

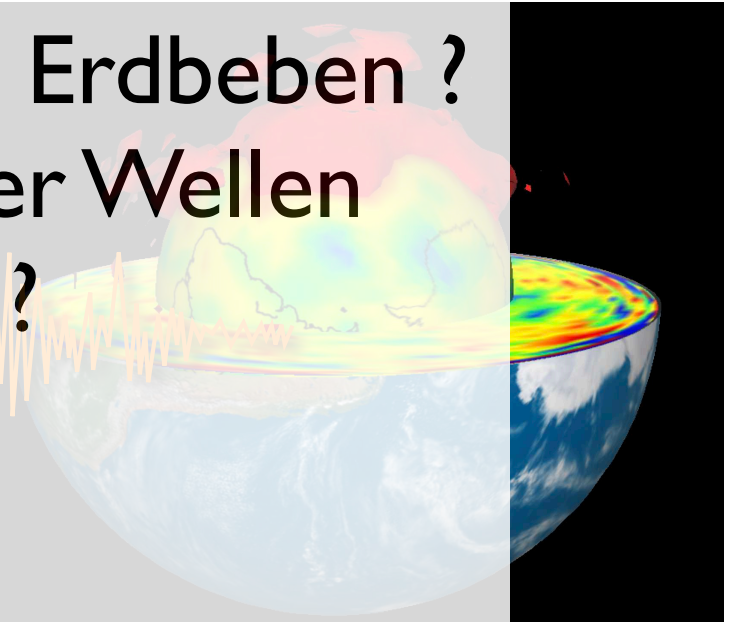
# Wellen aus der Tiefe der Erde: von Erdbeben zur seismischen Tomographie



[renee.heilbronner@unibas.ch](mailto:renee.heilbronner@unibas.ch)

# ... und wohin geht die Reise ?

1. was sind seismische Wellen ?
2. die Physik dahinter
3. wie entstehen seismische Wellen ?
4. was passiert bei einem Erdbeben ?
5. Aufzeichnung seismischer Wellen
6. wo ist das Epizentrum ?
7. die Richterskala
8. Herdflächenlösungen
9. seismische Tomographie



## Grote

- **Schallwellen**: Ton, Musik...
- **EM-Wellen**: Funk, Licht, UV, Röntgen, ...
- **Elastische Wellen**: Vibrationen, Erdbeben, ...

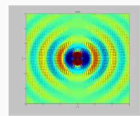
Eine **Welle** ist eine Störung, die sich ungehindert durch ein homogenes Medium ausbreitet und dabei ihre Form behält. So überträgt sie **Energie und Information**.

## Antusch

Ein Lautsprecher ändert periodisch sein Volumen. Es entstehen **Monopolwellen**.



**Elektromagnetische** Wellen entstehen durch periodische Ladungsänderungen. Die Ladungserhaltung erlaubt nur **Dipolwellen**.

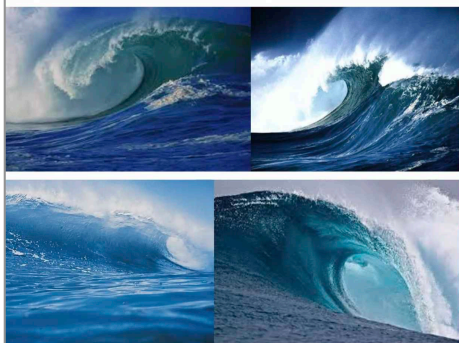


**Gravitationswellen** entstehen durch periodische Massenänderungen. Fehlende Dipole erlauben nur **Quadrupolwellen**!



## Lehman

**Wellen**: Tiefwasserwellen/Flachwasserwellen



hier unterscheiden wir

danach, wie sich Partikel im Medium bewegen

**Druckwellen (P-Wellen)**

**Scherwellen (S-Wellen)**

danach, wo sich die Wellen ausbreiten

**Körperwellen (P- und S-Wellen)\*)**

**Oberflächenwellen (Q- und R-Wellen)\*\*)**

\*) auch (Primär- und Sekundär-Wellen)

\*\*\*) auch (Love- und Raleigh-Wellen)

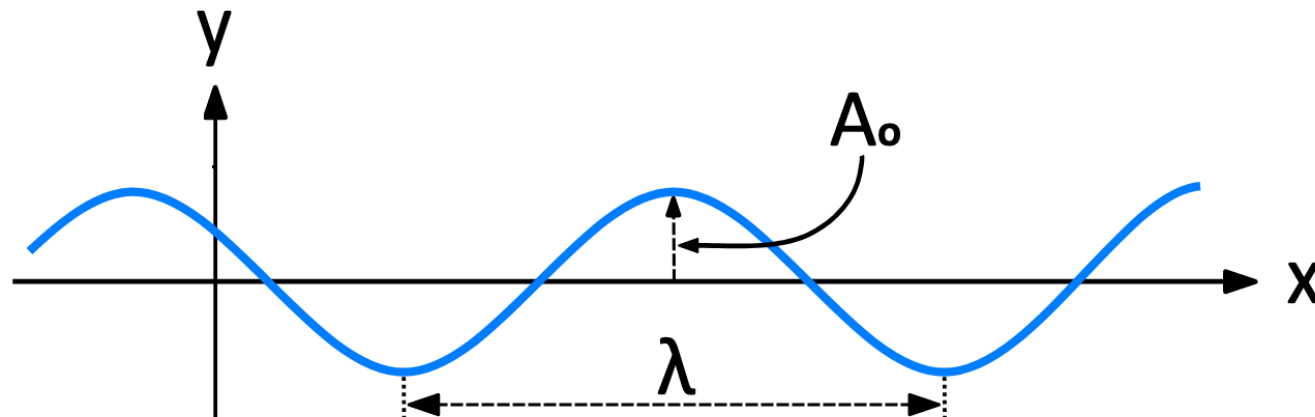
**Q- und R-Wellen ("Erdbebenwellen")**

sind für die grossen Zerstörungen bei

Erdbeben verantwortlich

# ... aber allen gemeinsam ist:

Eine Welle ist eine Störung,  
welche sich in einem Medium – in alle Richtungen – ausbreitet,  
welche Energie (nicht Materie) transportiert,  
und welche als Funktion der Zeit ( $t$ ) und des Ortes ( $x$ ) beschrieben wird.



Sie ist charakterisiert durch  
eine Amplitude  $A_0$   
eine Wellenlänge  $\lambda$  (Lambda)  
eine Frequenz  $\nu$  (Nü)  
eine **Geschwindigkeit  $v$  ( $=\lambda \cdot \nu$ )**

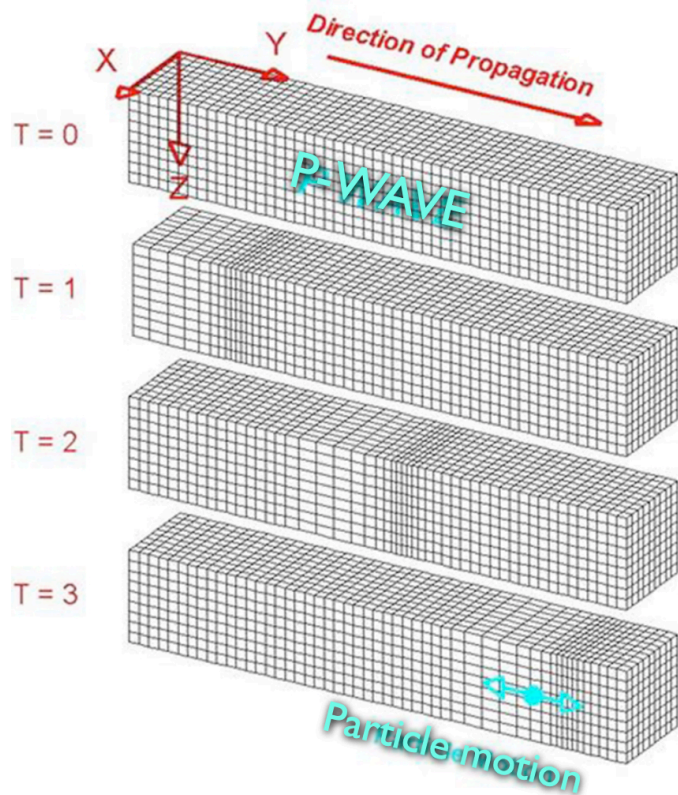
in m bzw.  $\mu\text{m}$  etc.

in m bzw. km etc,

in  $\text{s}^{-1} = 1/\text{s} = \text{Hz}$  (Hertz) bzw. kHz etc.

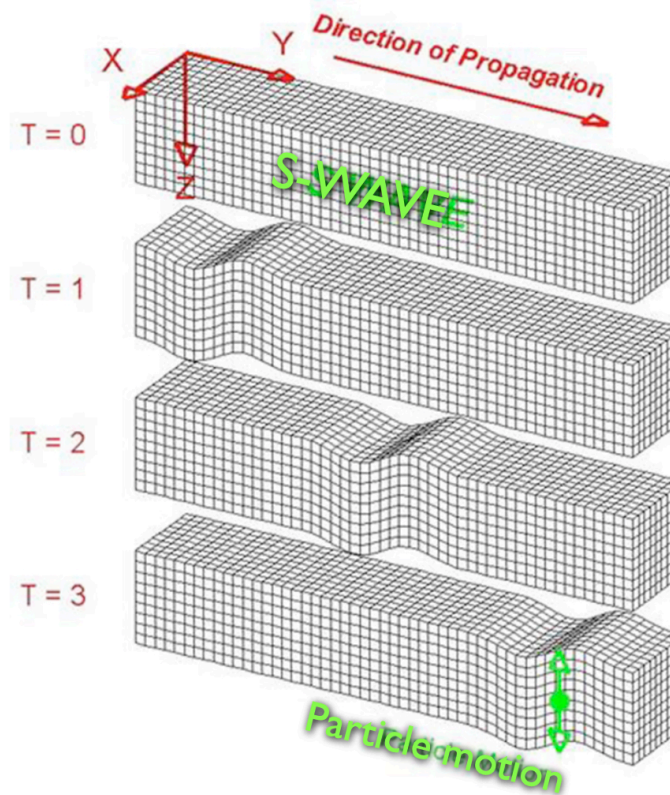
in  $\text{ms}^{-1}$  bzw. km/h etc.

