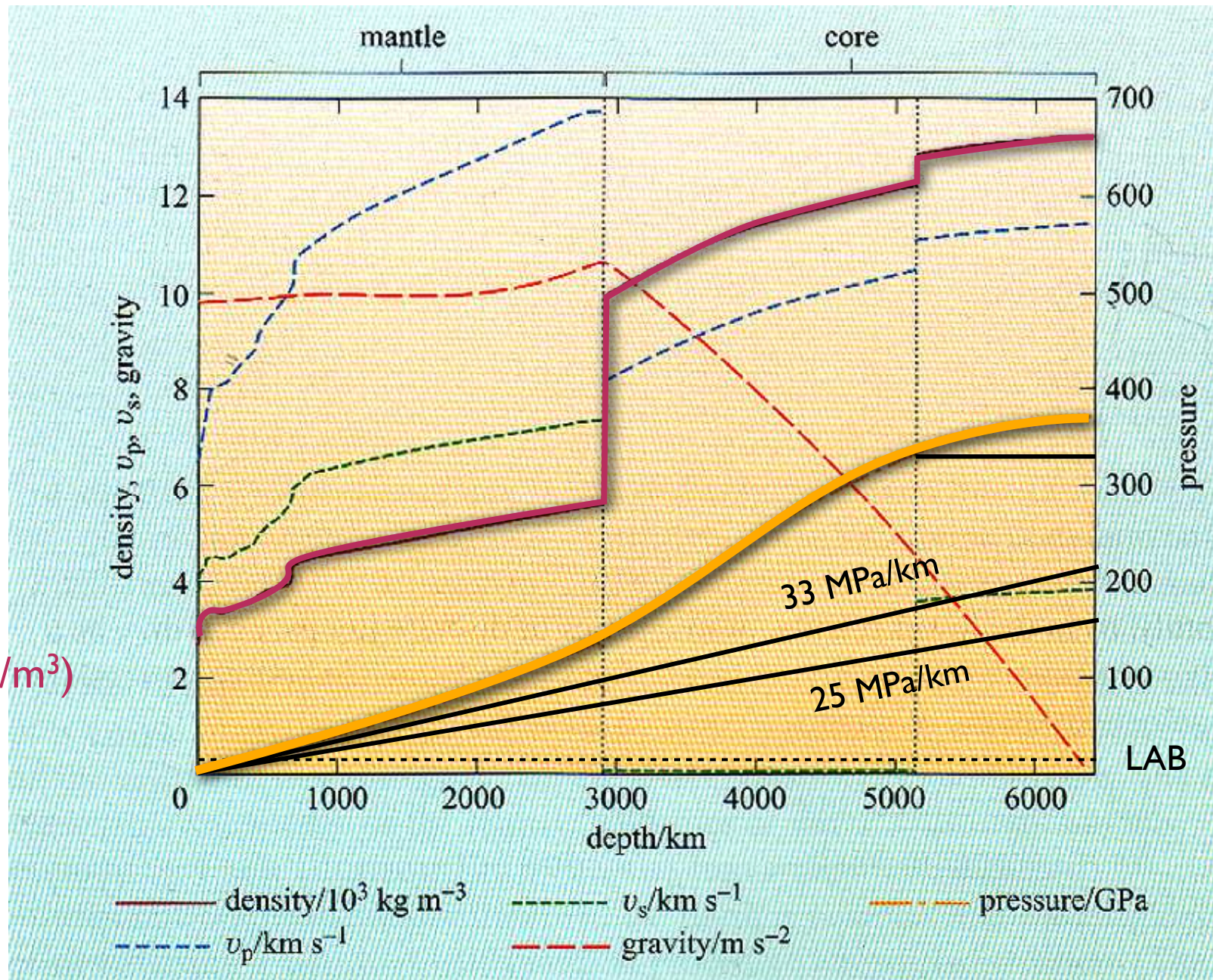
in 1 km Tiefe: $p_{\text{litho}} \approx 27 \text{ MPa}$

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N} / \text{m}^2 = 1 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-2}$$

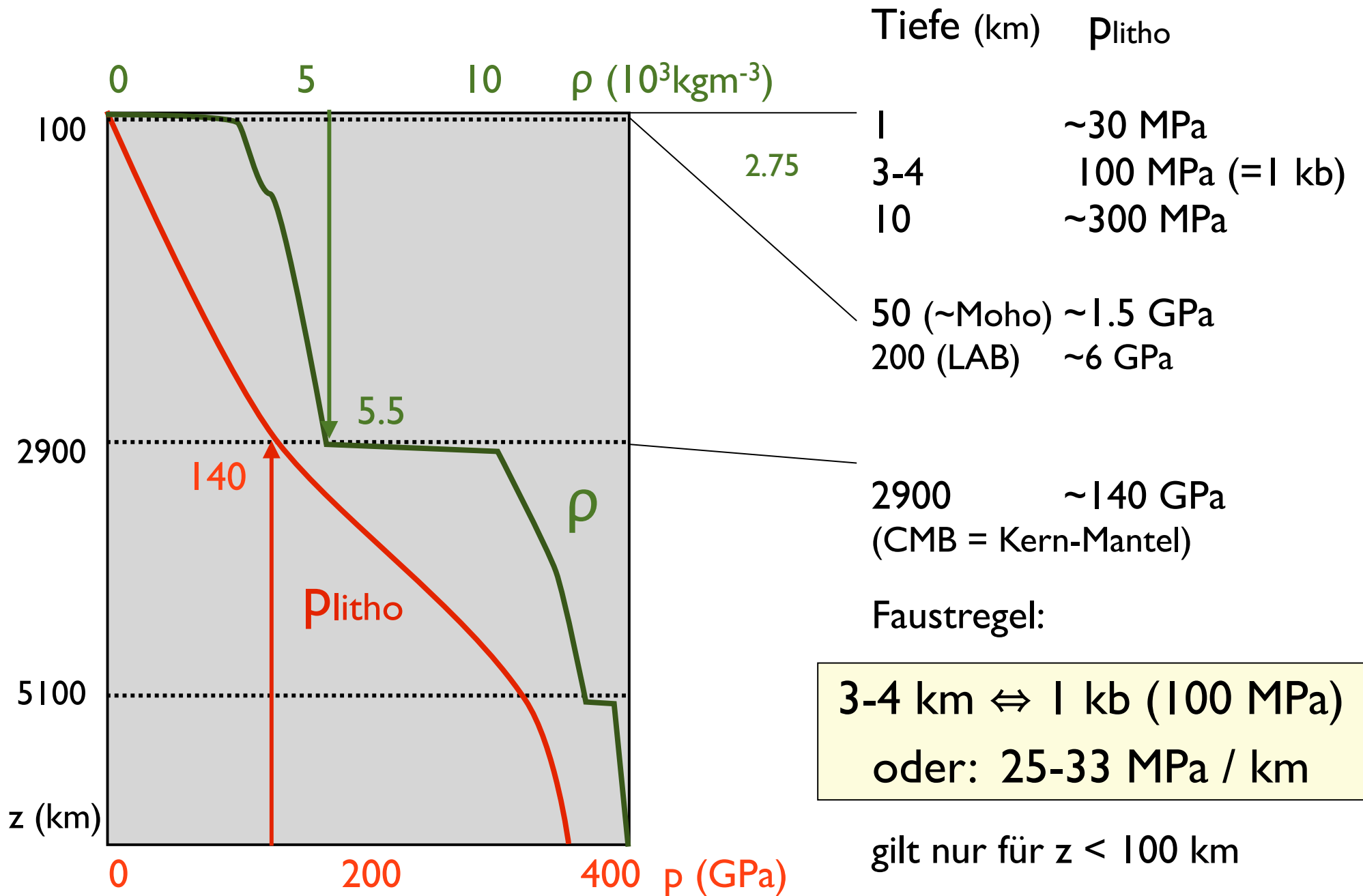
Preliminary Reference Earth Model

Druck
 p (GPa)

Dichte
 ρ (10^3 kg/m^3)



Lithostatischer Druck



Hydrostatischer Druck

Porendruck in 1 km Tiefe ?

$$\text{Dichte } \rho_{\text{H}_2\text{O}} = 1.00 \cdot 10^3 \text{ kgm}^{-3}$$

$$\text{Erdbeschleunigung } g = 9.81 \text{ ms}^{-2}$$

$$p = \rho \cdot g \cdot z = 1 \cdot 10^3 \text{ kgm}^{-3} \cdot 9.81 \text{ ms}^{-2} \cdot 10^3 \text{ m}$$

$$p_{\text{hydro}} \approx 10^3 \cdot 10 \cdot 10^3 \text{ Pa}$$

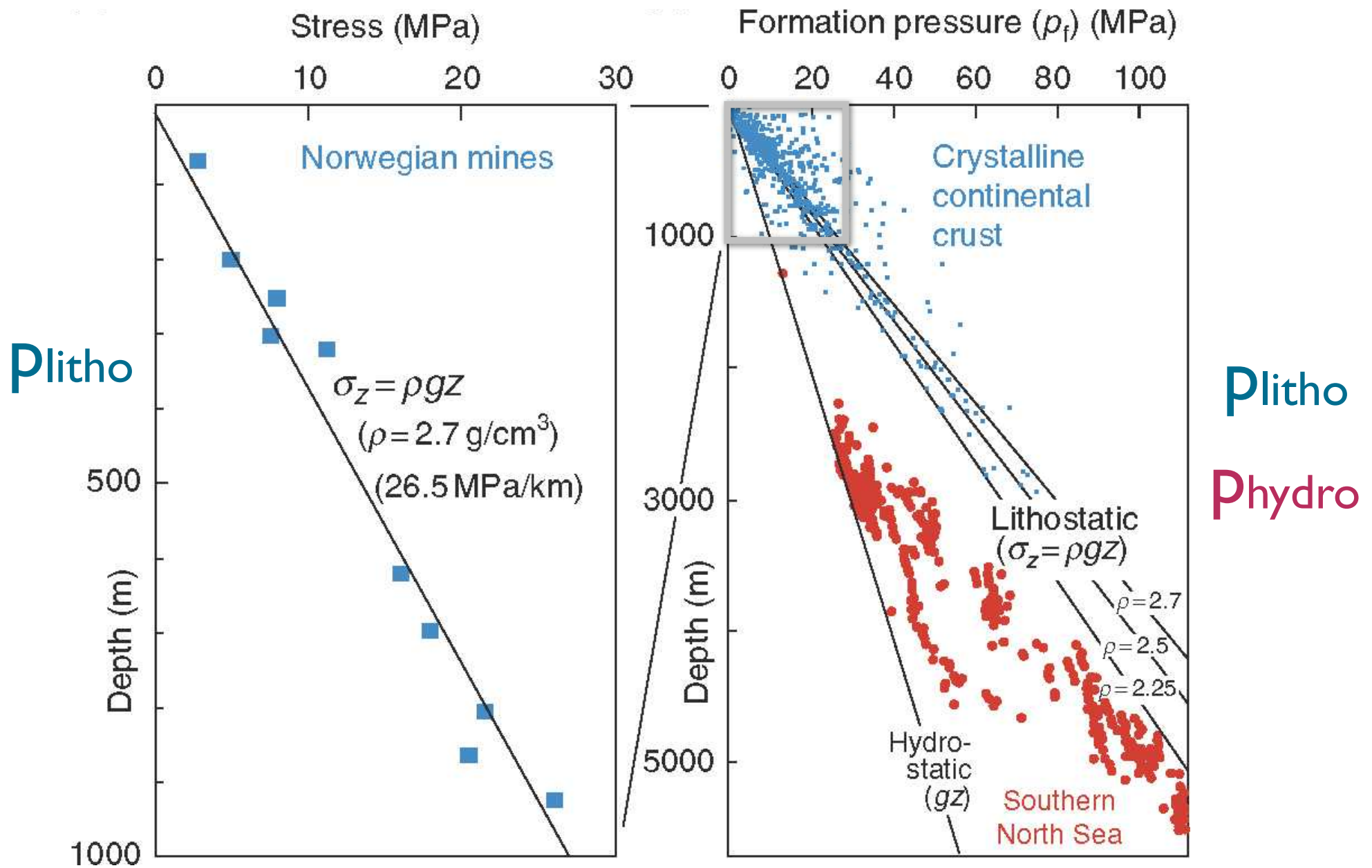
$$p_{\text{hydro}} \approx 10 \text{ MPa}$$

$$p_{\text{litho}} \approx 27 \text{ MPa}$$

$$\Rightarrow \lambda = p_{\text{hydro}} / p_{\text{litho}} \approx 0.4$$

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N} / \text{m}^2 = 1 \text{ kg m}^{-1} \text{s}^{-2}$$

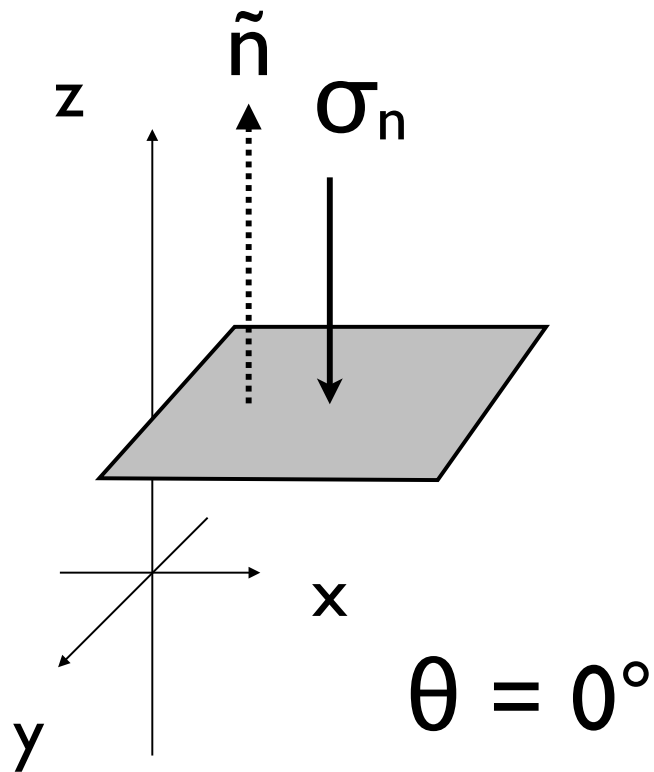
Hydrostatischer Druck



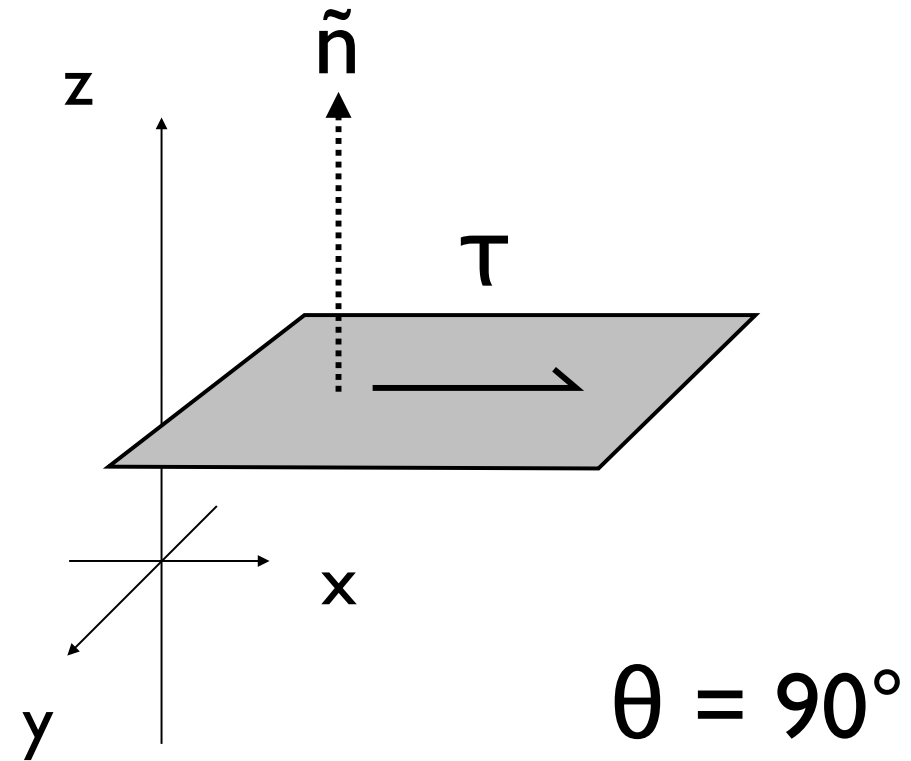
Spannung

Spannung

Normalspannung σ_n

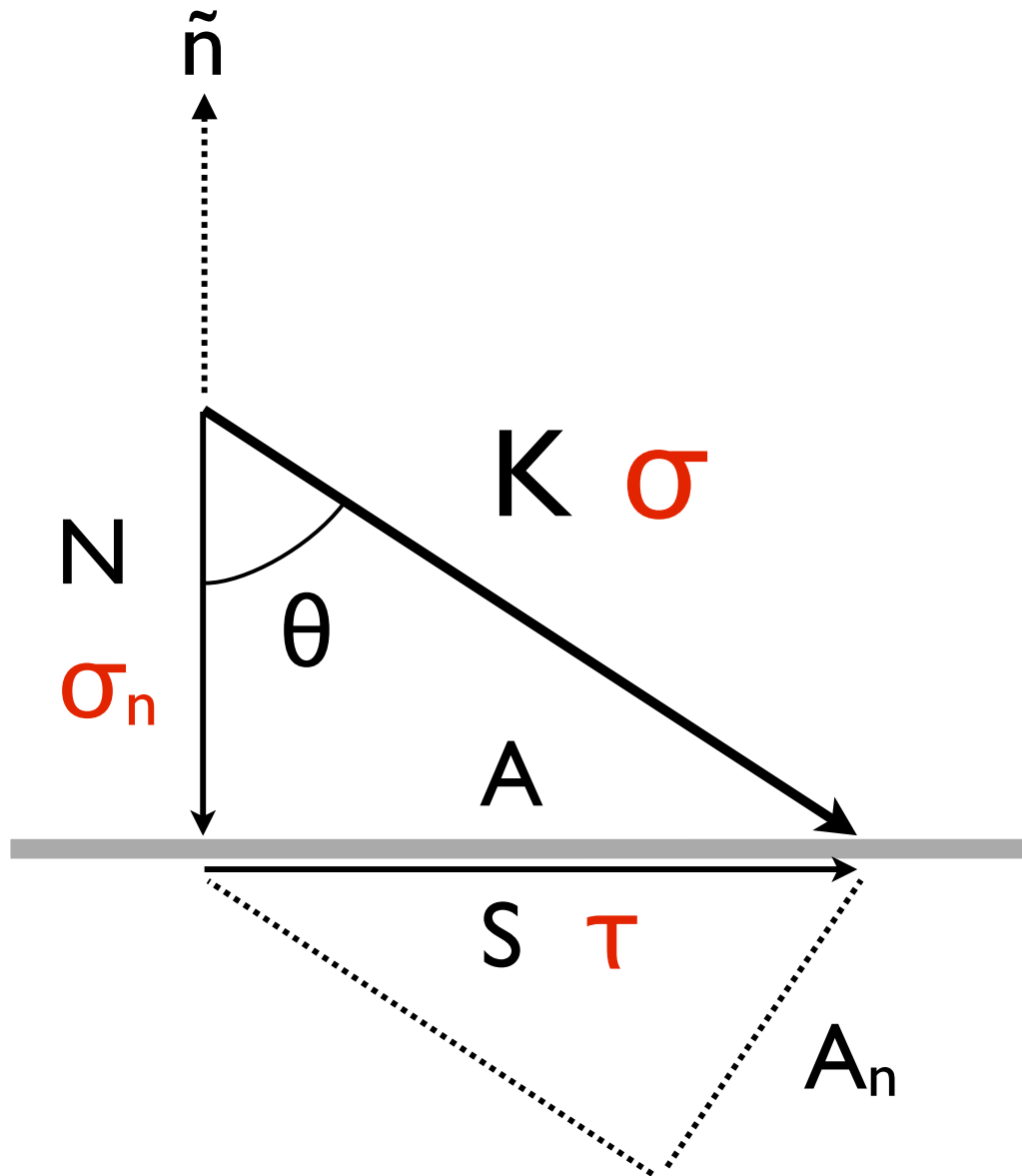


Scherspannung τ



$\theta =$ Winkel Flächennormale \tilde{n} und Spannung

Spannung



Kraftkomponenten

$$N = K \cdot \cos(\theta)$$

$$S = K \cdot \sin(\theta)$$

'angelegte' Spannung

$$\sigma = K / A_n$$

von K 'gesehene' Fläche:

$$A_n = A \cdot \cos(\theta)$$

$$(A = A_n / \cos(\theta))$$

Spannungskomponenten

$$\sigma_n = N / A$$

$$= K \cdot \cos(\theta) / (A_n / \cos(\theta))$$

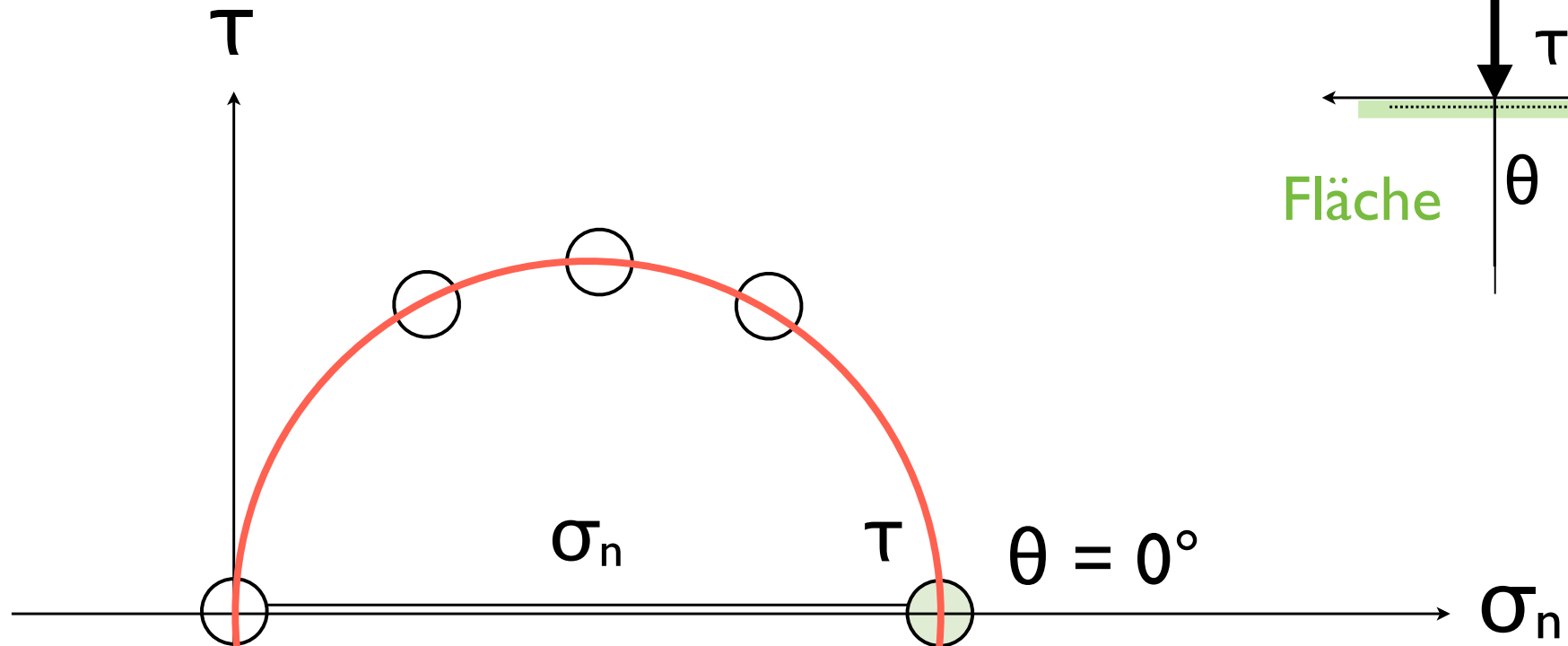
$$= \sigma \cdot \cos(\theta)^2$$

$$\tau = S / A$$

$$= K \cdot \sin(\theta) / (A_n / \cos(\theta))$$

$$= \sigma \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(\theta)$$

Normal- und Scherspa



Spannungskomponenten:

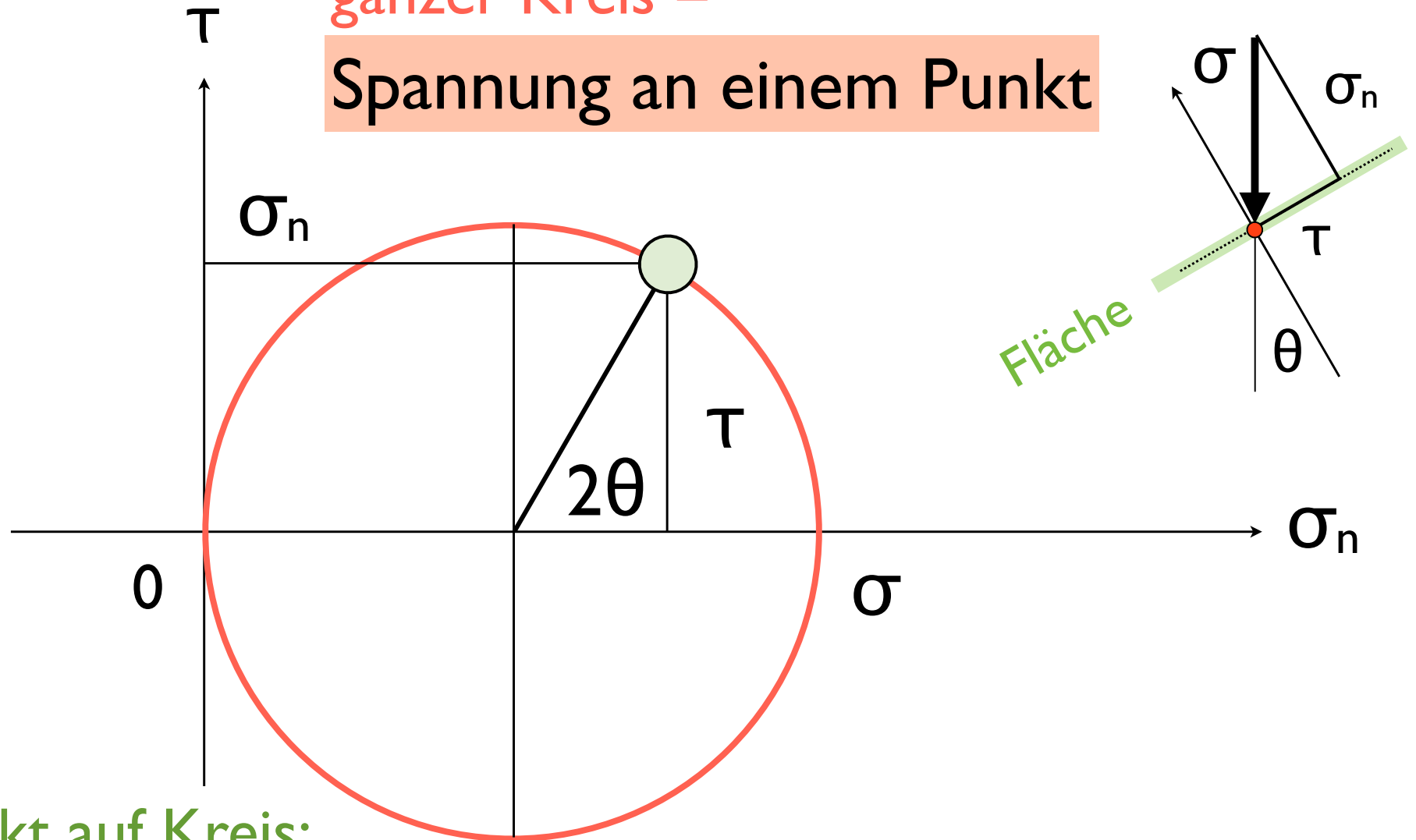
$$\sigma_n = f(\theta) = \sigma \cdot \cos(\theta)^2$$

$$\tau = f(\theta) = \sigma \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(\theta)$$

2D Mohr Kreis für Hauptspannung σ

ganzer Kreis =

Spannung an einem Punkt



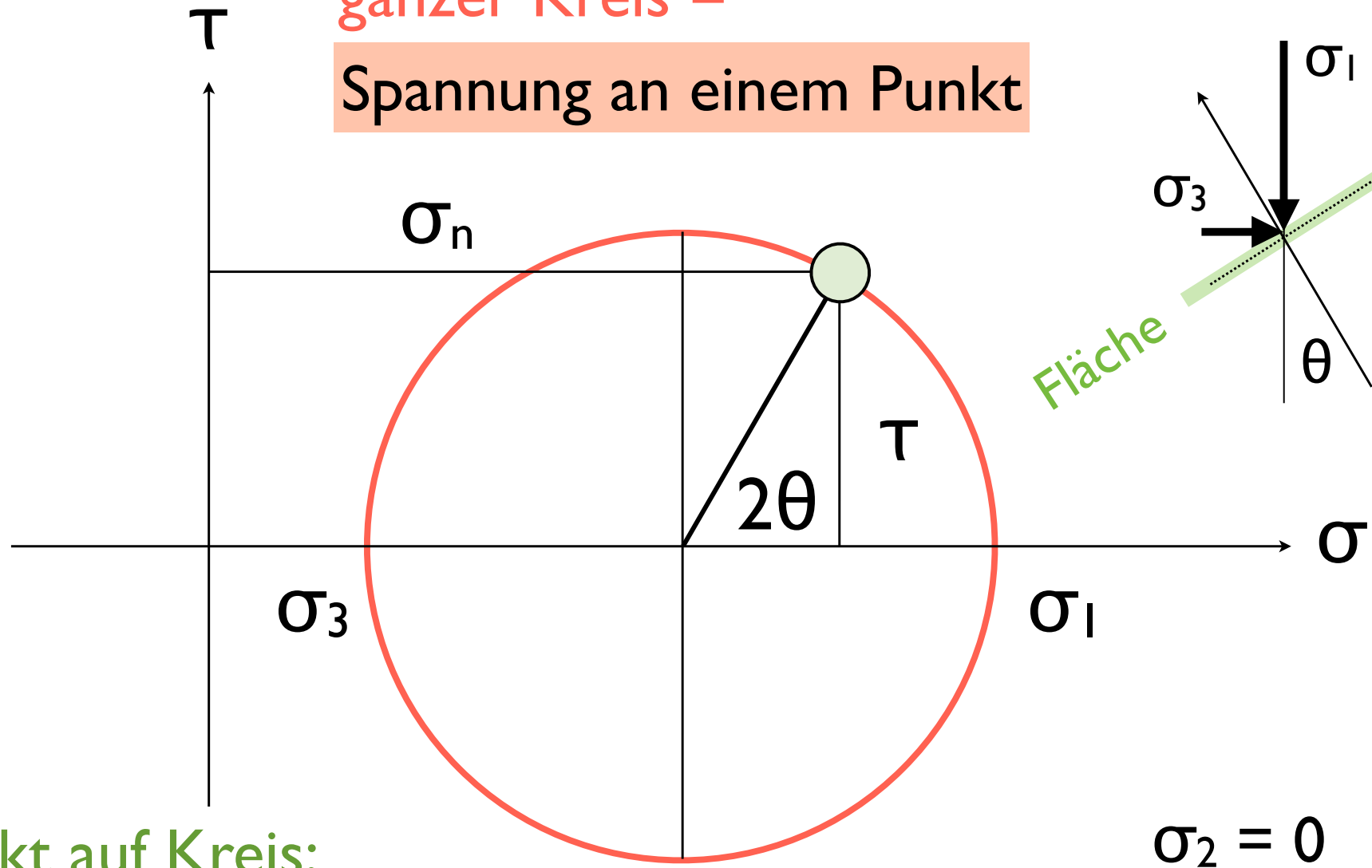
Punkt auf Kreis:

Normal- und Scherspannung auf einer Fläche

Mohr Kreis: Hauptspannungen σ_1, σ_3

ganzer Kreis =

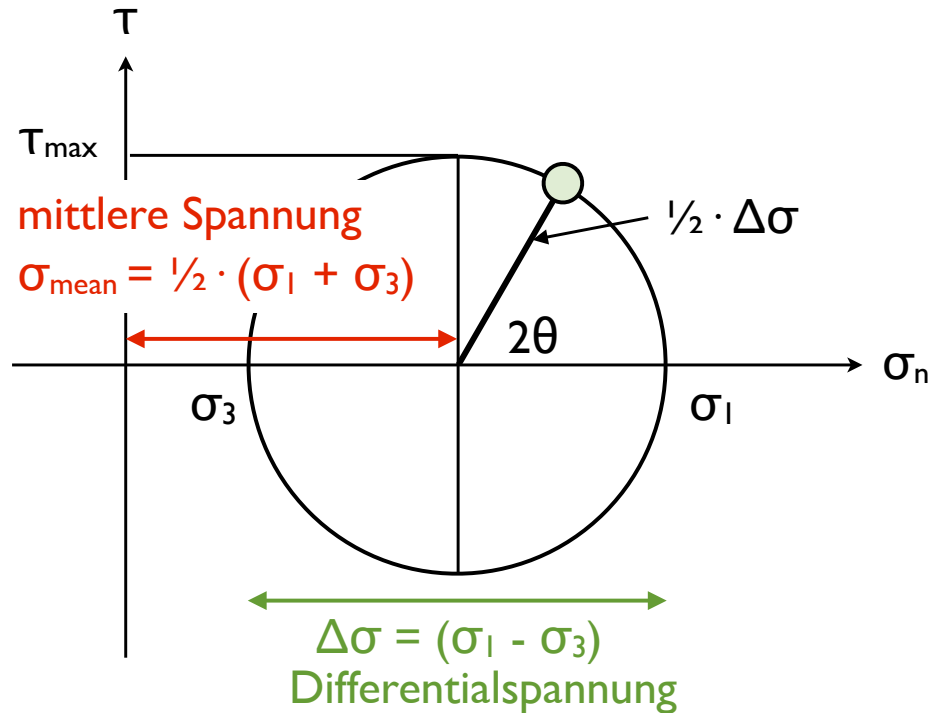
Spannung an einem Punkt



Punkt auf Kreis:

Normal- und Scherspannung auf einer Fläche

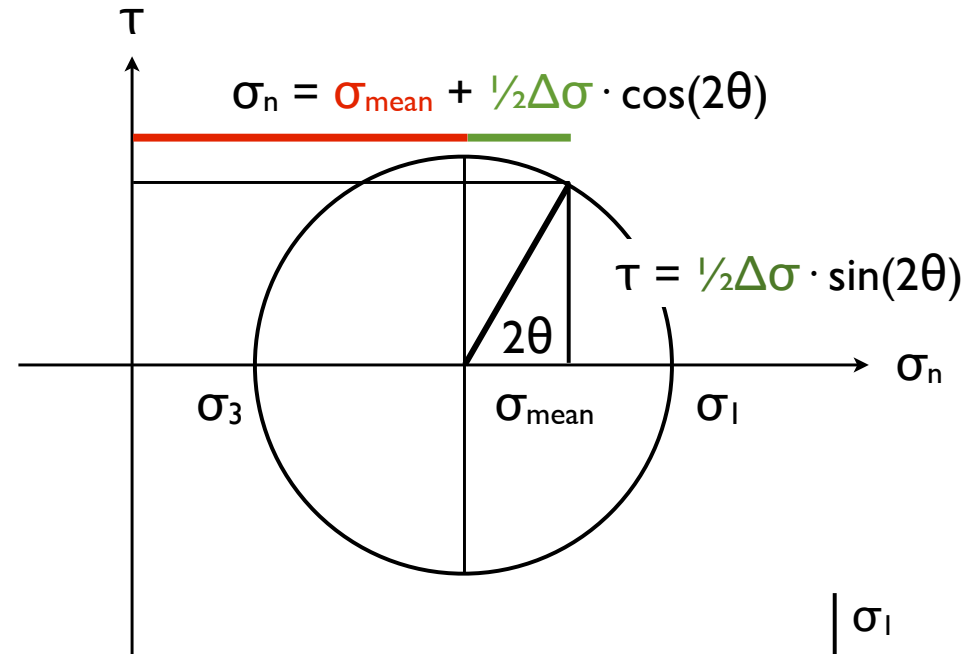
Komponenten σ_n , τ im Mohr Kreis



Spannungs-
komponenten:

$$\sigma_n = \sigma \cdot \cos(\theta)^2$$

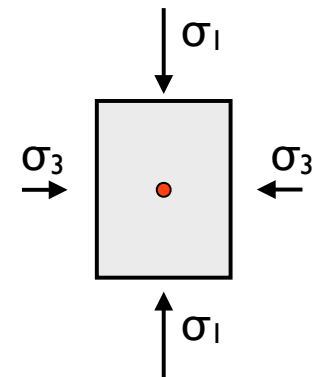
$$\tau = \sigma \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(\theta)$$



im Mohr Kreis
(geometrisch):

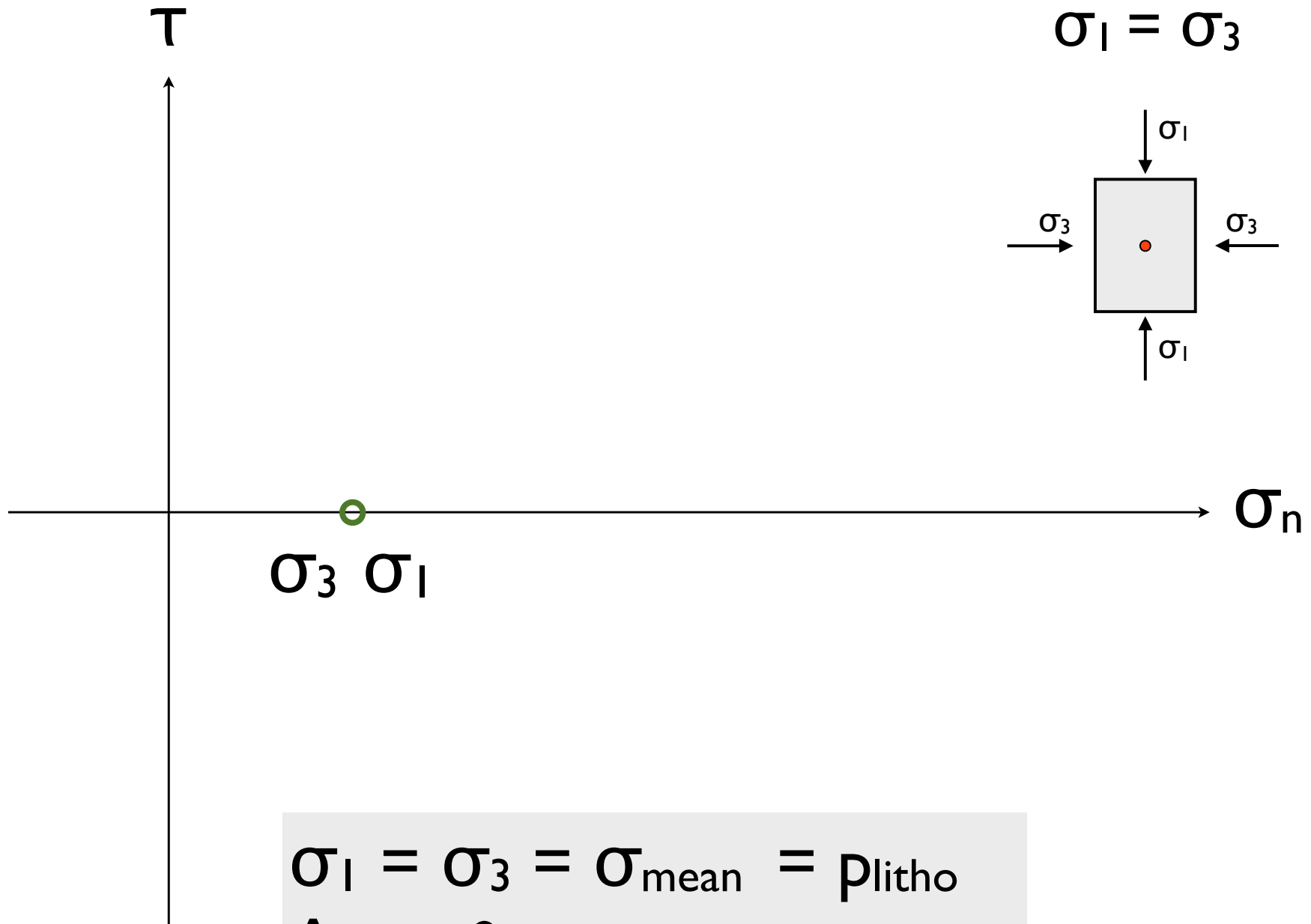
$$\sigma_n = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cdot \cos(2\theta)$$

$$\tau = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \cdot \sin(2\theta)$$



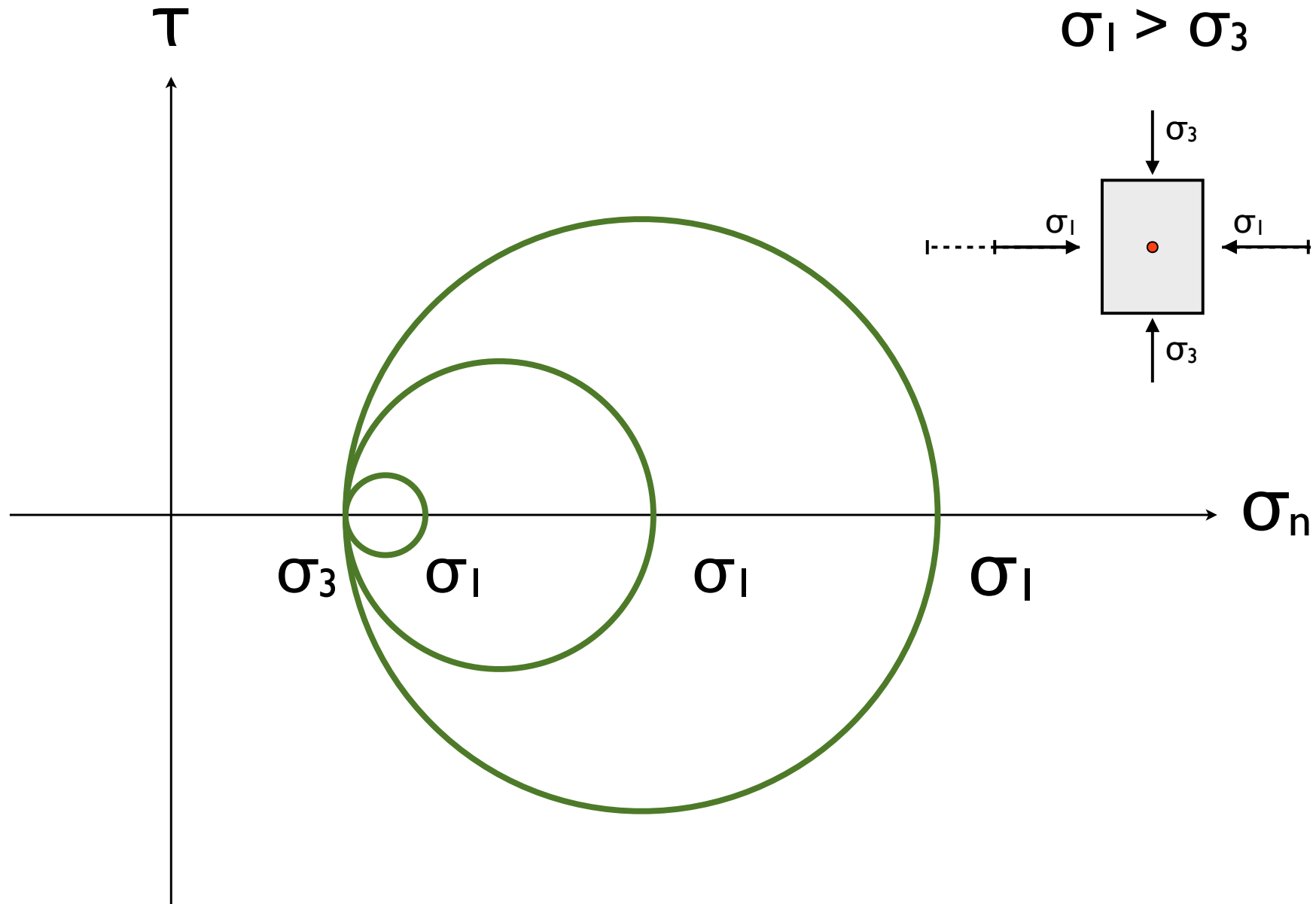
Druck- und Spannungszustände

Lithostatischer Druck



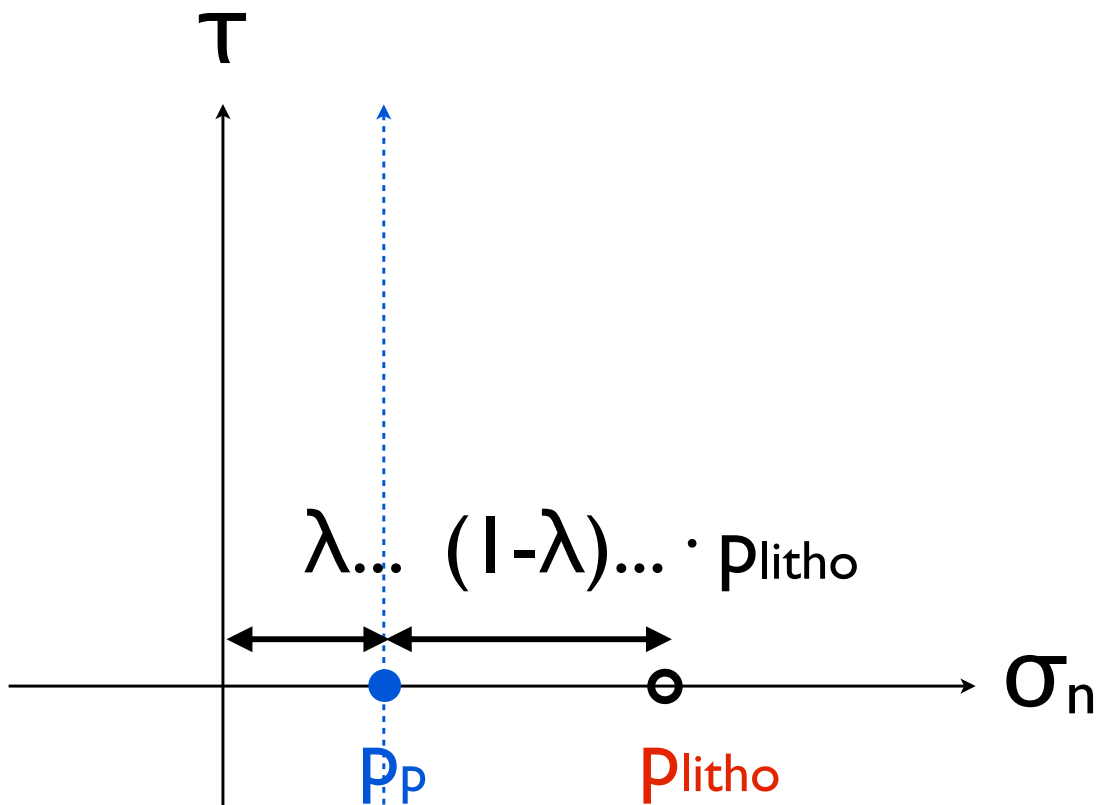
$$\sigma_1 = \sigma_3 = \sigma_{\text{mean}} = p_{\text{litho}}$$
$$\Delta\sigma = 0$$