**P-Wellen:**  
Kompression und Dilatation



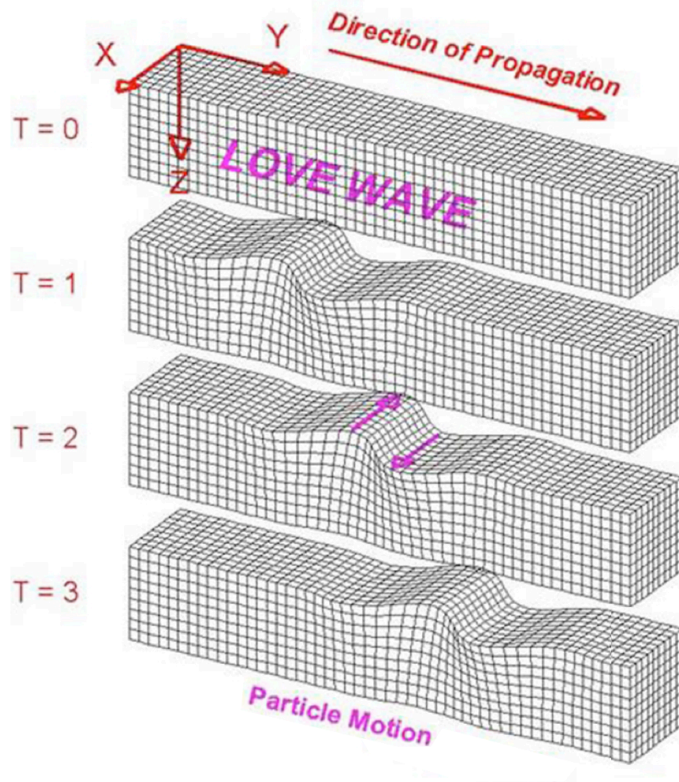
möglich in  
Festkörper, Flüssigkeit und Gas

**S-Wellen**  
Scherung ohne Volumenänderung



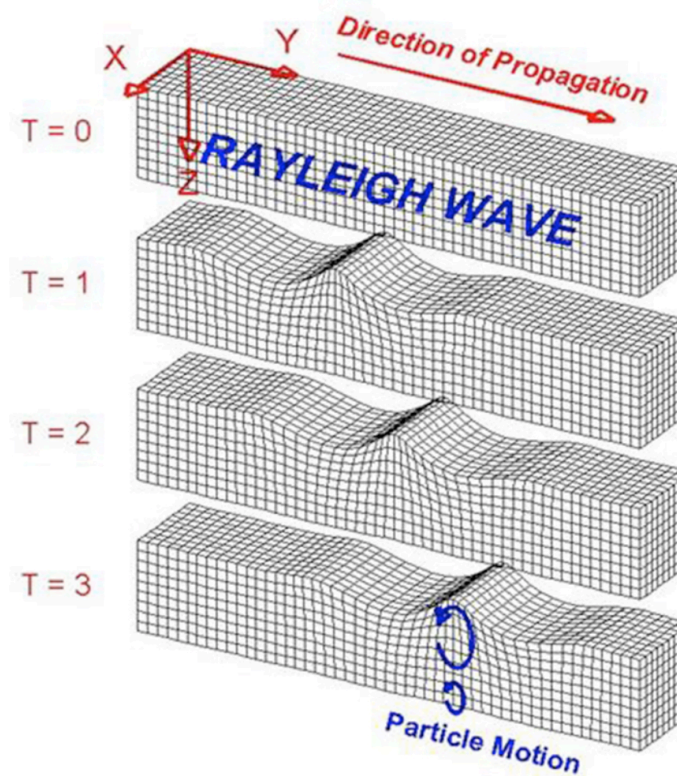
nur möglich in  
Festkörper, ... sehr zäher Flüssigkeit

## Love - Wellen Transversalwellen

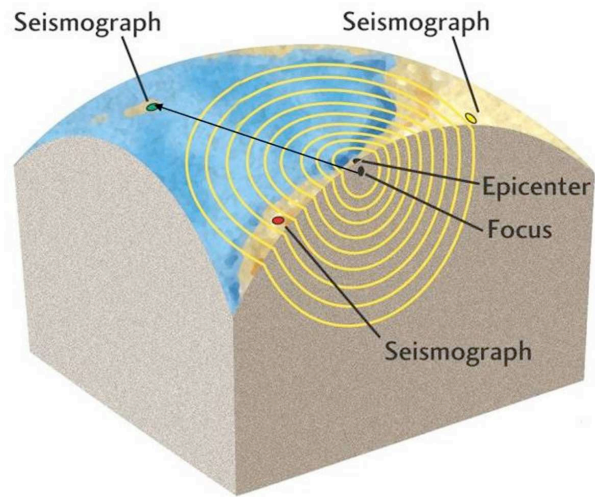
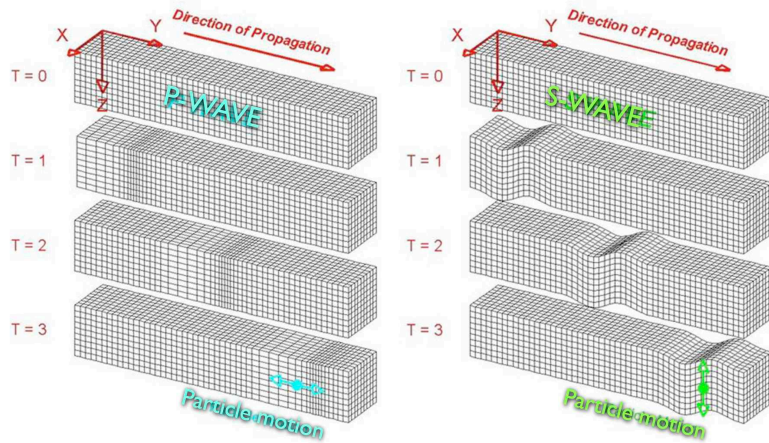


Auslenkung  
nimmt mit der Tiefe (z) ab

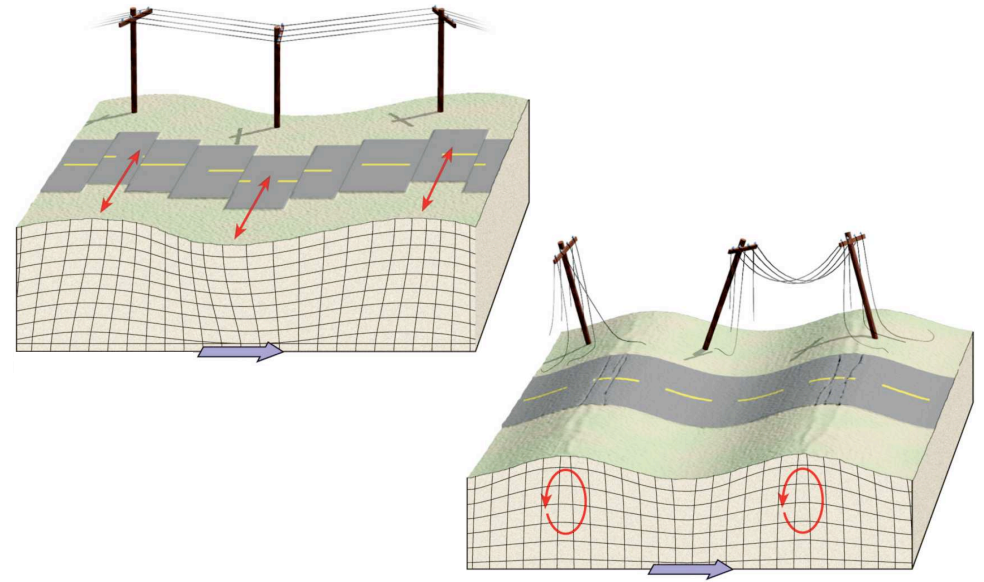
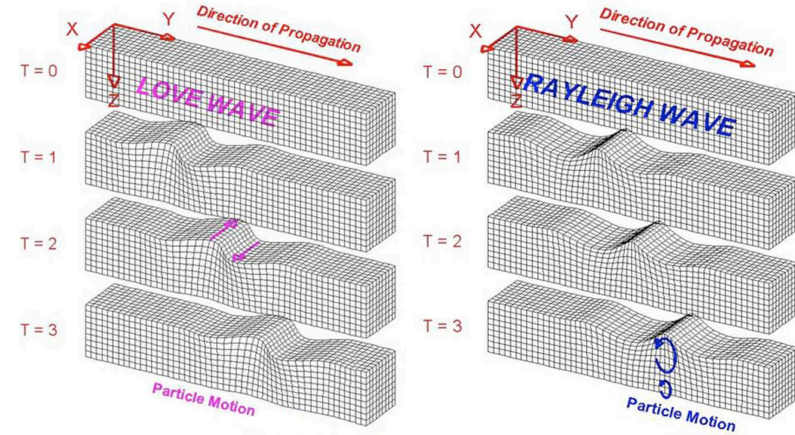
## Raleigh - Wellen Longitudinalwellen



Amplitude  
nimmt mit der Tiefe (z) ab



## Raumwellen

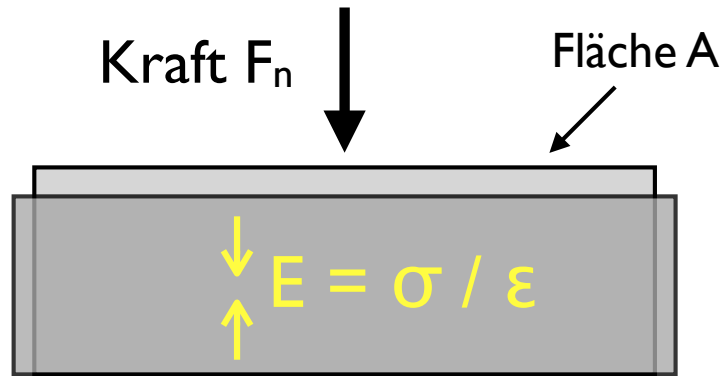


## Oberflächenwellen

# die Physik hinter seismischen Wellen



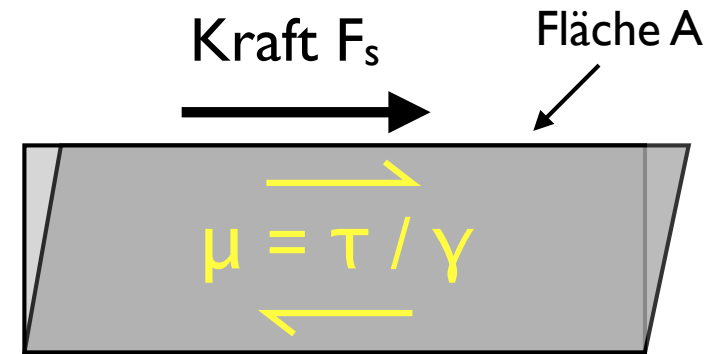
## Spannung



Normalspannung:

$$\sigma = F_n / A$$

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



Scherspannung:

$$\tau = F_s / A$$

## Verformung

Verkürzung:  $\epsilon$

Spannung:  $\sigma$

Einheit: Länge / Länge = dimensionslos

Scherung:  $\gamma$

Scherspannung:  $\tau$

## Elastizitätsmodul

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

$E$  = Youngs Modul

$$\tau = \mu \cdot \gamma$$

$\mu$  = Schermodul

Einheit: Spannung / Verformung = Pa bzw. GPa

# Wellengeschwindigkeit

$$\text{Geschwindigkeit} = \sqrt{\frac{\text{Elastizitätsmodul}}{\text{Dichte}}}$$

## P-Wellen

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

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

E = Elastischer Modul

K = Kompressionsmodul (3D)

## S-Wellen

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

$$\tau = \mu \cdot \gamma$$

$\mu$  = Schermodul

⇒ P-Wellen immer schneller als S-Wellen

$$v_p > v_s$$

# back of the envelope ...

geg.: Kompressionsmodul  $K \sim 0.6 \cdot 10^{11} \text{ Pa}$  (60 GPa = 600 kb)  
Schermodul  $\mu \sim 0.3 \cdot 10^{11} \text{ Pa}$  (30 GPa = 300 kb)  
Dichte  $\rho \sim 3 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-3}$

ges.: seismische Geschwindigkeiten  $v_s$  und  $v_p$

$\text{Pa} : \text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2}$   
 $10^5 \text{ Pa} = 1 \text{ bar}$

$$v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \approx \sqrt{\frac{30 \cdot 10^9 \text{ kg m}^{-1} \text{s}^{-2}}{3 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-3}}} \approx 3.2 \cdot 10^3 \text{ ms}^{-1}$$

$$v_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3} \mu}{\rho}} \approx \sqrt{\frac{(60+40) \cdot 10^9 \text{ kg m}^{-1} \text{s}^{-2}}{3 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-3}}} \approx 5.7 \cdot 10^3 \text{ ms}^{-1}$$

# seismische Geschwindigkeiten

	$v_p$ (ms <sup>-1</sup> )	$v_s$ (ms <sup>-1</sup> )
Air	332	
Water	1400-1500	
Concrete	3600	2000
Granite	5500-5900	2800-3000
Basalt	6400	3200
Sandstone	1400-4300	700-2800
Limestone	5900-6100	2800-3000
Clay	1000-2500	400-1000