Differentialspannung



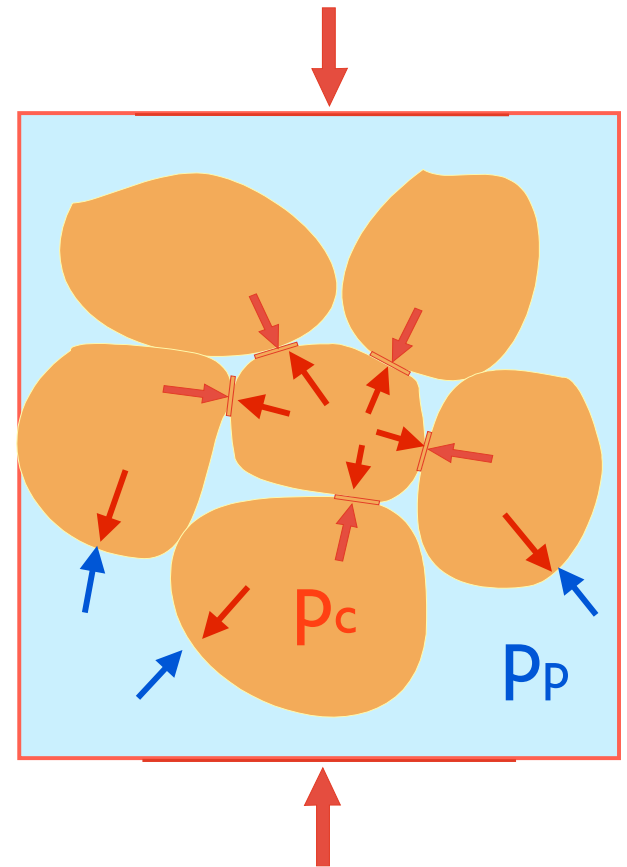
$\sigma_3 = p_c = \text{confining pressure} = \text{Umschliessungsdruck}$

Porendruck



$$p_p = p_{hydro}$$

$$p_p = \lambda \cdot p_{litho}$$



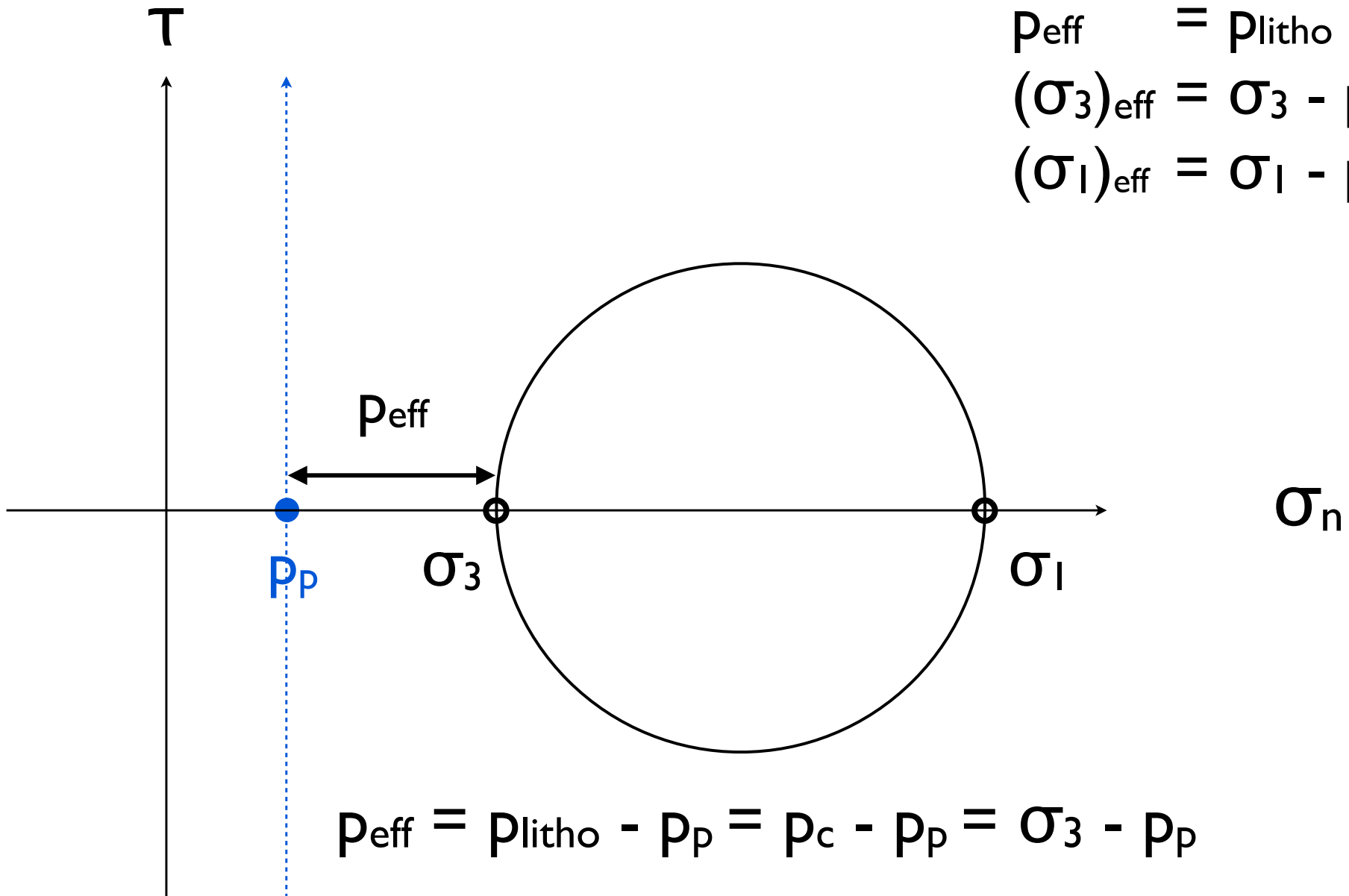
$$p_p = \lambda \cdot p_c = \lambda \cdot \sigma_3 = \text{Porendruck}$$

Effektiver Druck

$$p_{\text{eff}} = p_{\text{litho}} - p_p$$

$$(\sigma_3)_{\text{eff}} = \sigma_3 - p_p$$

$$(\sigma_1)_{\text{eff}} = \sigma_1 - p_p$$



$$p_{\text{eff}} = p_{\text{litho}} - p_p = p_c - p_p = \sigma_3 - p_p$$

$p_{\text{eff}} = \sigma_3 - p_p = \text{effektiver (Umschliessungs-) Druck}$

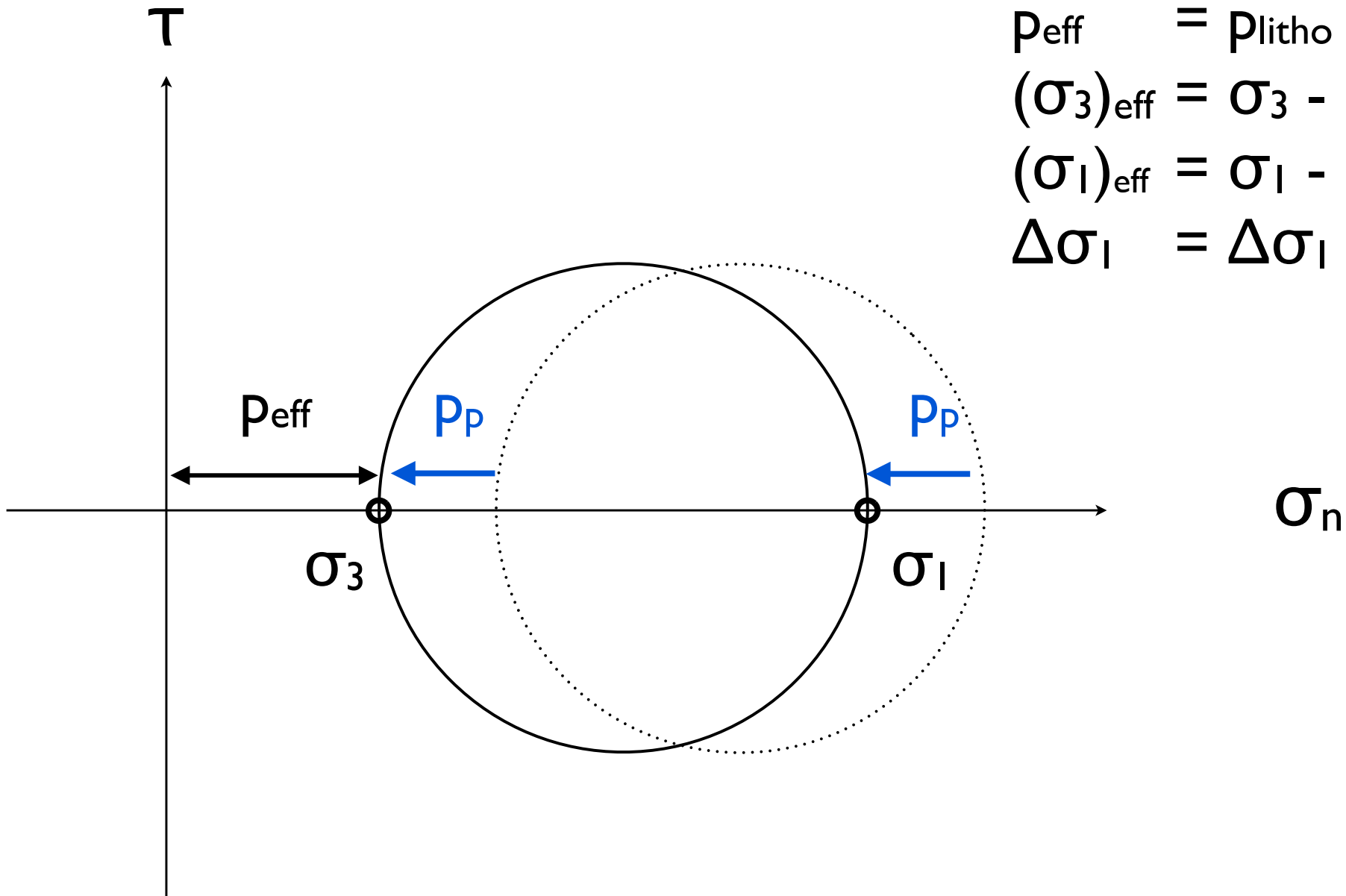
Effektiver Druck

$$p_{\text{eff}} = p_{\text{litho}} - p_p$$

$$(\sigma_3)_{\text{eff}} = \sigma_3 - p_p$$

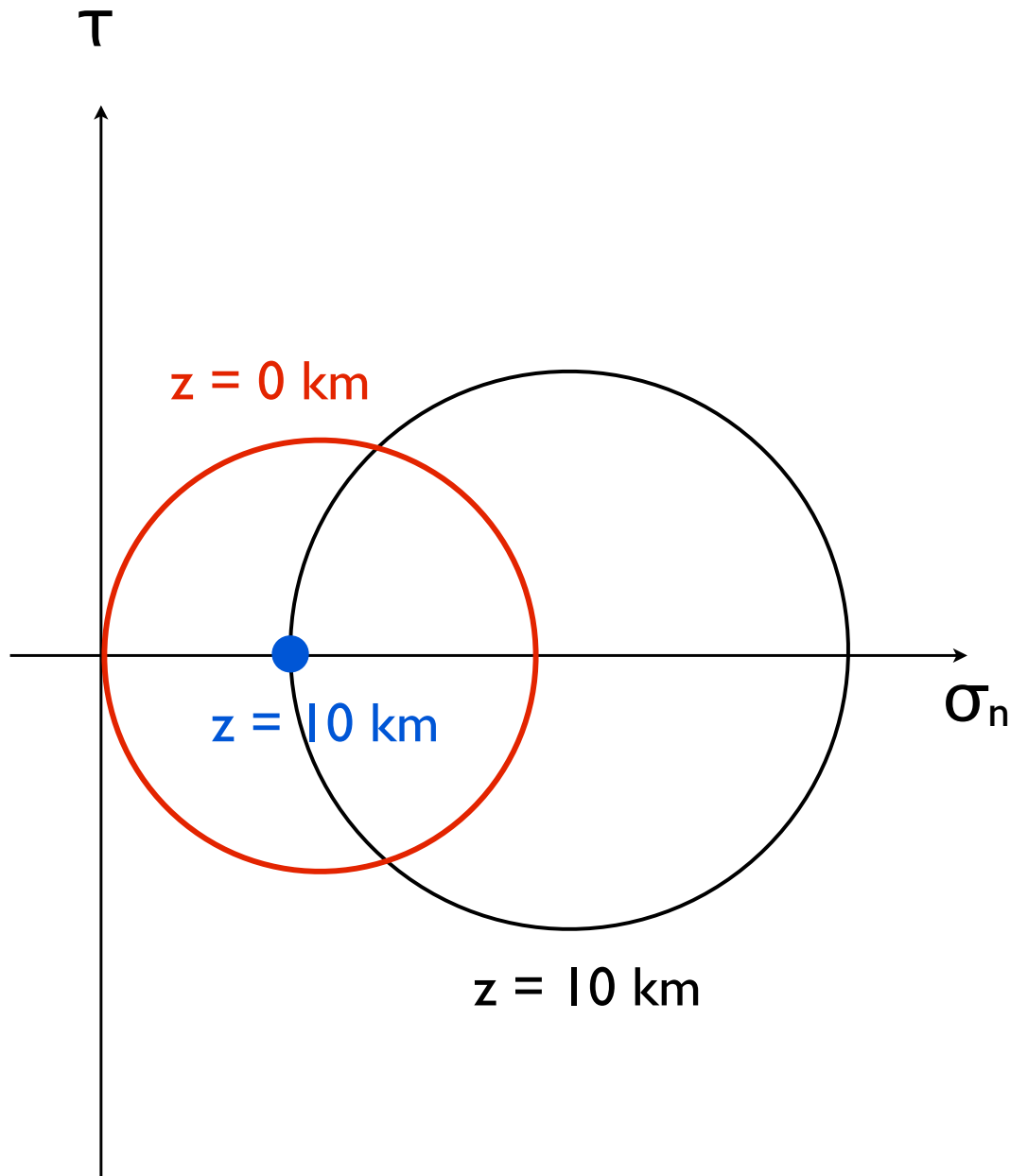
$$(\sigma_1)_{\text{eff}} = \sigma_1 - p_p$$

$$\Delta\sigma_1 = \Delta\sigma_1$$



$p_{\text{eff}} = \sigma_3 - p_p =$ effektiver (Umschliessungs-) Druck

Spannungszustände



Versenkung ($\Delta\sigma = 0$):

effektiver Druck

$$p_c = p_{\text{eff}} = \sigma_1 = \sigma_3$$

$$\tau_{\text{max}} = 0$$

Tektonik ($\Delta\sigma > 0$):

nahe Oberfläche

uniaxiale Kompression

$$\sigma_1 > 0 \quad \sigma_3 = 0$$

$$\tau_{\text{max}} = \frac{1}{2}\Delta\sigma$$

in der Tiefe

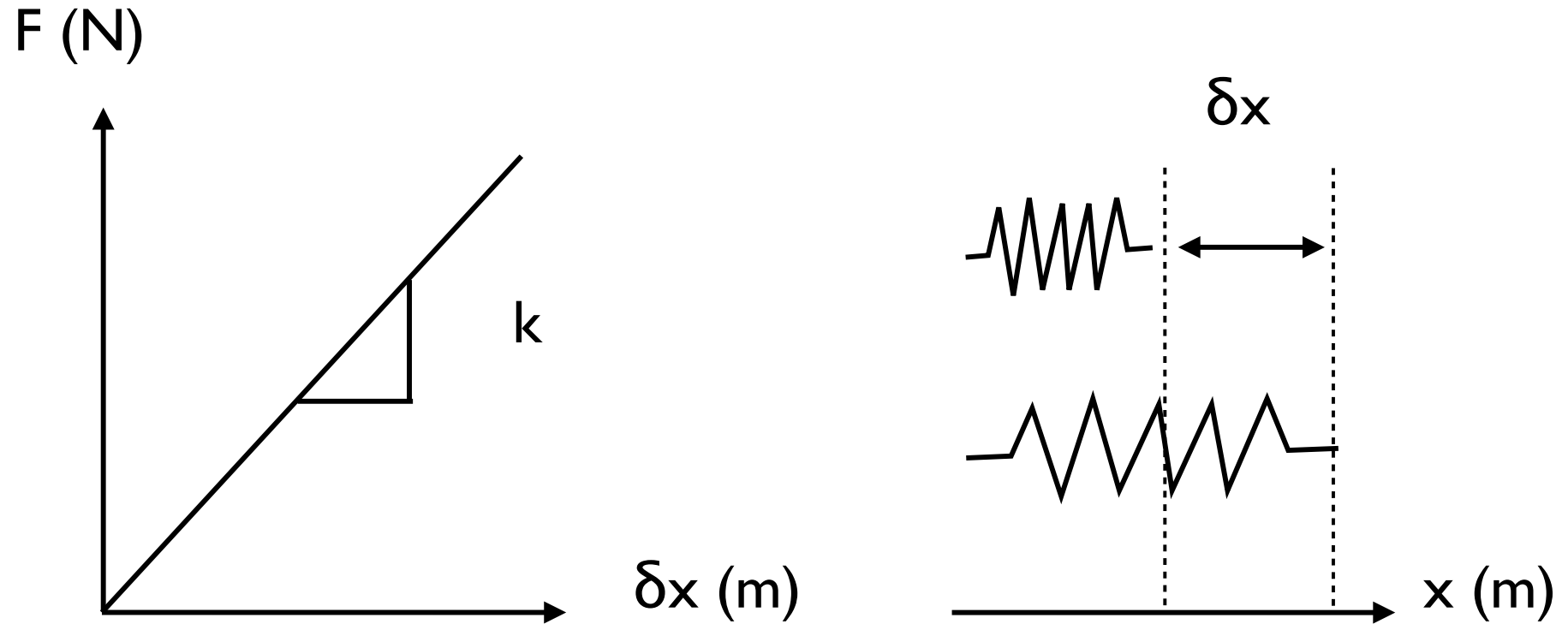
allgemeine Kompression

$$\sigma_1 > \sigma_3 > 0$$

$$\tau_{\text{max}} = \frac{1}{2}\Delta\sigma$$

Elastische
Verformung
≠ permanent

Elastische Verformung

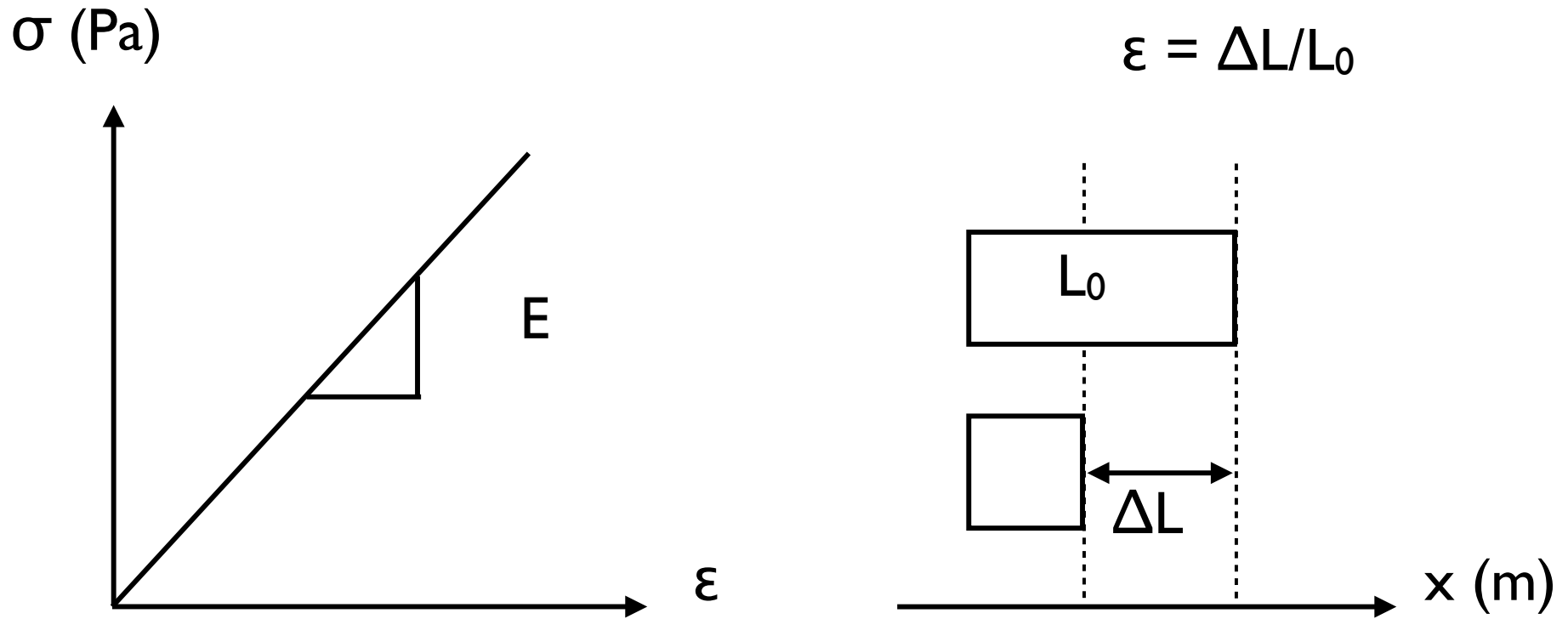


Hooke's Gesetz:

Kraft = Materialkonstante \cdot Auslenkung

$$F = k \cdot \delta x \quad k = \text{Federkonstante (N / m)}$$

Elastische Verformung



Hooke's Gesetz:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

$E =$ Elastizitätsmodul (Pa)

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \cdot \varepsilon_{kl}$$

$C =$ Steifigkeitsmatrix

Elastizitätsmodule

Gesteinstyp	Dichte ρ (kgm ⁻³)	Elastizitätsmodul E (GPa)	Kompressionsmodul K (GPa)	Schermodul μ (GPa)
Kalkstein	2300-2700	5 - 50	65	25
Dolomit	2800-2900	30 - 70		
Sandstein	2200-2800	15 - 50		
Ton	2400-2800	5 - 30	10	2
Gneiss	2600-2900	30 - 80		
Glimmerschiefer	2500-2900	5 - 60		
Marmor	2400-2700	30 - 70		
Quarzit	2600-2800	50 - 90		
Granit	2600-2700	30 - 70	50	25
Gabbro	2700-3300	40 - 100		
Basalt	2800-3000	40 - 80		
Peridotit	3100-3400	100 - 120	100 - 200	50 - 100

Elastische Verformung \neq permanent

Elastizitätsmodul \neq Festigkeit

Elastische Verformung

Kalkstein: Elastizitätsmodul: $E = 20 \text{ GPa}$
Kompressionsmodul: $K = 65 \text{ GPa}$
Dichte: $\rho = 2550 \text{ kgm}^{-3}$

Wie gross ist die elastische Verformung in 1 km Tiefe ?

$$\sigma = P_{\text{litho}} = \rho g z \quad \Rightarrow \sigma \approx 25 \text{ MPa}$$

$$\sigma = E \cdot \varepsilon = E \cdot \Delta L/L \quad \Rightarrow \sigma / E = \Delta L/L$$

$$\sigma = K \cdot \Delta V/V \quad \Rightarrow \sigma / K = \Delta V/V$$

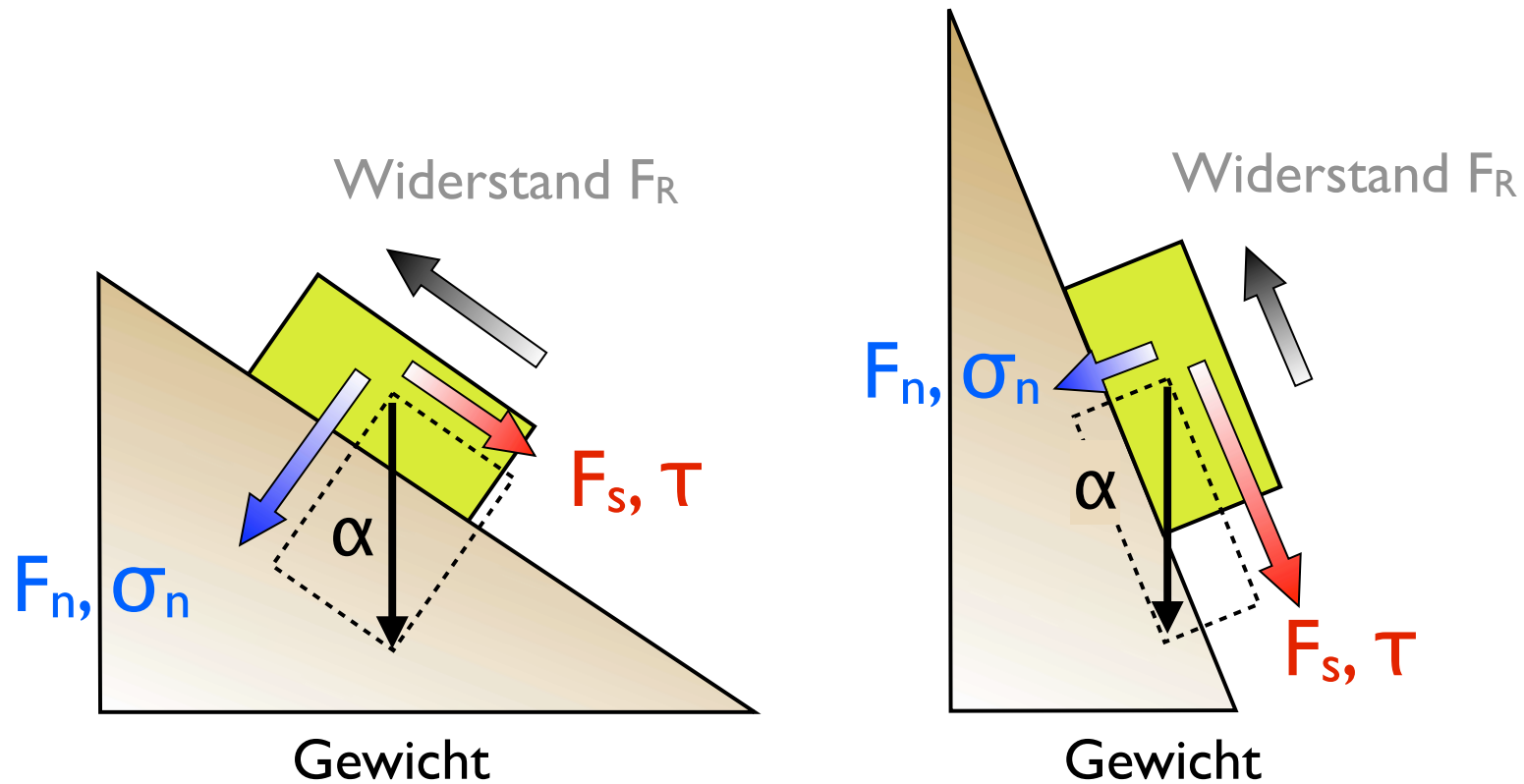
$$\Delta L/L = 2.5 \cdot 10^7 \text{ Pa} / 2 \cdot 10^{10} \text{ Pa} \approx 10^{-3} = 1 \text{ ‰}$$

$$\Delta V/V = 2.5 \cdot 10^7 \text{ Pa} / 6.5 \cdot 10^{10} \text{ Pa} \approx 0.3 \cdot 10^{-3} = 0.3 \text{ ‰}$$

$$\text{Faustregel: } \Delta V/V \approx \frac{1}{3} \cdot \Delta L/L$$

Reibung

Statische Reibung - Haftreibung



Gewicht = konstant

μ = konstant

$(0 < \mu < 1)$

α = Hangneigung variabel

Körper rutscht, wenn $F_R \leq F_s$

$F_R = \mu \cdot F_n$

$F_n = \cos(\alpha) \cdot mg$

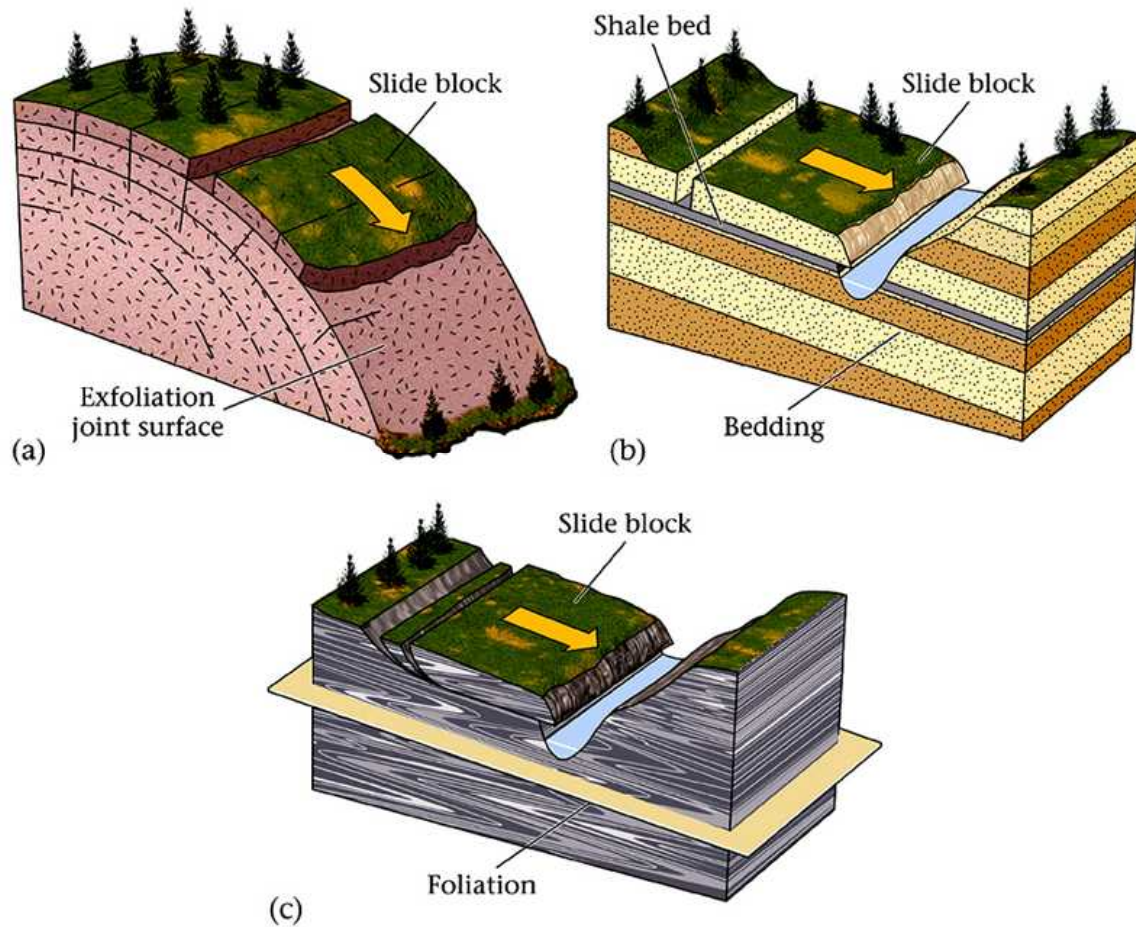
$F_s = \sin(\alpha) \cdot mg$

nimmt ab, wenn F_n abnimmt

nimmt ab, wenn α zunimmt

nimmt zu, wenn α zunimmt

Gleithorizont = Schwachstelle



Gesteinstyp	μ
Moräne	0.71
Paragneis	0.67
Phyllit	0.50
Tonschiefer	0.44
Serpentinit	0.3-0.5
Ton (unverfestigt)	0.18

Reibung bei hoher Geschwindigkeit

Geschwindigkeitsabhängigkeit
 $\mu = \mu(\text{slip velocity})$

slip velocity

$$v_{\text{slip}} = 10^{-1} - 1 \text{ ms}^{-1}$$

plate velocity:

$$v_{\text{plate}} \approx 10^{-9} \text{ ms}^{-1}$$

rupture speed:

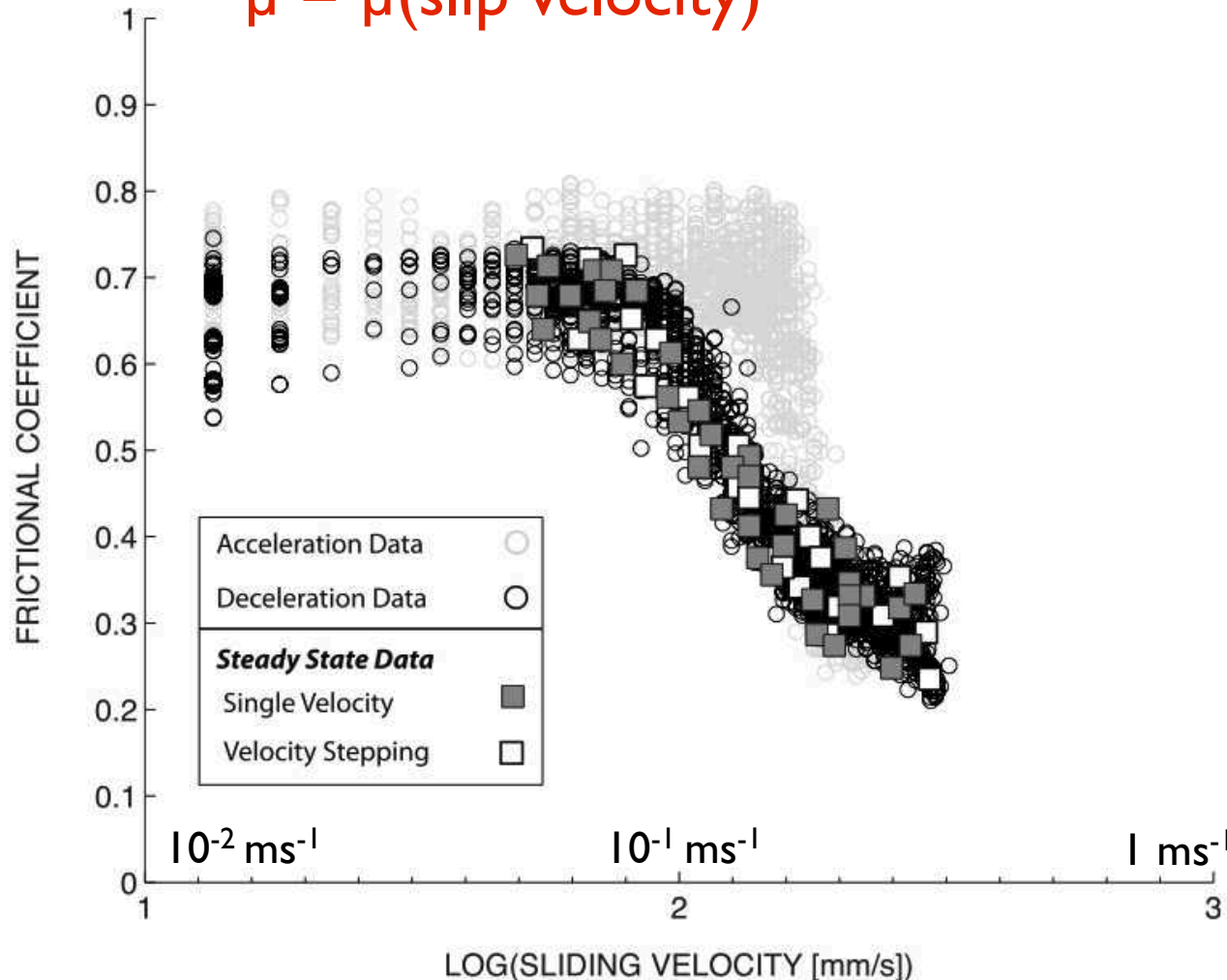
$$v_{\text{rupture}} \approx 10^3 \text{ ms}^{-1}$$

seismic wave velocity:

$$v_p \approx 6 \cdot 10^3 \text{ ms}^{-1}$$

$$v_s \approx 5 \cdot 10^3 \text{ ms}^{-1}$$

$$v_{\text{surface}} \approx 4 \cdot 10^3 \text{ ms}^{-1}$$



8 Spröde Verformung

Elastische Verformung

- Elastisches \neq plastisches \neq visköses Verhalten
- Experimentelle Gesteinsverformung
- Coulomb-Mohr (Mohr-Coulomb) Bruchkriterium

Spannungsfeld

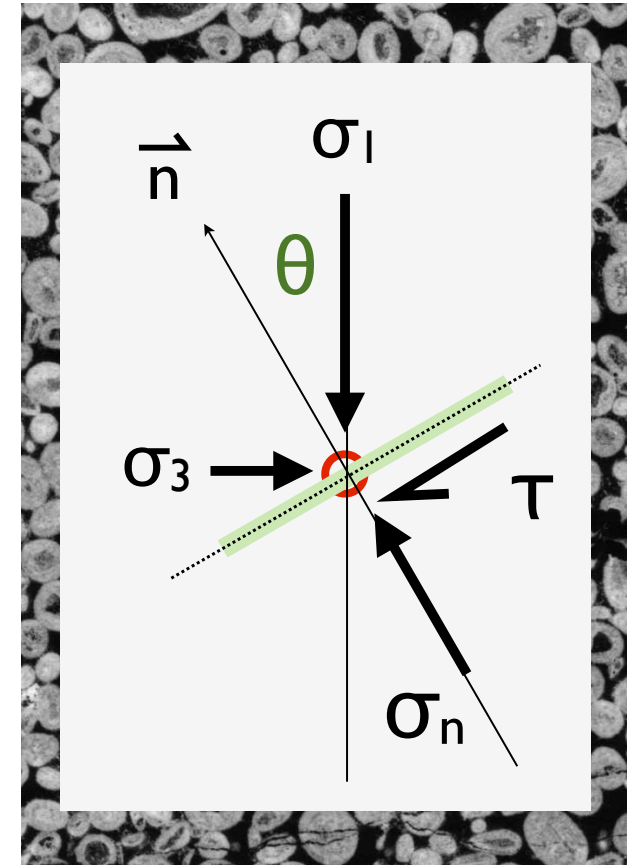
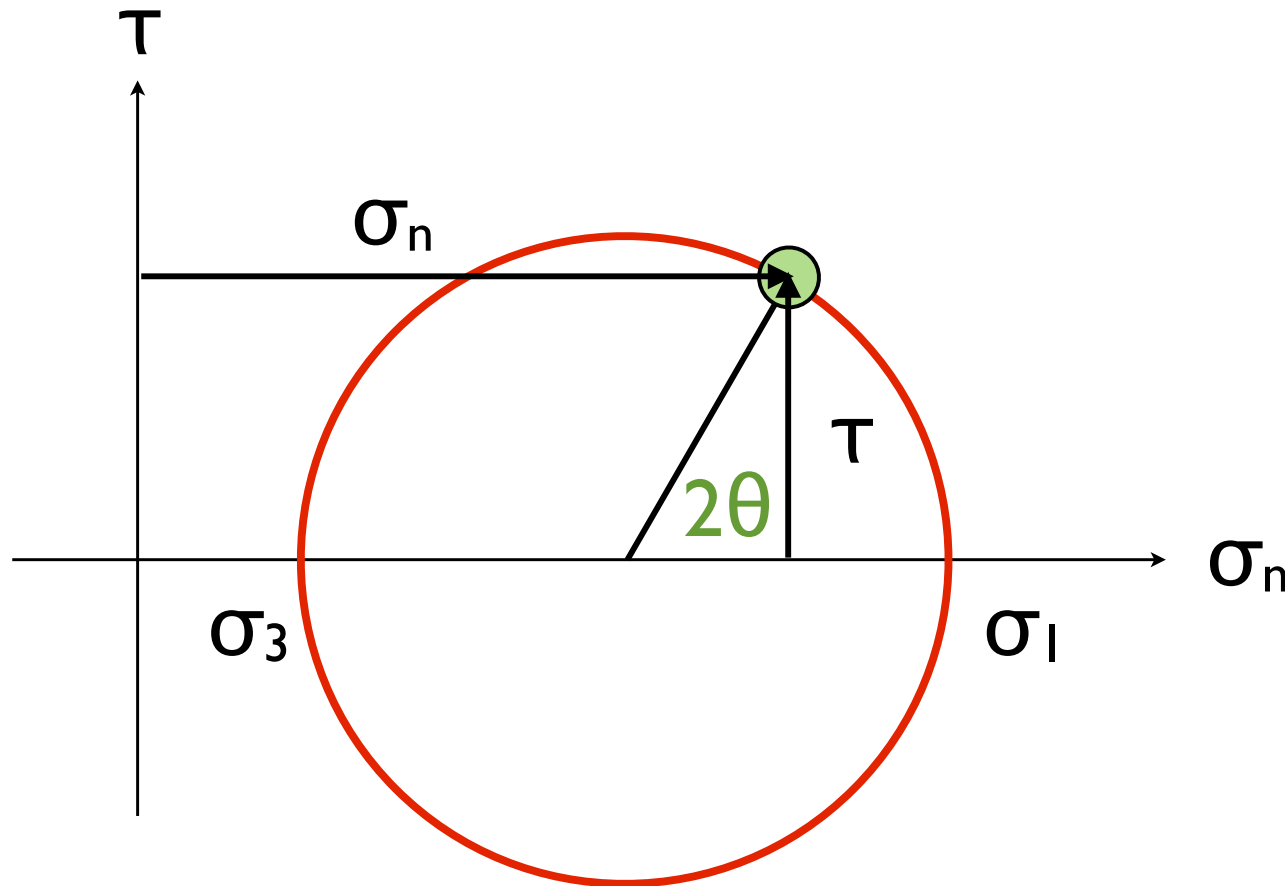
- Anderson's theory of faulting

Byerlee's rule

Fallbeispiel

- Bergsturz von Arth Goldau

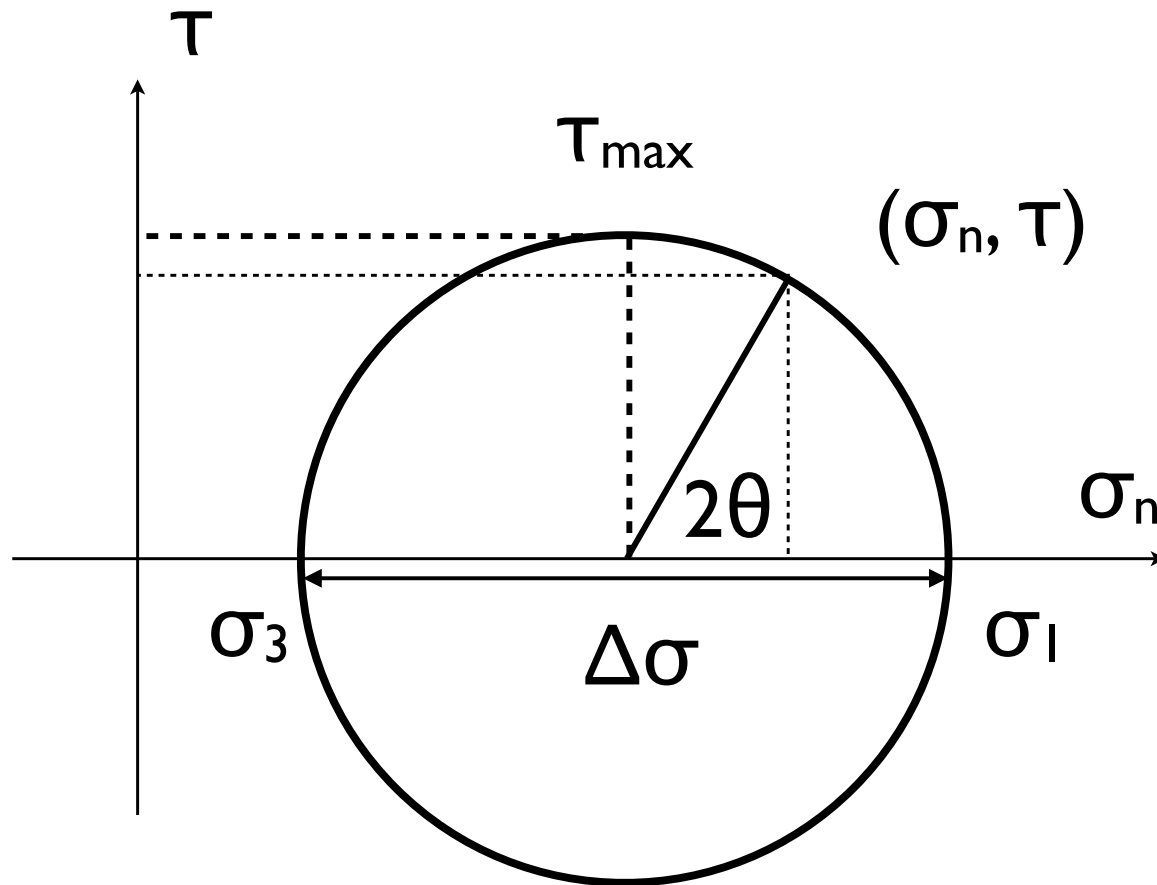
Repetition: Mohr Kreis (2D)



ganzer Kreis = Spannung an einem Punkt

Punkt auf Kreis: Normal- und Scherspannung auf einer Fläche

Scherspannung - Differentialspannung



Differentialspannung
(Durchmesser Mohr Kreis)

Scherspannung
(Radius Mohr Kreis)

je grösser $\Delta\sigma$,
desto grösser τ , τ_{\max}

$\tau = \text{maximal}$ auf Flächen 45° zu σ_1





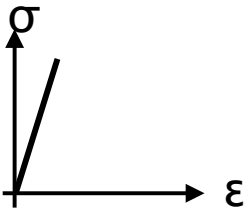
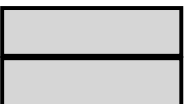
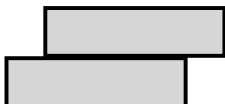
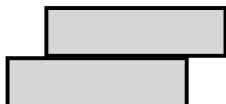

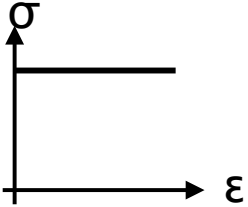

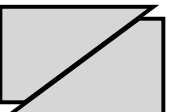
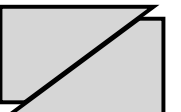

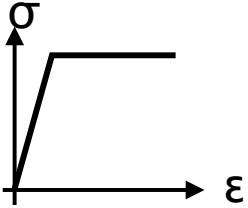

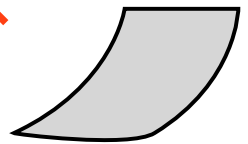
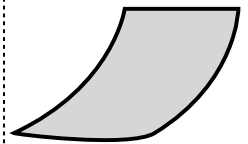
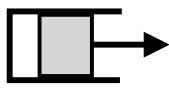
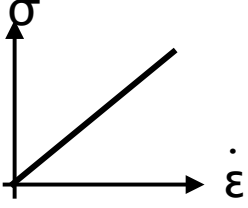
$\tau = 0$ auf Flächen normal zu σ_1 oder σ_3

$\tau = 0$ wenn $\Delta\sigma = 0$ (lithostatischer Druck) bzw. in Flüssigkeit, Gas

Scherspannung kritisch für Bruch oder Versagen von Festkörpern

Mechanische Modelle

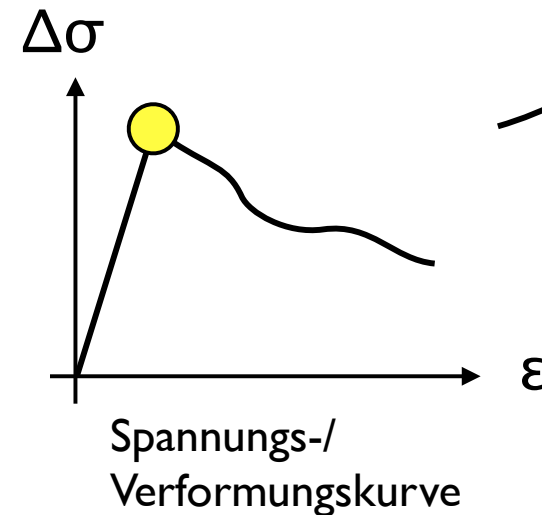
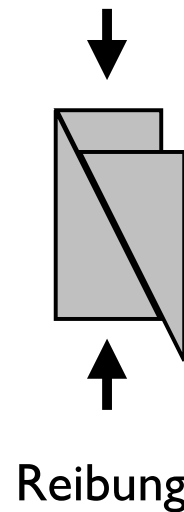
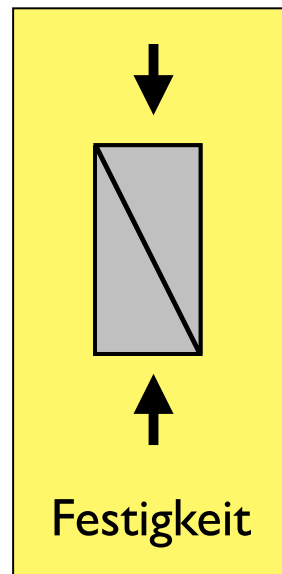
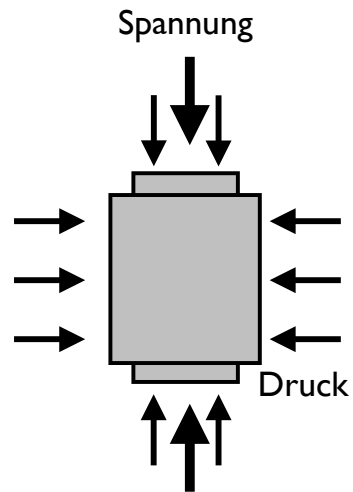
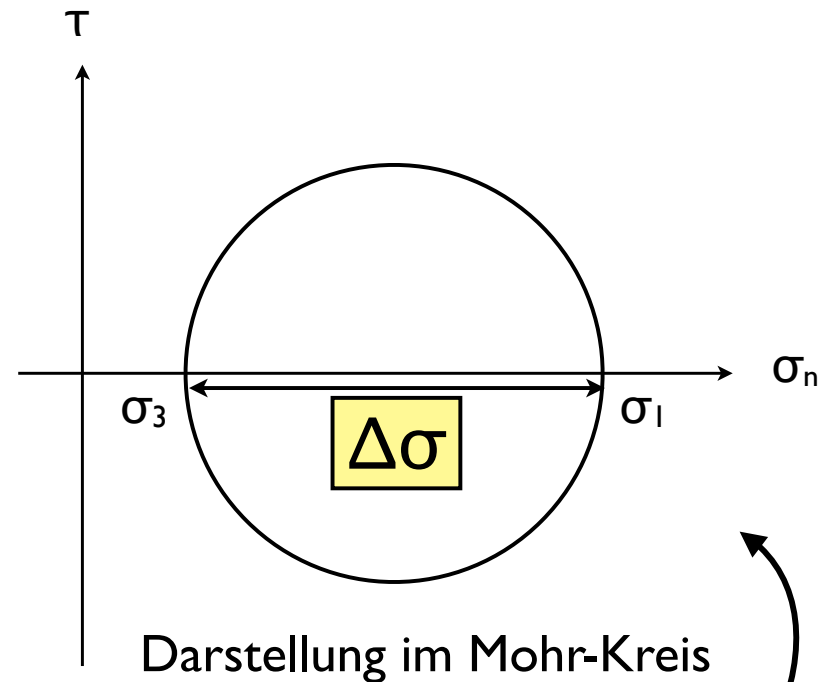
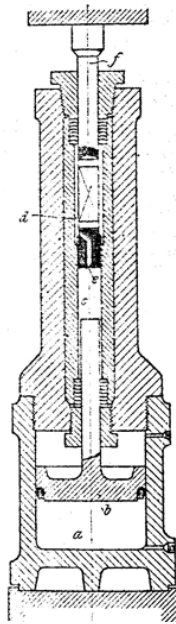
nach Entlastung:

<p>elastisch</p> 	<p>$\Delta\sigma > 0$</p> 	<p>$\Delta\sigma = 0$</p> 			<p>Erdbebenwellen Entlastung</p>
<p>plastisch</p> 	<p><i>spröd</i></p> 	<p>$\Delta\sigma = 0$</p> 			<p>Gleiten auf Verwerfung</p>
<p>elastisch-plastisch</p> 		<p>$\Delta\sigma = 0$</p> 			<p>Gestein im Sprödbereich (Bruchbildung)</p>
<p>viskös</p> 	<p><i>duktil</i></p> 	<p>$\Delta\sigma = 0$</p> 			<p>Gestein im duktilen Bereich (Fliesen)</p>

Experimentelle Gesteinsverformung

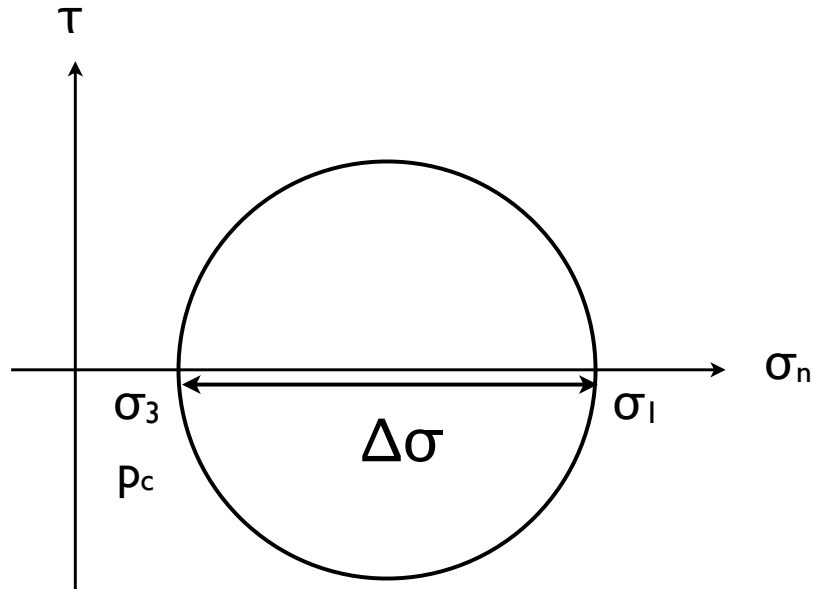


Theodore von Karman
1881 - 1963



Mohr-Coulomb Versagen

$\Delta\sigma \rightarrow$ Bruchfestigkeit

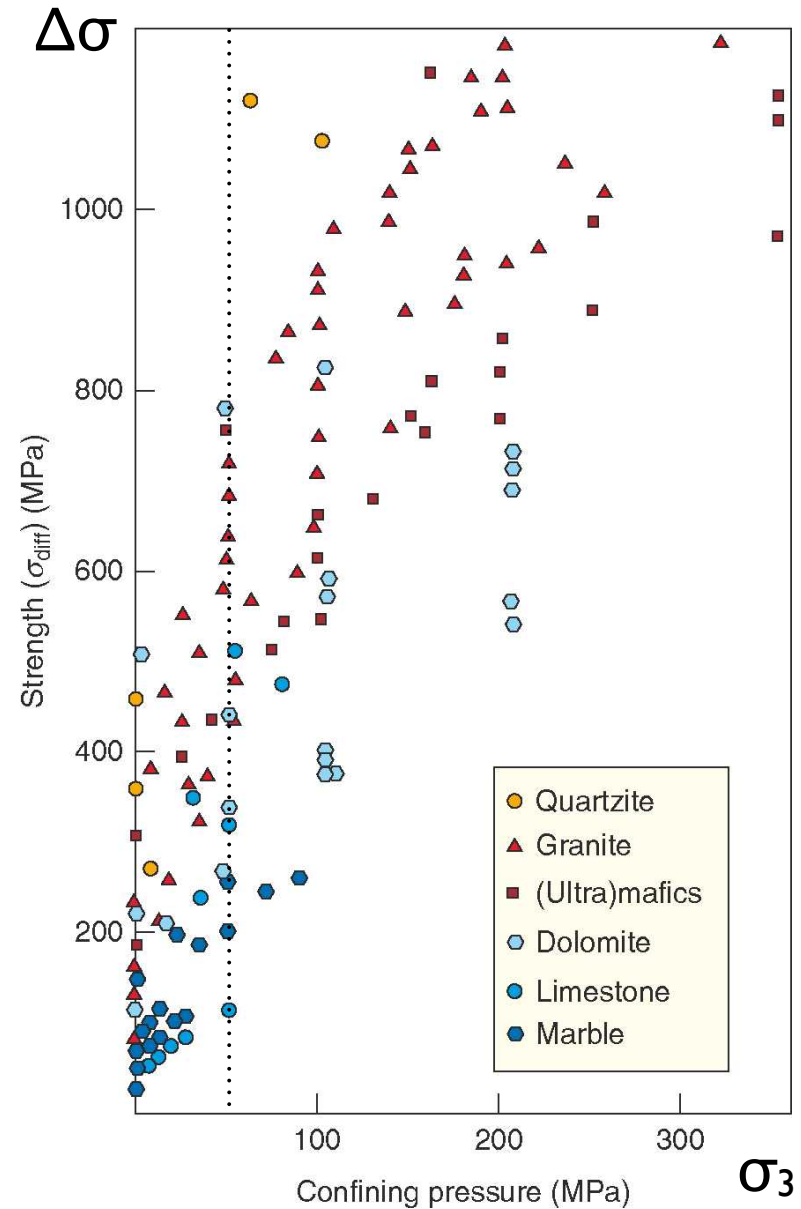


E-modul (GPa):	
1. (Ultra)mafittit	100-120
2. Quarzit	50-90
3. Granit	30-70
4. Dolomit	30-70
5. Marmor	30-70
6. Kalkstein	5-50

Bruchfestigkeit (MPa)*:	
1. Quarzit	> 1000
2. Granit	~800
3. (Ultra)mafittit	~600
4. Dolomit	~400
5. Marmor	~200
6. Kalkstein	~150

* bei $p_c = 50$ MPa

$$\Delta\sigma = f(p_c)$$



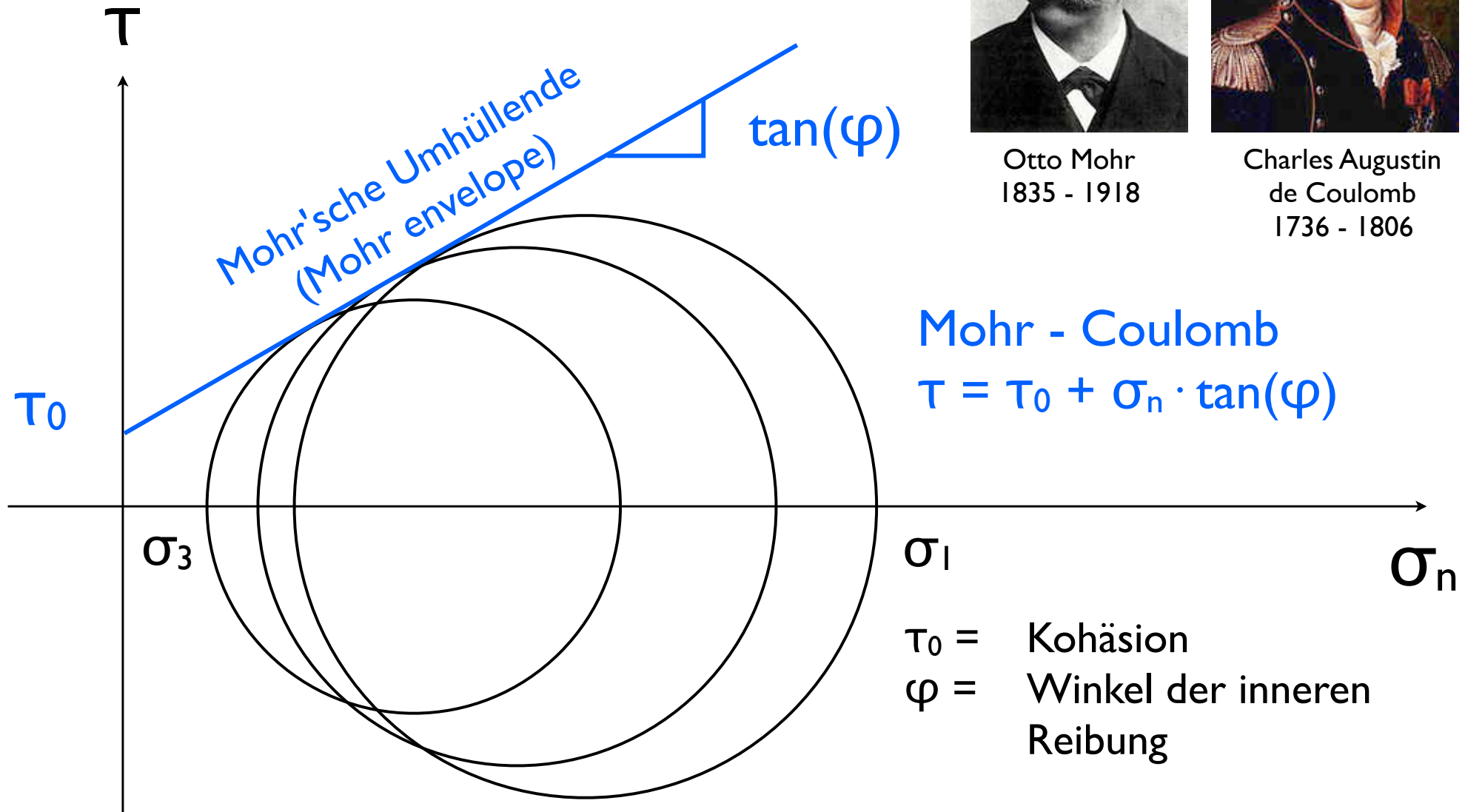
Mohr-Coulomb failure



Otto Mohr
1835 - 1918

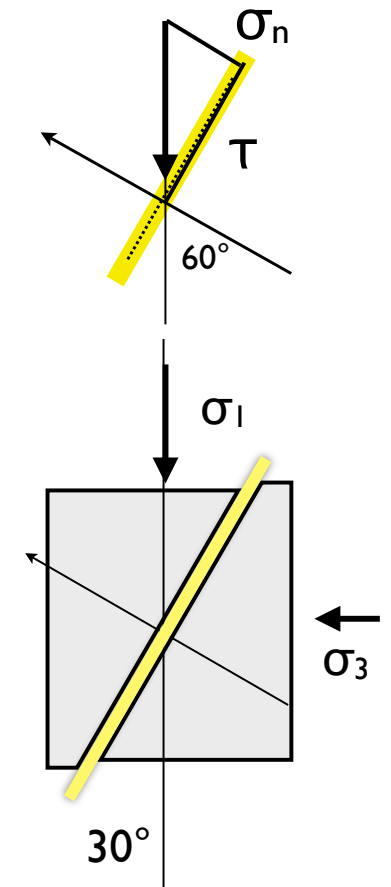
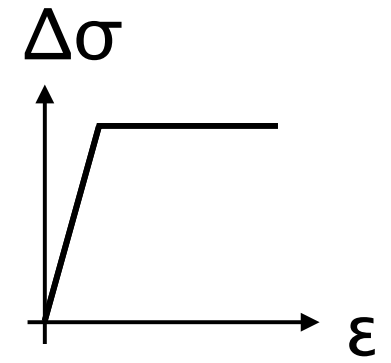
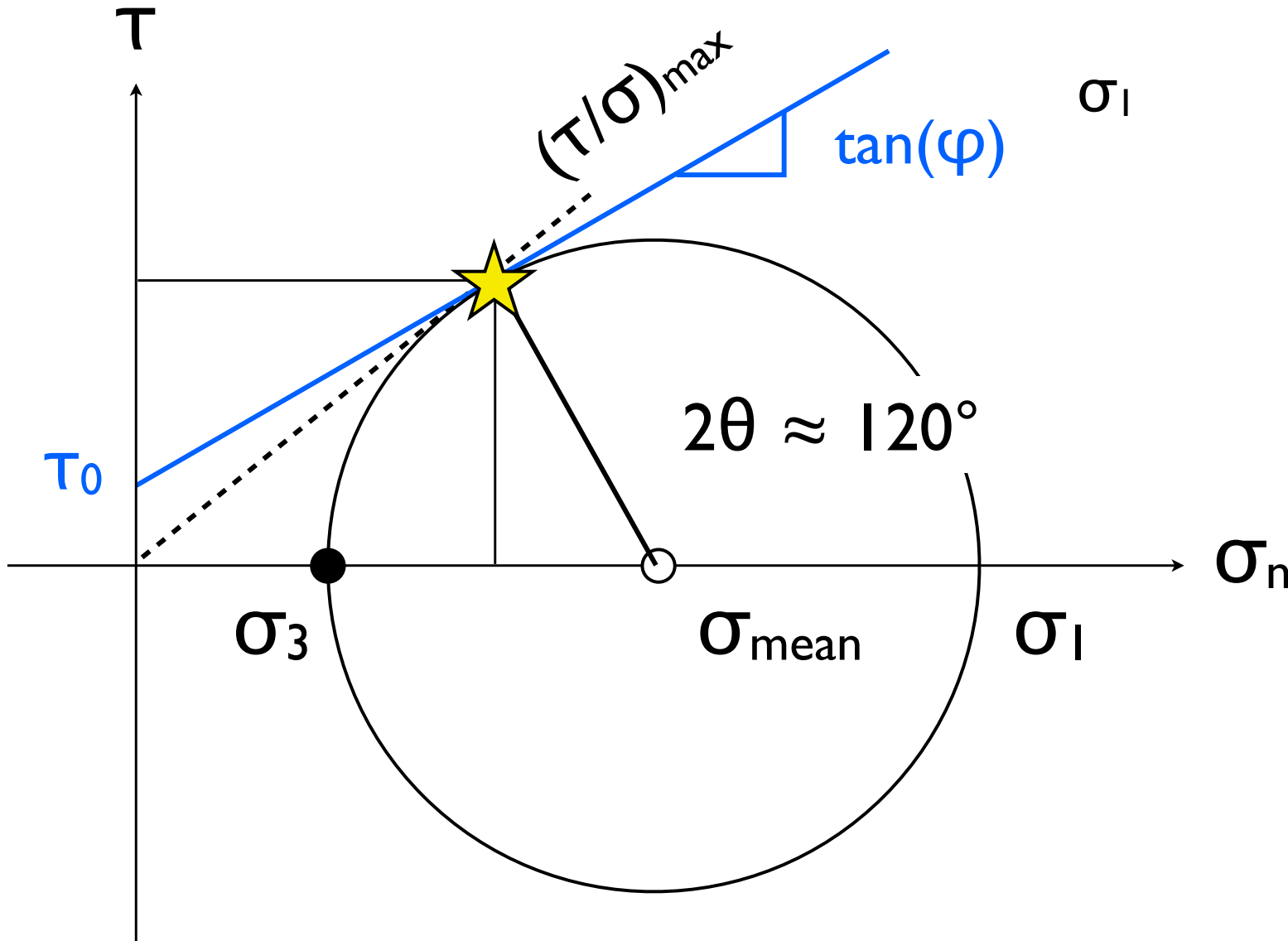


Charles Augustin
de Coulomb
1736 - 1806



$\tau_0, \tan(\varphi) =$ Materialkonstanten

Mohr'scher Bruch



Winkel zwischen σ_1 und Bruchfläche $\approx 30^\circ$

→ Anderson

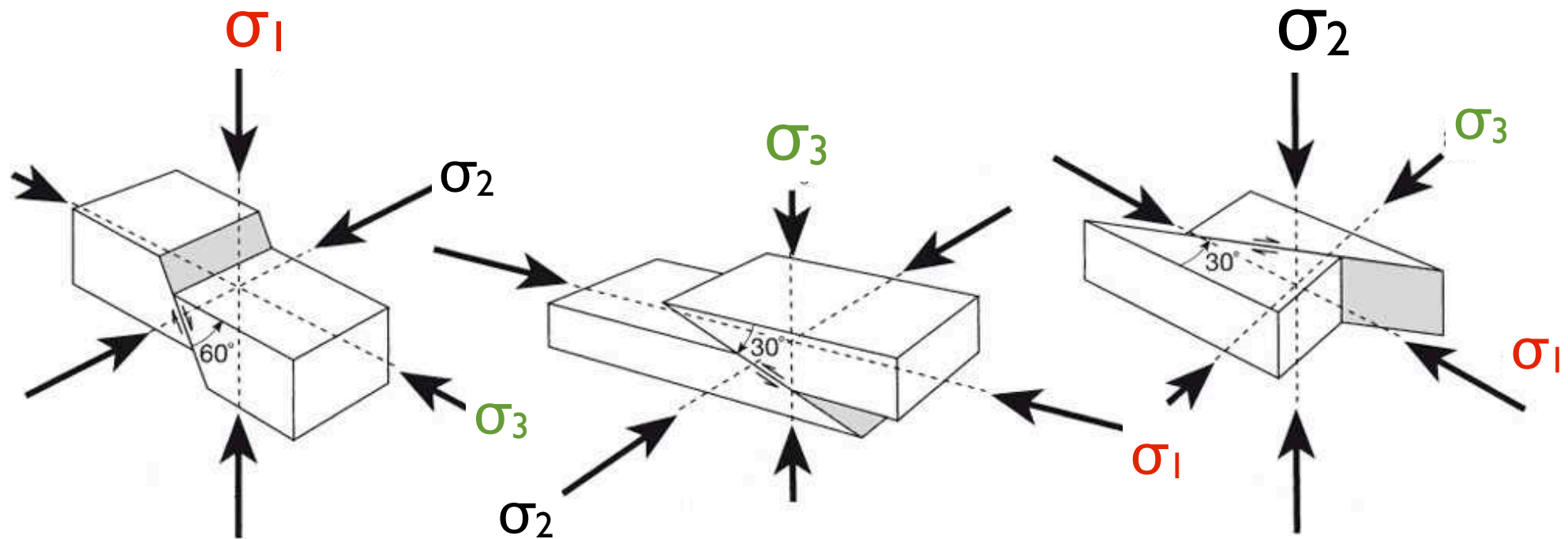
Spannungsfeld

Anderson's theory of faulting

Erdoberfläche ist freie Fläche: $\tau = 0$

σ_1 , σ_2 , σ_3 sind parallel oder senkrecht zur Oberfläche

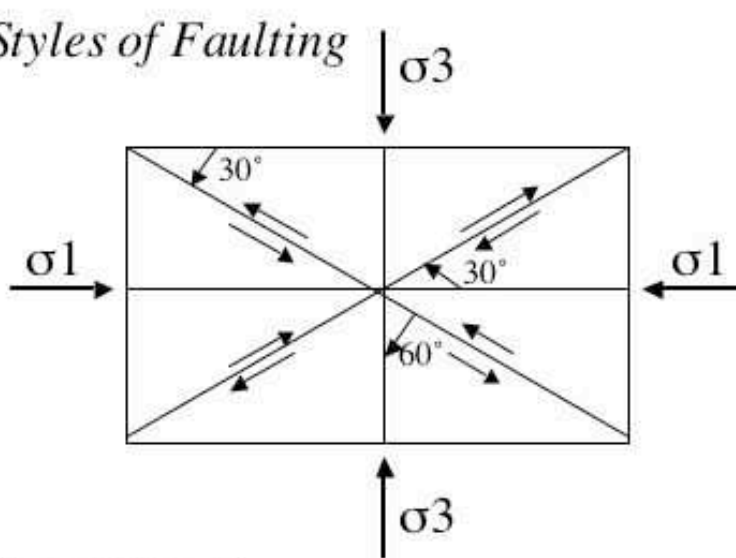
Bruchfläche bildet Winkel von 30° mit σ_1 - Richtung



in der Regel: Winkel zwischen σ_1 und Bruchfläche $\approx 30^\circ$

Anderson's theory of faulting

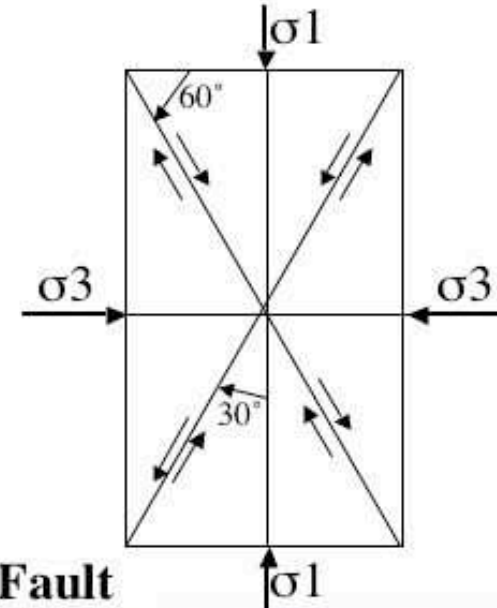
Styles of Faulting



Thrust Fault



Überschiebung

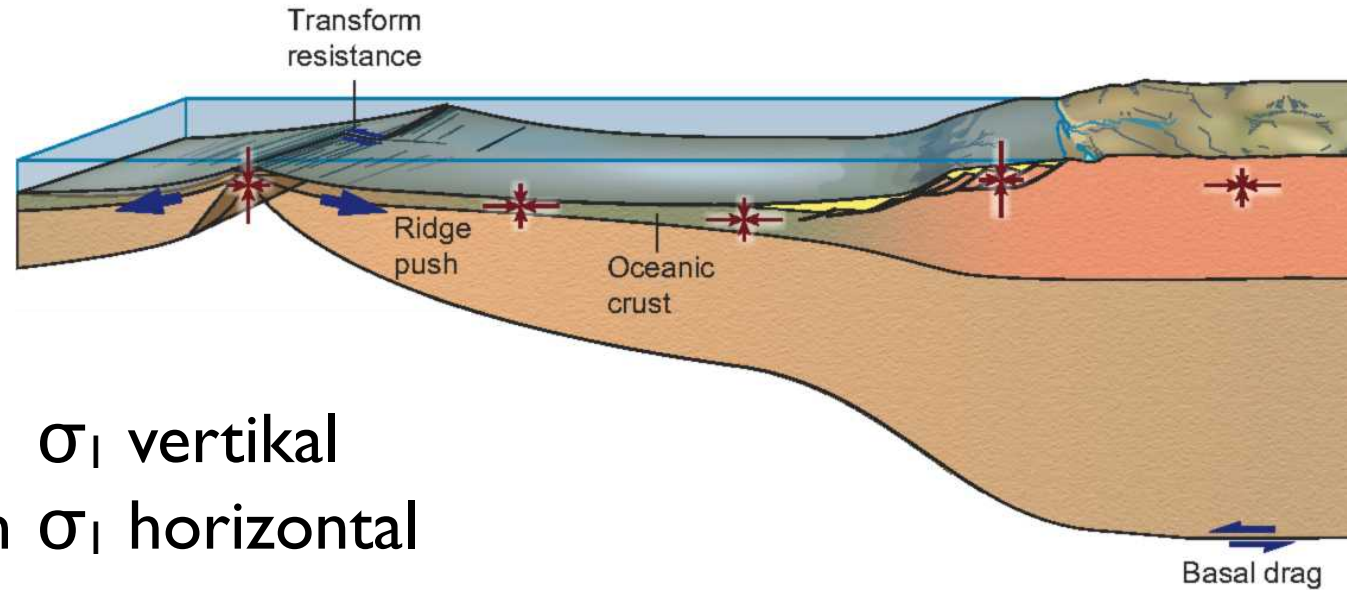


Normal Fault





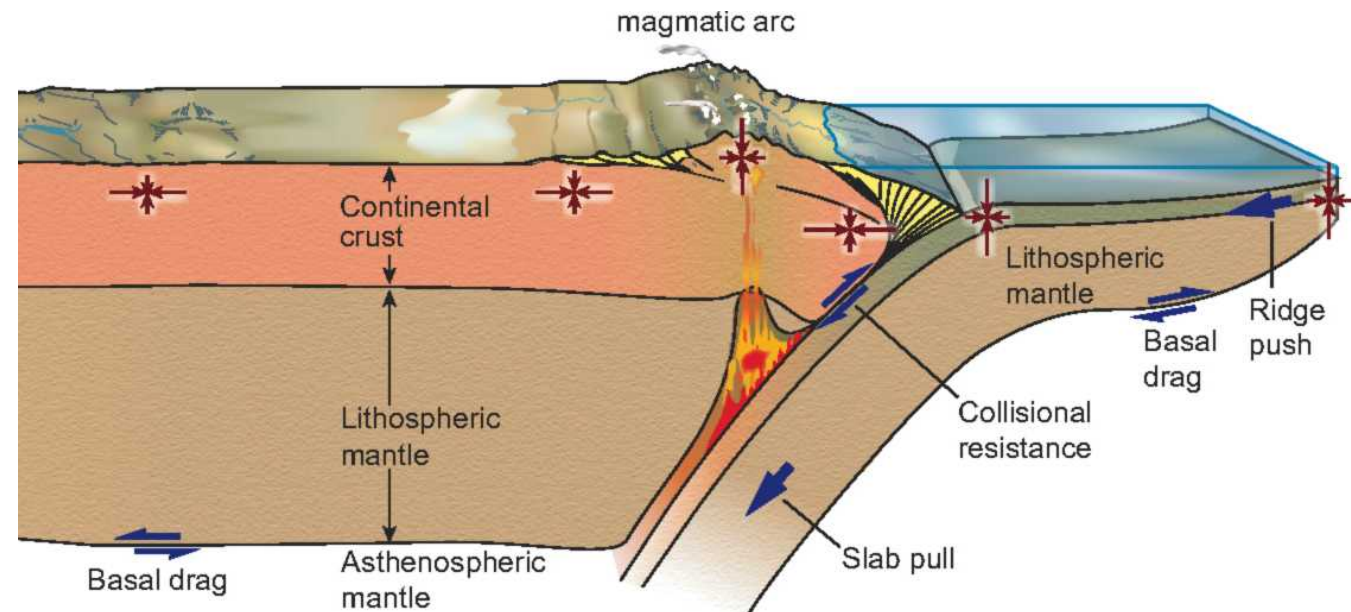
Abschiebung

Spannungszustand - tektonisches Regime

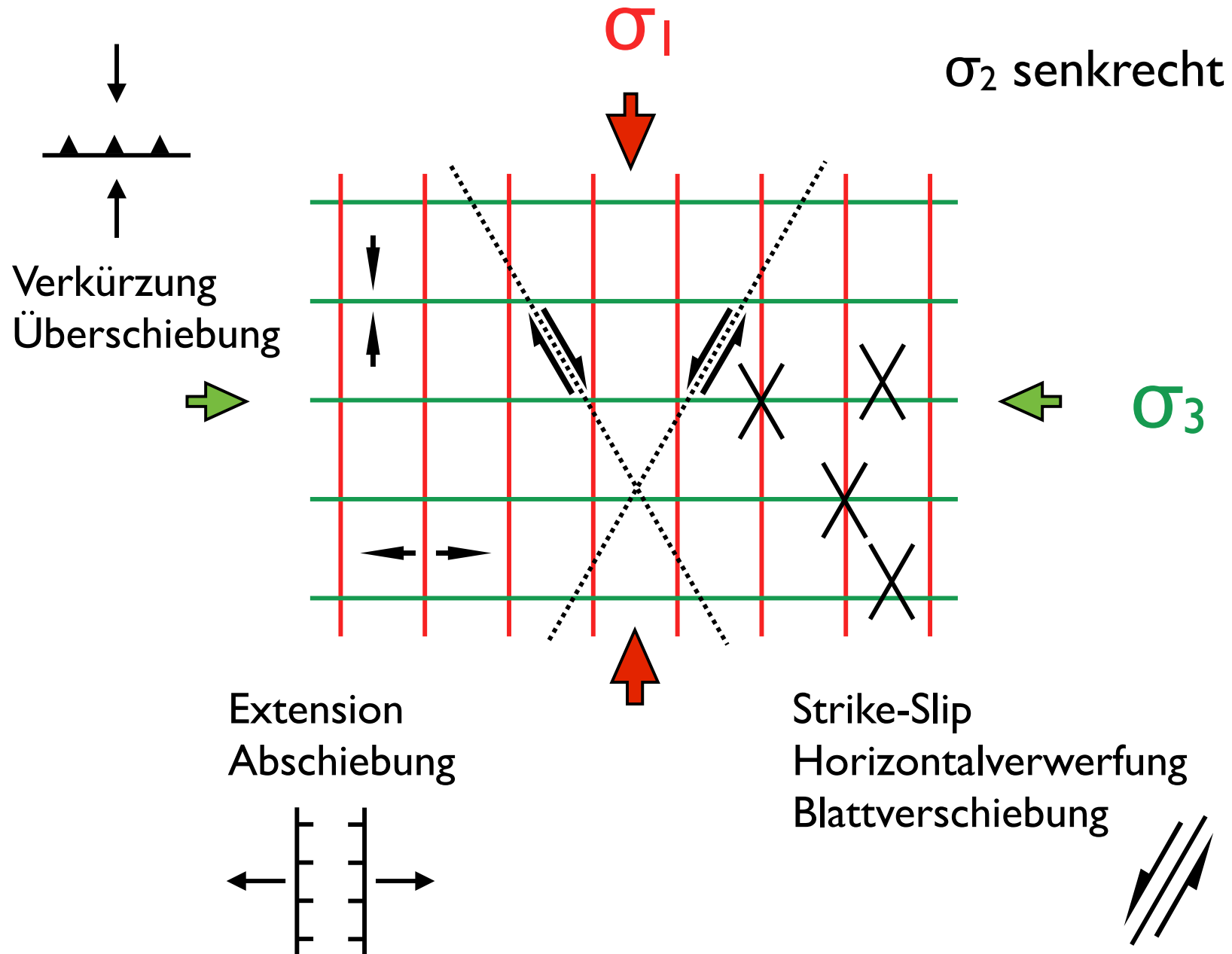


Abschiebungen σ_1 vertikal
 Überschiebungen σ_1 horizontal

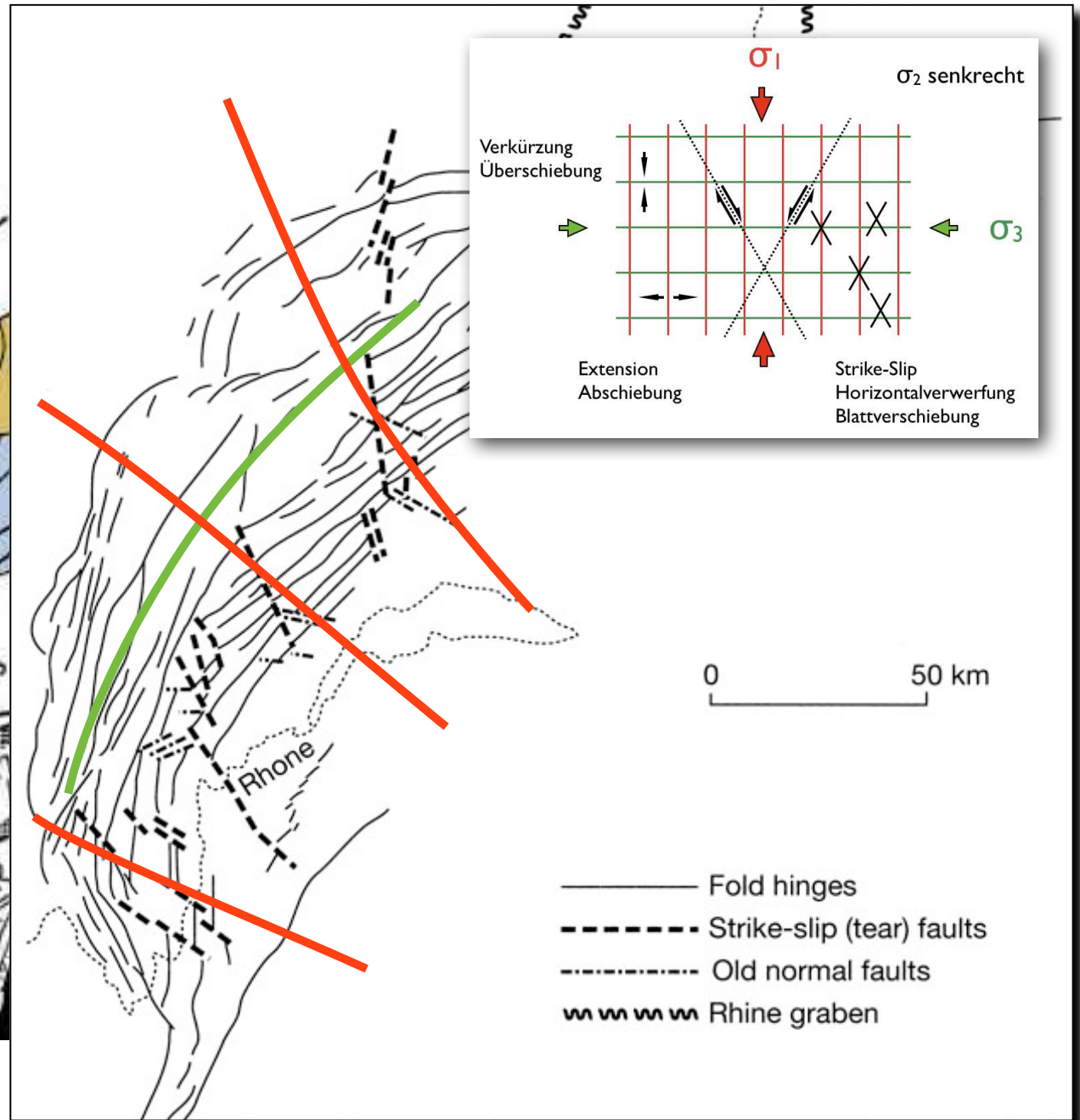
-  Normal-fault stress regime (σ_1 vertical)
-  Reverse-fault or strike-slip regime (σ_1 horizontal)



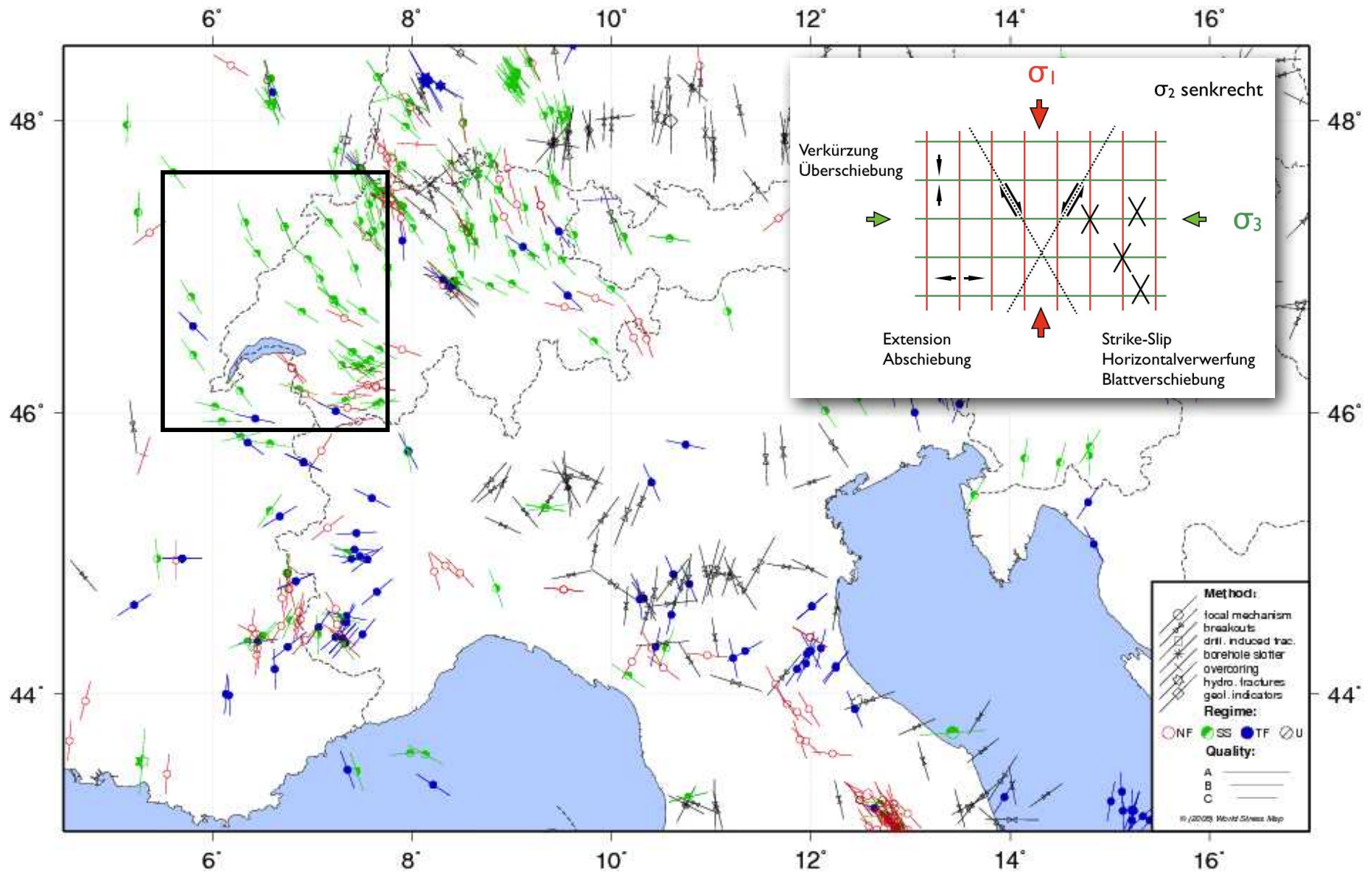
tektonische Signatur des Spannungsfeldes