Achtung: 1000 ms<sup>-1</sup> = 3600 km/h

physikalische / rheologische  
Eigenschaften

chemische / mineralogische  
Zusammensetzung

Lithosphäre

fest  
stark

Asthenosphäre  
(inkl. Übergangszone)

fest  
schwach

Unterer Mantel

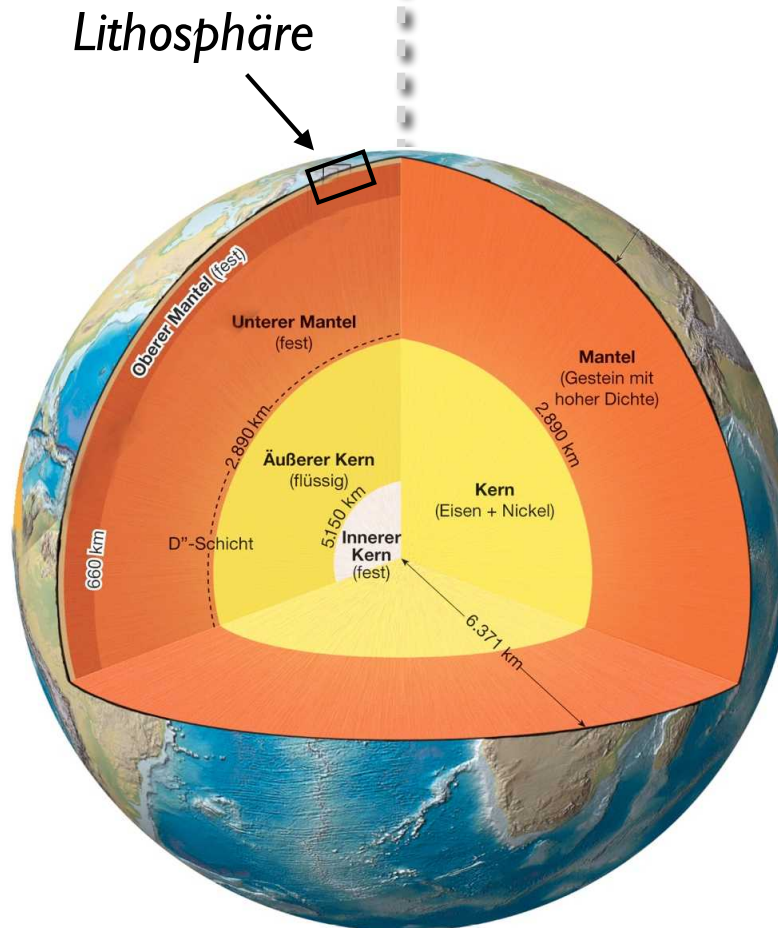
fest  
stark

Äusserer Kern

flüssig

Innerer Kern

fest



Kruste

Granodiorit,  
Basalt

Mantel

Peridotit

Kern

Fe-Ni-Legierung

physikalische / rheologische  
Eigenschaften

## Verhalten bei Verformung

Lithosphäre

fest  
stark

bildet Brüche, die beiden Seiten  
verschieben sich entlang Verwerfungen

Asthenosphäre  
(inkl. Übergangszone)

fest  
schwach

fließt als Festkörper (relativ leicht)  
mit relativ niedriger Viskosität

Unterer Mantel

fest  
stark

fließt als Festkörper unter hohen  $p, T$   
mit relativ hoher Viskosität

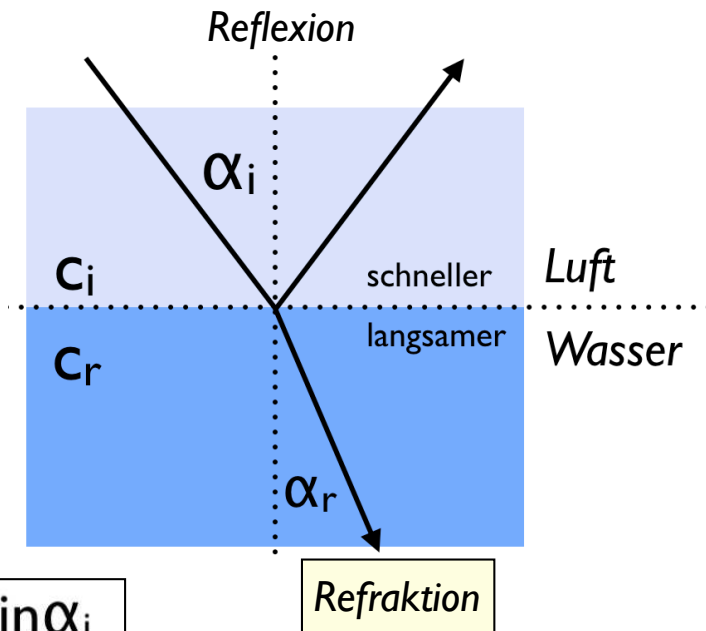
Äusserer Kern

flüssig

Innerer Kern

fest

# Refraktion (Brechung)

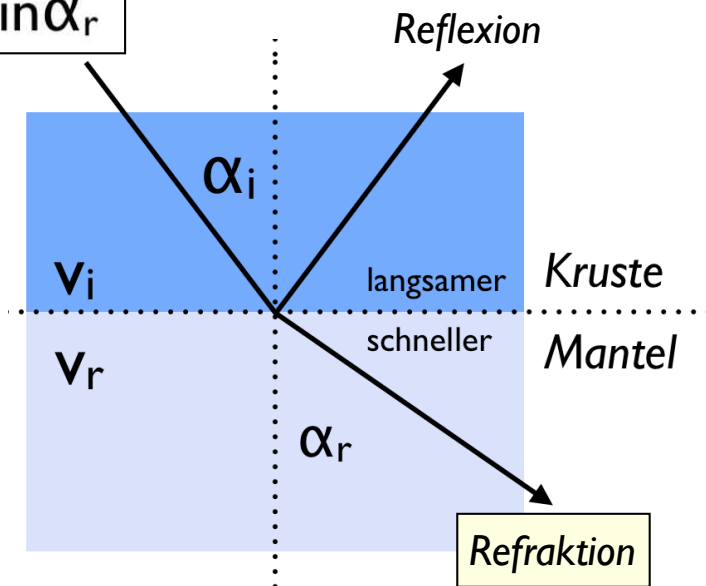


Optisch:  
(von der Luft ins Wasser)

Luft ist das optisch schnellere Medium  
Wasser ist das langsamere

der Strahl wird **zum Lot** gebrochen

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



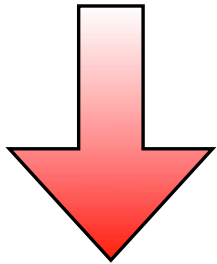
Seismisch:  
(von der Erdoberfläche in die Tiefe)

oben sind die schnelleren Gesteine  
in der Tiefe die langsameren

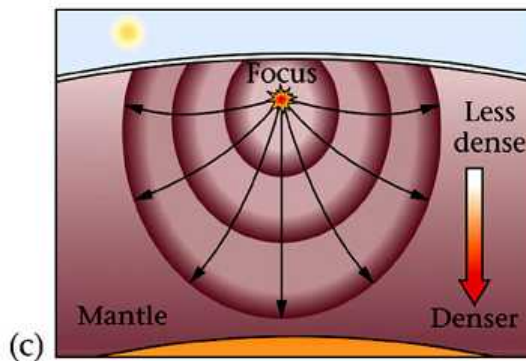
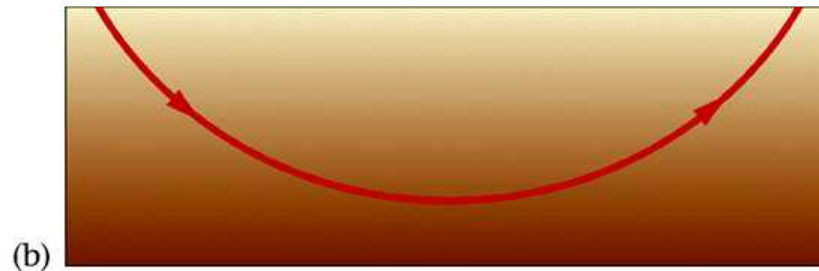
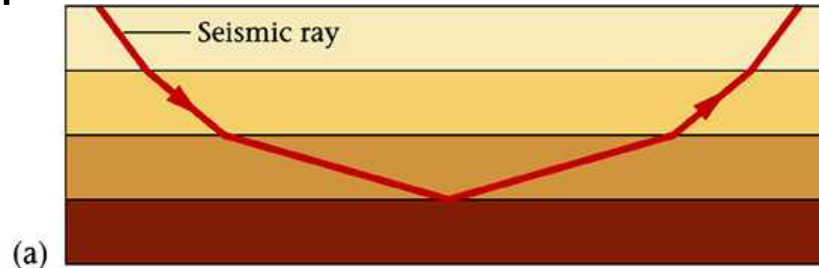
der Strahl wird **vom Lot weg** gebrochen

# Fortpflanzung seismischer Wellen

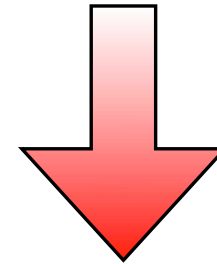
weniger steif



steifer



langsamer



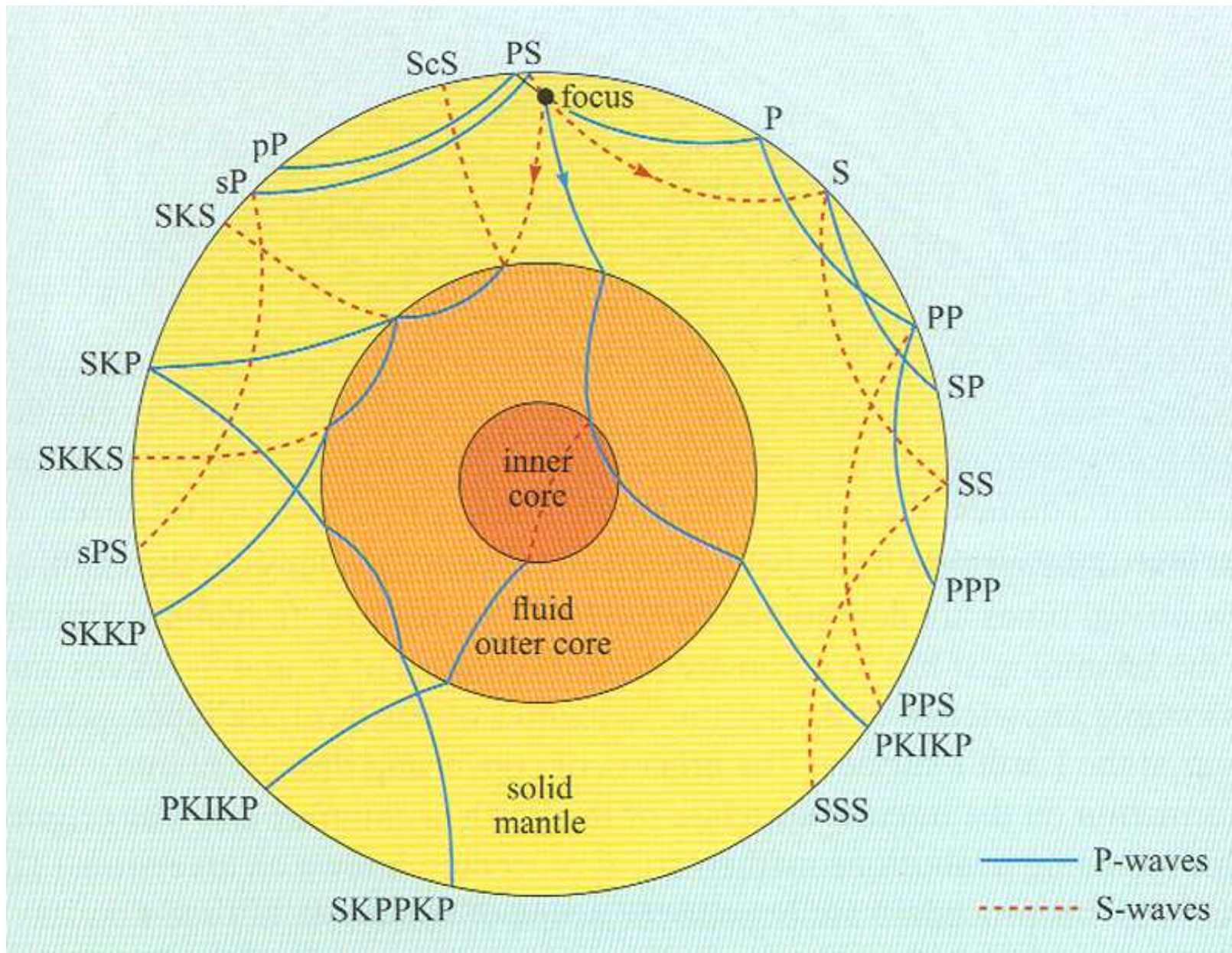
schneller

... denn:

$$\text{Geschwindigkeit} = \sqrt{\frac{\text{Elastizitätsmodul}}{\text{Dichte}}}$$

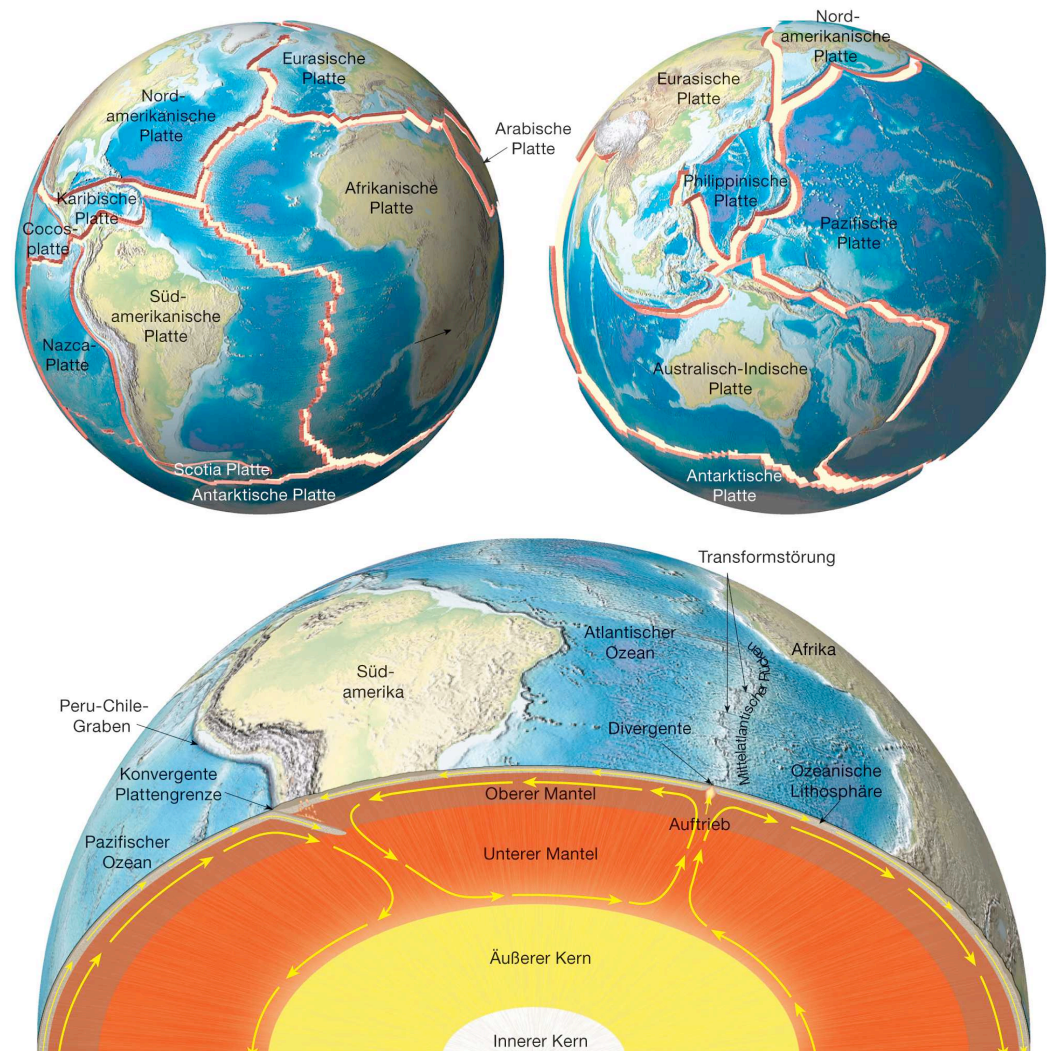


# ... im Erdinnern



**wie entstehen  
seismische Wellen ?**

- Die Erdoberfläche besteht aus mehreren grossen, relativ steifen (Lithosphären-)Platten
- Mantelkonvektion bewegt die Platten vom Spreading Ridge (wo sie entstehen) weg zur Subduktion (wo sie im Mantel versenkt werden)
- Bewegung der Platten ist ...
  - voneinander weg
  - aufeinander zu
  - aneinander vorbei



... und das geht nicht ohne Probleme, sprich Erdbeben

# do-it-yourself Erdbeben ...



*seismische Exploration (airgun array)*



*Nukleartest (Nordkorea 2016)*



*seismische Exploration (Vibroseis)*



*sogar das ..!*

# ... natürliche Beben



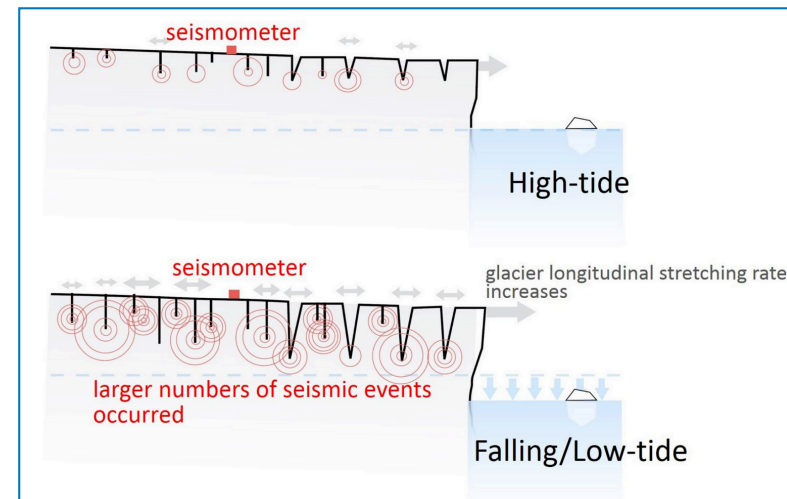
*Vulkanische Tätigkeit*



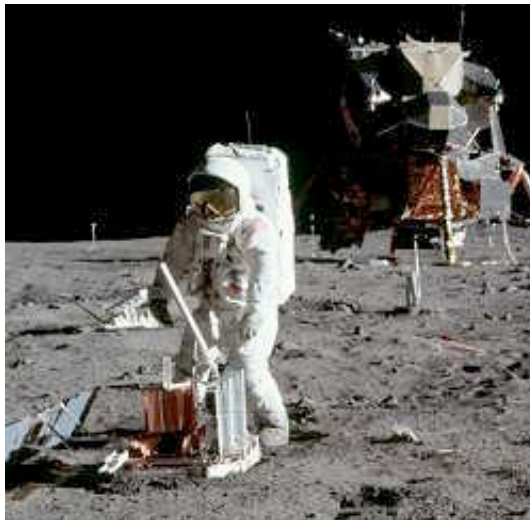
*Icequakes in Gletschern*



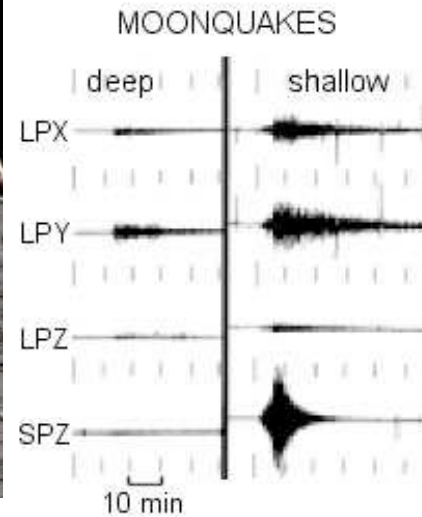
*Brandung*



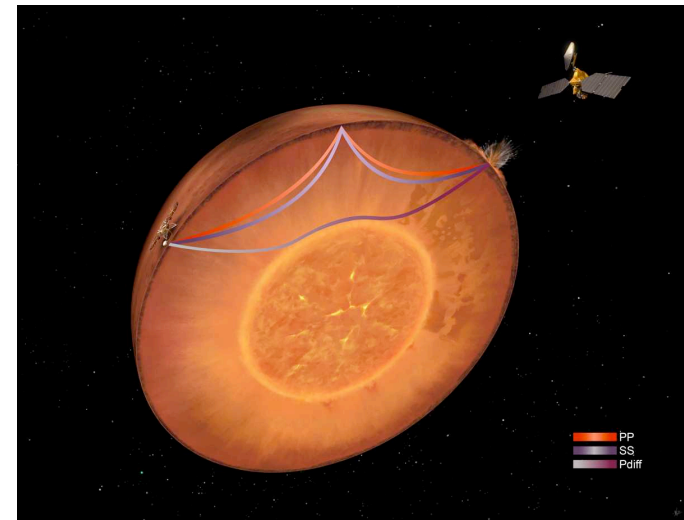
## auf dem Mond



Buzz Aldrin deploys a seismometer in the Sea of Tranquillity.