Transversalstörungen im Jura



WSM world stress map project



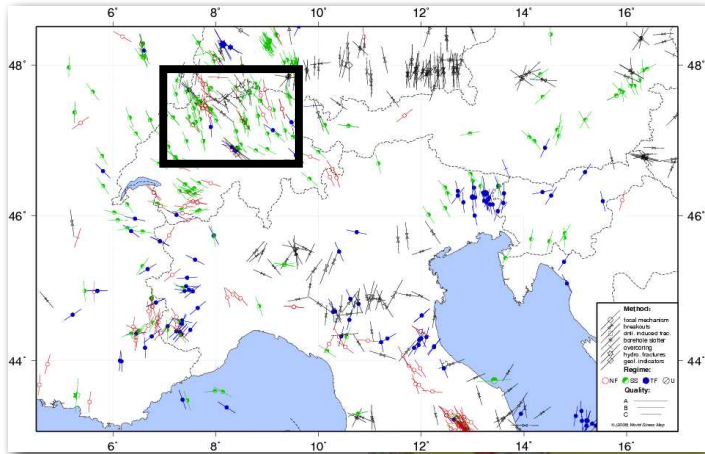
focal mechanisms

normal strike slip thrust unknown

<http://www.gfz-potsdam.de/>

Spannungsfeld

Herdfflächenlösungen



maps: <http://earth.unibas.ch/tecto/>

S.M. Schmid¹), K. Ustaszewski¹), N. Deichmann²),
W.H. Müller³), D. Slejko⁴)

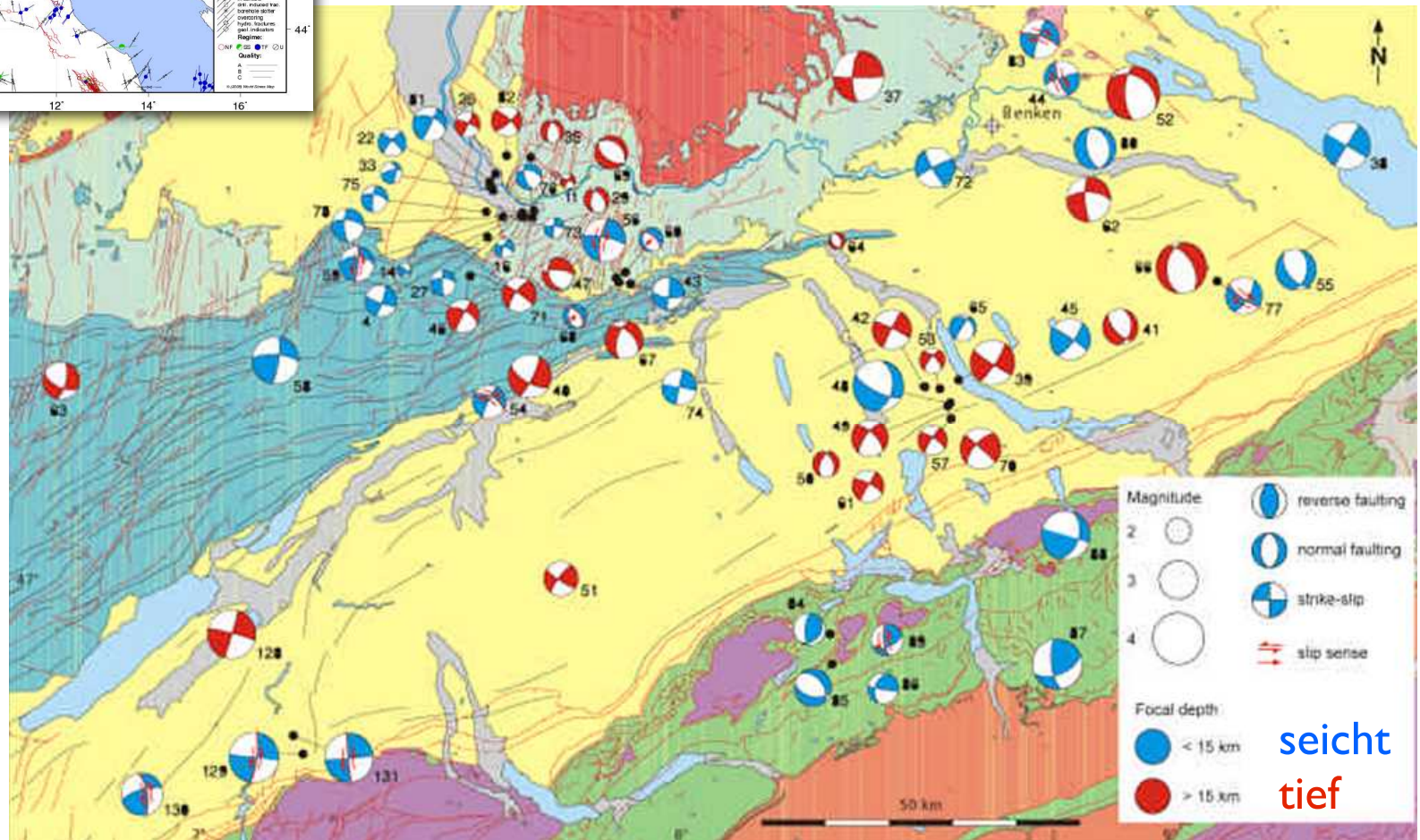
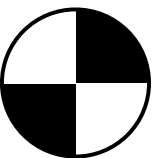
Überschiebung



Abschiebung



Blattverschiebung

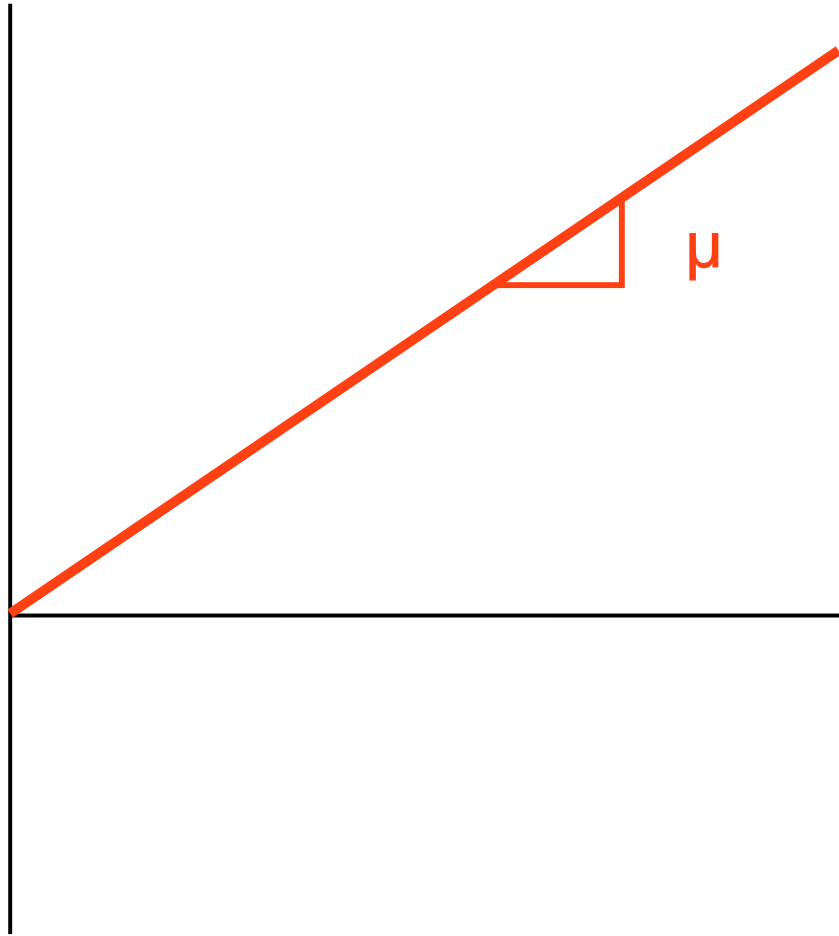


Byerlee's rule

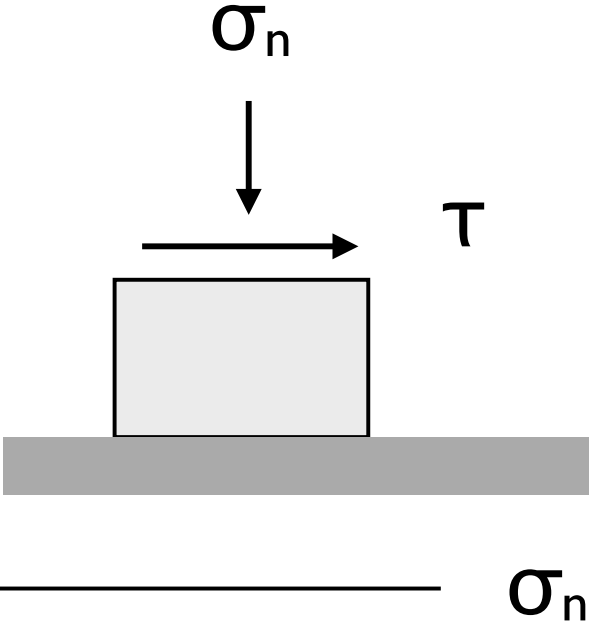
Gleitreibung

$$\tau = \mu \cdot \sigma_n$$

τ

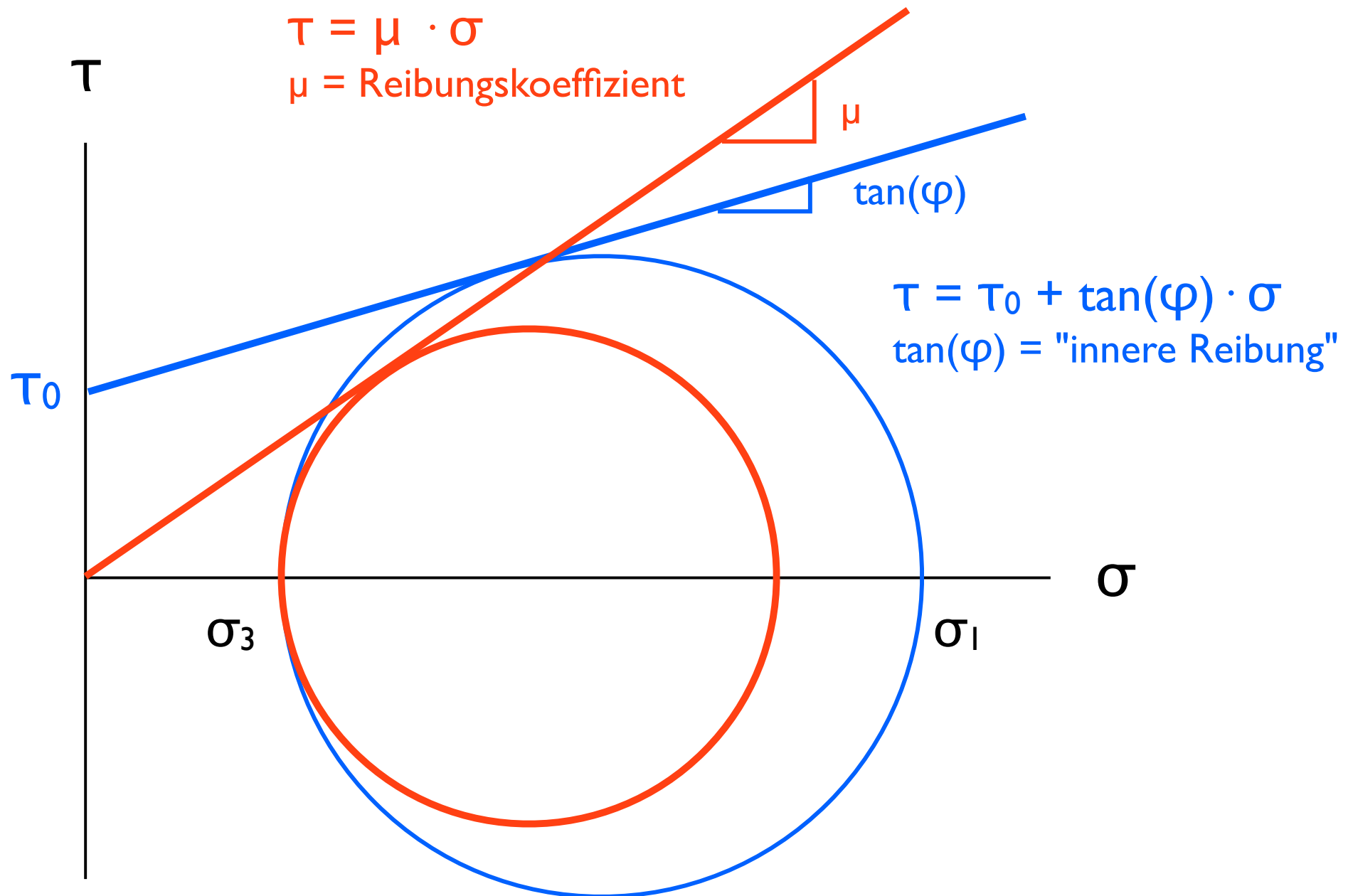


Amontons Gesetz



μ = Reibungskoeffizient
(Gleitreibung)

Innere Reibung - Reibungskoeffizient



Byerlee's rule

Gestein ist nicht intakt,
enthält unendlich viele
Bruchflächen.

Deformation ist
kontrolliert durch Gleiten
auf (einer der vielen)
Bruchflächen

= reibungskontrolliert

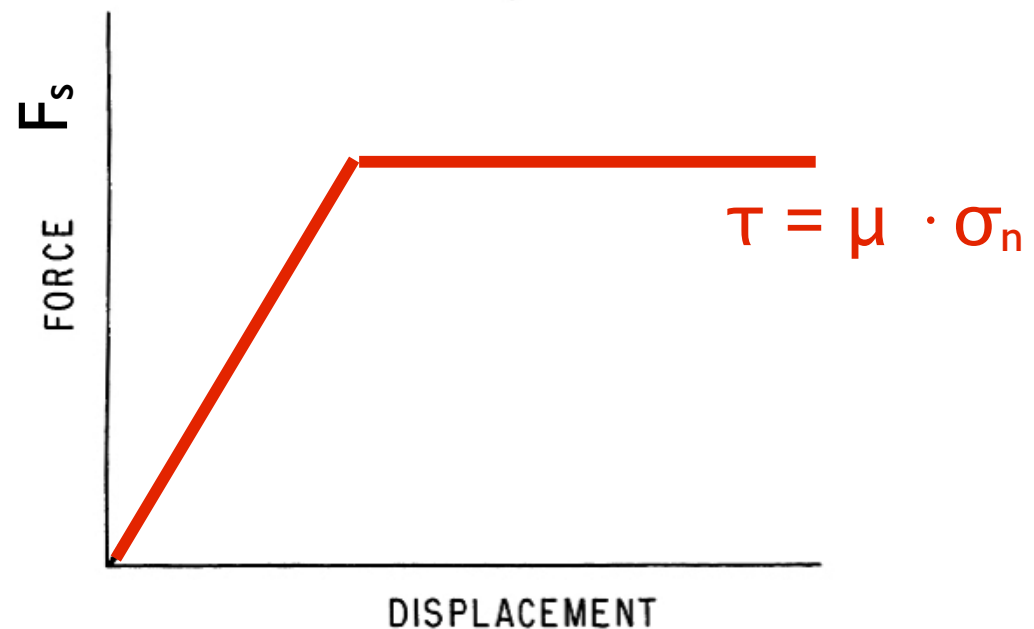
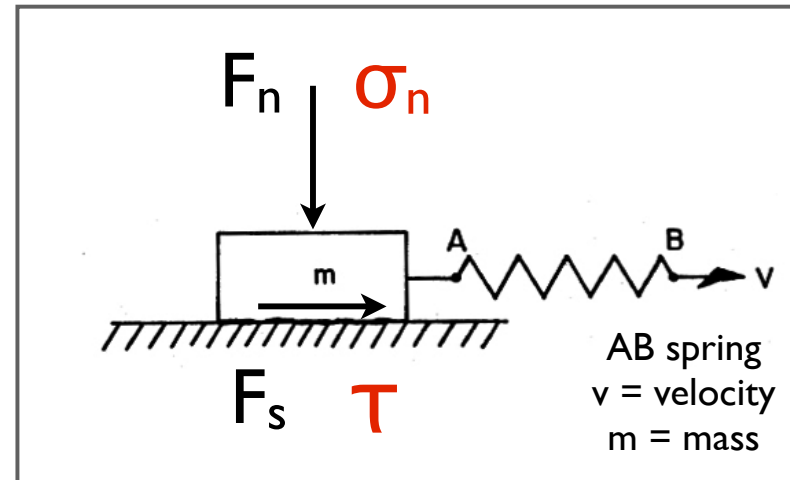
Spannungen:

$$\tau = \mu \cdot \sigma_n$$

Reibungskoeffizient:

$$\mu = \tau / \sigma_n$$

Rheologisches Modell für Gestein



Byerlee's rule

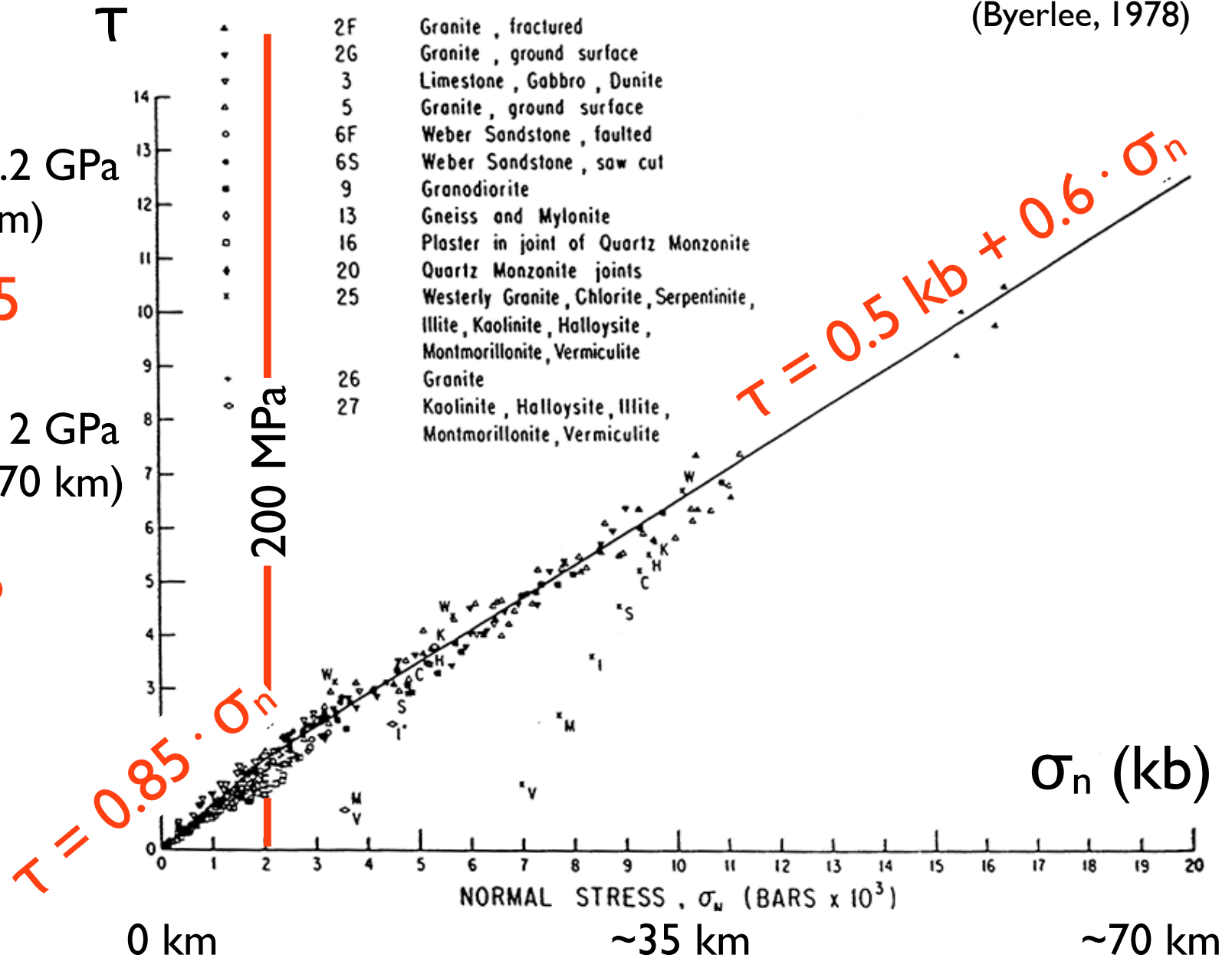
(Byerlee, 1978)

(1) Bereich 0 - 0.2 GPa
(0 bis ca. 7 km)

$$\mu = 0.85$$

(2) Bereich 0.2 - 2 GPa
(ca. 7 bis ca. 70 km)

$$\mu = 0.6$$



Bergsturz von Arth Goldau

Goldauer Bergsturz 2. September 1806

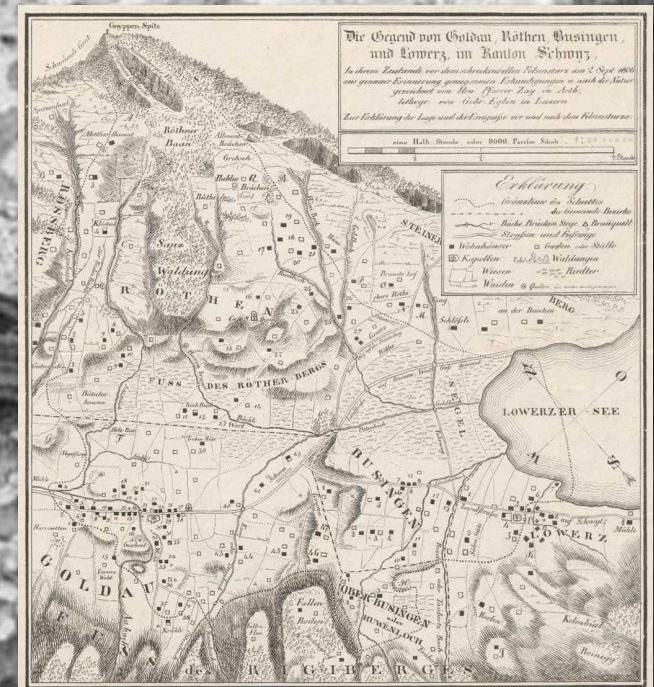


Goldauer Bergsturz 2. September 1806

Die Gemeinden Goldau, Röthen und Teile von Buosingen wurden unter einer 10–50 m dicken Schuttschicht begraben.

457 Menschen fanden den Tod.

Der Bergsturz von Goldau erregte damals in ganz Europa Aufsehen und fand in der Folge Eingang in die Literatur, Musik und Malerei.



Aquarell von David Alois Schmid (1791-1861)

Goldauer Bergsturz 2. September 1806

Rossberg

Felsmasse:

30–40 Mio. m³ Gestein

1700-2000 m lang, ~300 m breit, 80 m dick

= ca. 1/1000–1/1500 der Masse des Rossberges

Bergsturz dauert lediglich ein paar Minuten.

Verhalten:

anfangs kompakte Gesteinsschicht → Lockerschutt
→ Feinschuttanteil.

mechanisch wie Flüssigkeit. teilt sich in vier Ströme.

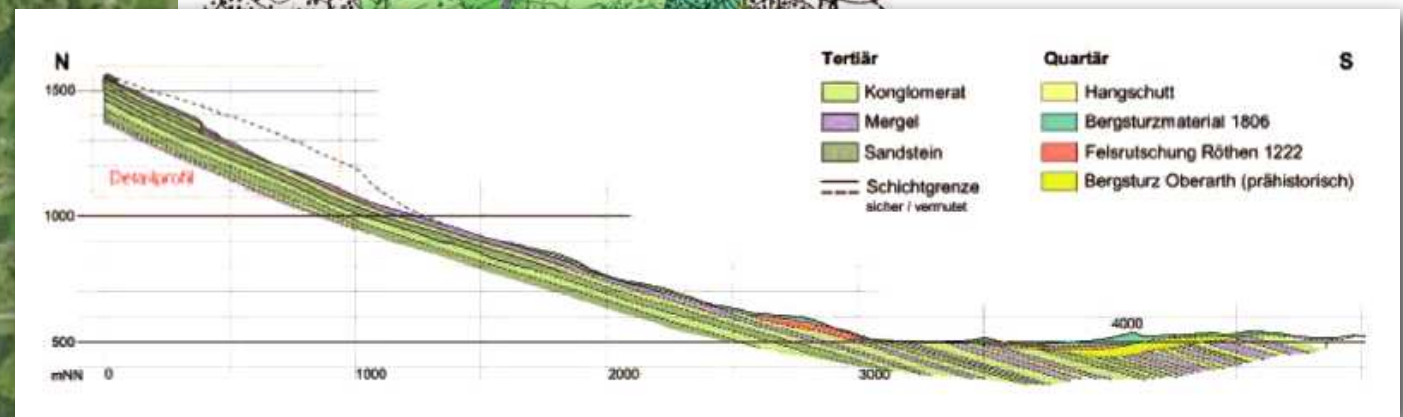
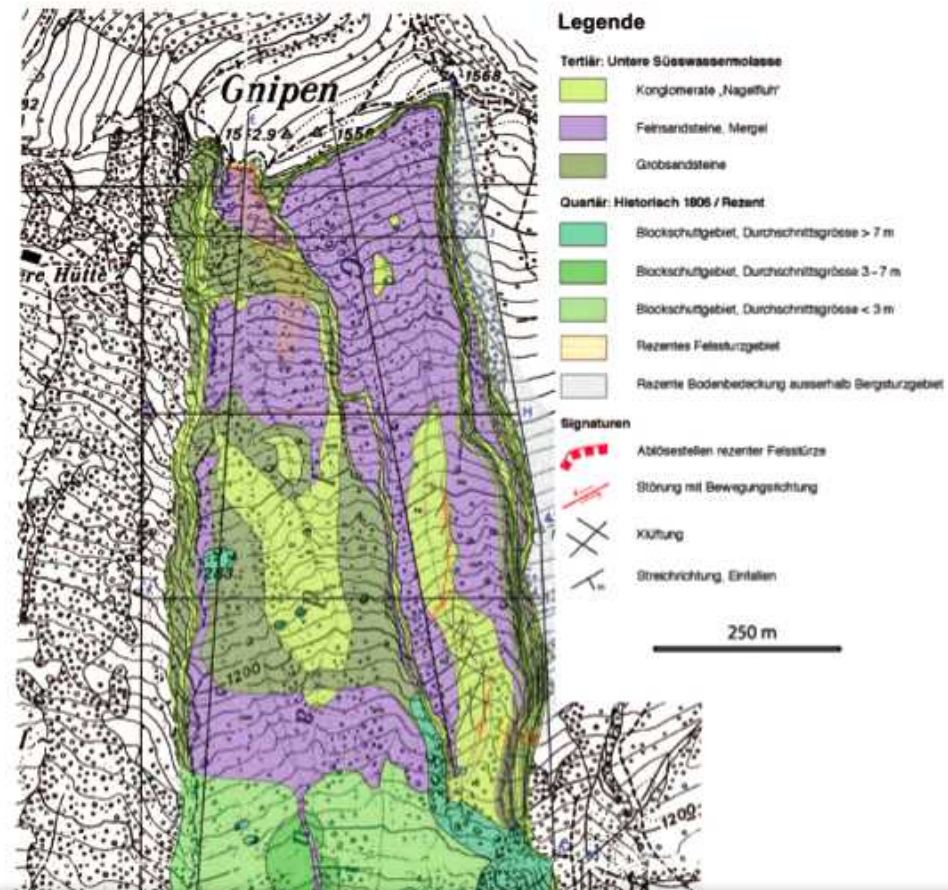
Am Gegenhang (Rigi Nordflanke) Trümmer bis auf
ca. 600 m.ü.M. hinauf.

Im Lauerzersee: Flutwelle, mehrere Opfer

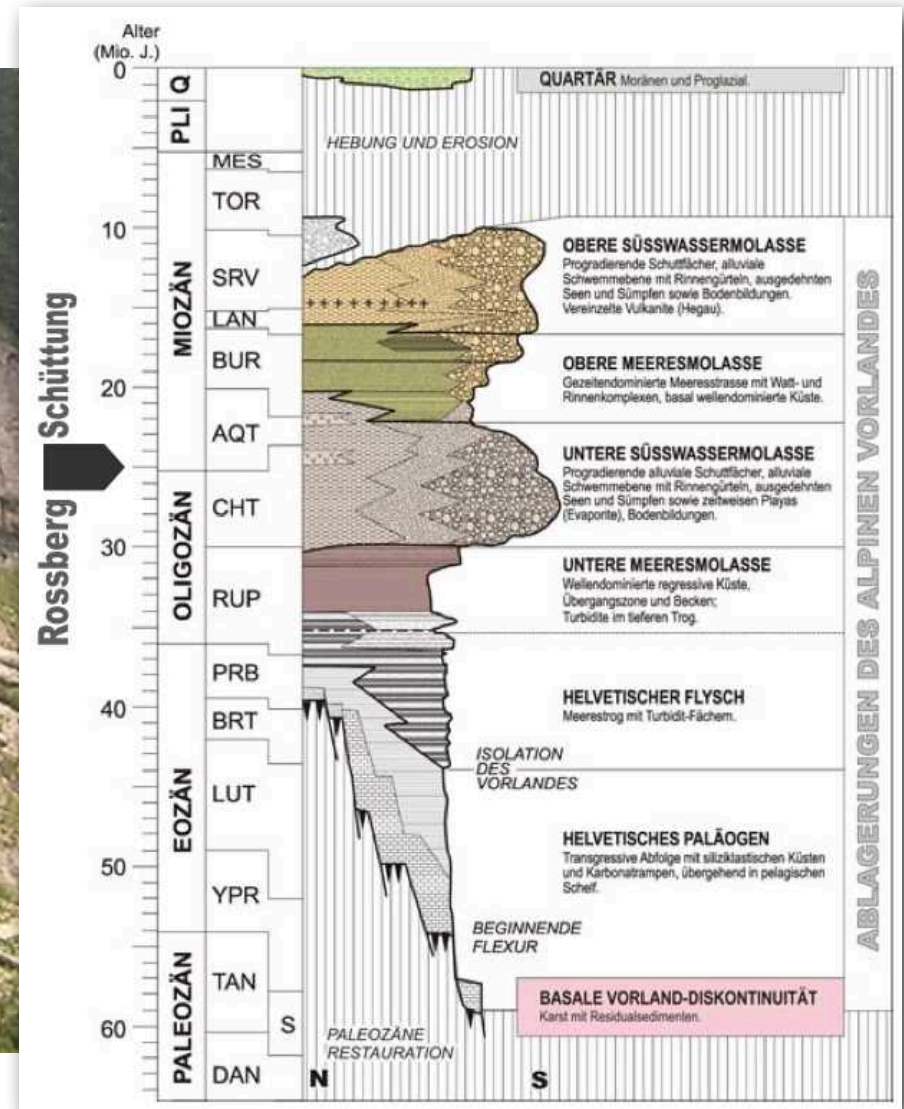
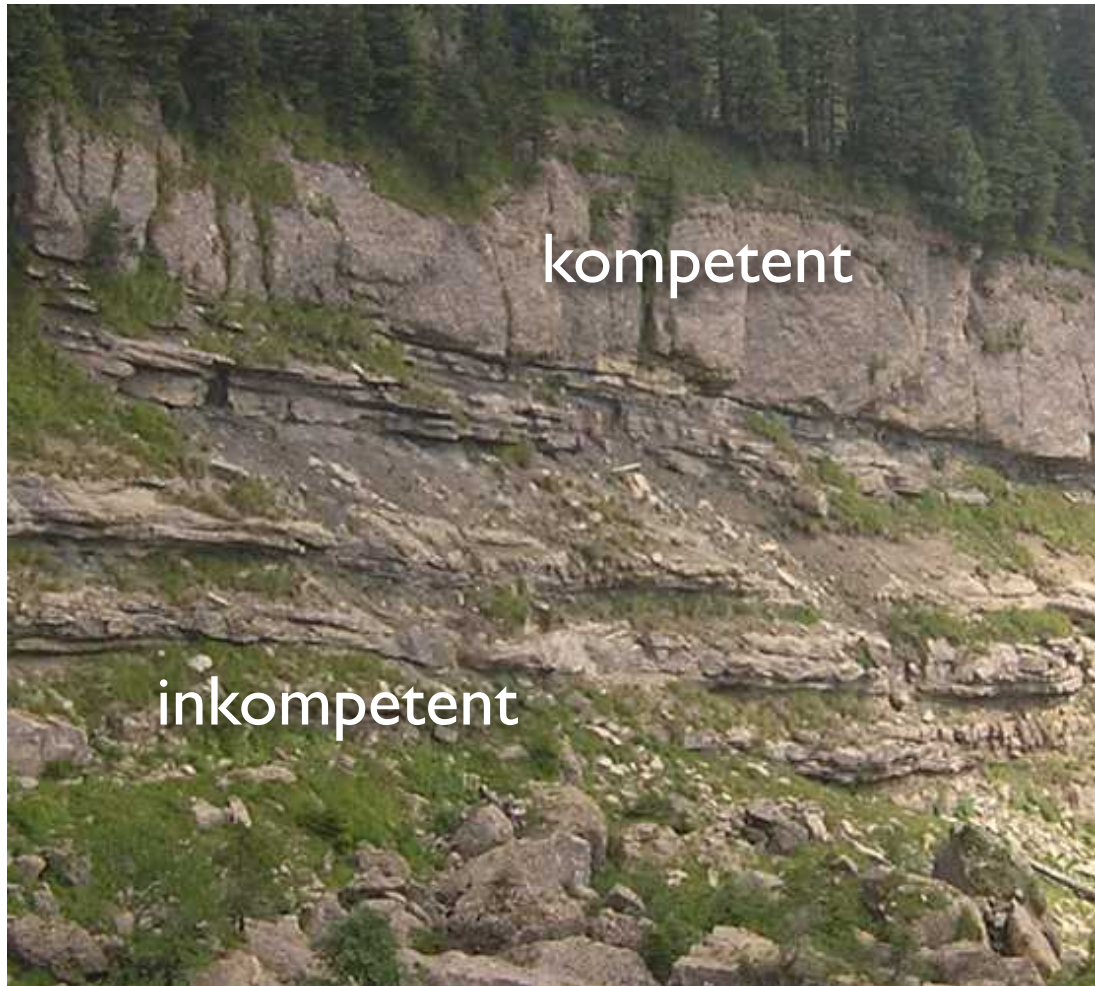
Folge:

Die Westgrenze des Lauerzersees wird verschoben

Geologie



Stratigraphie

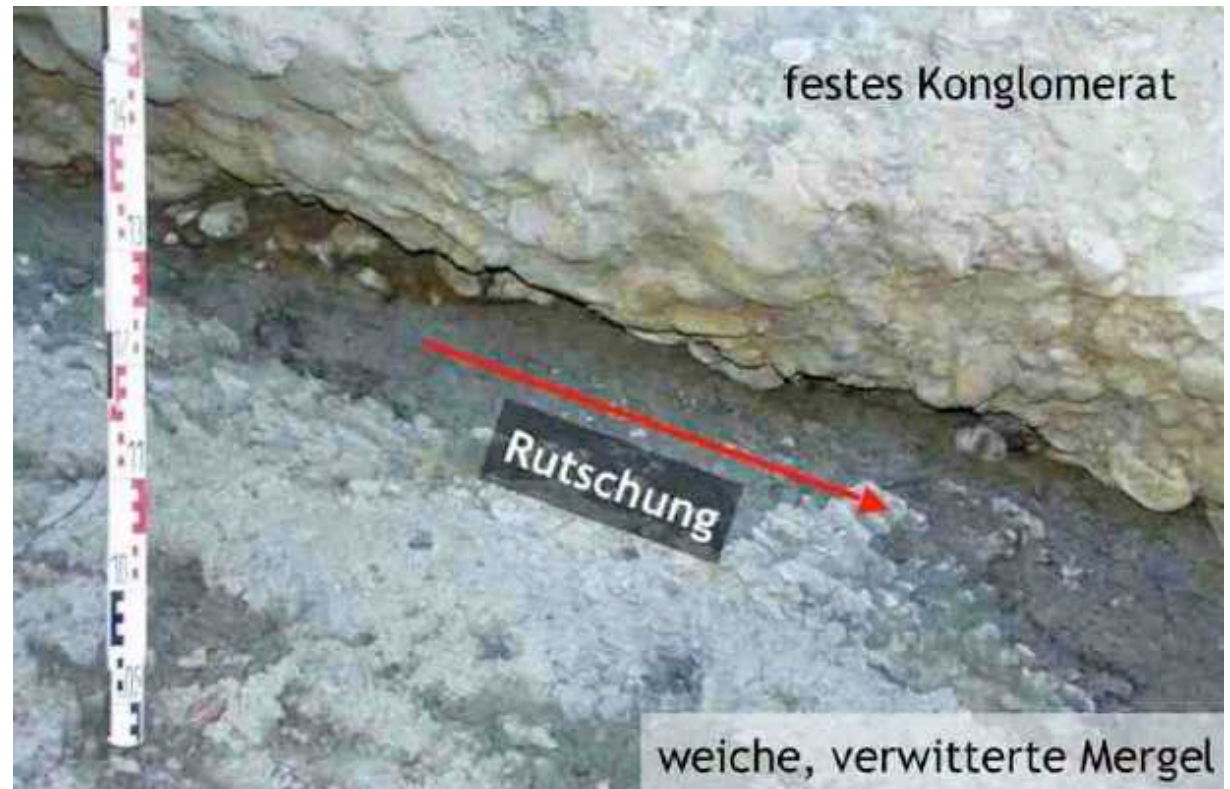
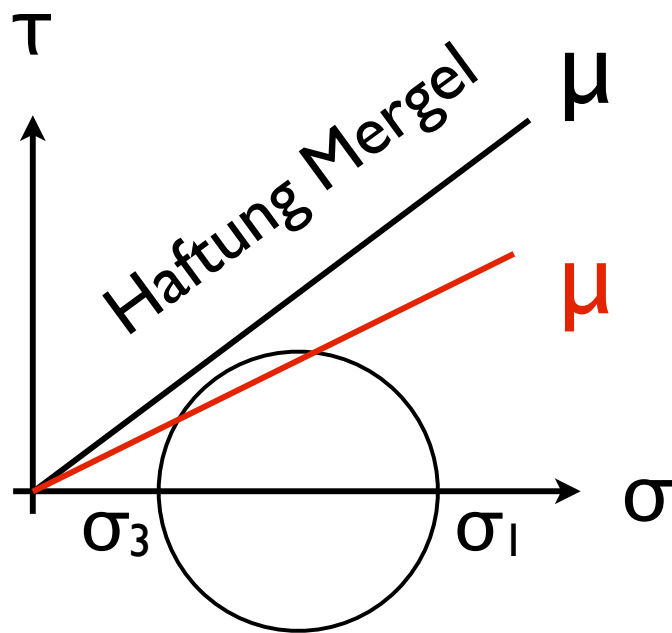


Interpretation I: Reibungsversagen

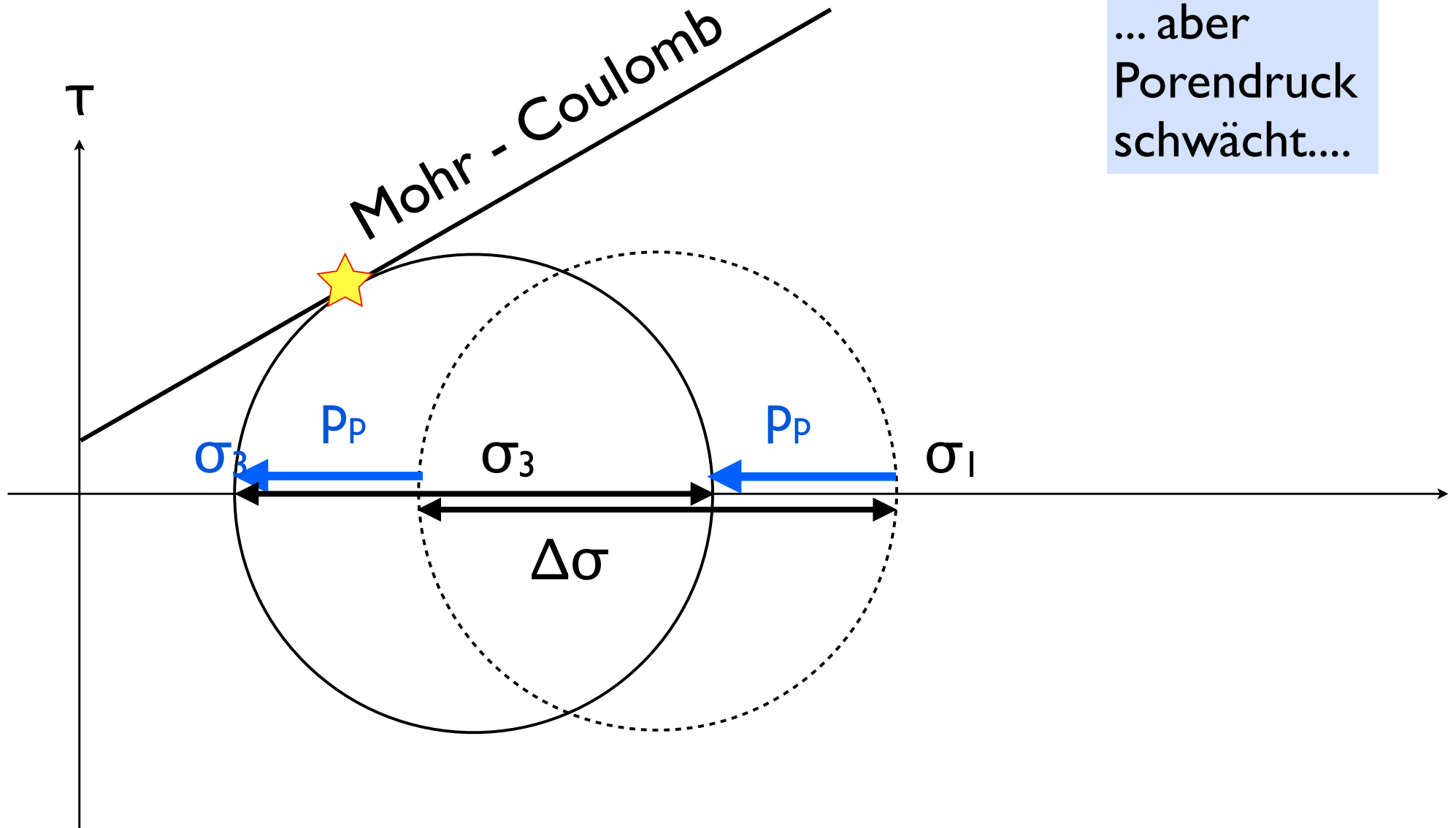
Verringerung des Haftreibung μ durch Wasser

Widerstand:

$$\tau = \mu \cdot \sigma_n$$



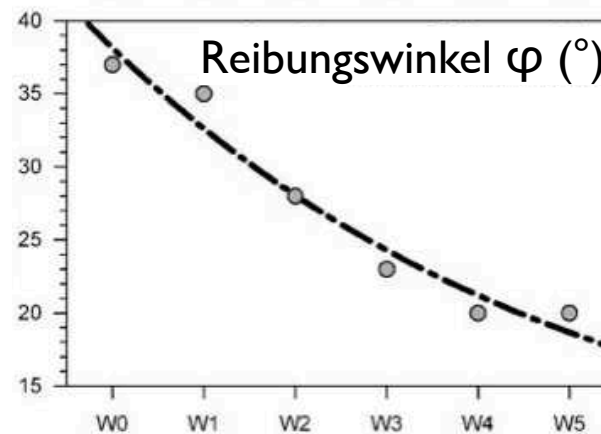
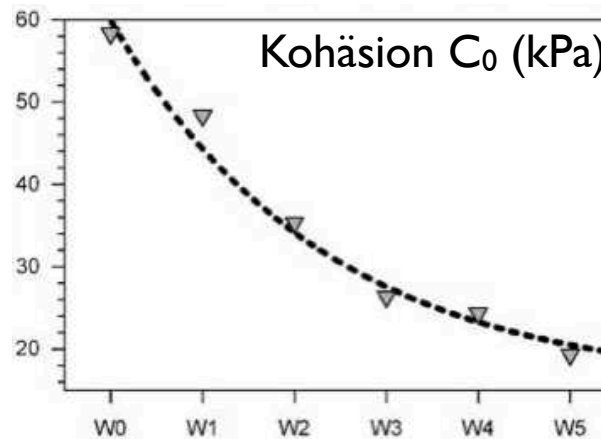
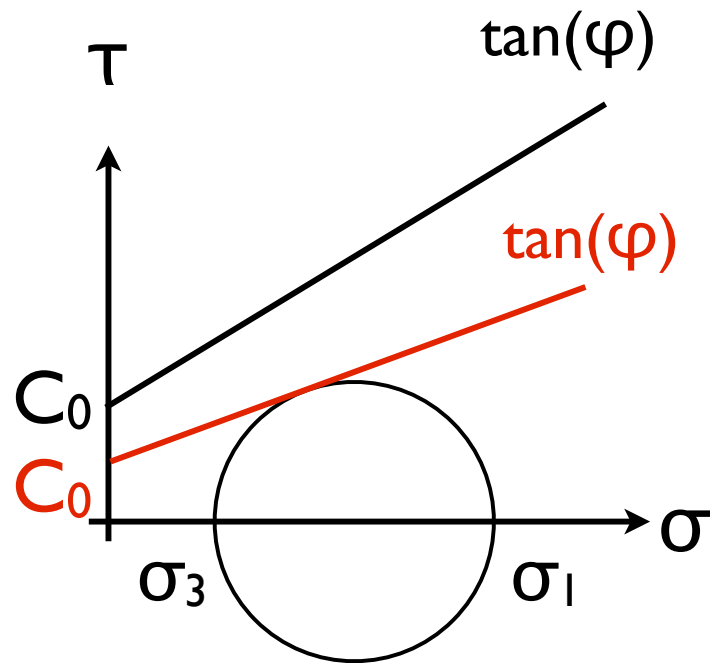
Interpretation 2: Porendruckeffekt



... aber
Porendruck
schwächt....

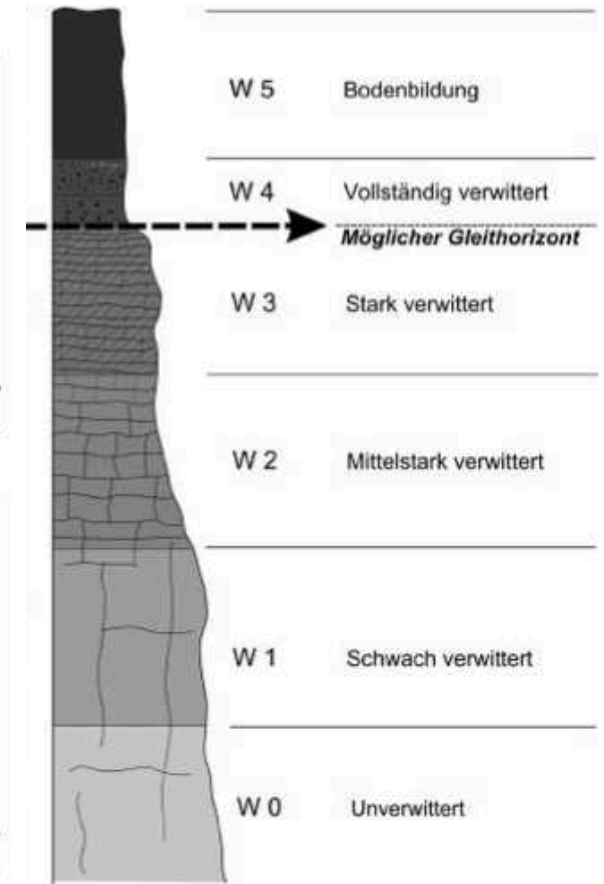
$$p_c = p_{\text{eff}} = \sigma_3 - p_p$$

Interpretation 3: Änderung C_0 und φ



Verwitterungsgrad

Verwitterungsprofil Klassifikation



9 Erdwärme und Erdschwere

Erdwärme

Geotherm (Temperaturprofil)

Wärmefluss

Geoid

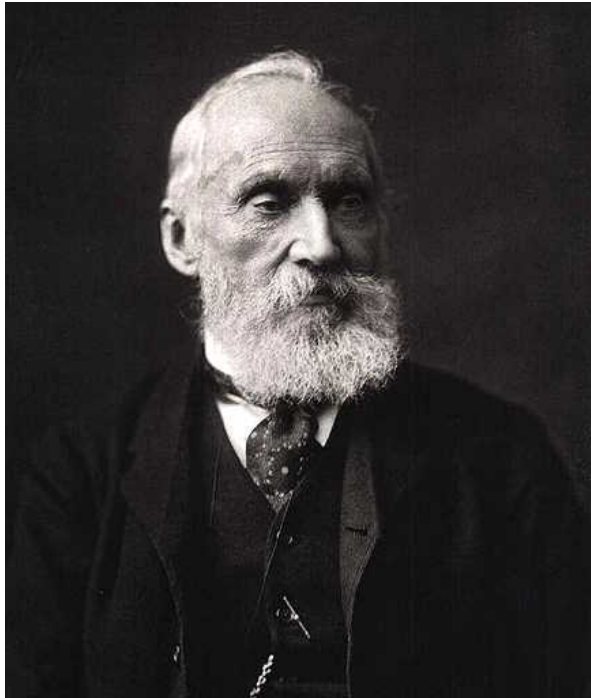
Gravimetrie

Schweremessung

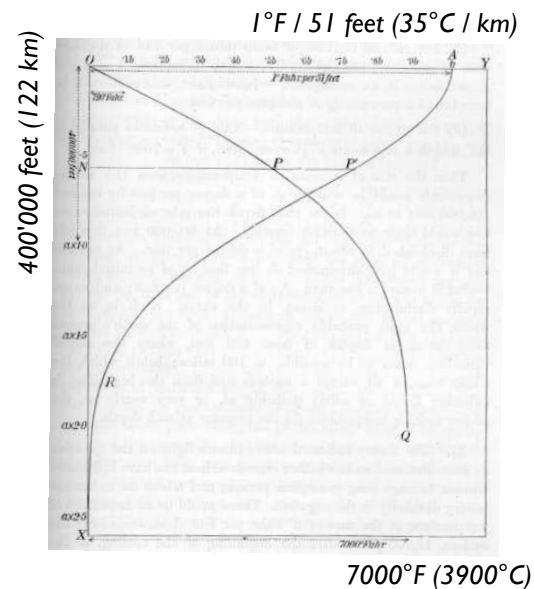
Schwere-Anomalien

Erdwärme

Wärmeabstrahlung → Abschätzung des Erdalters



William Thomson,
1st Baron Kelvin of Largs
(1824 - 1907)



Jean Baptiste Joseph Fourier
(1768 - 1830)

$$q_x = -k \frac{dT}{dx}$$

Annahmen: Temperaturzunahme mit Tiefe: $1^\circ\text{F} / 51 \text{ feet} (\hat{=} 36^\circ\text{C} / \text{km})$
Anfangstemperatur: $7000^\circ\text{F} (3900^\circ\text{C})$ (geschmolzenes Gestein)

eingesetzt in Fourier-Gleichung: \Rightarrow Erdalter $\approx 100 \text{ Ma}$ (20 - 400 Ma)

woher kommt die Wärme?

Hauptwärmequellen der Erde

- Akkretionswärme
Kollision von Partikeln bei Erdentstehung

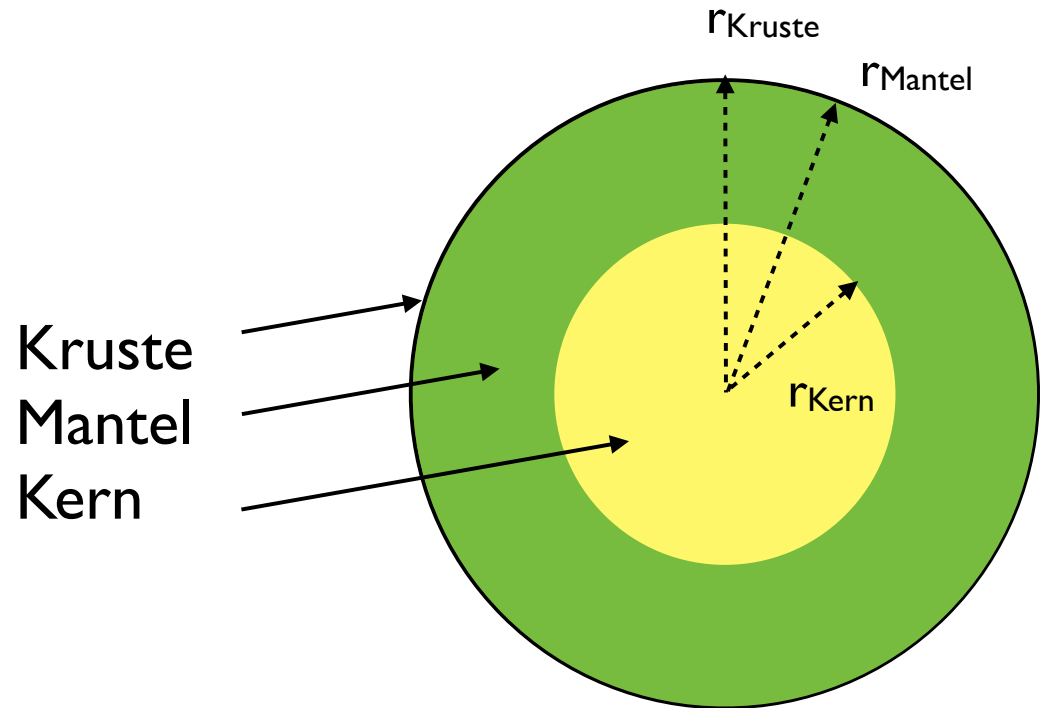
• Kristallisationswärme
Bildung des festen Erdkerns

 $\approx 25-50\%$ der
Gesamtwärme
- Reibungswärme
Verformung von Kruste und Mantel unter
Gezeiteneinwirkung (Mond)

 $2 \cdot 10^{-13} \text{ Wkg}^{-1}$
gemittelt über
ganze Erde = wenige %
- Zerfallswärme
Radioaktiver Zerfall von Uranium (U),
Thorium (Th), Kalium (K) im Mantel

 $> 50\%$ der
Gesamtwärme
 $5 \cdot 10^{-12} \text{ Wkg}^{-1}$

...aus dem Mantel



äusserer Radius:

$$r_{\text{Kruste}} = 6370 \text{ km}$$

$$r_{\text{Mantel}} = 6350 \text{ km}$$

$$r_{\text{Kern}} = 3470 \text{ km}$$

Dichte:

$$\rho_{\text{Kruste}} = 3000 \text{ kgm}^{-3}$$

$$\rho_{\text{Mantel}} = 4000 \text{ kgm}^{-3}$$

$$\rho_{\text{Kern}} = 10000 \text{ kgm}^{-3}$$

Volumen:

$$V_{\text{Kruste}} = 3.50 \cdot 10^{19} \text{ m}^3 = 1.08 \%$$

$$V_{\text{Mantel}} = 2.69 \cdot 10^{21} \text{ m}^3 = 82.8 \%$$

$$V_{\text{Kern}} = 5.25 \cdot 10^{20} \text{ m}^3 = 16.1 \%$$

Masse:

$$m_{\text{Kruste}} = 1.05 \cdot 10^{23} \text{ kg} = 0.65 \%$$

$$m_{\text{Mantel}} = 1.08 \cdot 10^{25} \text{ kg} = 66.8 \%$$

$$m_{\text{Kern}} = 5.25 \cdot 10^{24} \text{ kg} = 32.6 \%$$

Wärme produzierende Isotope

Isotop	Wärmeproduktion des Isotops (Wkg^{-1})	Konzentration des Isotops im Mantel	Wärmeproduktion des Mantels (Wkg^{-1})	gesamte Wärmeproduktion des Mantels (W)
238 U	$9.46 \cdot 10^{-5}$	$3.08 \cdot 10^{-8}$	$2.91 \cdot 10^{-12}$	$11.7 \cdot 10^{12}$
235 U	$5.69 \cdot 10^{-4}$	$2.2 \cdot 10^{-10}$	$1.25 \cdot 10^{-13}$	$0.5 \cdot 10^{12}$
232 Th	$2.64 \cdot 10^{-5}$	$1.24 \cdot 10^{-7}$	$3.27 \cdot 10^{-12}$	$13.1 \cdot 10^{12}$
40 K	$2.92 \cdot 10^{-5}$	$3.69 \cdot 10^{-8}$	$1.08 \cdot 10^{-12}$	$4.3 \cdot 10^{12}$
			Masse des Mantels $\approx 67\%$ Erdmasse (Erde $\approx 6 \cdot 10^{24}$ kg)	$29.6 \cdot 10^{12}$

1 Joule = 1 J = 1 kg m² s⁻²
 1 Watt = 1W = 1 Js⁻¹ = 1 kg m² s⁻³

Masse des Mantels $\approx 67\%$ Erdmasse
 (Erde $\approx 6 \cdot 10^{24}$ kg)

Wärmeproduktion der Erde:

durch radioaktiven Zerfall: ≈ 30 TW

(pro Jahr: $30 \cdot 10^{12} \text{ Js}^{-1} \cdot 31.6 \cdot 10^6 \text{ s} \approx 1000 \cdot 10^{18} \text{ J} = 10^{21} \text{ J} = 1 \text{ ZJ}$)

Totale Wärmeproduktion (inklusive Bildungswärme): ≈ 44 TW

Zum Vergleich: Energie-Verbrauch der Menschen: ≈ 20 TW

PS: Totaler Wärmegehalt der Erde geschätzt auf $13'000'000 \text{ YJ} = 13 \cdot 10^9 \text{ ZJ}$

(https://en.wikipedia.org/wiki/World_energy_resources)

10³ kilo - 10⁶ Mega - 10⁹ Giga - 10¹² Tera - 10¹⁵ Peta - 10¹⁸ Exa - 10²¹ Zetta - 10²⁴ Yotta

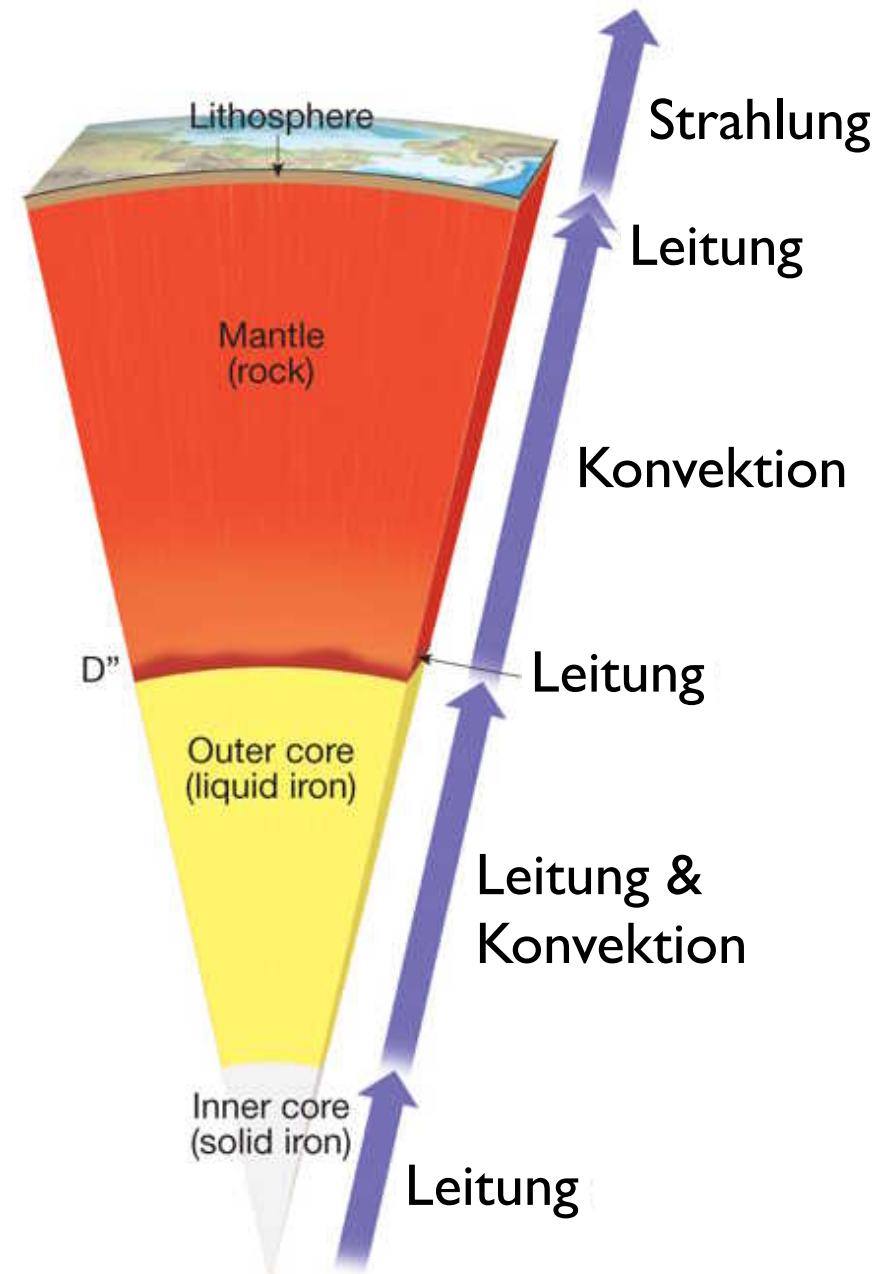
Wärmefluss

Wärmefluss

$$q = k \cdot \frac{dT}{dz}$$

q Wärmeflussdichte (Wm^{-2})
k Leitfähigkeit ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)
dT/dz Temperaturgradient (Km^{-1})

Wärmetransport:



Global heat flow

Total heat flow: 40 TW
Surface of a sphere: $S = 4\pi r^2$
Radius of earth: 6370 km

$$S \approx 4 \cdot 3.14159 \cdot (6.3 \cdot 10^6)^2 \text{ m}^2$$

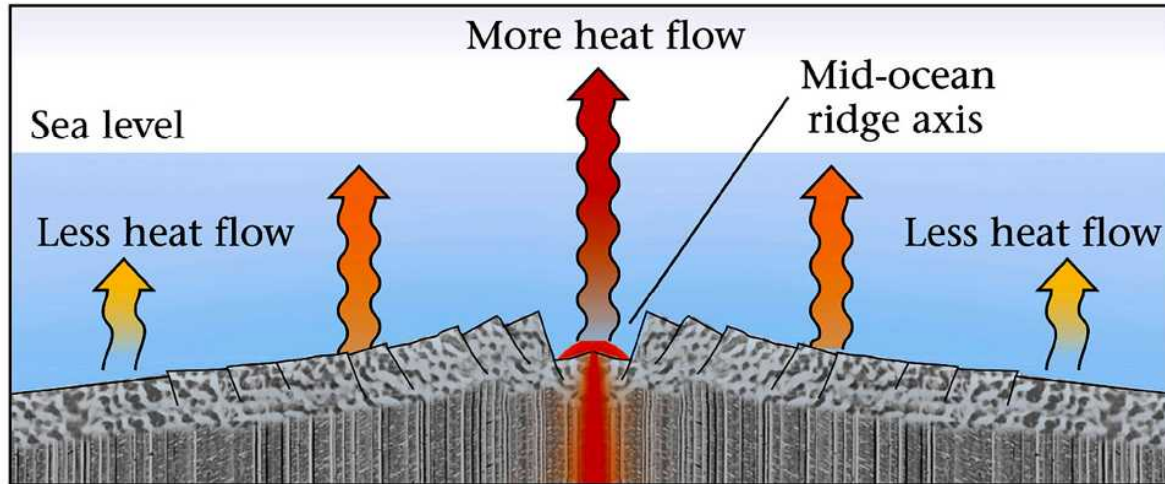
$$S \approx 12.5 \cdot 40 \cdot 10^{12} \text{ m}^2$$

$$S \approx 500 \cdot 10^{12} \text{ m}^2$$

$$q \text{ (average)} \approx \frac{4 \cdot 10^{13} \text{ W}}{500 \cdot 10^{12} \text{ m}^2} \approx 80 \text{ mWm}^{-2}$$

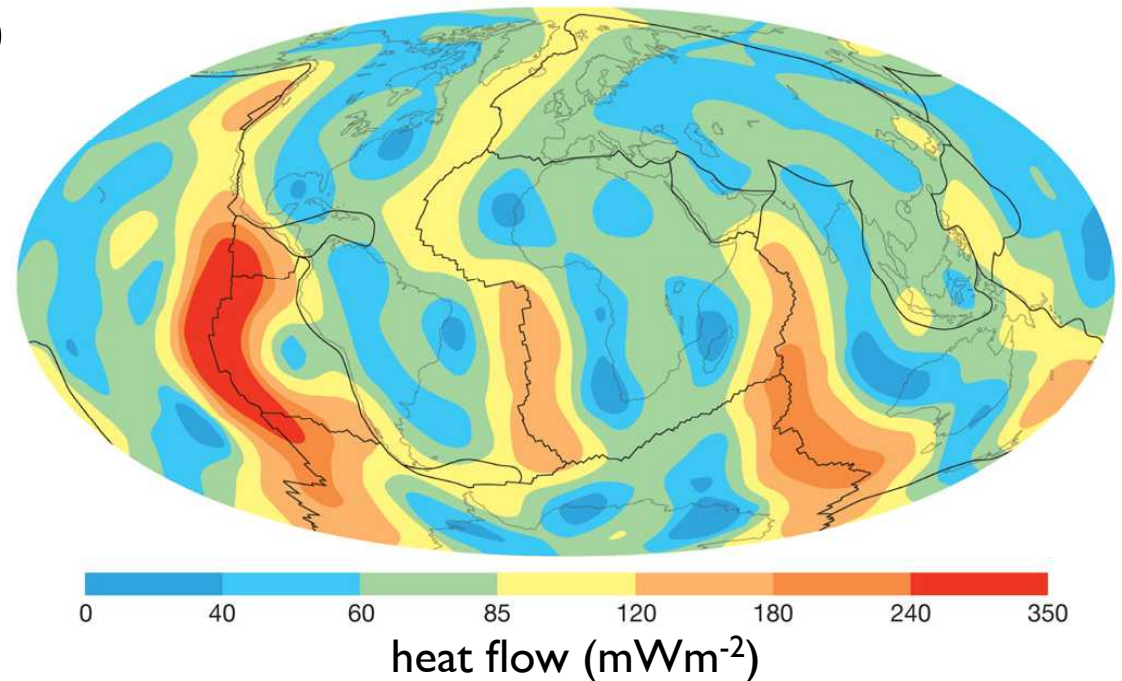
$$50 - 100 \text{ mWm}^{-2}$$

Heat flow



typical values (10^{-3} Wm^{-2})

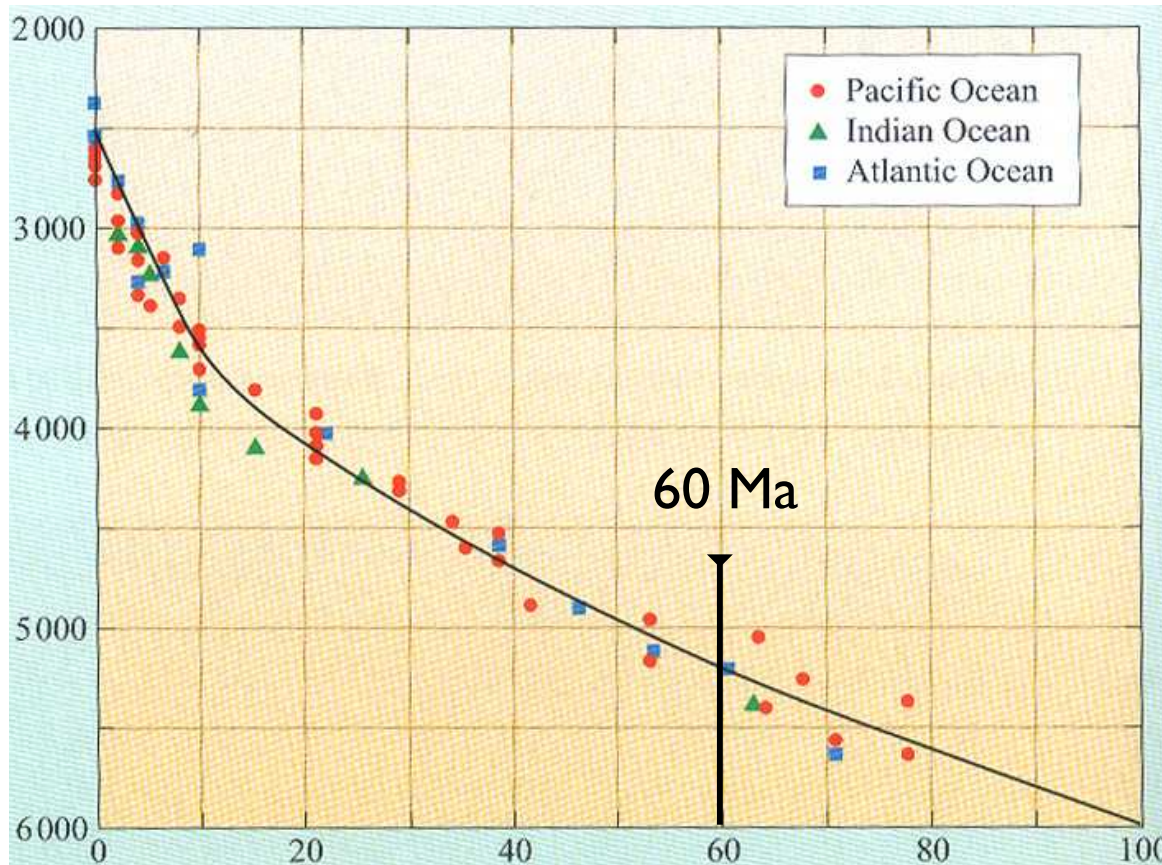
mid-ocean ridge	100-200
old oceanic crust	~ 50
young mountain belts	60-75
old cratons	< 40



heat flow at divergent margins

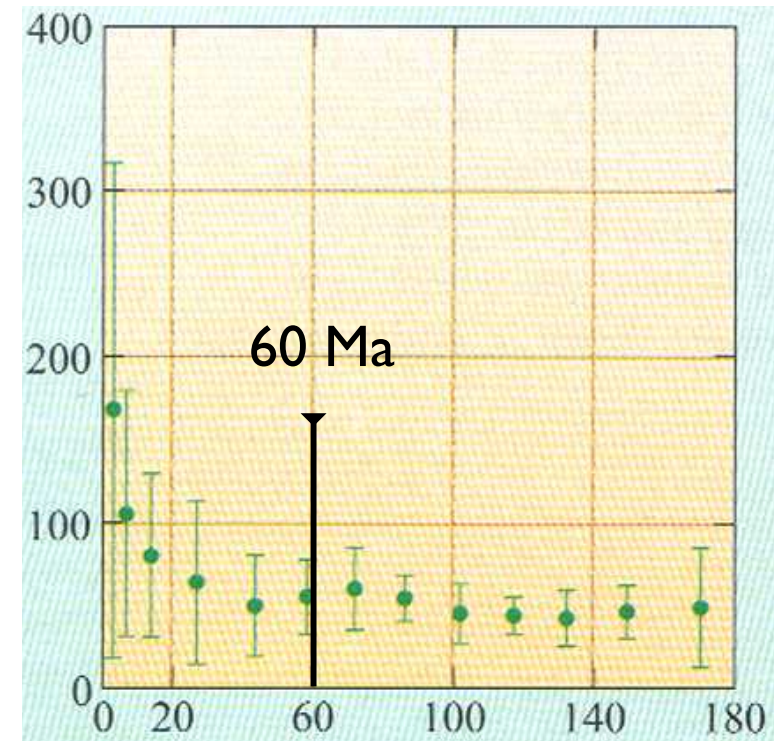
depth / m

Rogers (2008)



age of oceanic crust / Ma

mean heat flow / mWm^{-2}



age of oceanic crust / Ma

s. auch Pfiffner et al. 2012

Temperaturen an Subduktionszonen

im Allgemeinen:

alt / kalt / langsam = steil
jung / heiss / schnell = flach

Kuril-Kamtschatka-Graben:

Subduktionsgeschwindigkeit

SCHNELL: 0.091 ma^{-1}

Alter der subduzierten Platte

ALT: 130 Ma

Nankai-Graben:

Subduktionsgeschwindigkeit

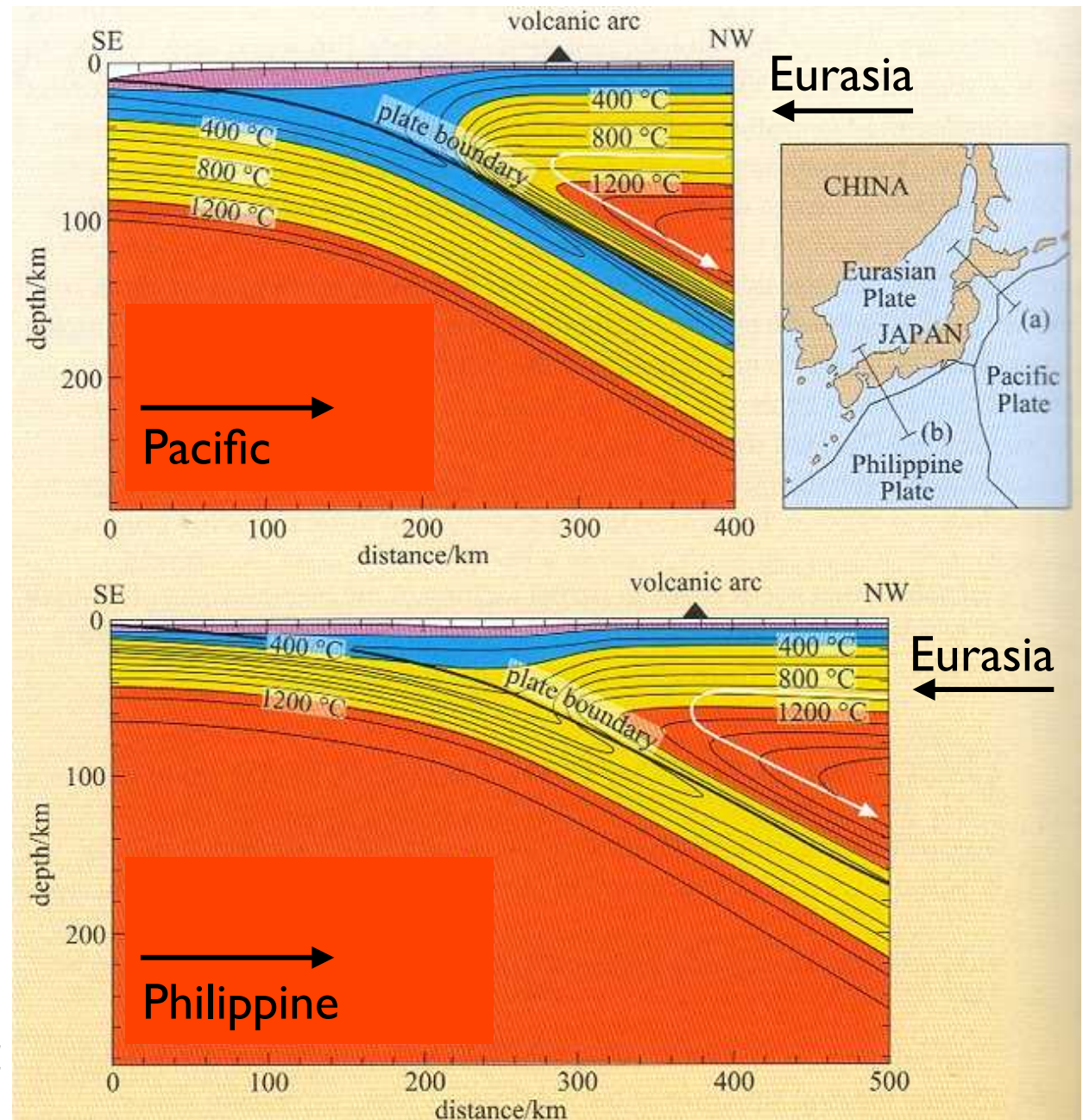
LANGSAM: 0.045 ma^{-1}

Alter der subduzierten Platte

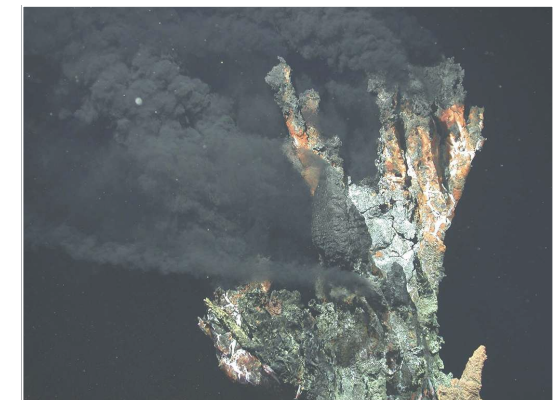
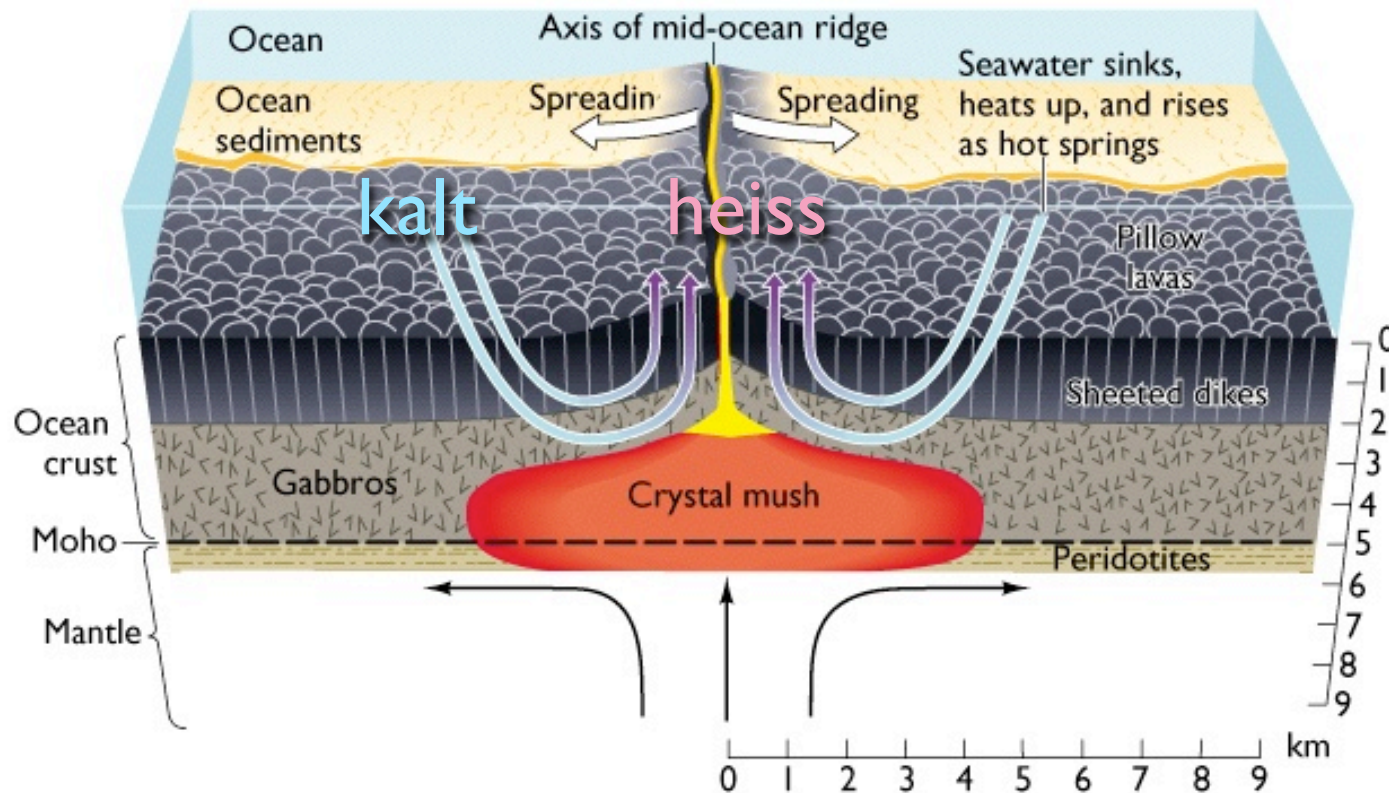
JUNG: 15 Ma

Rogers (2008)

Achtung:
Blick aus NE



Ozeanische Kruste

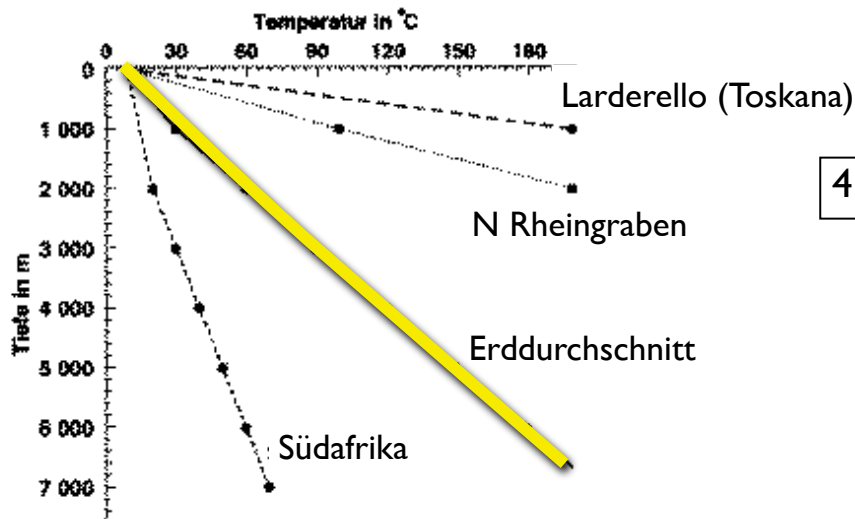


- kaltes Meerwasser zirkuliert hinunter in die Kruste, erwärmt sich
- Hydrothermalmetamorphose → Ophikalzite
- Hydrothermale Fluids lösen Metallionen, die auf dem Meeresboden ausgefällt werden → schwarze, weisse Raucher, thermophile Fauna

Geotherm (Temperaturprofil)

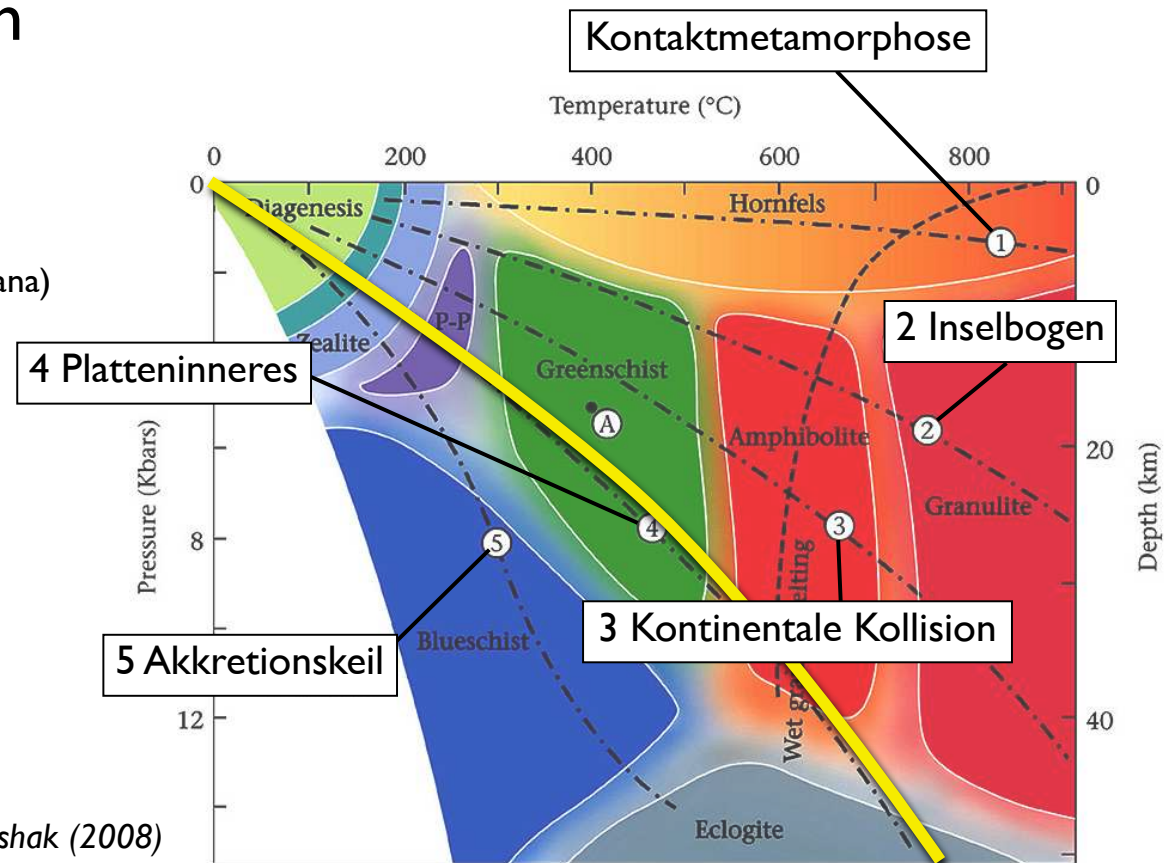
Temperaturgradient

- Temperatur nimmt mit der Tiefe zu: $T = f(z)$
- $dT/dz = \text{Gradient } (^\circ\text{C} / \text{km})$
- typische Werte:
 Kruste: $20^\circ\text{C} - 30^\circ\text{C} / \text{km}$
 Lithosphäre: $\sim 10^\circ\text{C} / \text{km}$



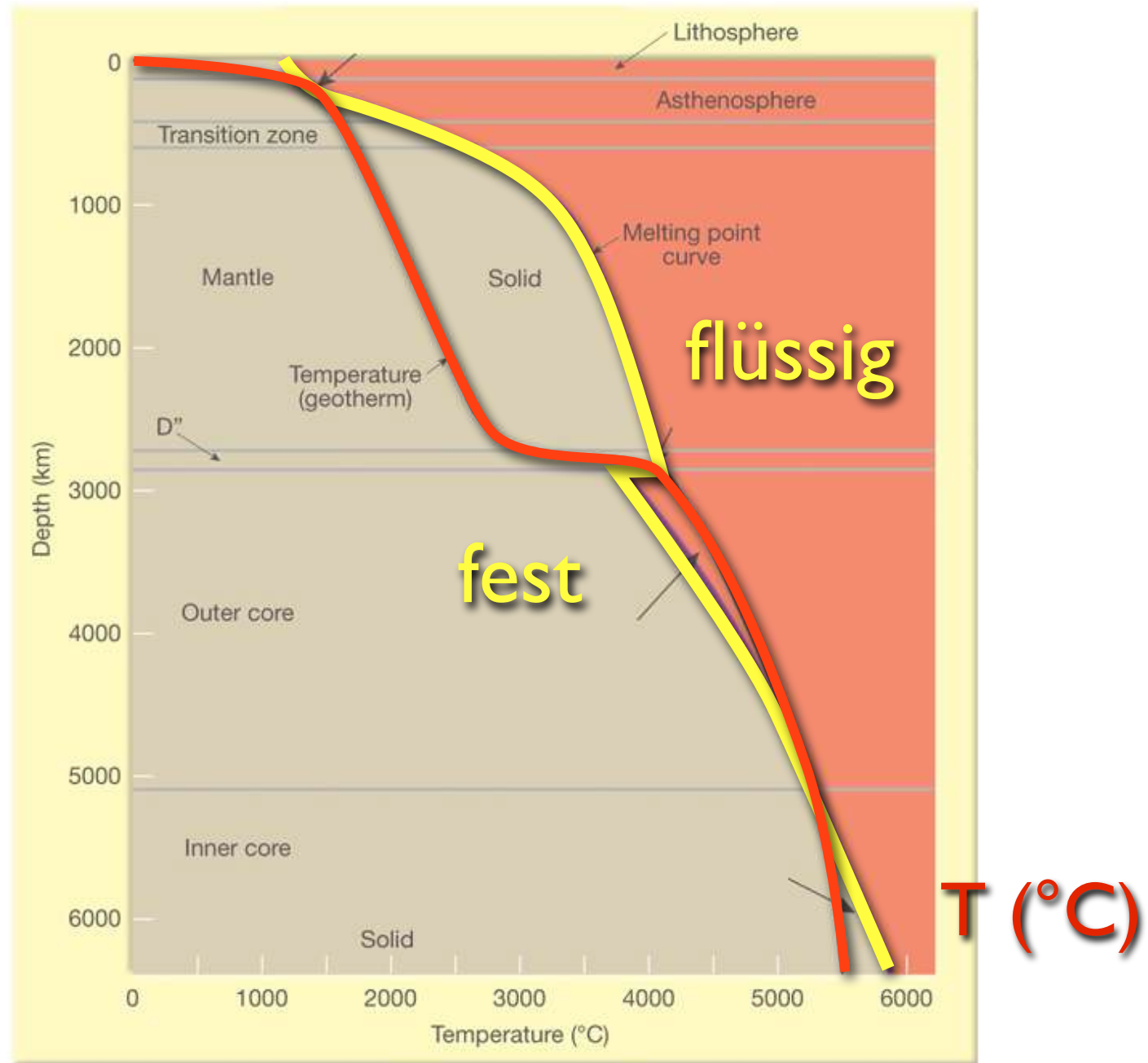
Quelle: <http://elite.tugraz.at> (Uni Graz)