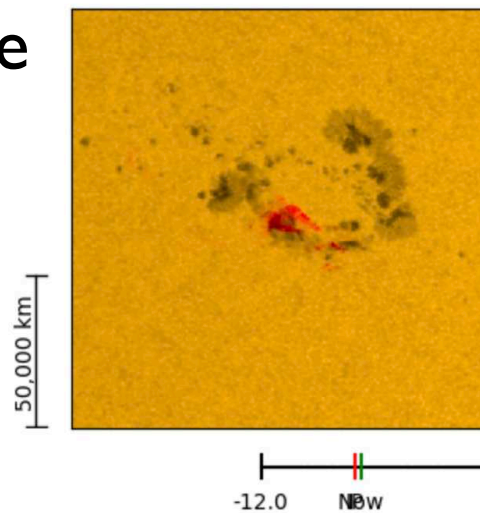


## auf dem Mars



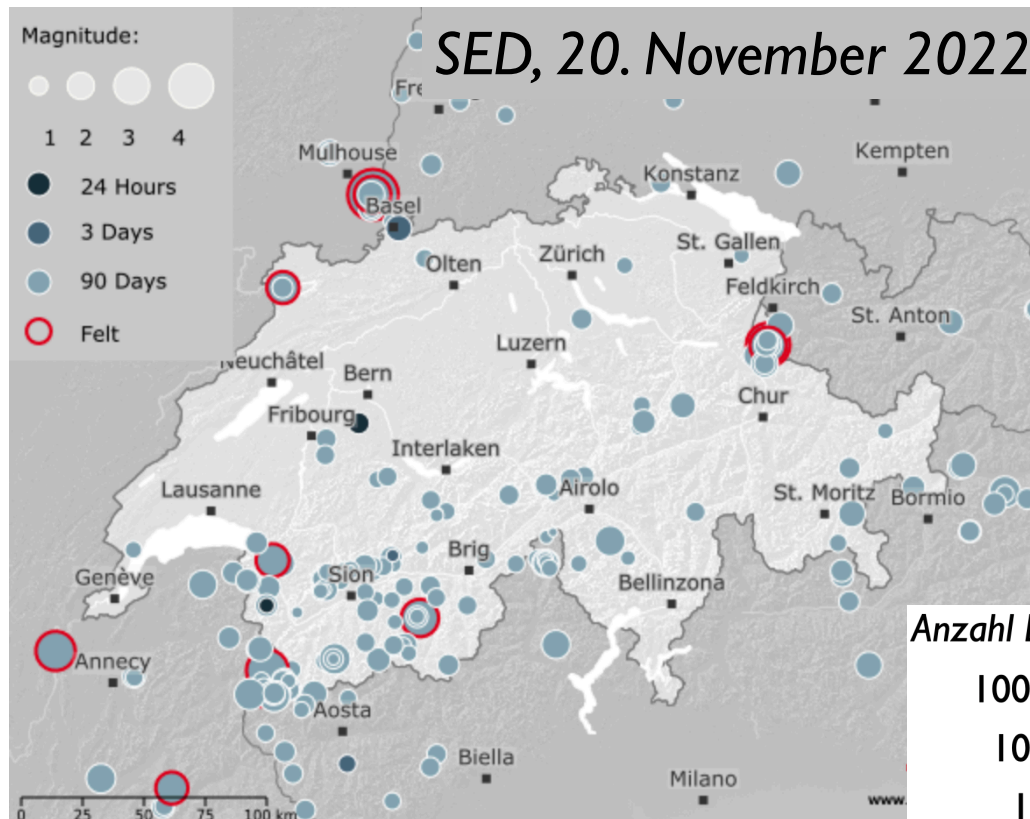
NASA's InSight lander (Interior Exploration using Seismic Investigations, Geodesy and Heat Transport)

## auf der Sonne



Movie of a sunquake – the earthquake-like waves that ripple through our star. Left frame shows the active region in visible light (amber) and extreme ultraviolet (red) on July 30, 2011. Credits: NASA/SDO

# Erdbeben gibt es jeden Tag ...

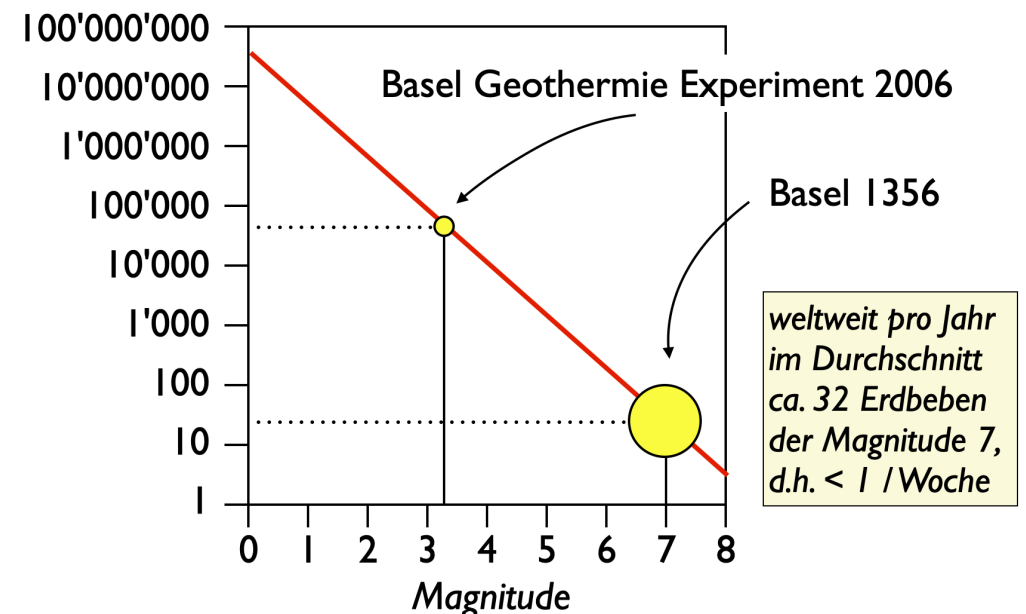


... aber grosse Erdbeben sind relativ selten

Swiss Earthquakes Counter

since 01.01.2022 **910**

Anzahl Erdbeben / Jahr

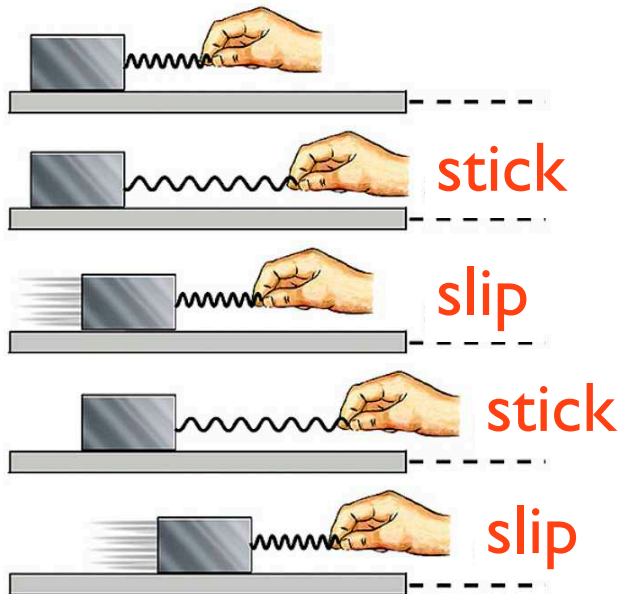


**was genau passiert bei  
einem Erdbeben ?**

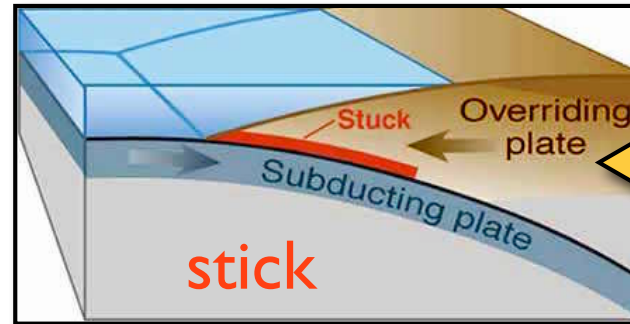


# stick – slip

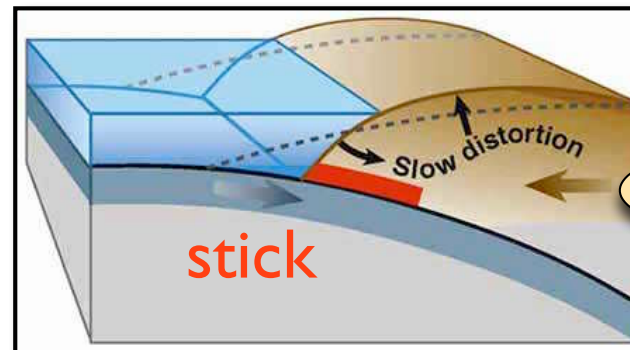
## Aufbau elastischer Spannung Gleiten auf Bruchfläche



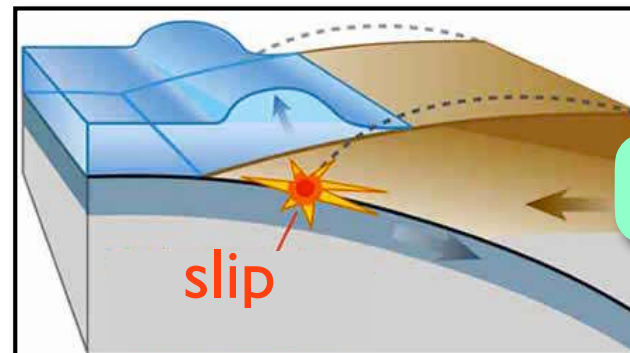
Stick-slip Modell für Verwerfungen



langsam



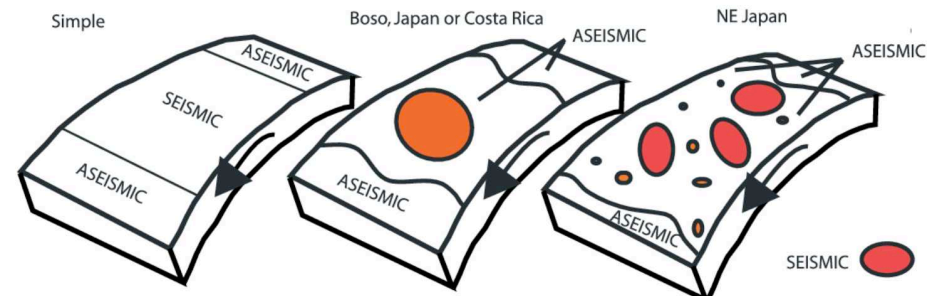
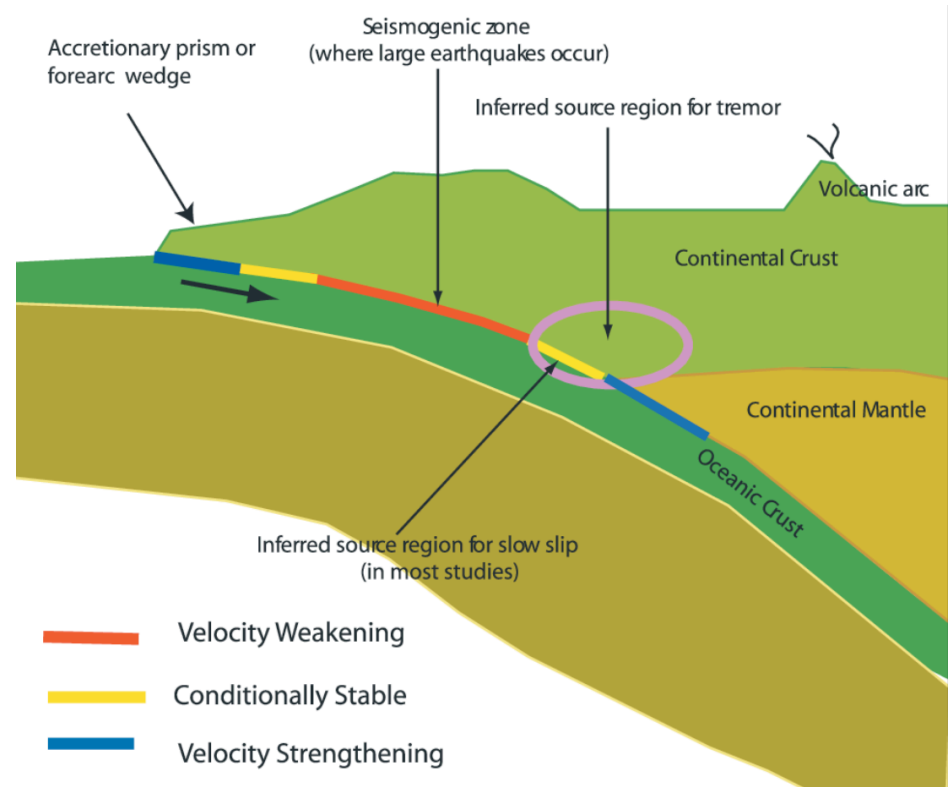
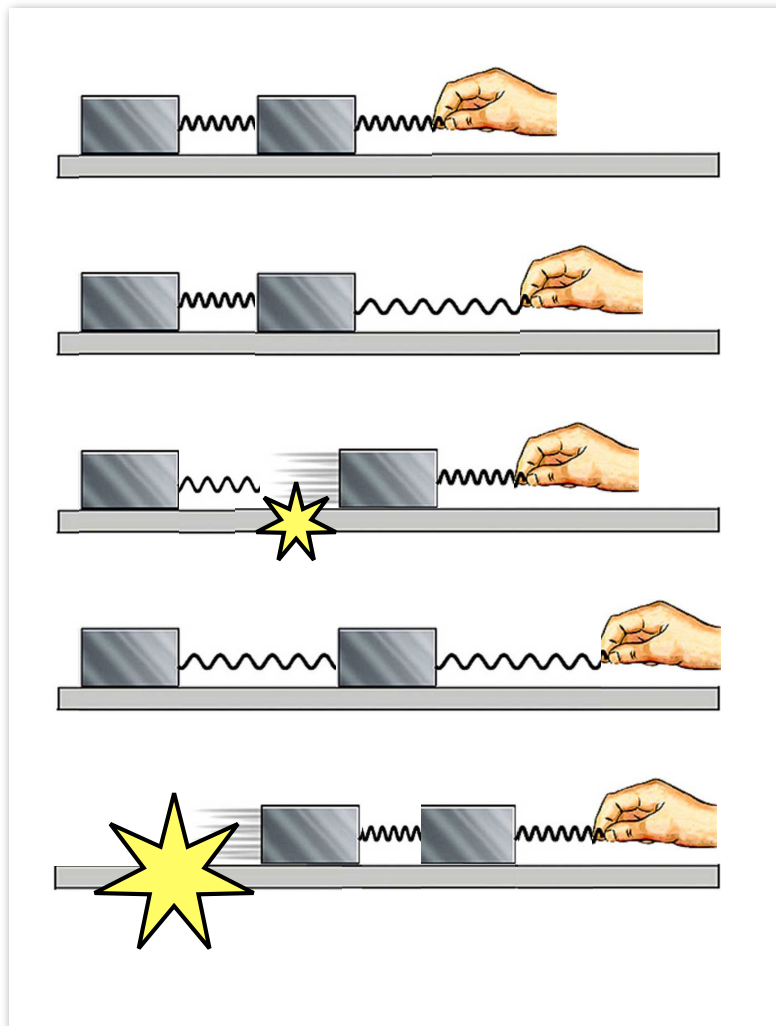
langsam