Marshak (2008)



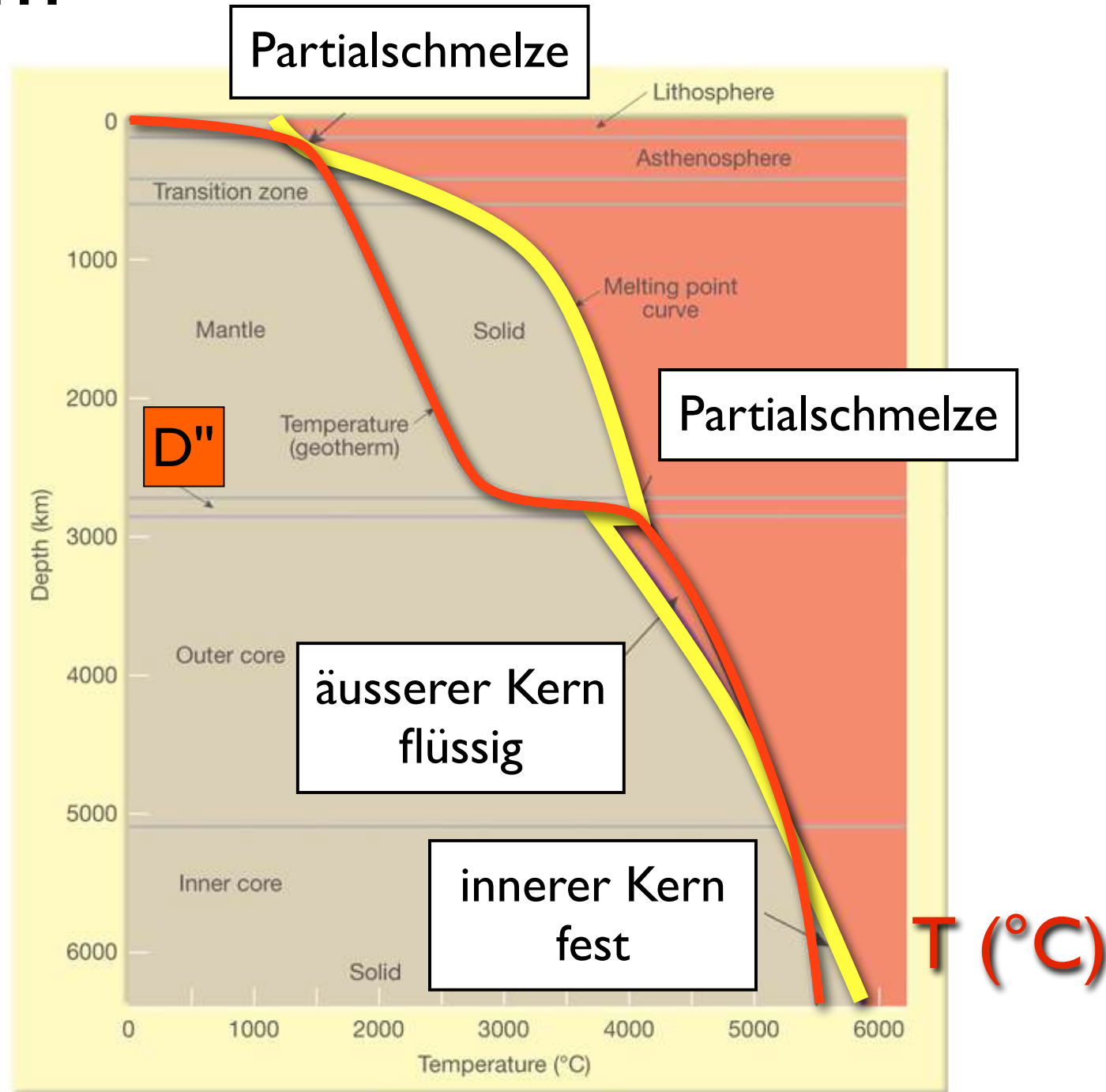
Geotherm

litho	150
astheno	410
transition	660
meso (lower mantle)	
	2700
D''	2900
outer core	
	5150
inner core	
	6370



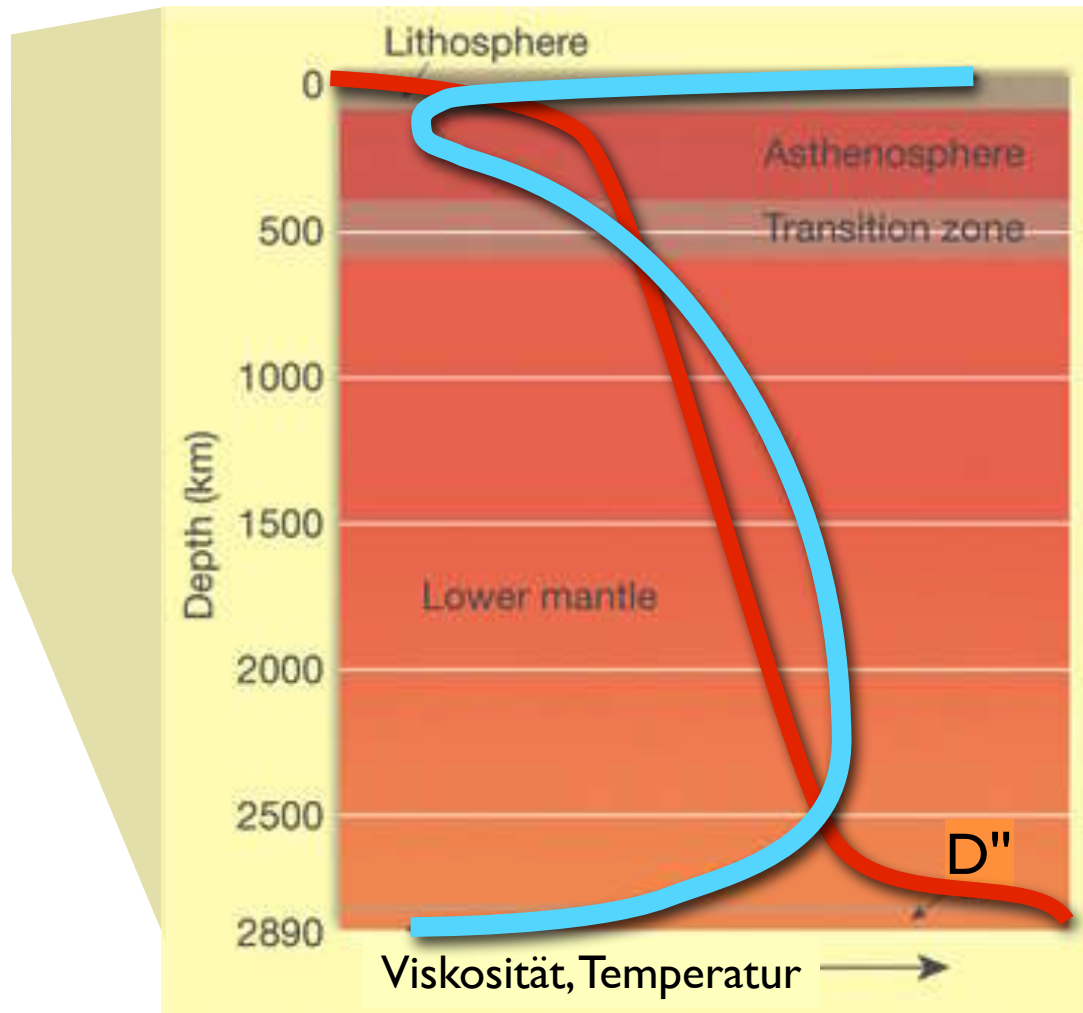
Geotherm

litho	150
astheno	410
transition	660
meso (lower mantle)	2700
D''	2900
outer core	5150
inner core	6370



Geotherm und Rheologie

litho	150
astheno	410
transition	660
meso (lower mantle)	2700
D''	2900
outer core	5150
inner core	6370



Viskosität

Temperaturprofil
≠
Festigkeitsprofil

T (°C)

Geoid

Geoid

Form der Erde ?

geometrisch: Ellipsoid

Referenzellipsoid =
dem Geoid angepasstes
rotationssymmetrisches Ellipsoid

physikalisch: durch Schwerkraft

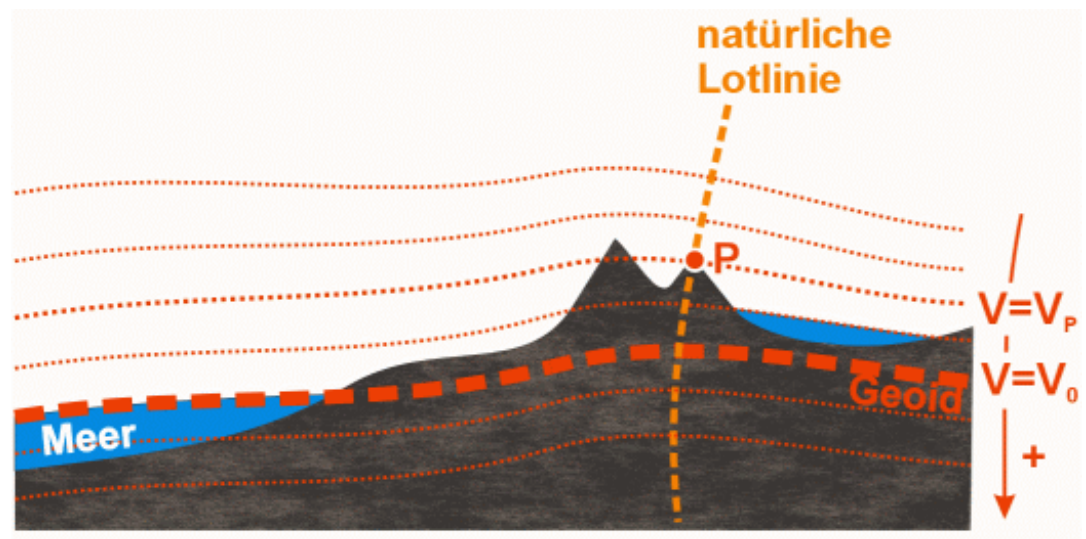
Geoid =
Equipotentialfläche

auf dem Geoid ist:

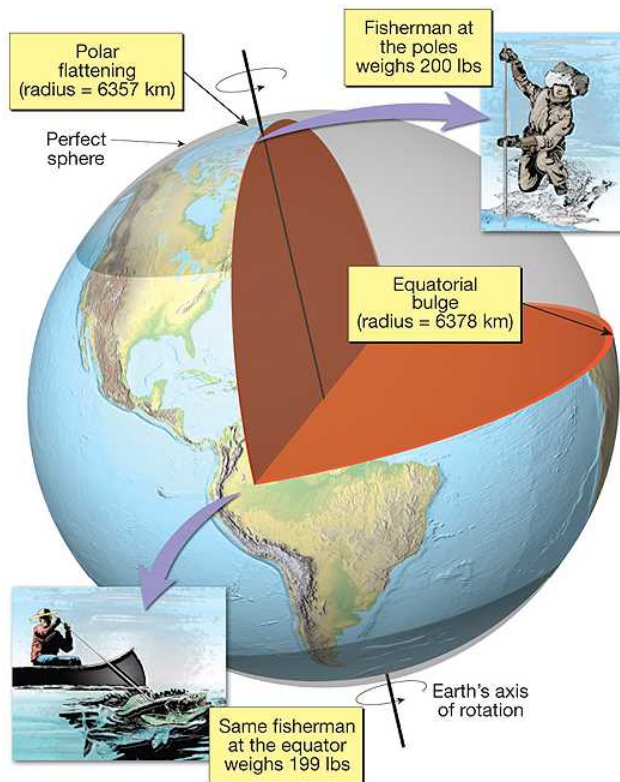
Schwerepotential = $\Delta V = \Delta h \cdot g = \text{konstant}$
Schwerebeschleunigung $g \neq \text{konstant}$

Form = freie Wasseroberfläche

Niveau: Meeresniveau



Erdbeschleunigung



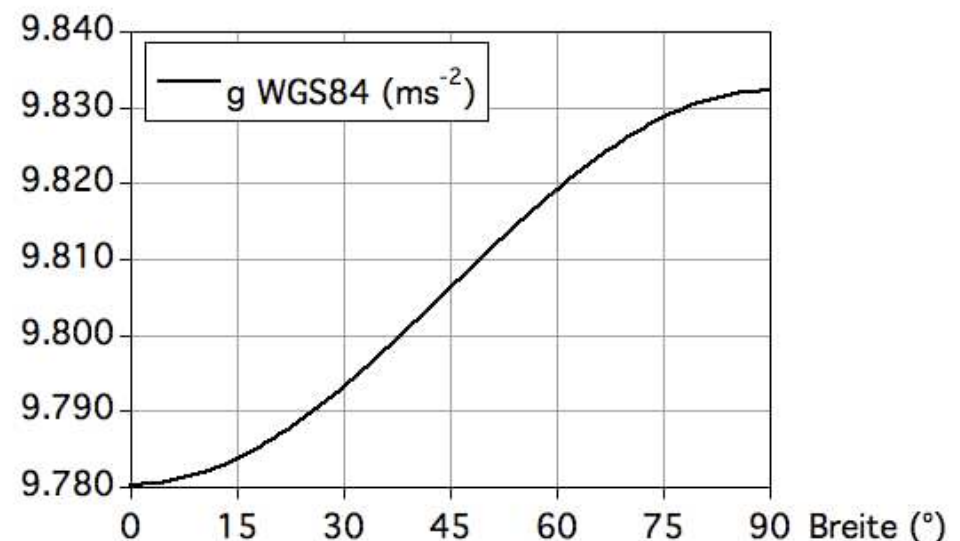
Pol: 9.832187 ms^{-2}
 45° Breite: 9.806199 ms^{-2}
 Äquator: 9.780327 ms^{-2}

Normalschwere (\neq Geoid)

Internationale Schwereformel 1980

$$g = g_E \cdot \left(\frac{1 + \alpha \cdot \sin^2 \lambda}{1 - \beta \cdot \sin^2 \lambda} \right)$$

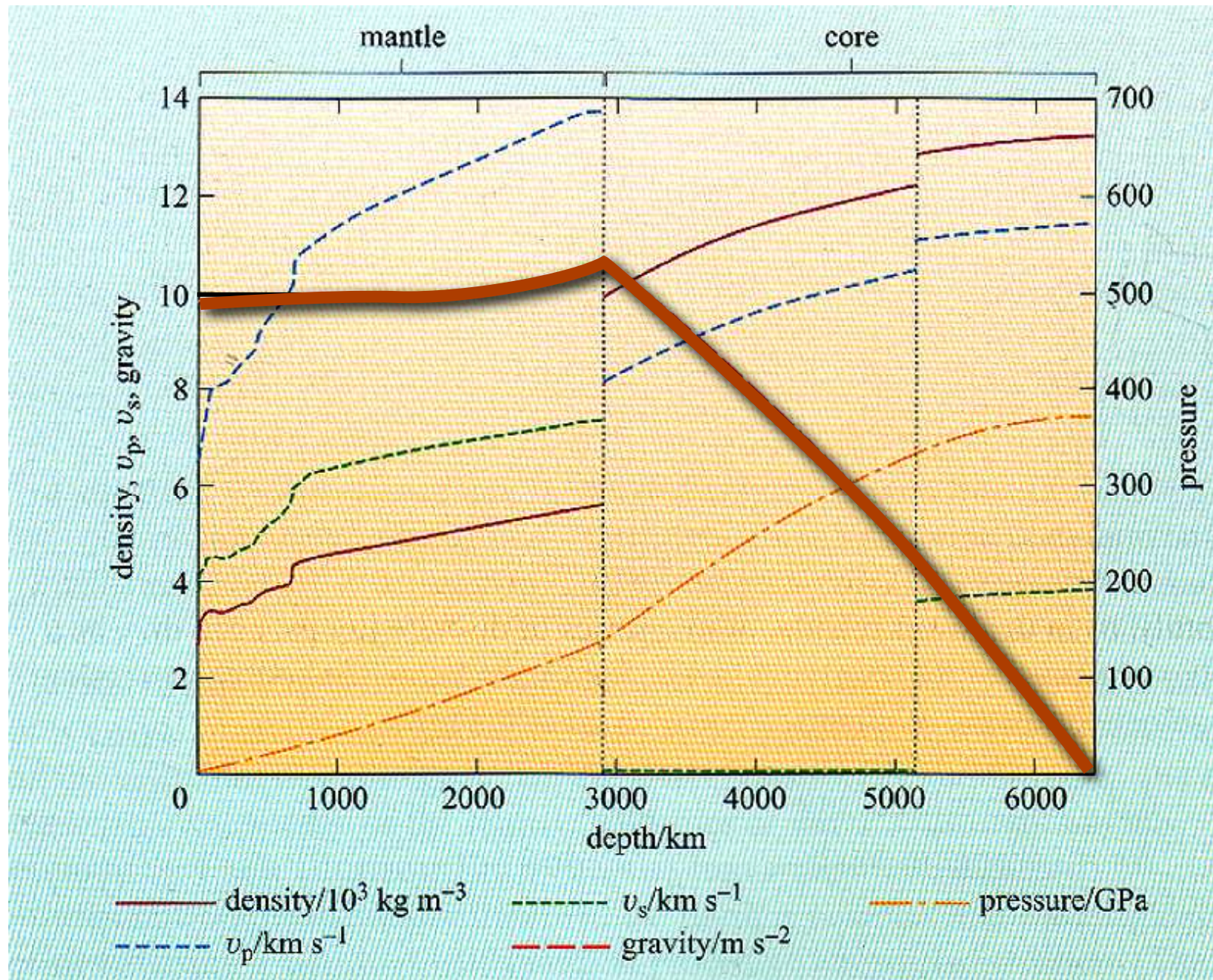
$g_E = 9.780327 \text{ ms}^{-2}$ $\alpha = 1.932 \cdot 10^{-3}$
 $\lambda = \text{geografische Breite}$ $\beta = 6.694 \cdot 10^{-3}$



Erdbeschleunigung im Erdinneren

gravity
[ms⁻²]

$$g = \frac{GM}{r^2}$$



Geoid-Messung

(1) Messung mittels Satelliten-Geodäsie

- Bahnstörungen
- Satellitengradiometrie (GOCE)
- Satellite-to-satellite tracking (SST) (GRACE)
- Satelliten-Altimetrie

(2) Astrogeoid: Messung der Lotabweichung

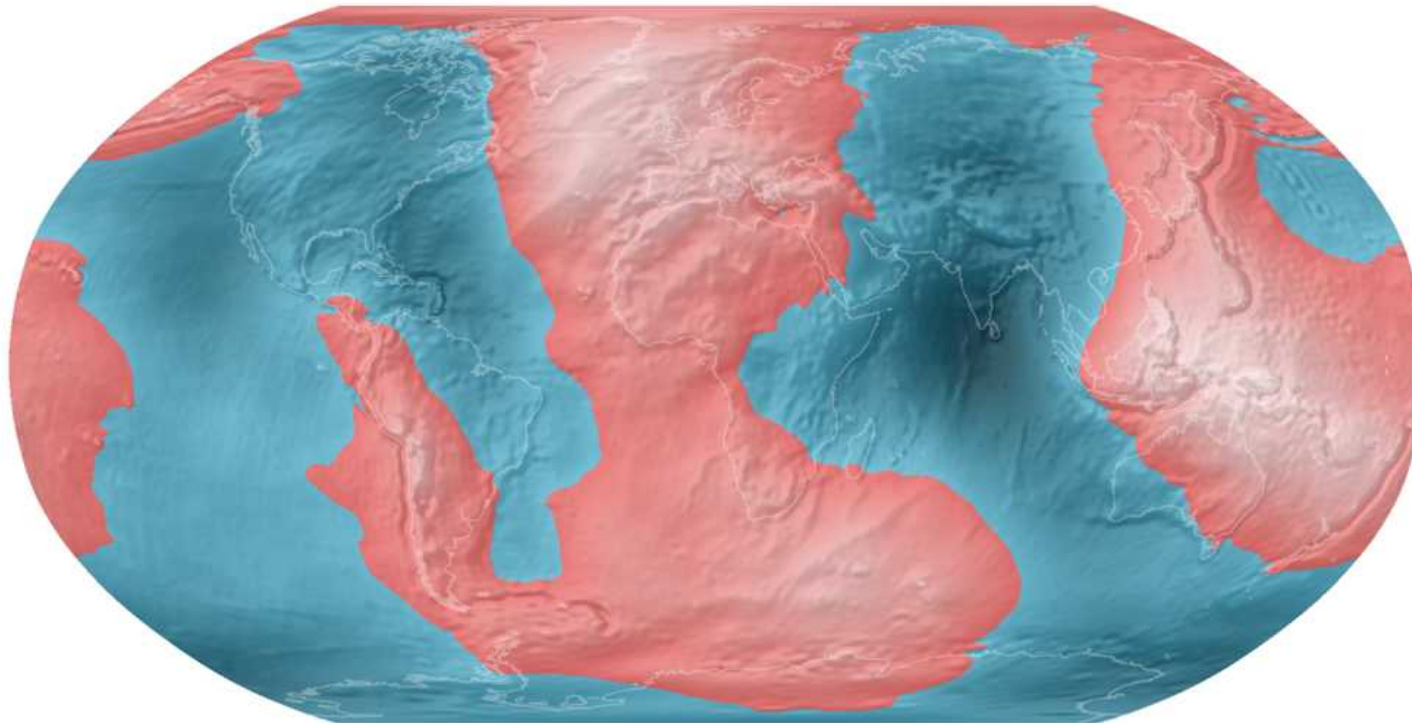
(3) Kombination

(4) Gravimetrie: Messung der Schwerkraft

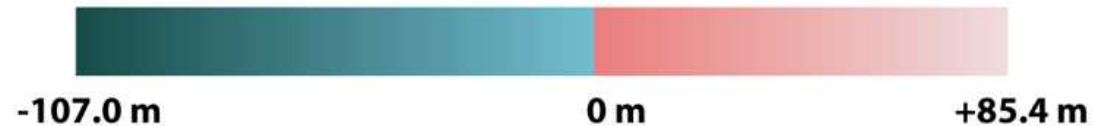
Geoid (1996)

≠ Referenzellipsoid
= Äquipotential fläche

Deviation of the Geoid from the idealized figure of the Earth
(difference between the EGM96 geoid and the WGS84 reference ellipsoid)



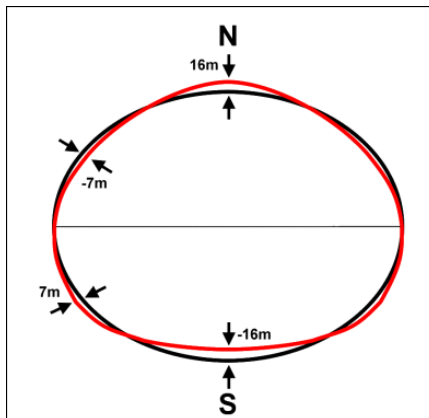
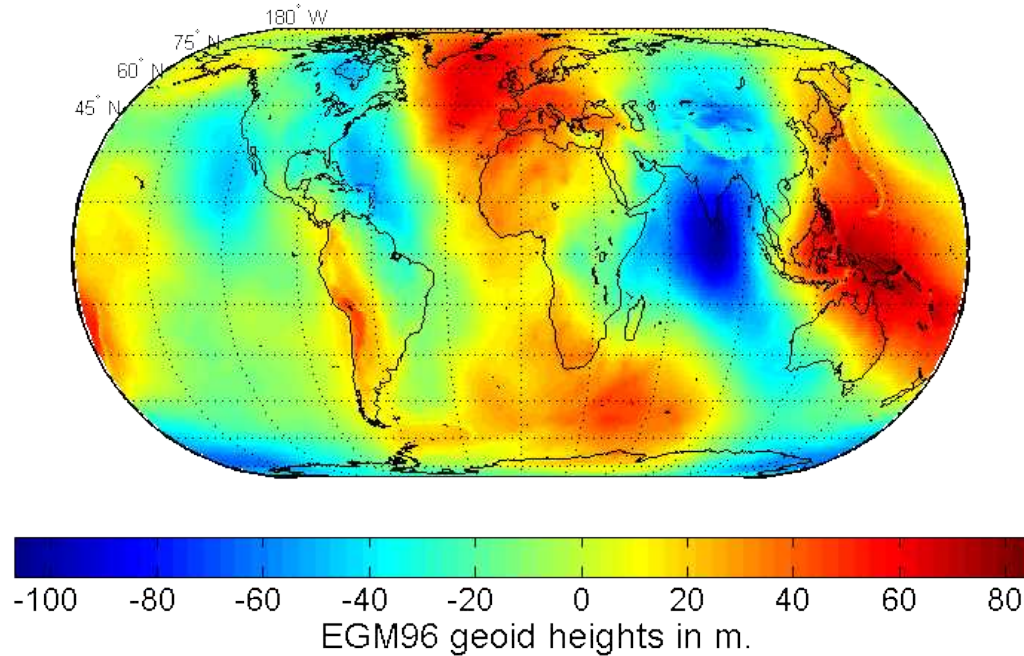
Red areas are above the idealized ellipsoid; blue areas are below.



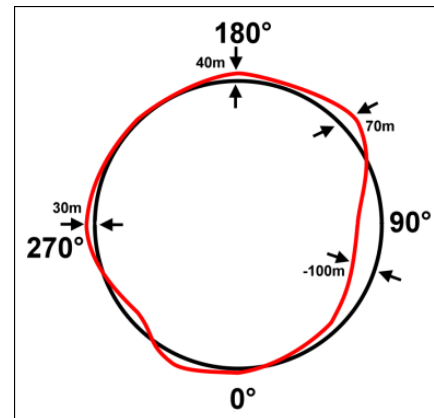
Geoid (1996) -

Geoid (2011)

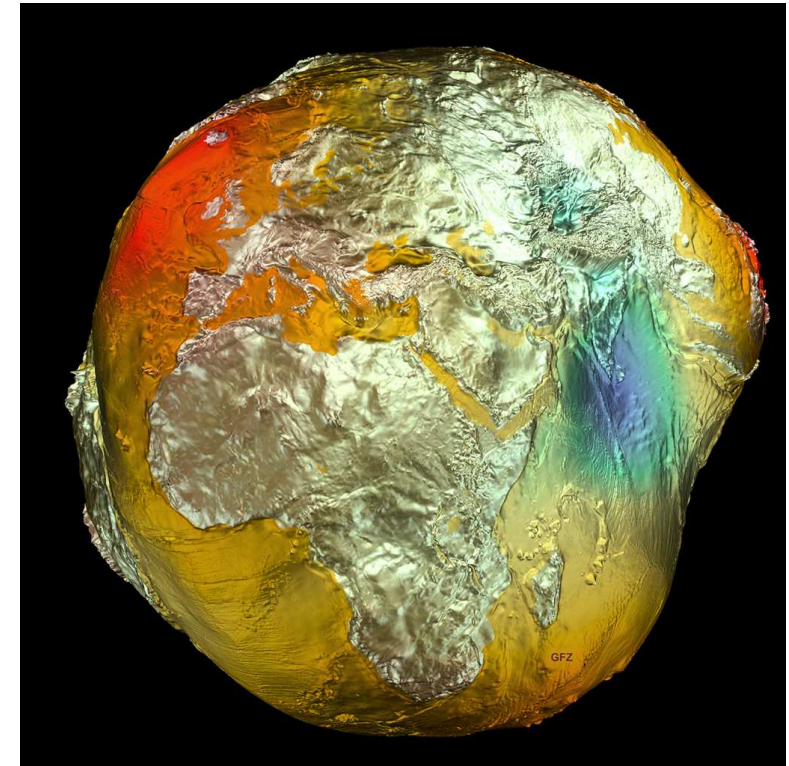
Abweichung vom Rotationsellipsoid



"Birne"



"Kartoffel"



data based on satellite LAGEOS,
GRACE and GOCE and surface
data (airborne gravimetry and
satellite altimetry)
<http://www.gfz-potsdam.de>

Gravimetric

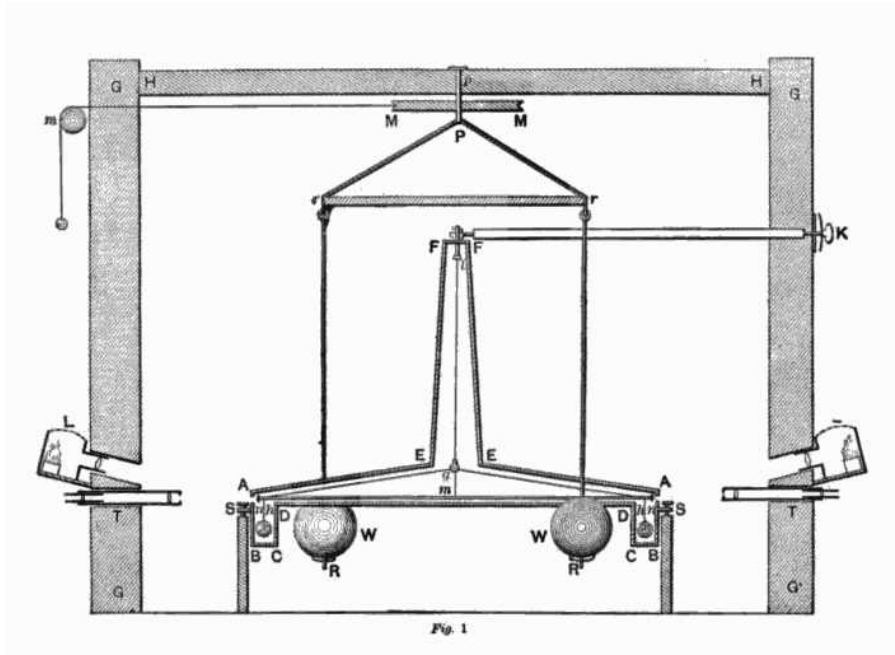
Gravitationskonstante

Gravitationsgesetz $F = \frac{Gm_1m_2}{r^2}$

Gravitationskonstante:

$$G = (6.67428 \pm 0.00067) \cdot 10^{-11} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}\text{s}^{-2}$$

Henry Cavendish (1731-1810)
fand 1798 mit Torsionswaage:
 $G = 6.754 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3\text{kg}^{-1}\text{s}^{-2}$



Messung der Erdbeschleunigung

Gewichtsmessung:

$$F = mg$$

m: Masse

Gravitationsgesetz:

$$F = \frac{GMm}{r^2}$$

$$mg = \frac{GMm}{r^2}$$

$$G = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$$

$$M = 5.97 \cdot 10^{24} \text{ kg}$$

$$r = 6.37 \cdot 10^6 \text{ m}$$

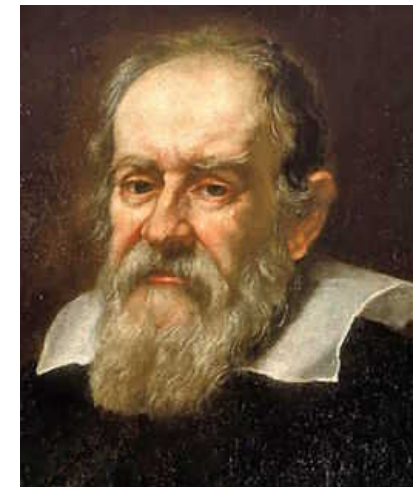
$$\Rightarrow g = \frac{GM}{r^2} \approx 9.81 \text{ ms}^{-2}$$

Einheiten der Erdschwerebeschleunigung g :

$$1 \text{ g} = 9,81 \text{ ms}^{-2} = 981 \text{ Gal} = 981'000 \text{ mGal}$$

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cms}^{-2} = 10^{-2} \text{ ms}^{-2}$$

$$1 \text{ mGal} = 10^{-5} \text{ ms}^{-2}$$



Galileo Galilei (1564-1641)

Erdbeschleunigung

g auf der Kugel

$$g = \frac{GM}{r^2}$$

g auf dem Rotationsellipsoid (Radiusänderung)

$$g_E = \frac{GM}{r^2}, \quad r = r_E \cdot (1 - f \cdot \sin^2(\lambda))$$

$$f = \frac{r_E - r_P}{r_E}$$

λ = Breite

$$f = (6378 - 6357) / 6378 \\ = 0.003292568203198$$

g auf dem rotierenden Ellipsoid (Zentripetalkraft)

$$g_{\text{rot}} = g - \omega^2 r_E \cdot \cos^2(\lambda)$$

ω = Winkelgeschwindigkeit

Schweremessung

An einem Messpunkt ist der Wert der Erdbeschleunigung zusammengesetzt aus

(a) zeitlich unveränderten Anteilen:

- Normalschwere
- Stationshöhe (Freiluftwirkung)
- Gesteinsdichte (Bouguer Platte)
- Topographieeinfluss

(b) zeitlich veränderlichem Anteil:

- Gezeiten

$$g = g_{\text{normal}} + C_F + C_B + C_T + C_{\text{tide}}$$

wird gelegentlich so geschrieben

$$g = g_{\text{normal}} + \delta g_F + \delta g_B + \delta g_T + \delta g_{\text{tide}}$$

Korrekturen

Normalschwere und Gezeiten-Korrektur:

Normalschwere durch **Erdanziehung** und **Fliehkraft**

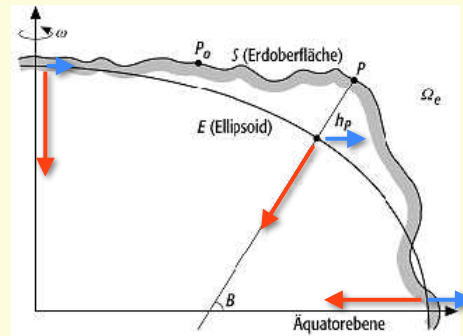
$$g_{\text{normal}} = g_E \cdot (1 + \alpha \cdot \sin^2 \lambda + \beta \cdot \sin^2 2\lambda)$$

λ geografische Breite

α, β Parameter

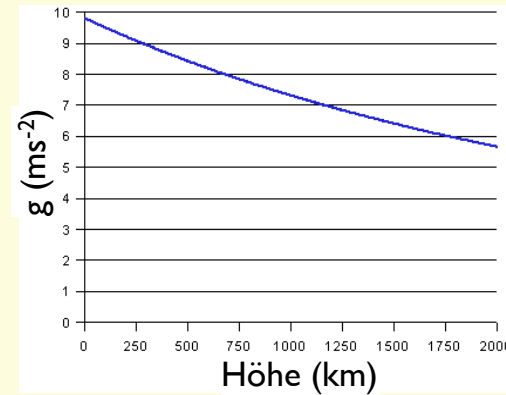
Gezeitenkorrektur

C_{tide} wird nachgeschlagen



Freiluft-Korrektur C_F :

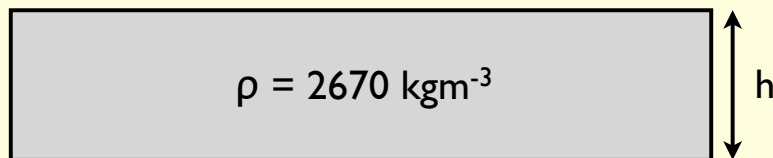
+ 0.3086 mGal/m (Äquator)



$$\delta g_F = 2h/R \cdot g_E$$

Bouguerplatten-Korrektur C_B :

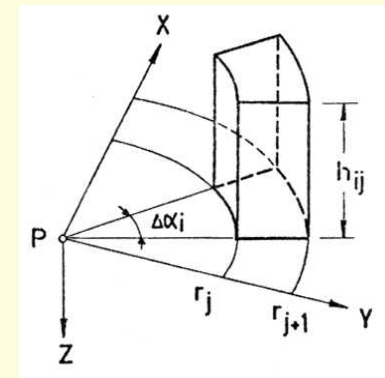
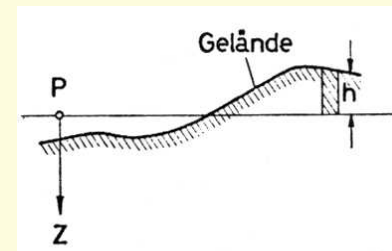
- 0.1119 mGal/m



$$\delta g_B = 2\pi \cdot G \cdot \rho \cdot h$$

Topographische Korrektur C_T :

Kreissektoren
Geländemodell



Freiluftkorrektur

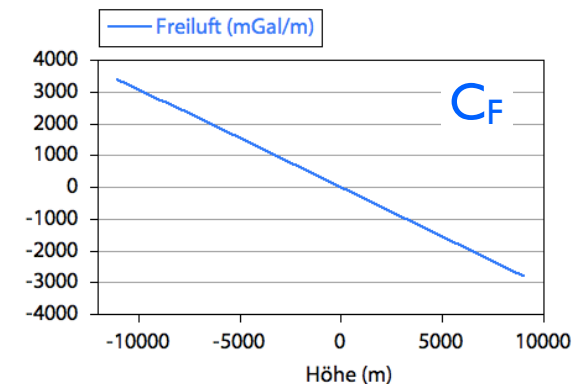
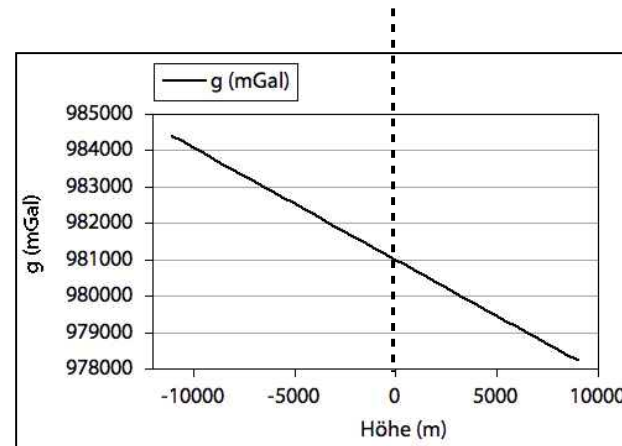
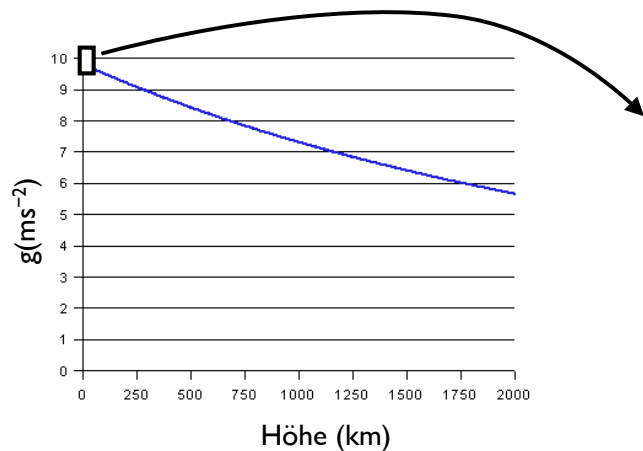
Liegt ein Messpunkt über dem Referenzellipsoid (Meeresspiegel), ist eine geringere Erdanziehung zu erwarten.

Mit der Freiluftkorrektur (C_F) berechnet man für eine gegebene Höhe die theoretisch richtige Erdanziehung.

$$g_{\text{Freiluft-korrigiert}} = g_{\text{normal}} + C_F$$

$$g_{\text{Freiluft-korrigiert}} = 981000 \text{ mGal} - 0.3086 \text{ mGal/m}$$

$$g_{\text{normal}} = 981000 \text{ mGal} = 1 \text{ g}$$



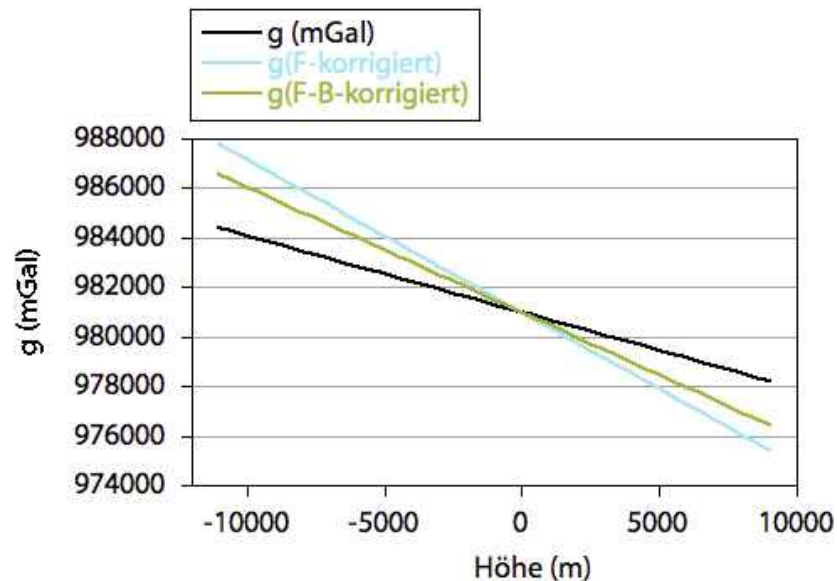
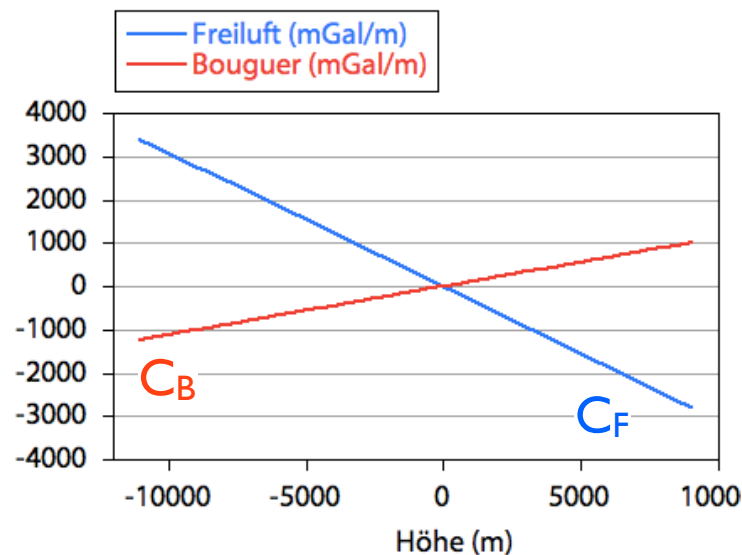
Bouguer - Korrektur

Nach der Freiluftkorrektur berechnet man die Bouguer-Korrektur (C_B), zusätzliche Erdanziehung, welche durch die sogenannte Bouguerplatte auf den Messpunkt wirkt.