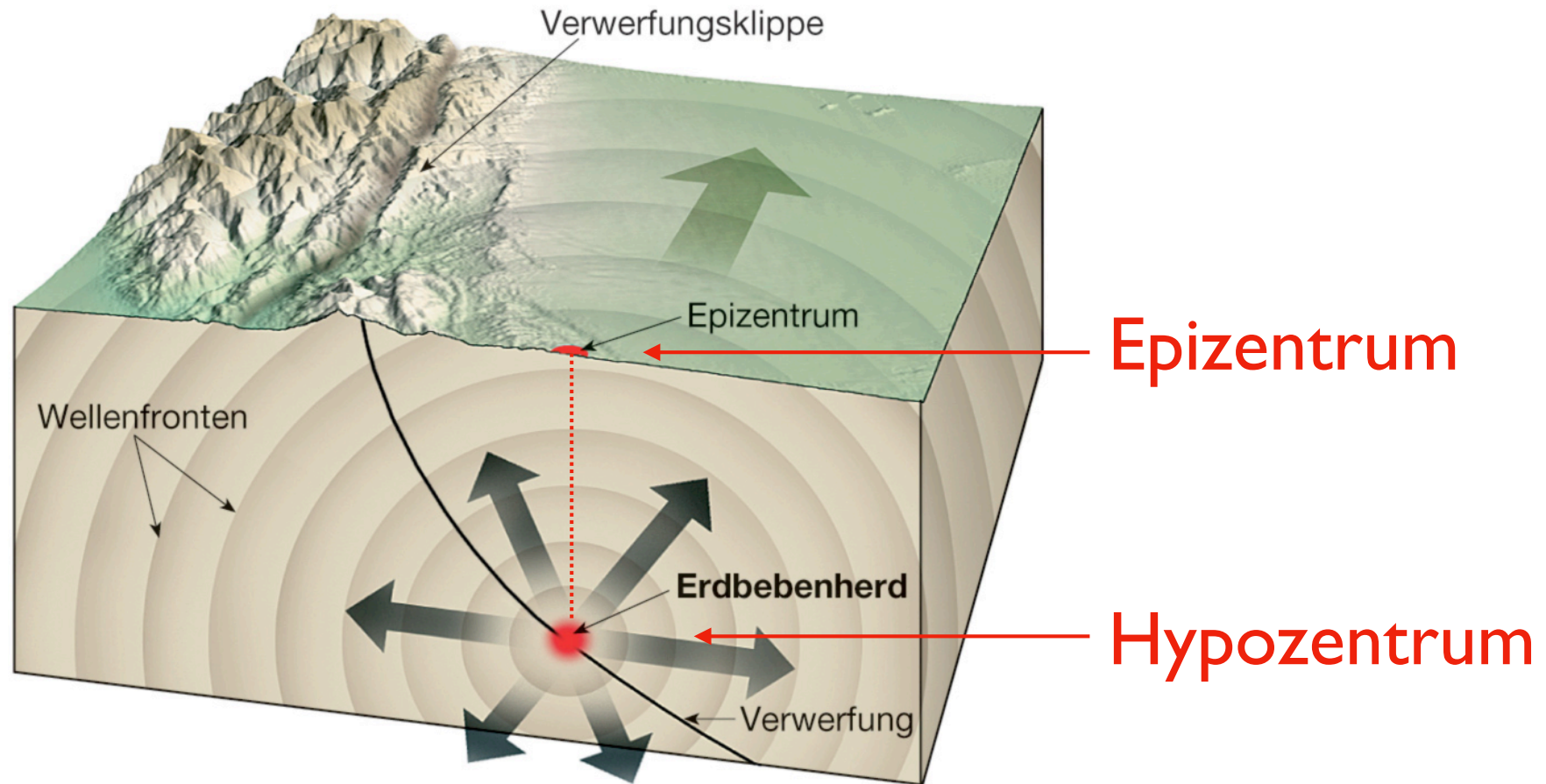
schnell

# seismic – aseismic

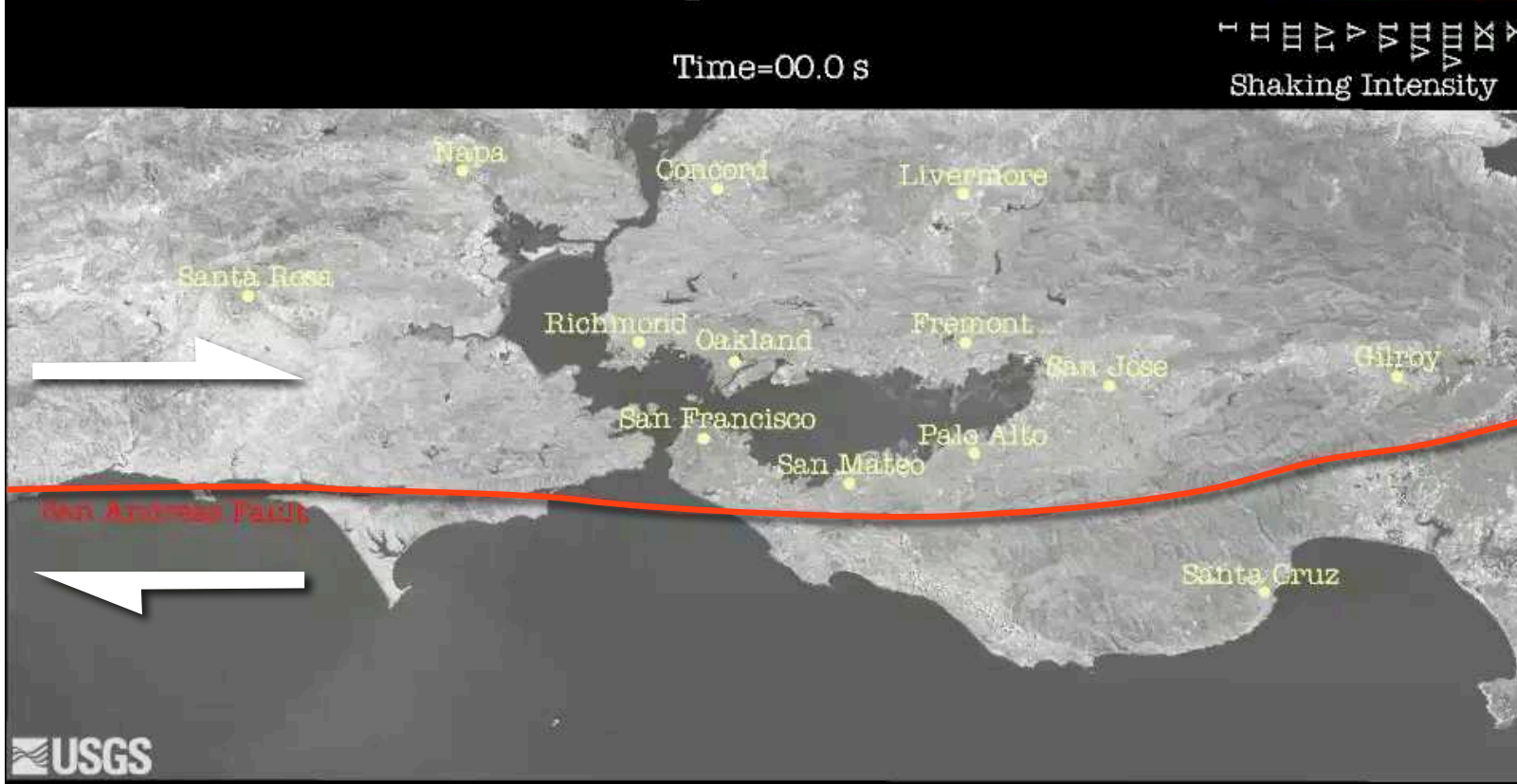
en detail:



# Erdbebenherd – focus



## 1906 M7.8 San Francisco Eq



nord-  
amerikanische  
Platte

San Andreas  
Fault

pazifische  
Platte

Ausbreitungsgeschwindigkeit des Bruches (rupture speed)	2.7 km/s
Geschwindigkeit der Erdbebenwellen (Oberflächenwellen)	~4 km/s
Geschwindigkeit der Gesteinskörper (slip velocity)	5 km/h

maximaler Versatz	8.4 m
Dauer des Hauptbebens	45 - 60 s
Länge der Bruchfläche	477 km