Die Dicke der Bouguerplatte entspricht der Höhenlage der Erdoberfläche über (bzw. unter) dem Referenzellipsoid

$$g_{\text{Bouguer-korrigiert}} = g_{\text{normal}} + C_F + C_B$$

$$g_{\text{Bouguer-korrigiert}} = 981000 \text{ mGal} - 0.3086 \text{ mGal/m} + 0.1119 \text{ mGal/m}$$



Schwere-Anomalien

Schwereanomalien

theoretischer Wert g

$$g = g_{\text{normal}} + C_F + C_B + C_T$$

(C_{tide} in g_{normal} eingeschlossen)

Freiluft-Anomalie Normalschwere

$$\Delta g_F = g_{\text{obs}} - (g_{\text{normal}} + C_F)$$

$$\Delta g_F = 0$$

⇒ isostatisches Gleichgewicht

Bouguer-Anomalie Δg_B

$$\Delta g_B = \Delta g_F - (C_B + C_T)$$

$$\Delta g_B \neq 0$$

⇒ lokale Dichtevariation

$$\Delta g_B = g_{\text{obs}} - (g_{\text{normal}} + C_F) - (C_B + C_T)$$

(topographische Korrektur C_T wird manchmal weggelassen)

Freiluft - Anomalie

Freiluft-Anomalie $\Delta g_F = g_{\text{obs}} - (g_{\text{normal}} + C_F)$

$\Delta g_F = 0$ beobachteter Wert = korrigierte Normalschwere

Im Kontinentalbereich erklärt man:

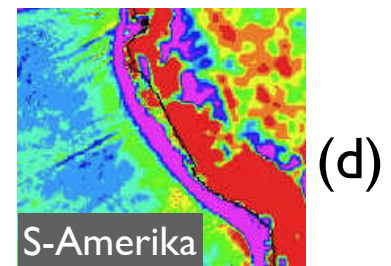
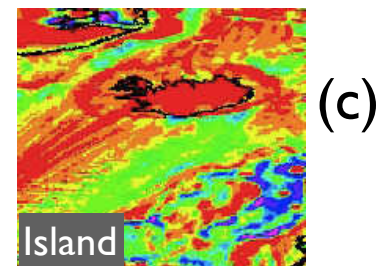
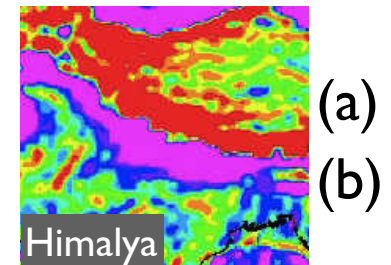
$\Delta g_F > 0$ (= typisch) durch die zusätzliche Gesteinsmasse / Krustenverdickung unter dem Messpunkt (a)

$\Delta g_F < 0$ durch sehr geringe Dichte der Gesteinsmasse unter dem Messpunkt (b)

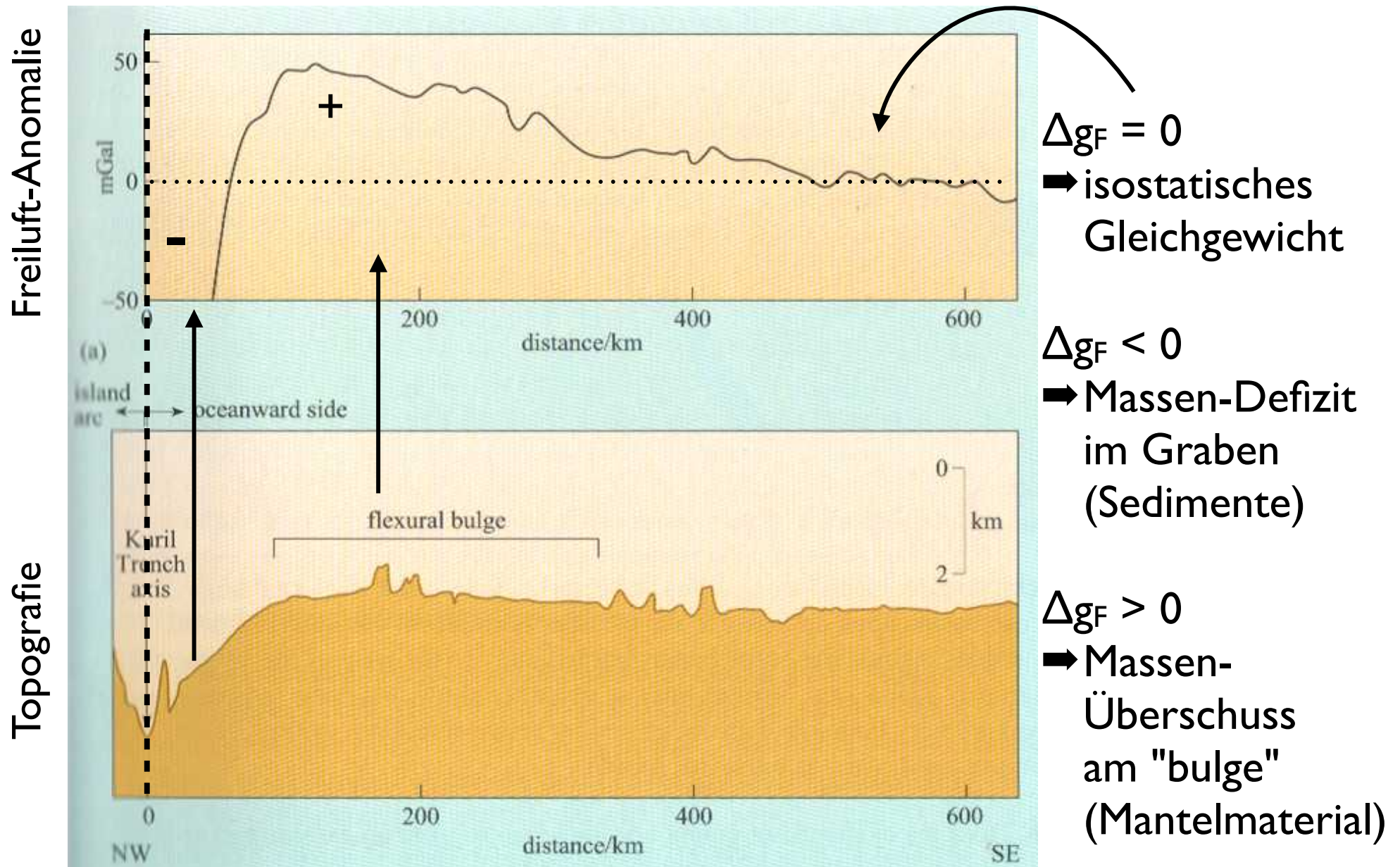
Im Ozeanbereich erklärt man:

$\Delta g_F > 0$ durch oberflächennahes, dichtes (Mantel-) material (c)

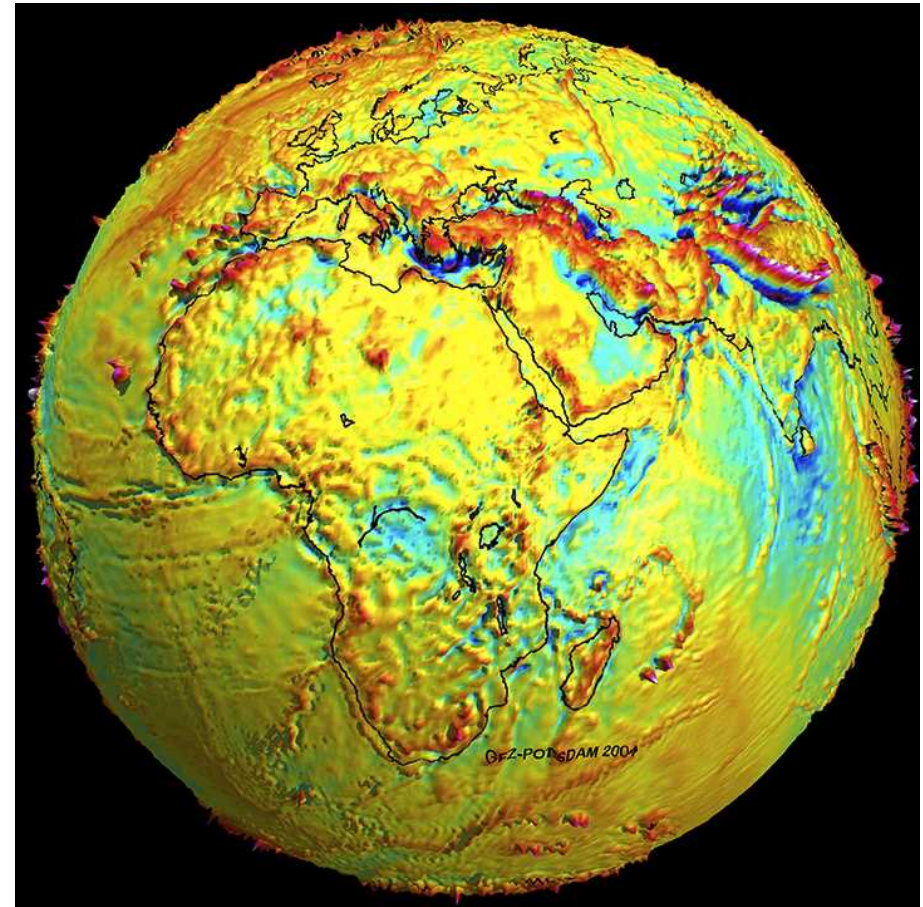
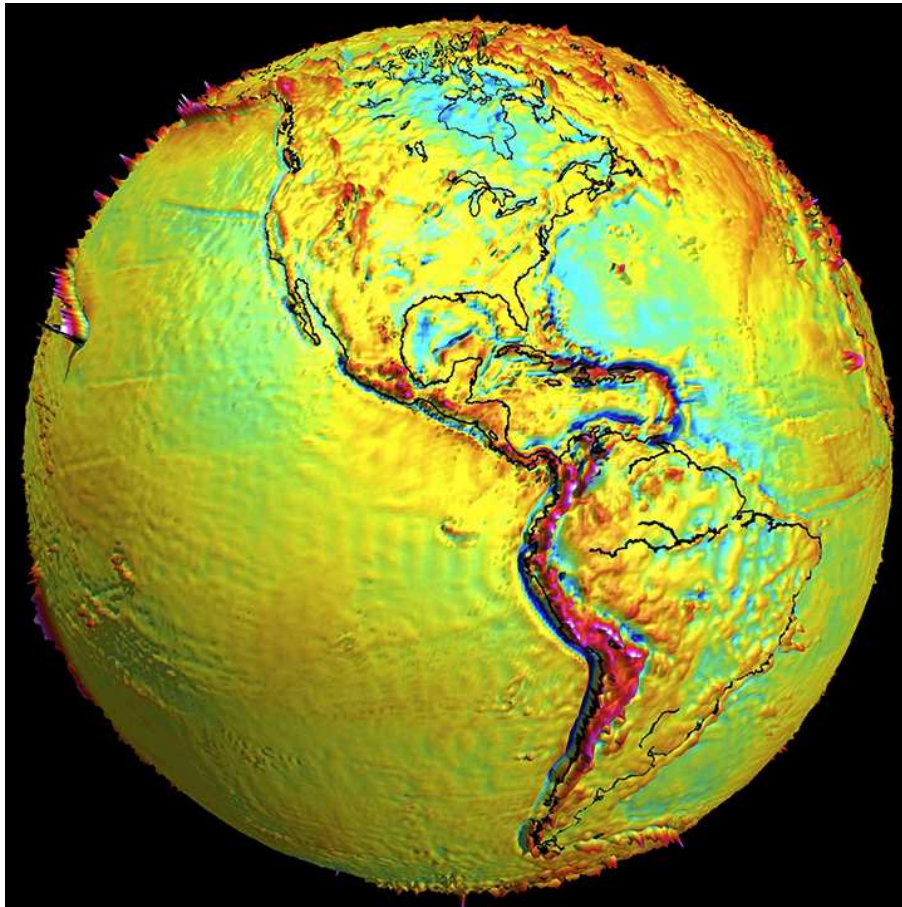
$\Delta g_F < 0$ (= typisch) durch die fehlende Anziehung durch das Wasser, vor allem bei grosser Wassertiefe (d)



Freiluft-Anomalie \Rightarrow Isostasie



Satellitenbeobachtungen (= Freiluft-A.)



Freiluft-Anomalie:

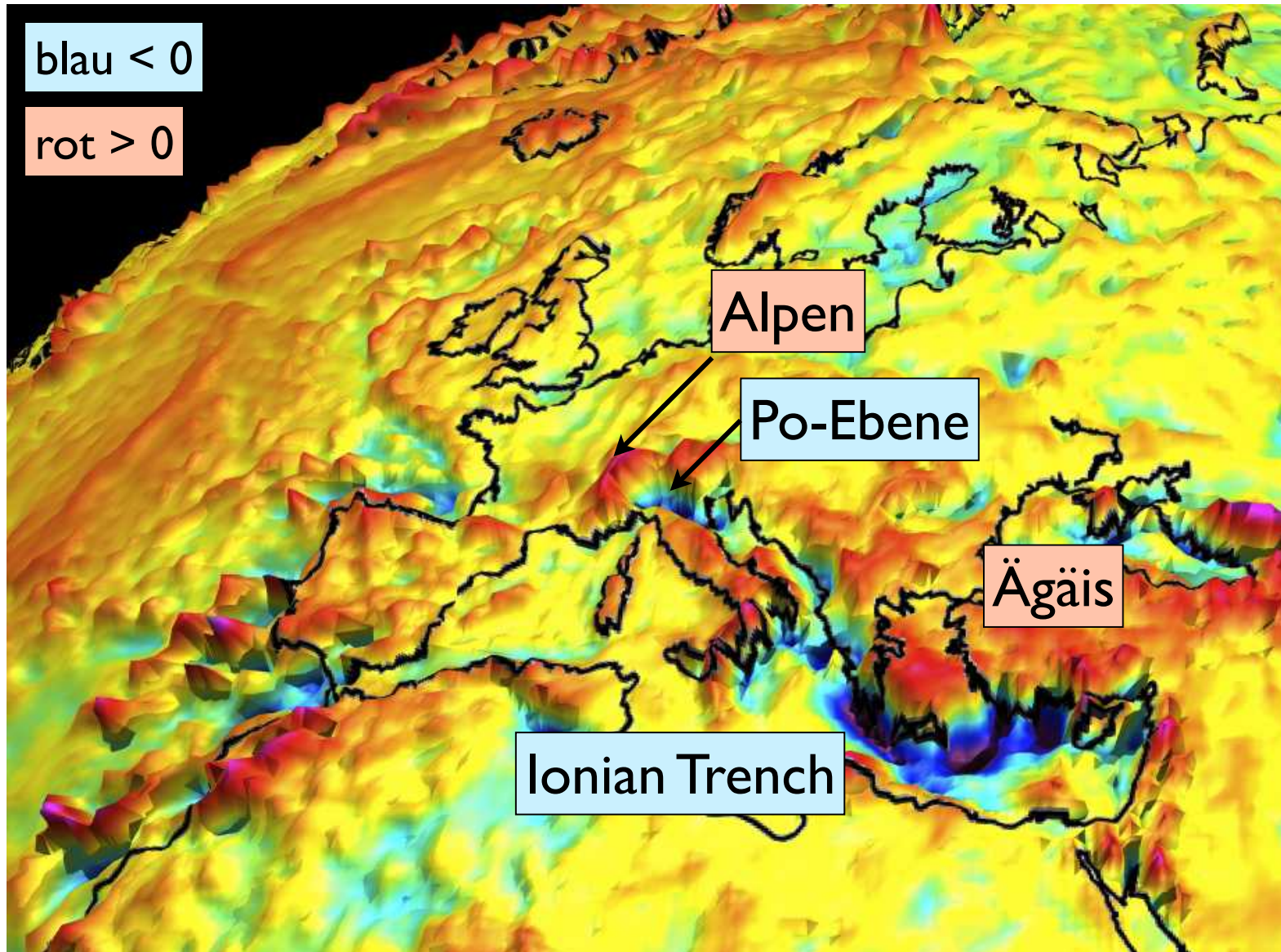
gelb = 0 (Gleichgewicht)

blau < 0 (Graben)

rot > 0 (Gebirge)

GRACE Gravity Recovery and Climate Experiment
CHAMP CHALLENGING Minisatellite Payload

Freiluft-Anomalie Europa



Bouguer- Anomalie

Bouguer-Anomalie $\Delta g_B = g_{\text{obs}} - (g_{\text{normal}} + C_{g_F} + C_{g_B})$

$\Delta g_B = 0$ beobachteter Wert = korrigierte Normalschwere

Im Kontinentalbereich erklärt man:

$\Delta g_B > 0$ durch besonders dichte Gesteinsmassen unter dem Messpunkt

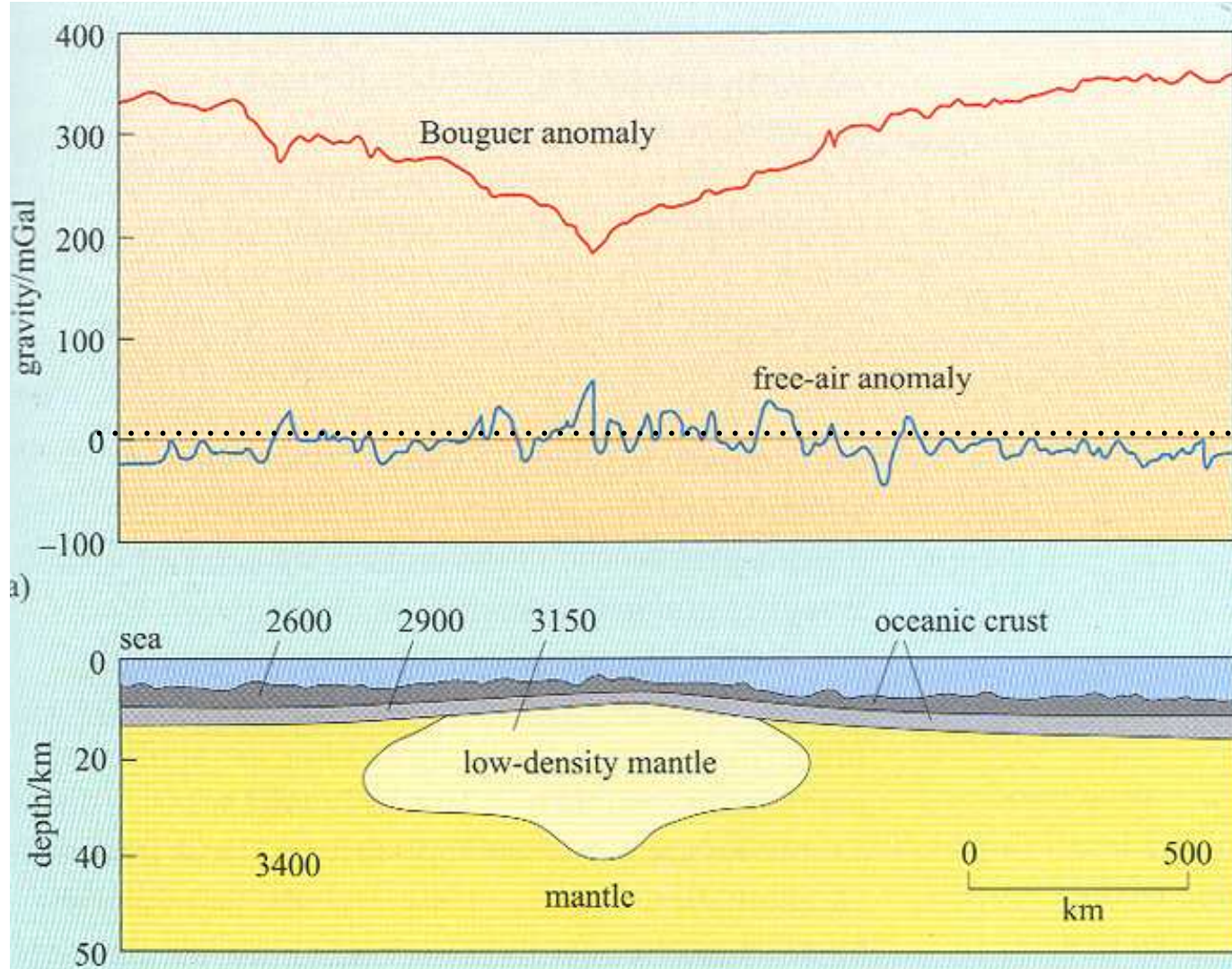
$\Delta g_B < 0$ (= typisch) durch eine geringe Dichte der Gesteinsmasse unter dem Messpunkt, z.B. Gebirgswurzel

Im Ozeanbereich erklärt man:

$\Delta g_B > 0$ (= typisch, = Artefakt) Dichtedefizit des Wasser
 Δg_B - Absenkung durch tiefe Tröge mit leichtem Sedimentmaterial, z.B. Subduktionszonen

Bouguer Anomalie \Rightarrow Dichte

Freiluft-A. Bouguer-A.
Topografie

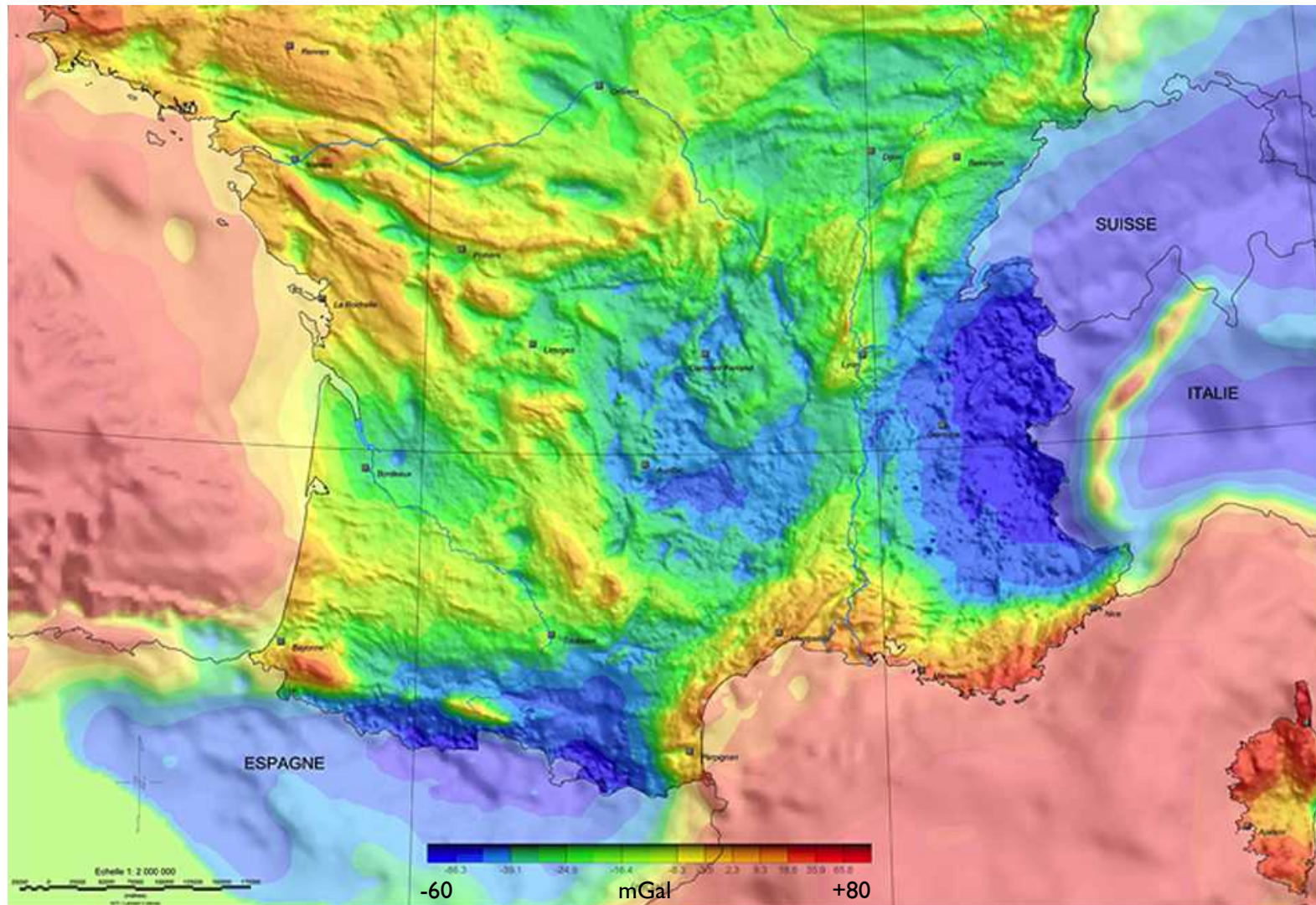


Δg_B abgesenkt
➔ Dichte-Defizit
am spreading
center

$\Delta g_F = 0$
➔ isostatisches
Gleichgewicht

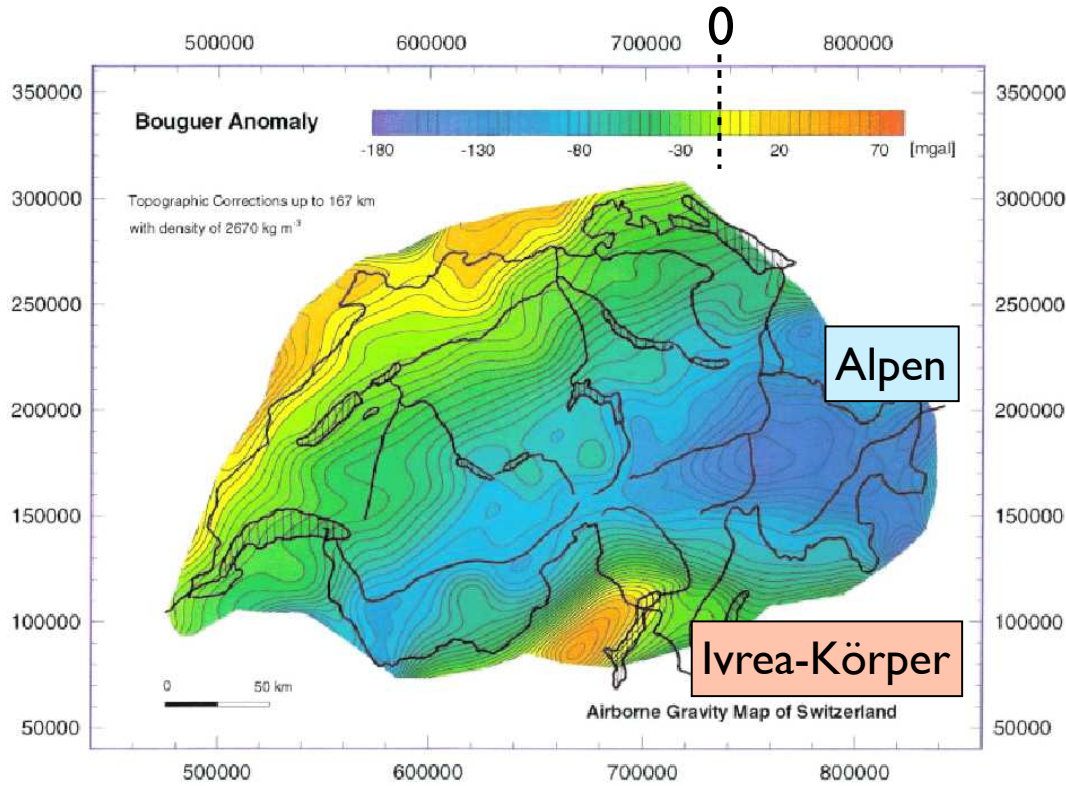
Erklärung:
heisses Mantel-
Material

Bouguer - Anomalie

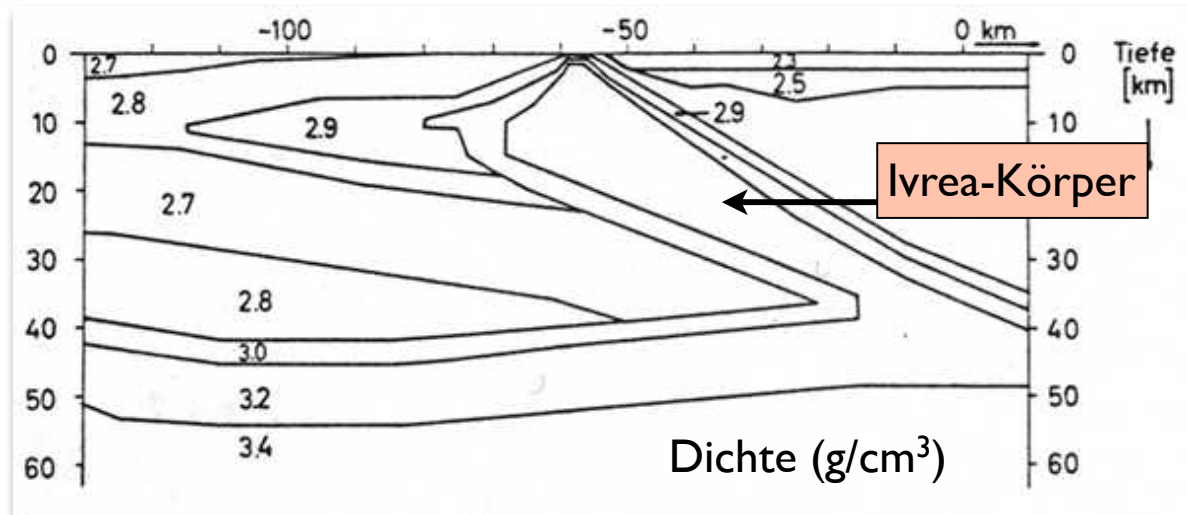


Bouguer - Anomalie

Westalpen



Bouguer Karte Schweiz (swiss topo)



10 Duktile Verformung

Spröd-Duktil Übergang

- im Feld
- im Experiment
- in der Theorie

Visköses Fließen

- Kristallplastizität
- Versetzungen (Dislokationen)

Fliessgesetze

- Deformation mechanism maps
- Rheologisches Profil der Lithosphäre

Spröd-duktil
Übergang

Spröd versus duktil

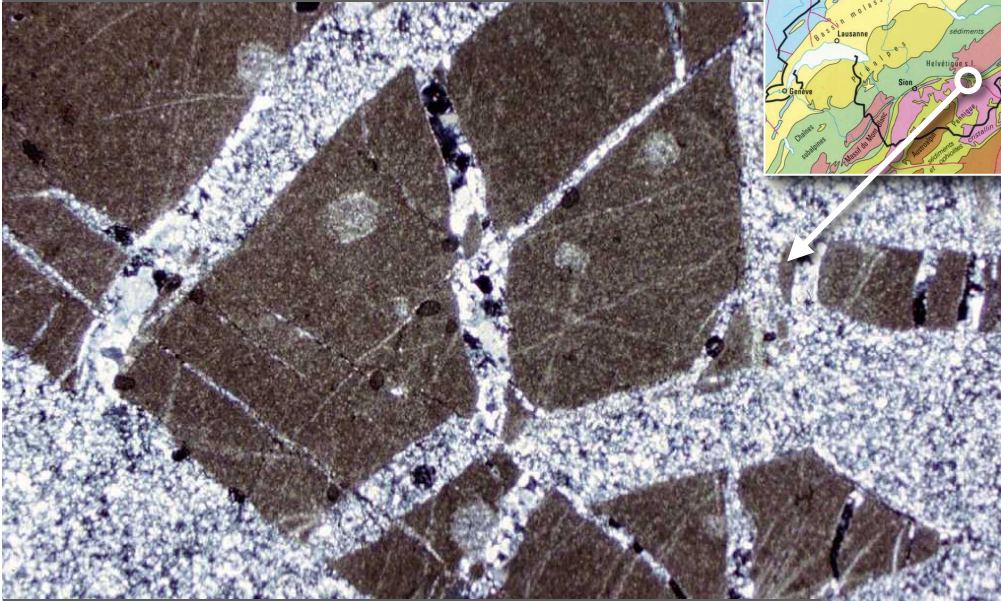
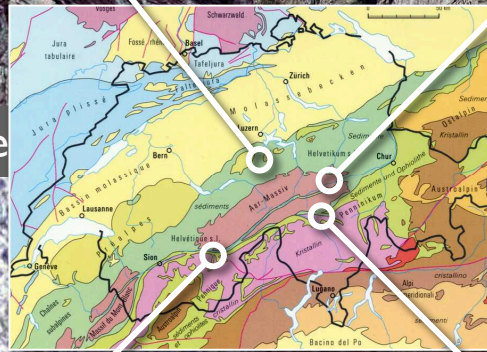
Pfiffner et al. 2012



Abschiebungen - Achsendecke, Quintner



Grossfalte - Windgälle, Quintnerkalk



Dolomitbrekzie - Lötchbergtunnel, Trias



Falten - bei Brigels, Liaskalke

Spröd-duktil - Übergang

makroskopisch

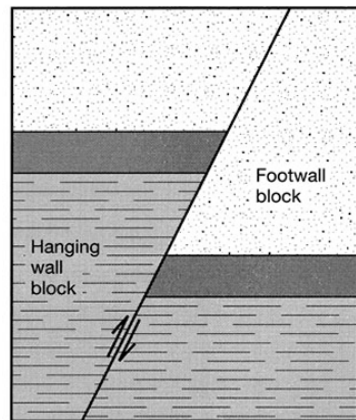


- lokalisiert - bruchhaft
 - Gesteinsmehl (fault gouge), Kataklastit Ultrakataklastit
 - ± keine Metamorphose

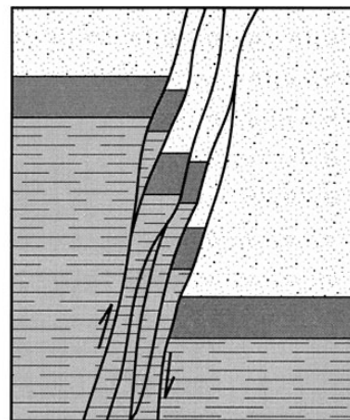
 - pervasiv - homogen
 - rekristallisiert
 - Metamorphose
- Grünschiefer (300°/5kb) - Amphibolitfacies (500°/8kb)



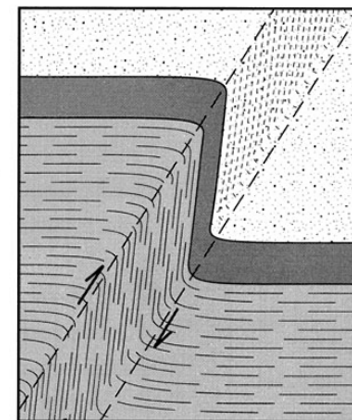
Reibungs-
kontrolliert



Bruch



Bruchzone



Duktile Scherzone

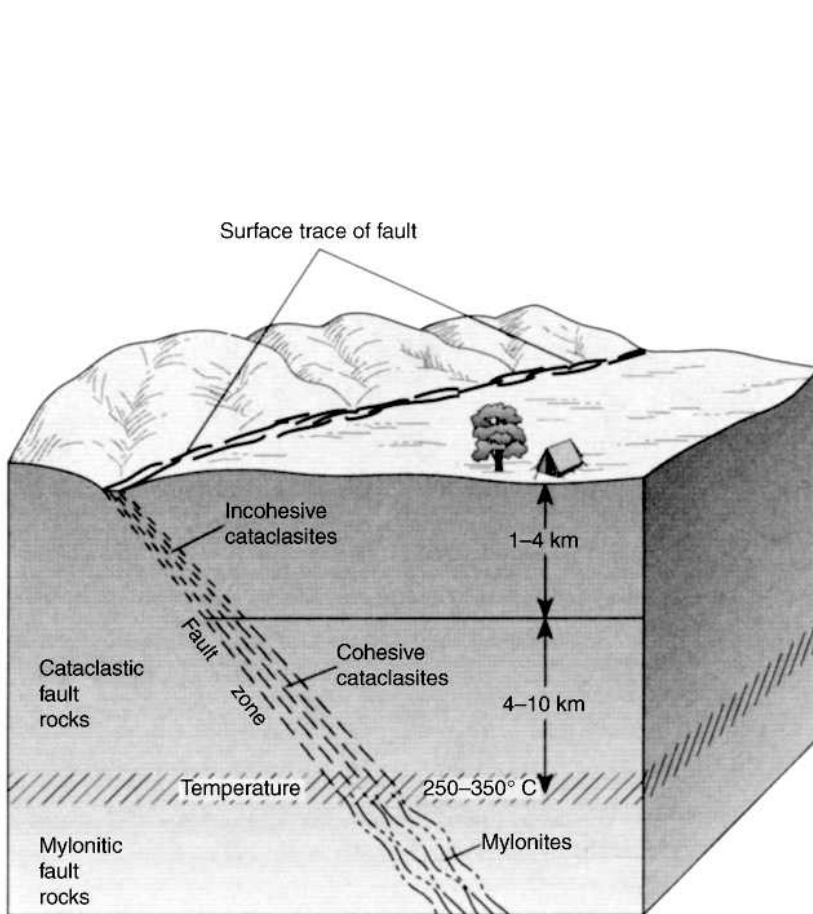
Temperatur-
kontrolliert

lokalisiert - bruchhaft

pervasiv - homogen

Spröd-duktil - Übergang

lithologisch



Kohäsionsloses Lockermaterial:

Gesteinsmehl (gouge)	feinkörnige Matrix
----------------------	--------------------

Unverfestigte Brekzie	erkennbare Klaster
-----------------------	--------------------

Festes Gestein (ohne Foliation):

Protokataklasit / Brekzie	< 50% erkennbare Klaster
---------------------------	--------------------------

Kataklasit	50-90% erkennbare Klaster
------------	---------------------------

Ultrakataklasit	> 90% Matrix
-----------------	--------------

Festes Gestein (mit Foliation):

Protomylonit	< 50% rekristallisiert
--------------	------------------------

Mylonit	50-90% rekristallisiert
---------	-------------------------

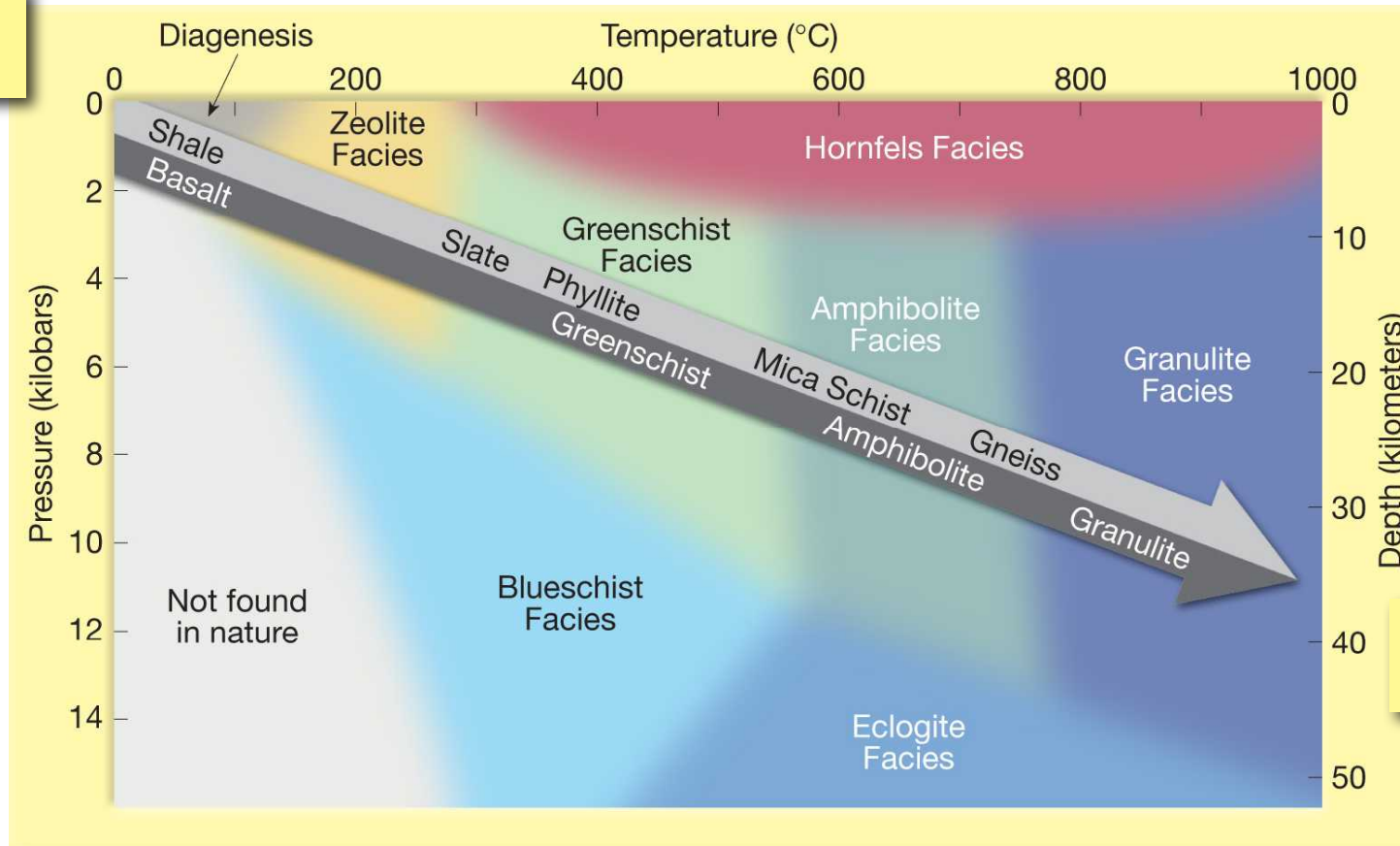
Ultramylonit	> 90% rekristallisiert
--------------	------------------------

T nimmt zu p_c nimmt zu $\dot{\epsilon}$ spröd \approx schnell / duktil \approx langsam

Spröd-duktil - Übergang

Metamorphose

spröd



duktil

SPRÖD reibungskontrolliert (p_c -abhängig) Temperatur -unabhängig
DUKTIL von Temperatur abhängig Druck (p_c) -unabhängig