Plattengeschwindigkeit	1/100mm/h
------------------------	-----------

# Sumatra 26. Dezember 2004

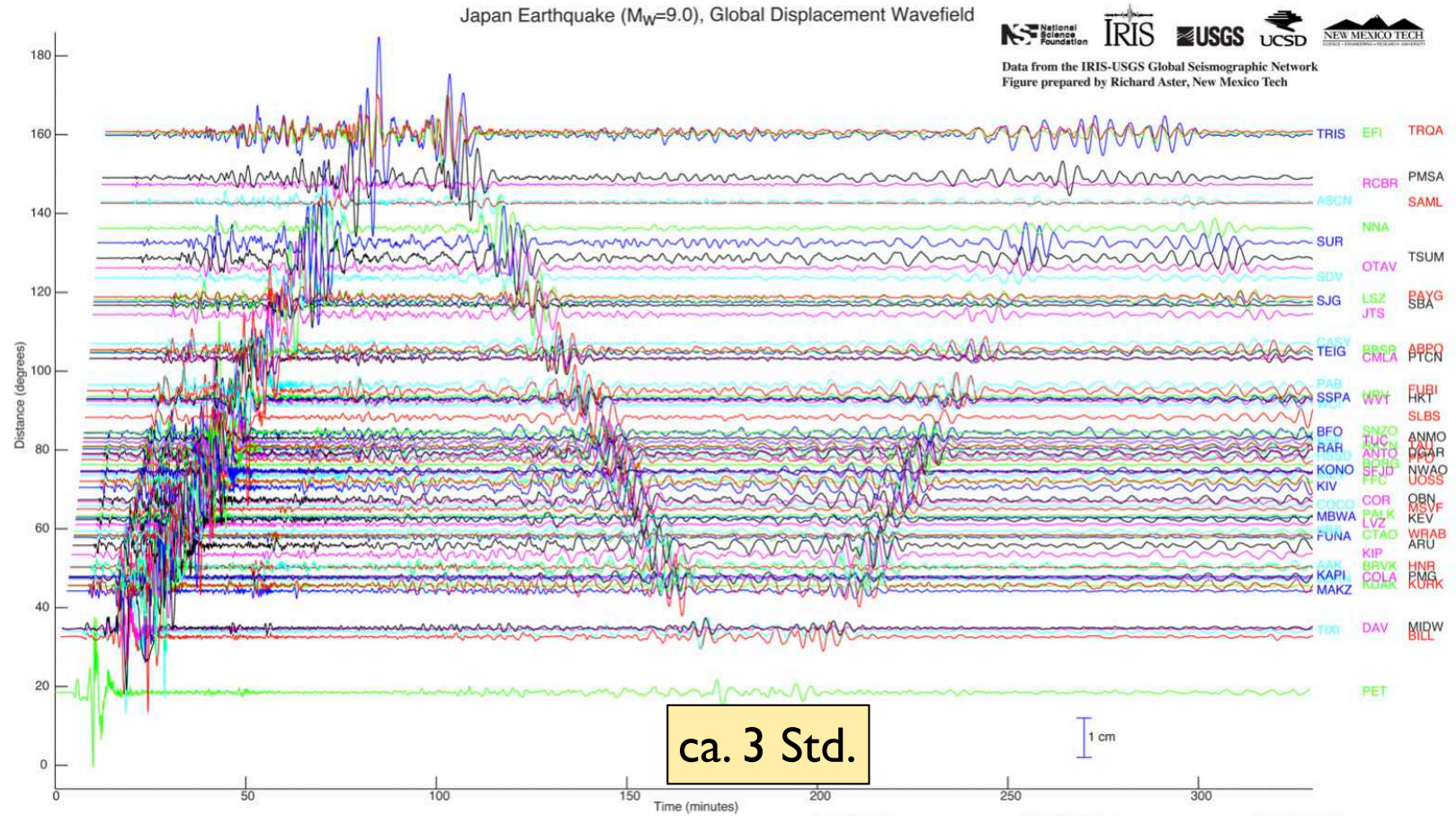
time= 13.0s  
00:59:06 UTC



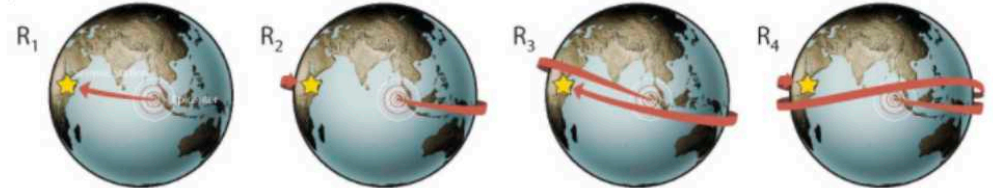
# Magnitude 9.1 NEAR THE EAST COAST OF HONSHU, JAPAN

Friday, March 11, 2011 at 05:46:24 UTC

This assembly of seismograms displays the vertical movement of the Earth's surface due to seismic waves generated by the earthquake. The seismograms are plotted with respect to time since the start of the earthquake on the horizontal axis and are sorted vertically according to distance from the epicenter in degrees.



*Paths of earthquake surface waves as they travel multiple times around the Earth*



seismische Wellen –  
wie sie aussehen ...  
... und wie sie tönen

# Wellenlängen und Frequenzen

Geschwindigkeit  $v = \lambda \cdot \nu$   $\Rightarrow$  Wellenlänge = Geschwindigkeit / Frequenz

menschliches Gehör:

$\nu = 20 \text{ Hz} - 20 \text{ kHz}$

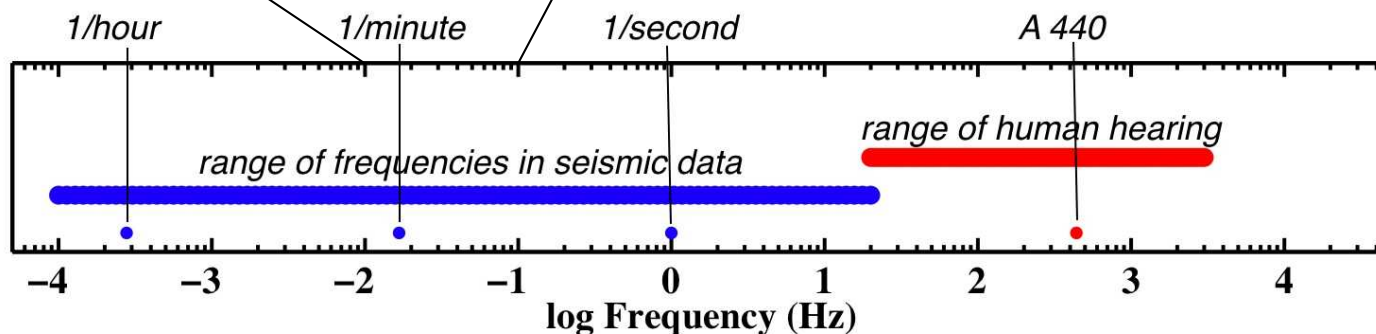
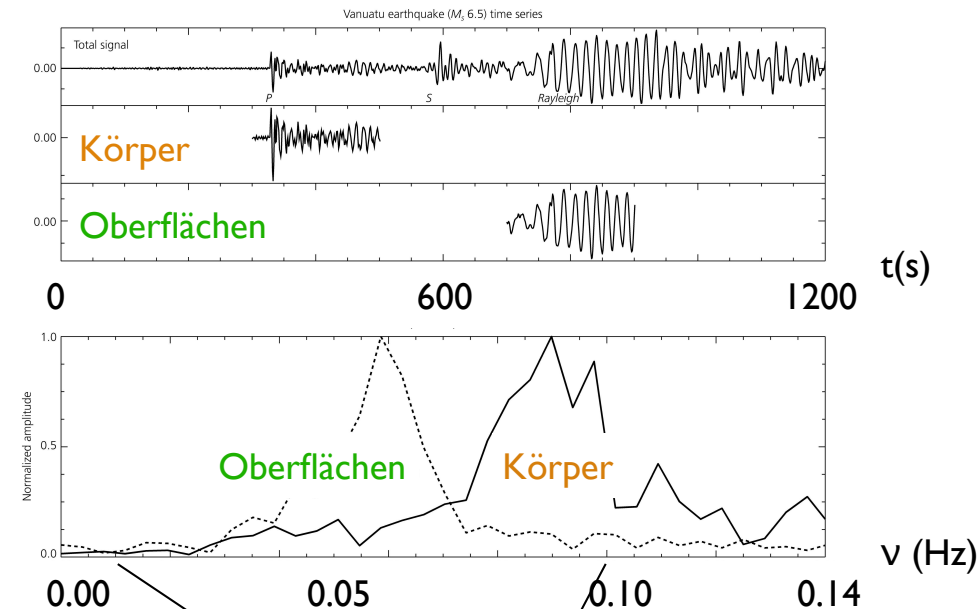
$\lambda = 16.5 \text{ m} - 16.5 \text{ mm}$

seismische Wellen:

$\nu = 1/10000 \text{ Hz} - 20 \text{ Hz}$

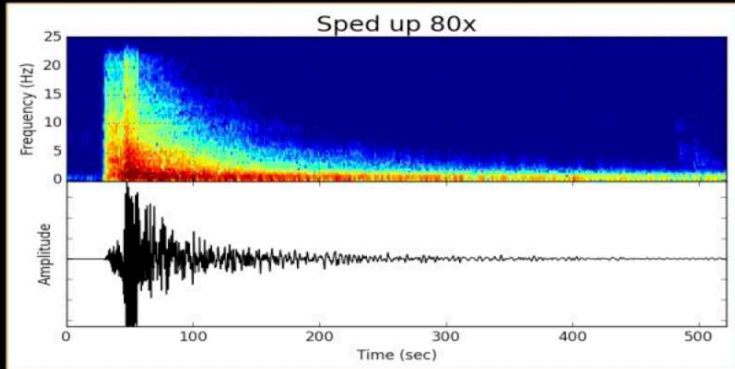
$\lambda = 720 \text{ km} - 1.44 \text{ km}$  ( $v = 4 \text{ km/s}$ )

$\lambda = 1080 \text{ km} - 2.16 \text{ km}$  ( $v = 6 \text{ km/s}$ )