Spröd-duktil - Übergang

... im Experiment



Undeformed

Low confining
pressure

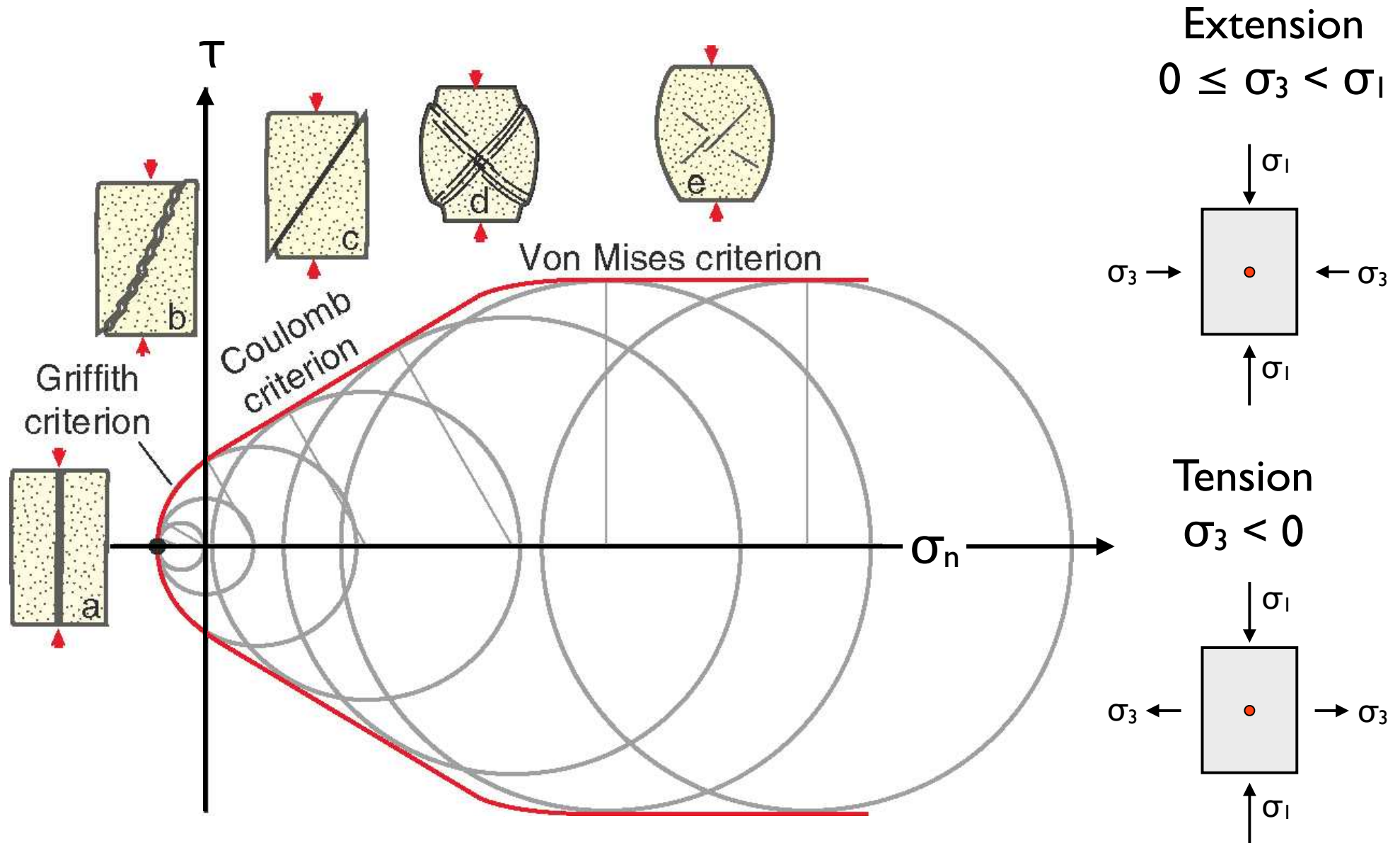
Intermediate
confining pressure

High confining
pressure

zunehmender Umschliessungsdruck
zunehmende Versenkung

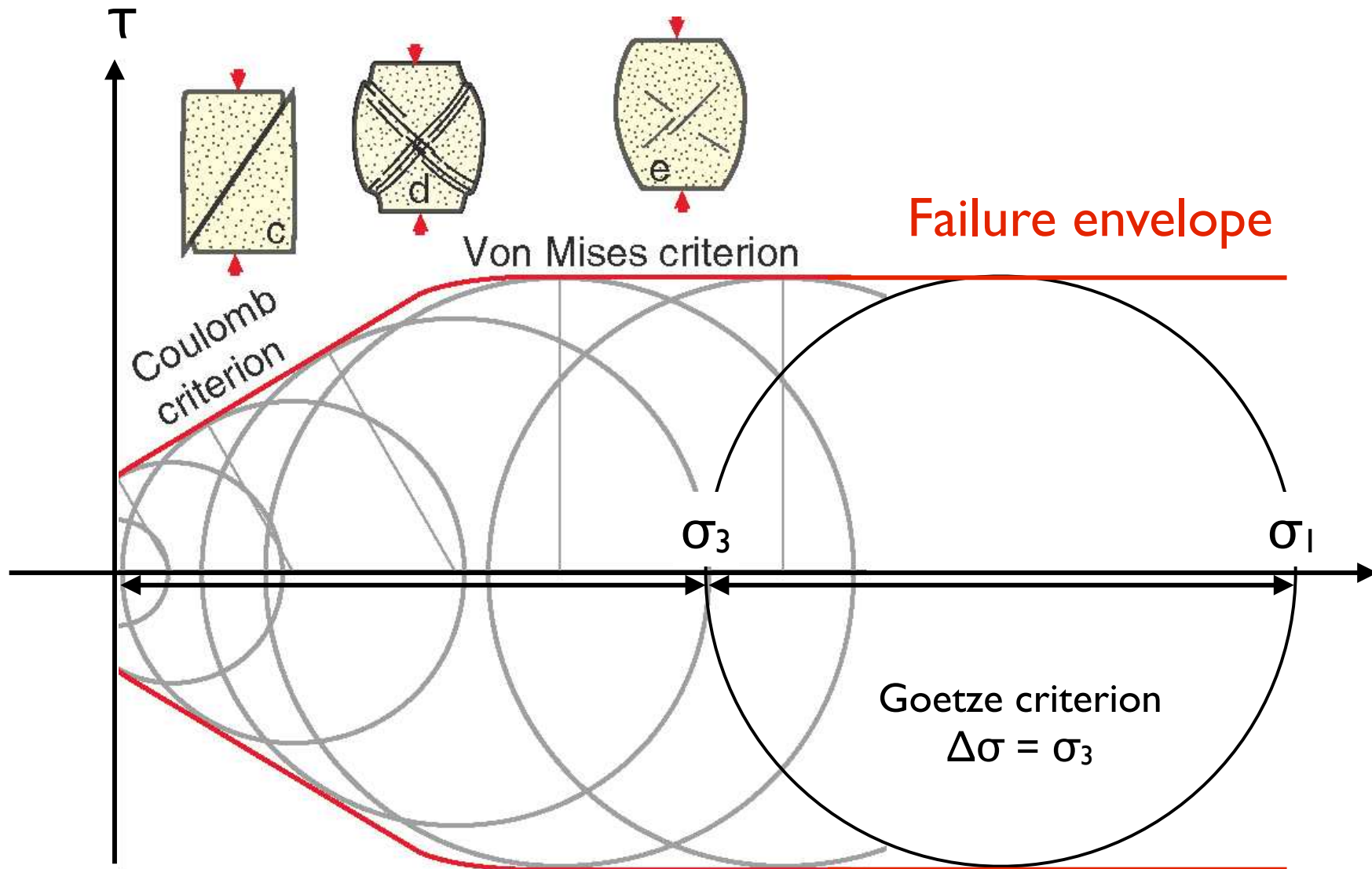
Spröd-Duktil - Übergang

... im Mohr Kreis



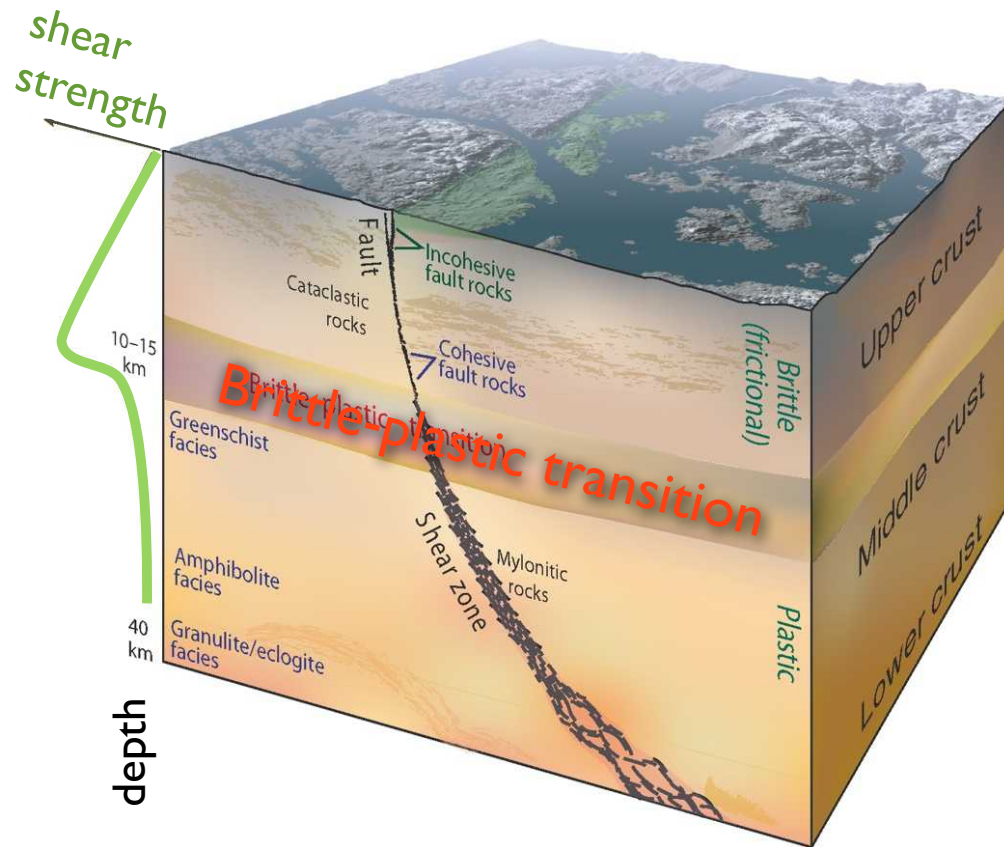
Spröd-Duktil - Übergang

... im Mohr Kreis

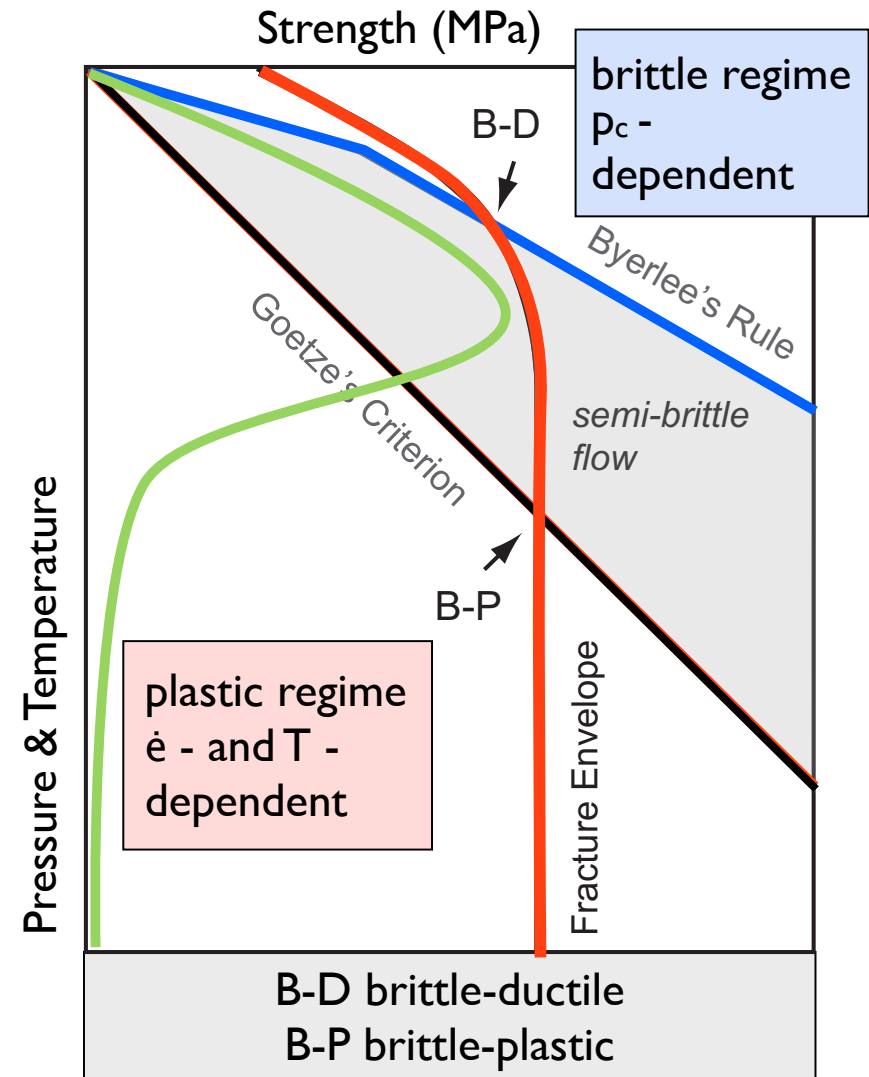


Spröd-duktil - Übergang

... als $f(p_{litho})$



Haakon Fossen: Structural Geology

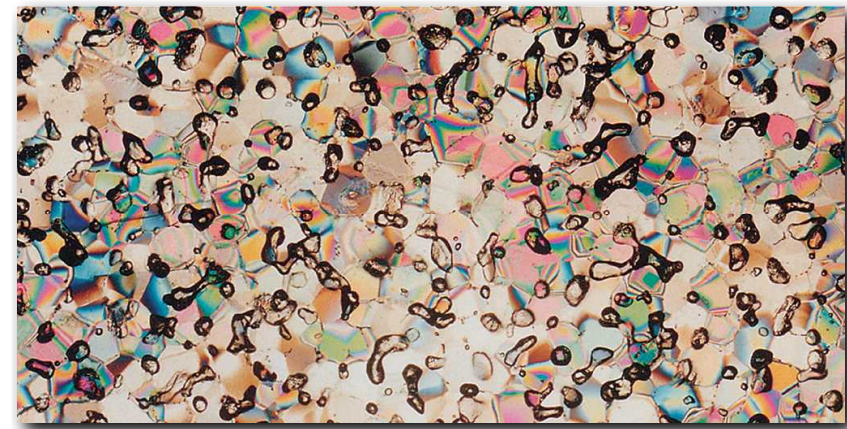
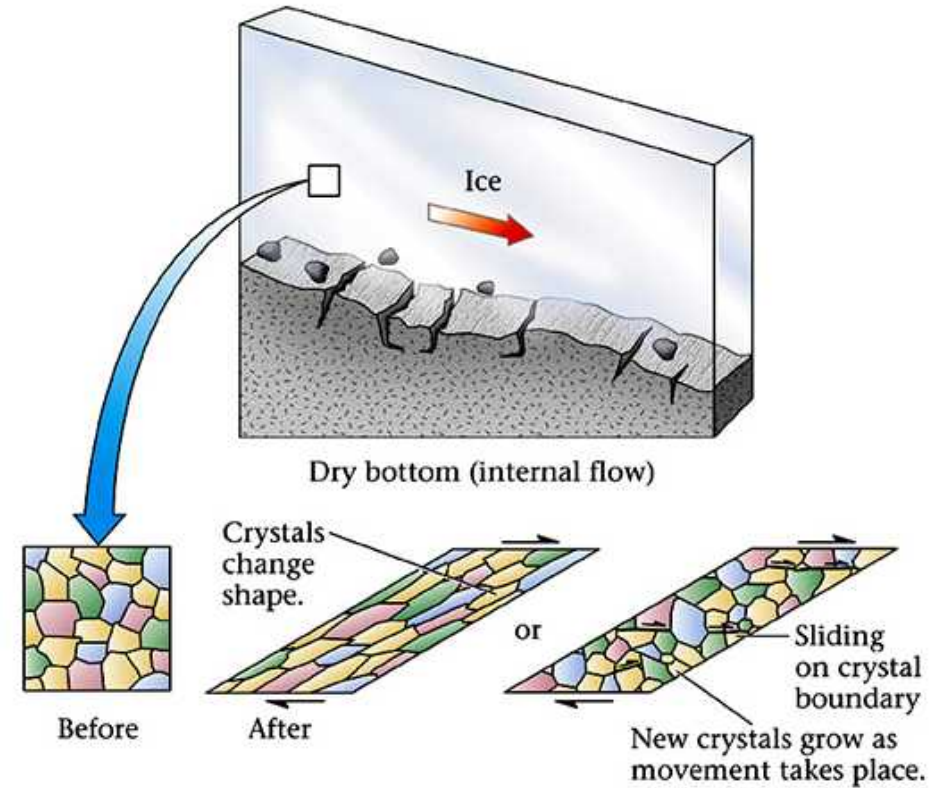
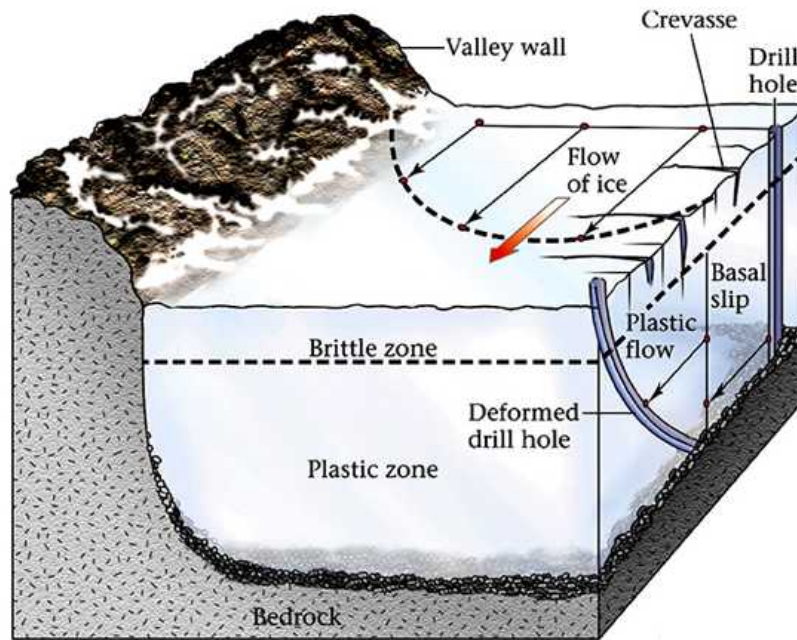


Byerlee: $\tau = 50 \text{ MPa} + 0.6 \cdot \sigma_n$

Mohr Envelope: $\tau = f(\sigma_n)$

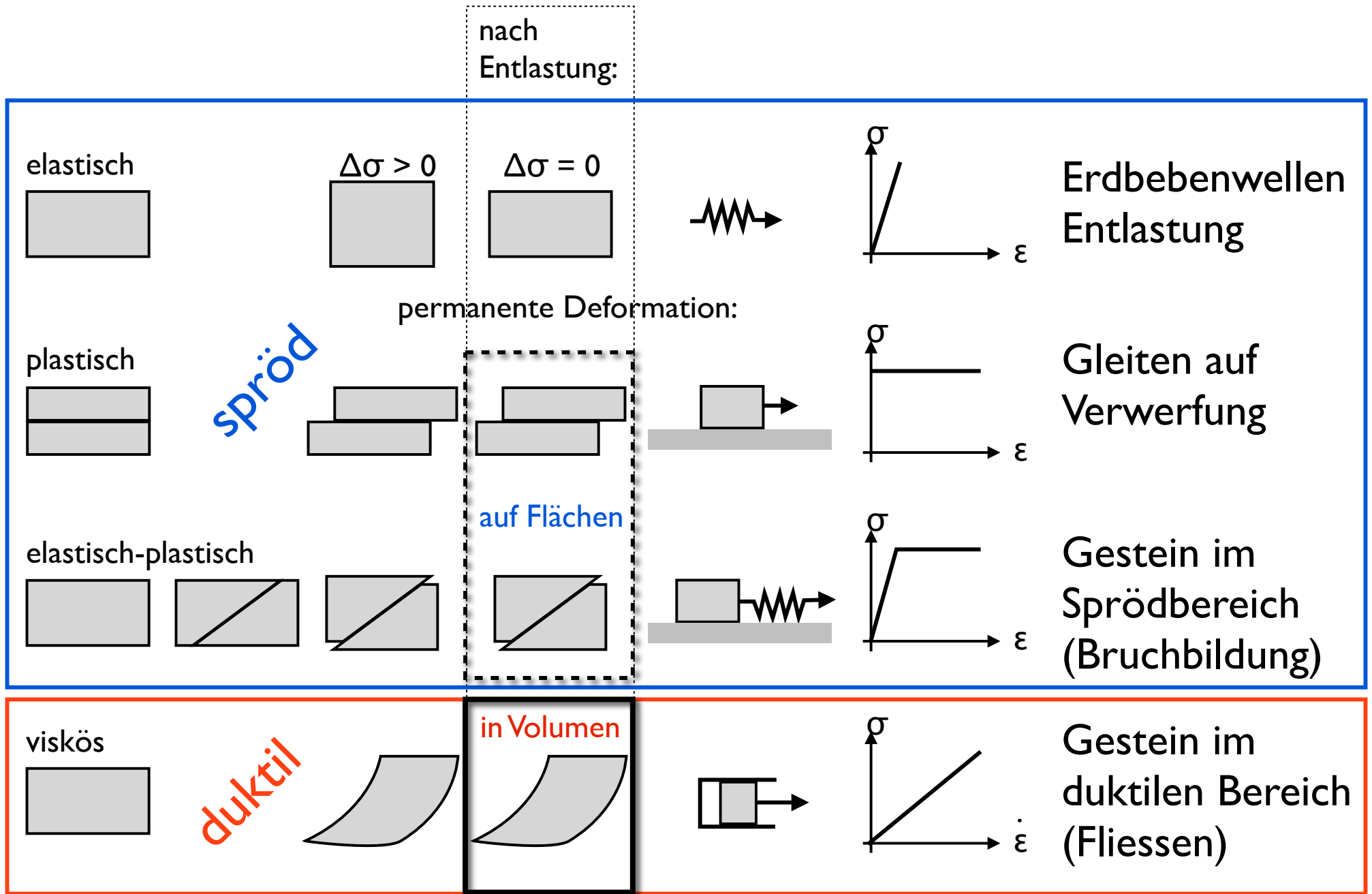
Goetze criterion: $\Delta\sigma = P_c$

Spröd-duktil - Übergang in Eis



Visköses Fließen

Mechanische Modelle



Permanente Deformation

Spröd

im Allgemeinen:

schnell
kalt
seicht

Charakteristisch:

- lokalisierte Verformung
- Bruchbildung
- Verlust von Kohäsion
- Spannungsabfall

hängt ab von:

p_c Umschliessungsdruck
 μ Reibungskoeffizient

hängt NICHT ab von:

T Temperatur
 $\dot{\epsilon}$ Verformungsrate

Duktil

im Allgemeinen:

langsam
heiss
tief

Charakteristisch:

- homogene Verformung
- steady state flow
- konstante Fließspannung

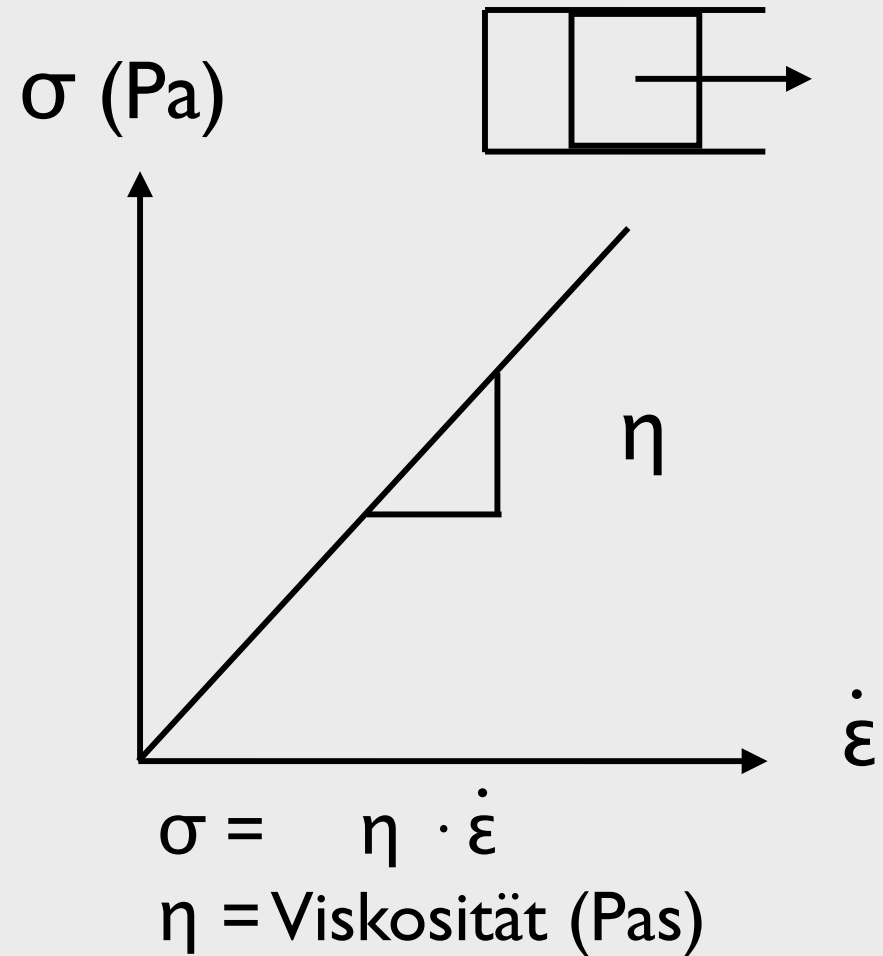
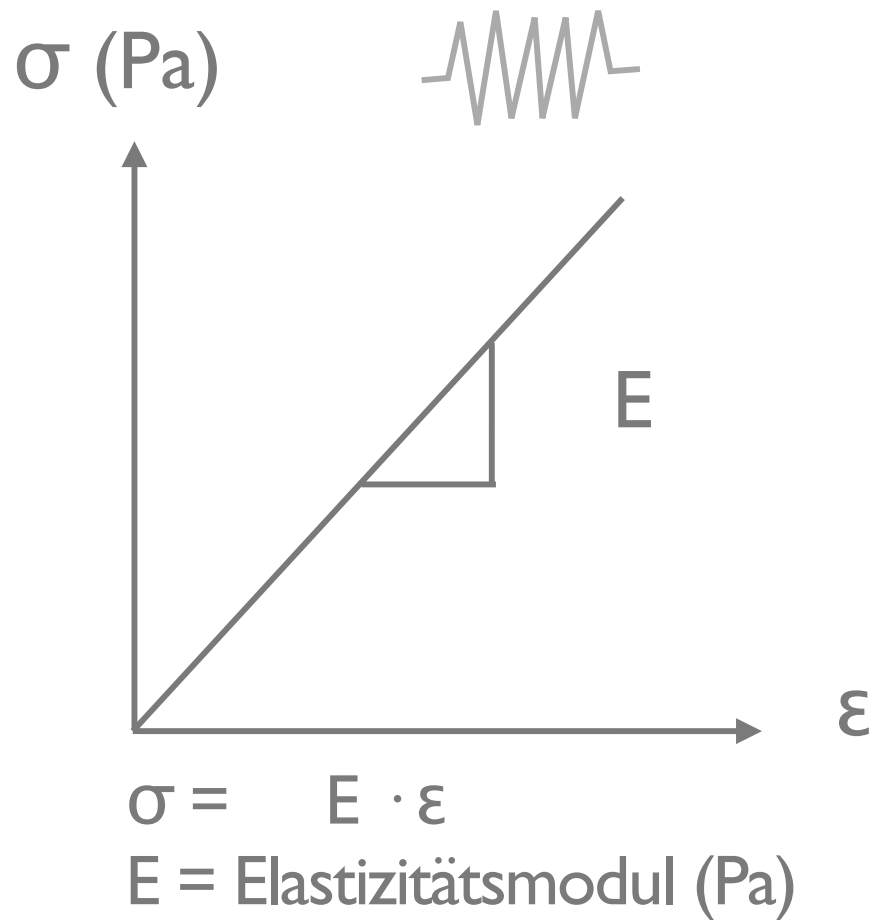
hängt ab von:

T Temperatur
 $\dot{\epsilon}$ Verformungsrate

hängt NICHT ab von:

p_c Umschliessungsdruck

Visköse Verformung



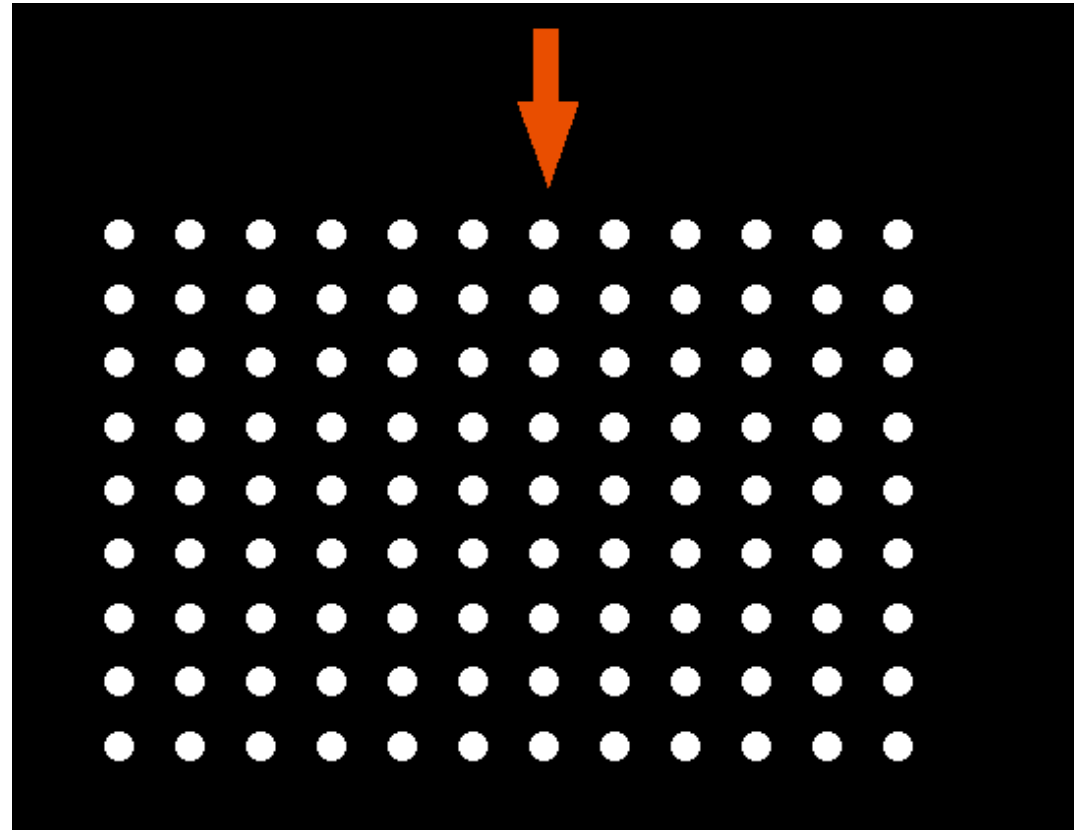
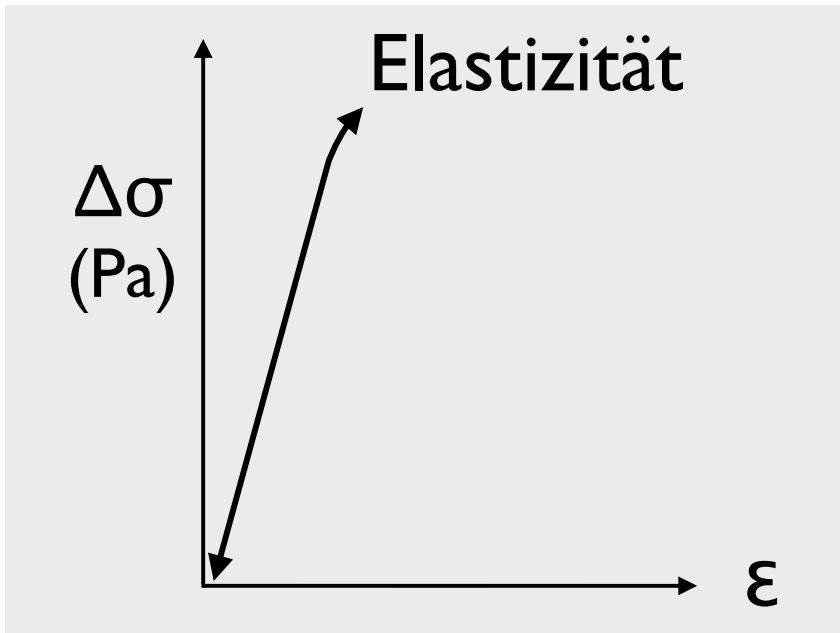
$$1 \text{ Pas} = 1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$1 \text{ Pas} = 10 \text{ Poise}$$

(after J. L. M. Poiseuille)

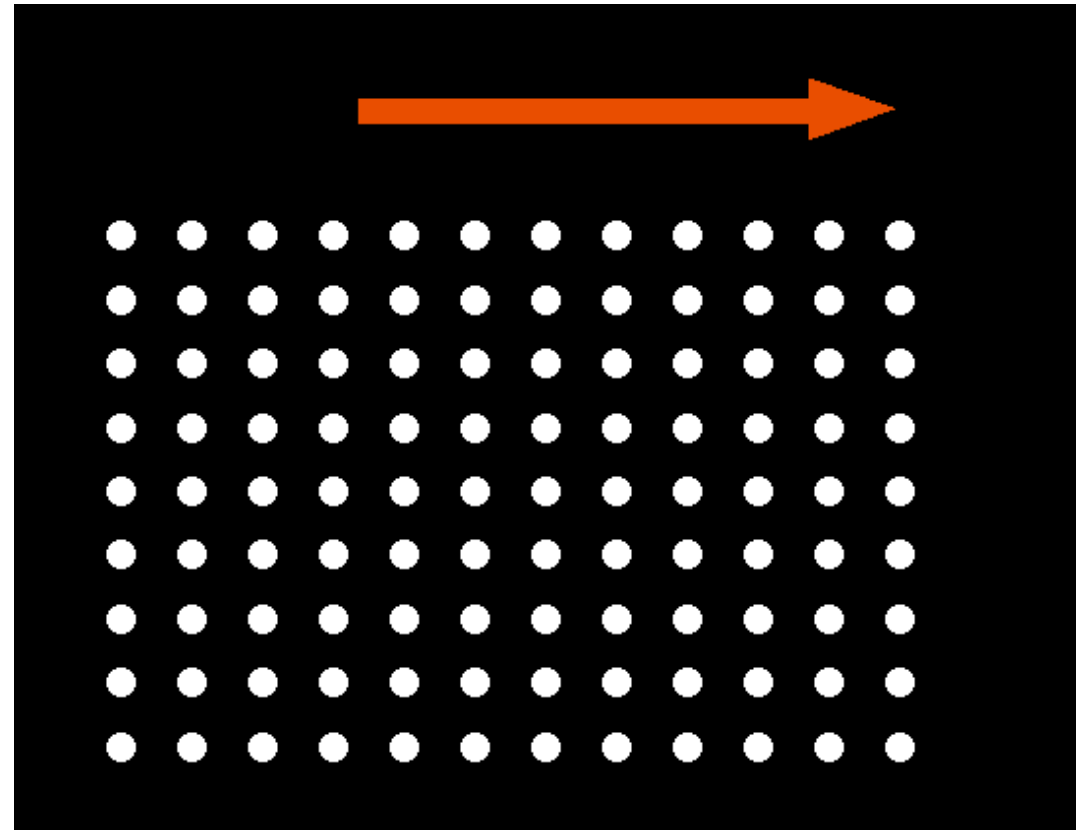
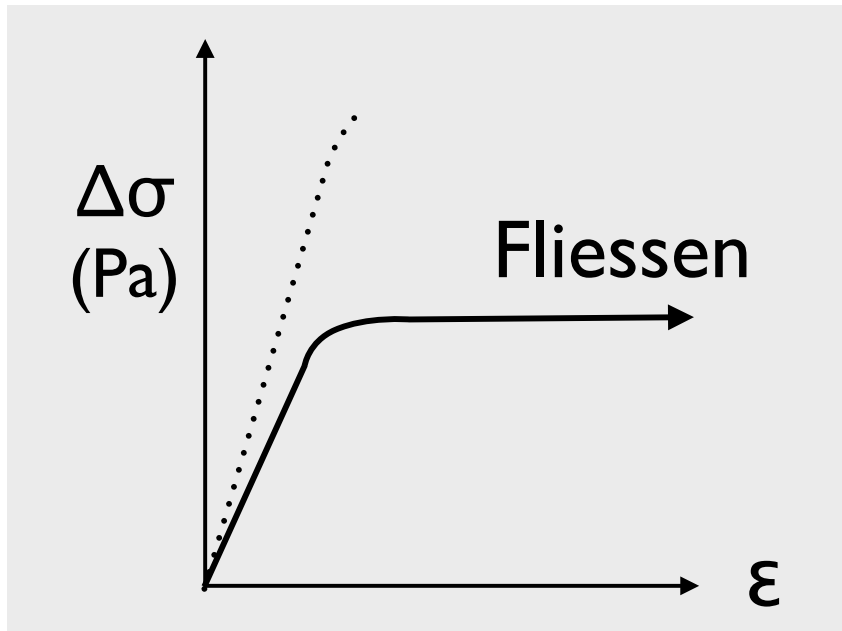
Kristallplastizität Verformungs- mechanismen

Elastische Deformation



reversible deformation

Dislokationsgleiten

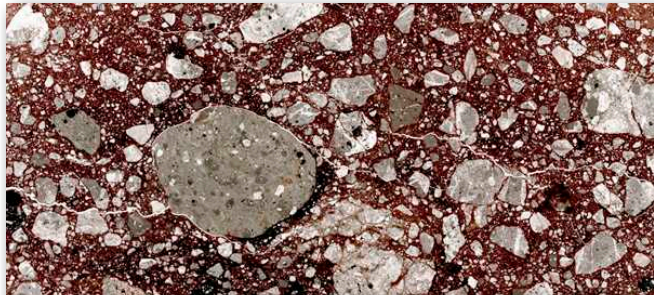


irreversible deformation

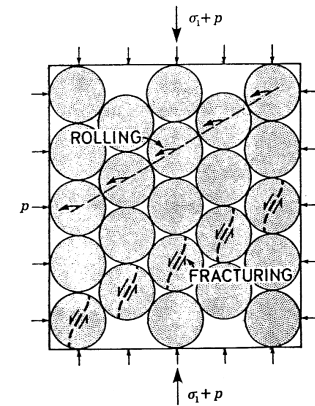
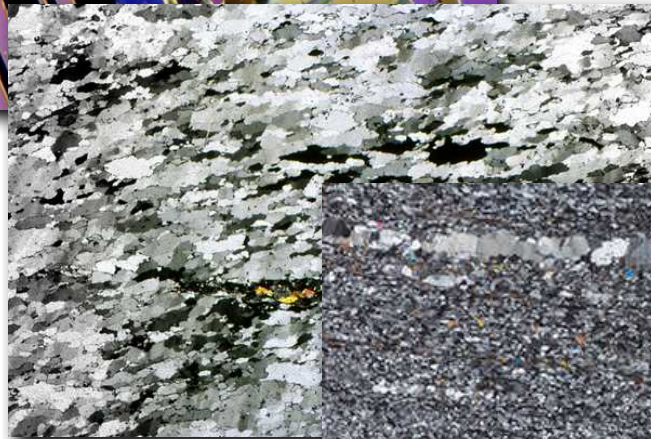
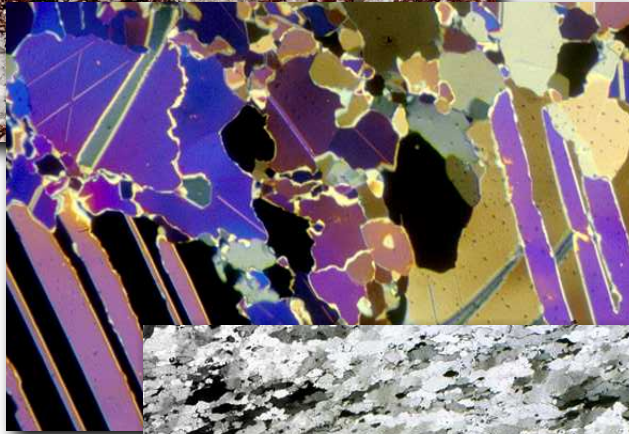
Fliessgesetze

von Verformungsmechanismen...

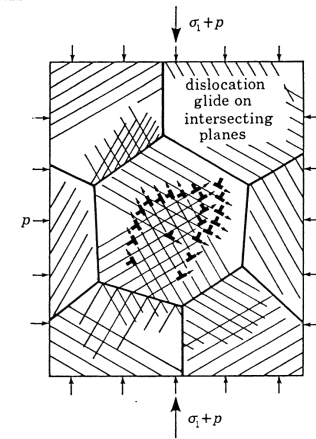
... zu mikromechanische Modellen ...



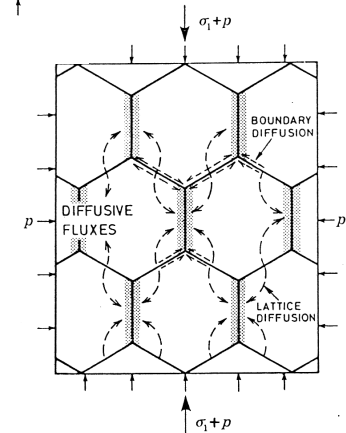
cataclastic
flow



dislocation
creep



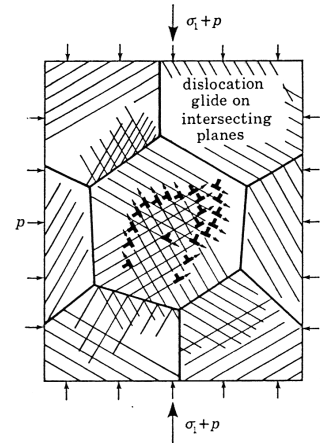
diffusion
creep



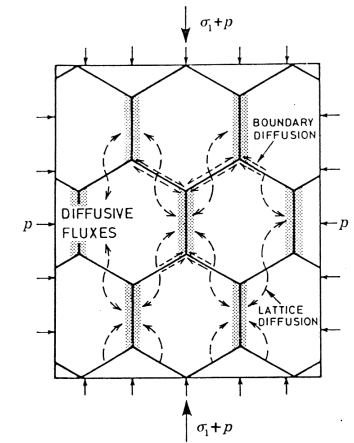
... zu Fließgesetzen

Models

1 dislocation creep



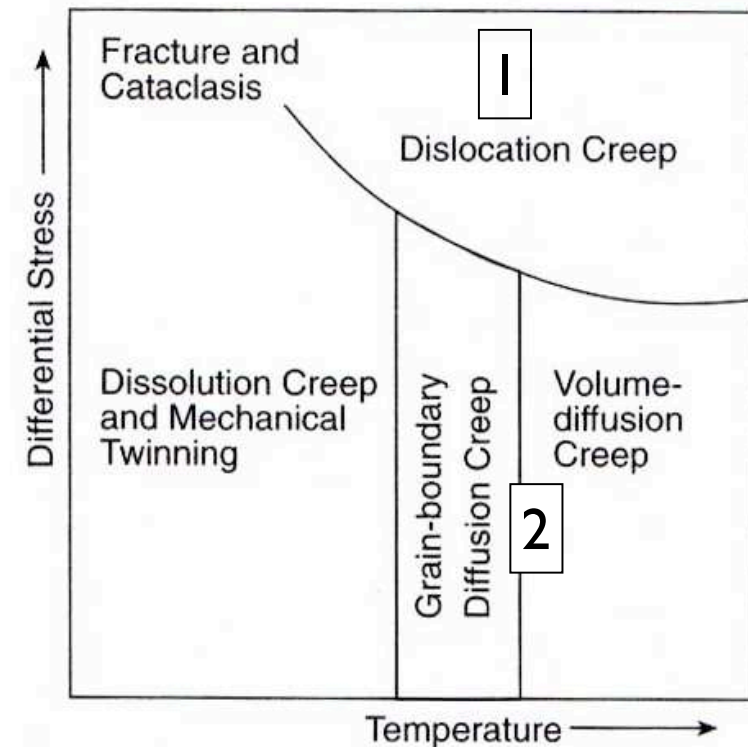
2 diffusion creep



Flow laws

dislocation creep			
$\dot{\epsilon} = A \cdot \exp(-Q / RT)$			$\cdot \sigma^n$
diffusion creep			
$\dot{\epsilon} = A \cdot \exp(-Q / RT)$		$\cdot d^m$	$\cdot \sigma^n$
strain rate	activation energy temperature	grain size	flow stress

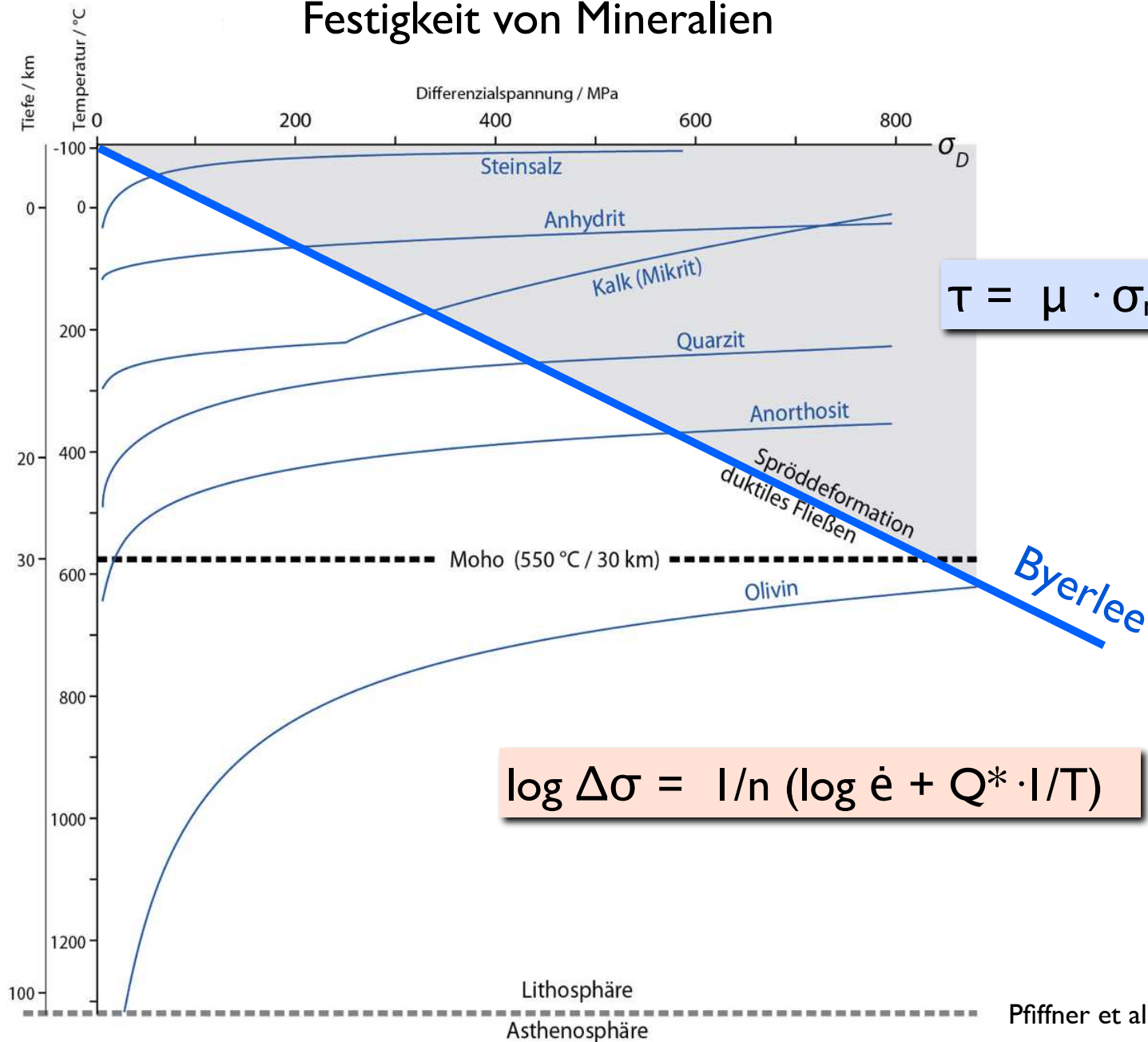
Deformation mechanism map



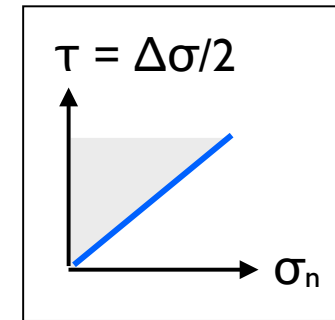
Rheologie der Lithosphäre

Materialfestigkeit (Fließfestigkeit)

Festigkeit von Mineralien

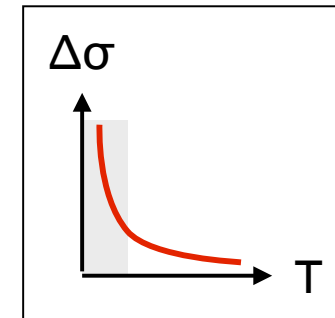


spröd



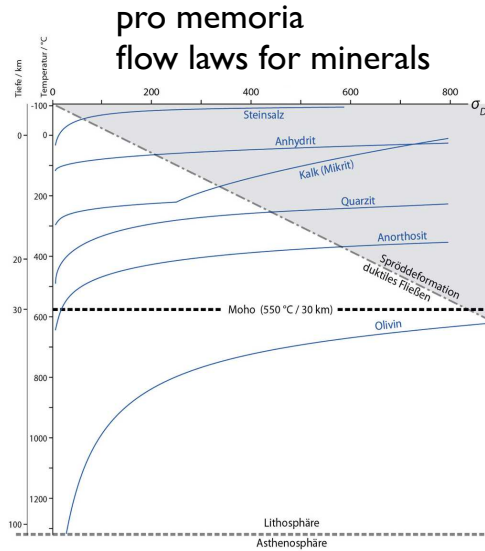
reibungskontrolliert

duktil



temperaturkontrolliert

Rheologisches Profil der Lithosphäre



... und des Mantels