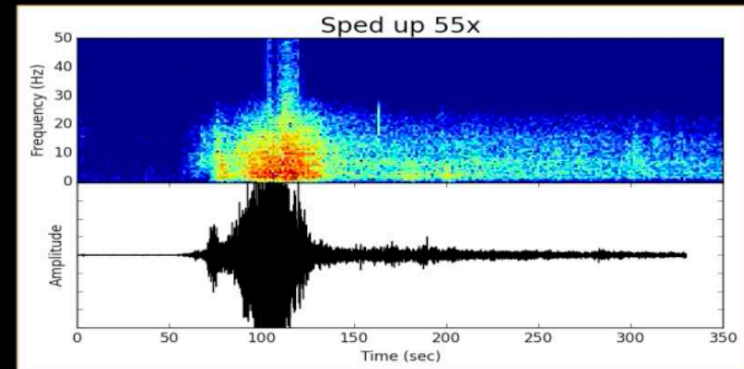




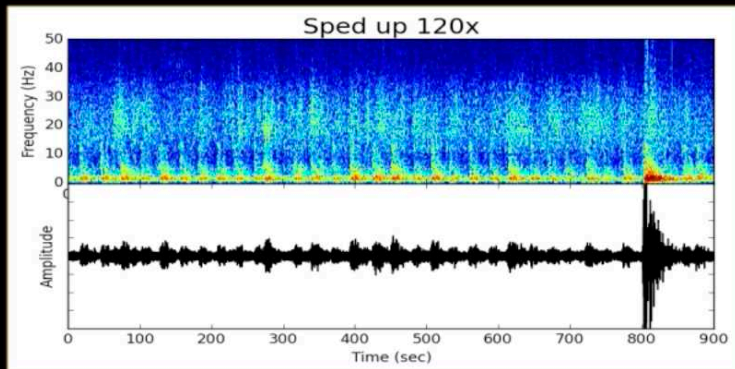
# the sound of earthquakes



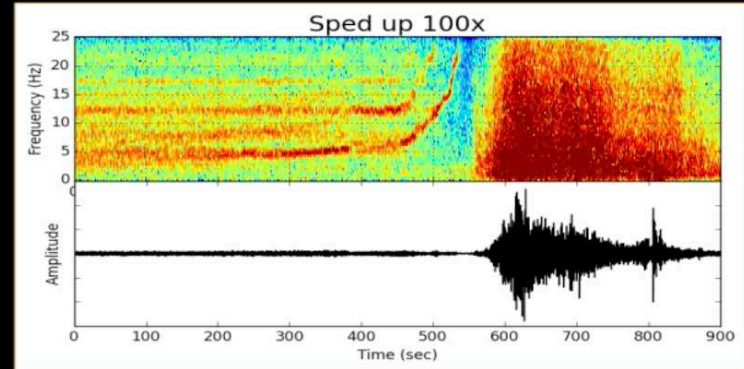
2001 Nisqually earthquake



2011 Mount Rainier rockfall



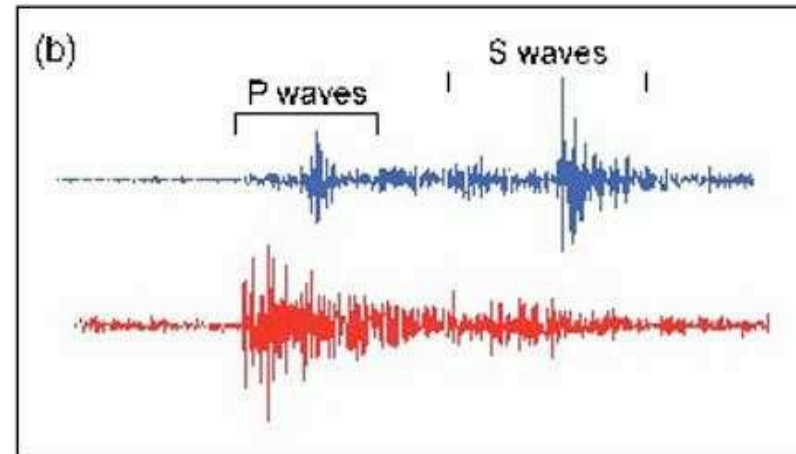
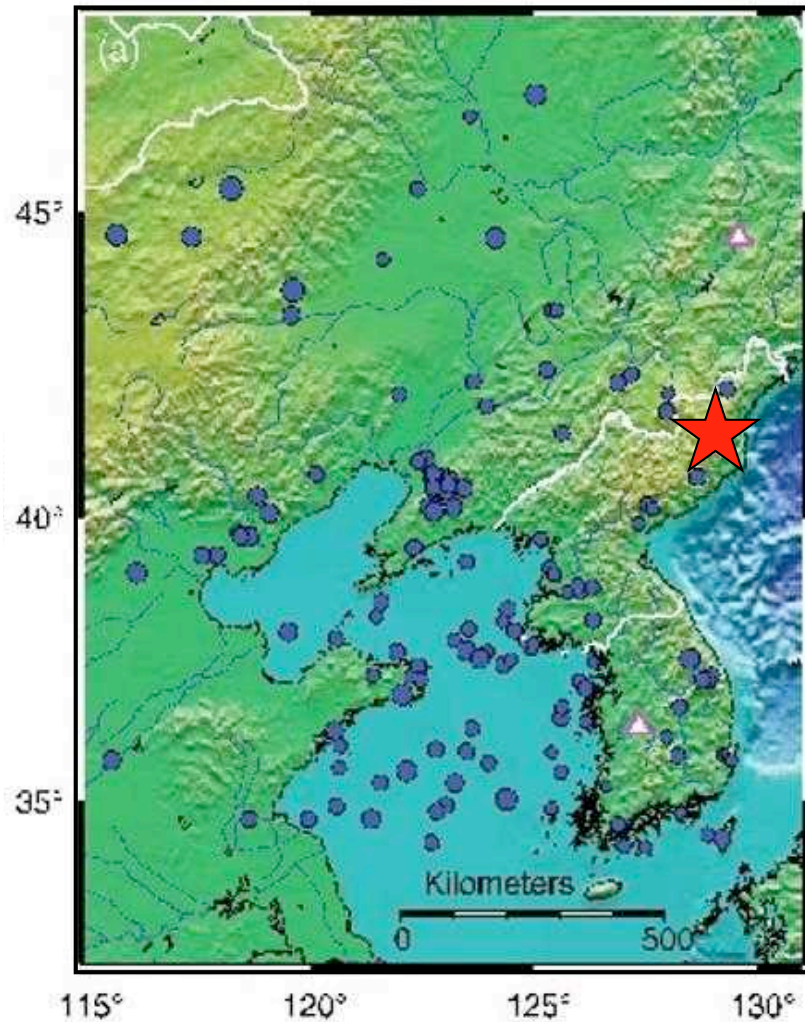
2004 Mount St. Helens drumbeats



2009 Mount Redoubt scream



# verräterische Signatur



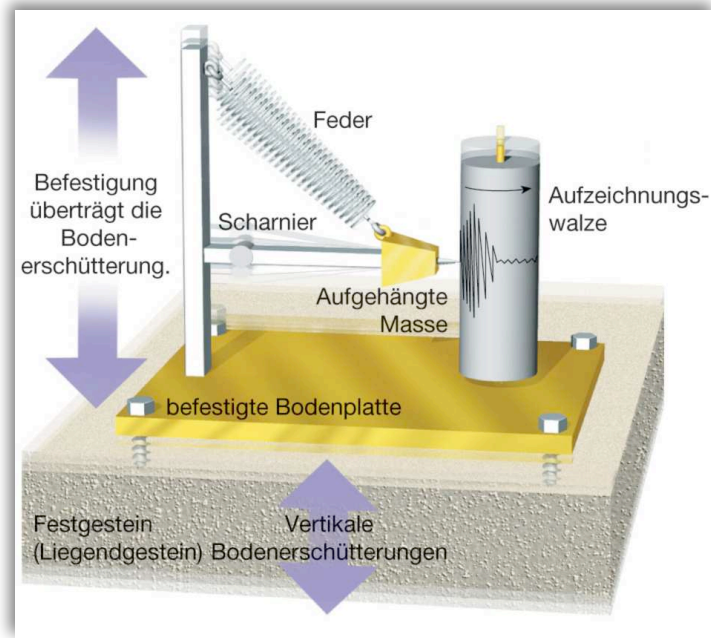
Erdbeben

Atomtest

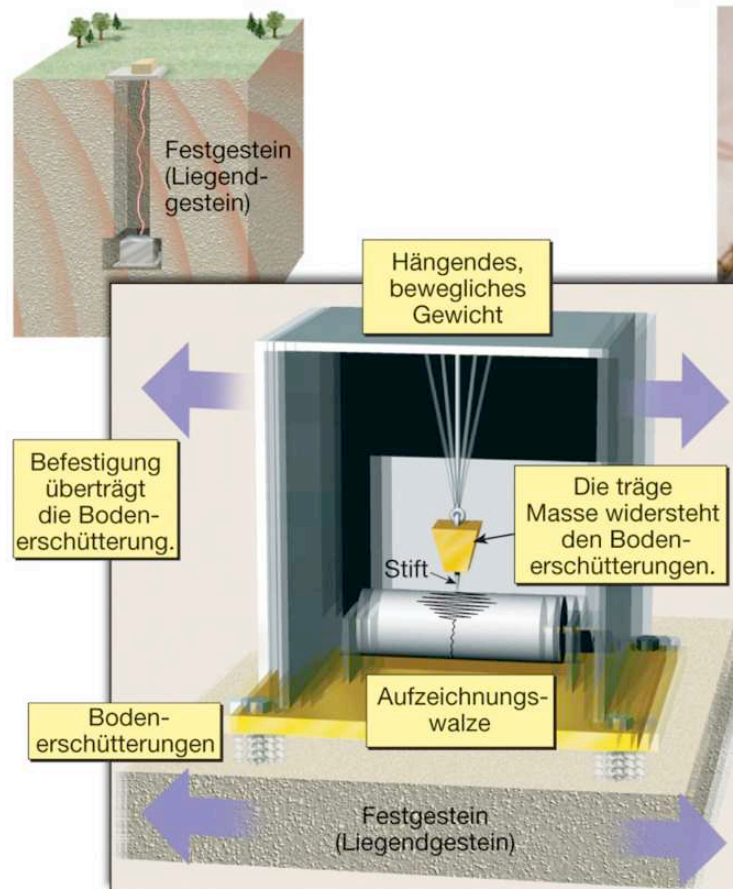
- Erdbeben
- ★ Atomtest

*Nordkorea Atomtest 25. 8. 2016*

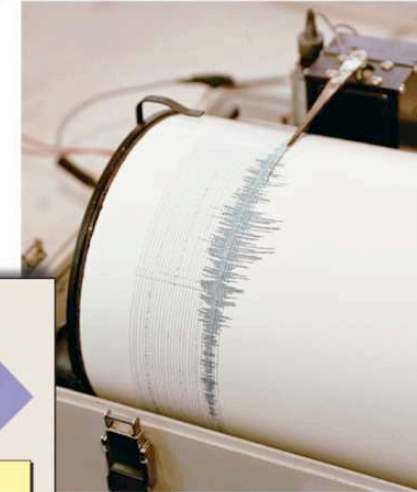
# Seismometer (Seismograph)



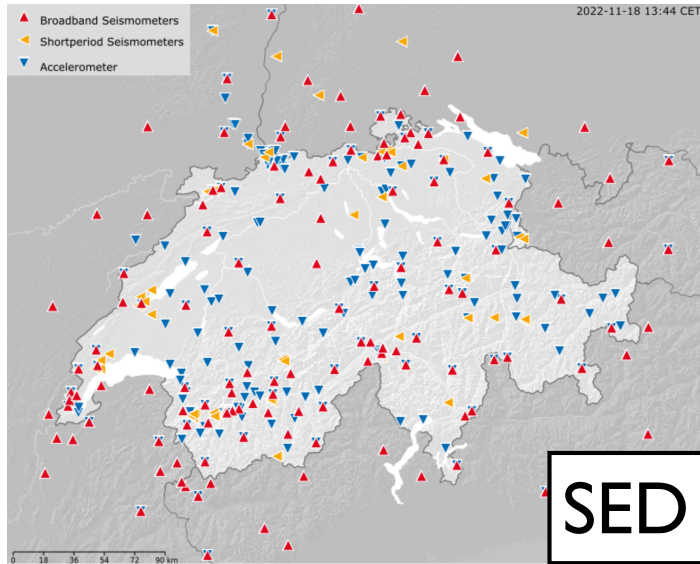
vertikal



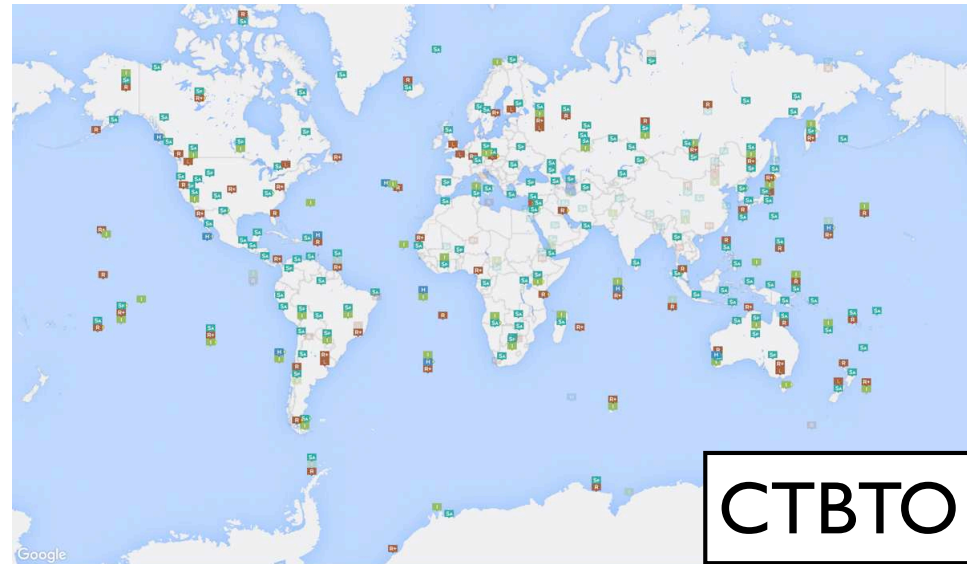
horizontal



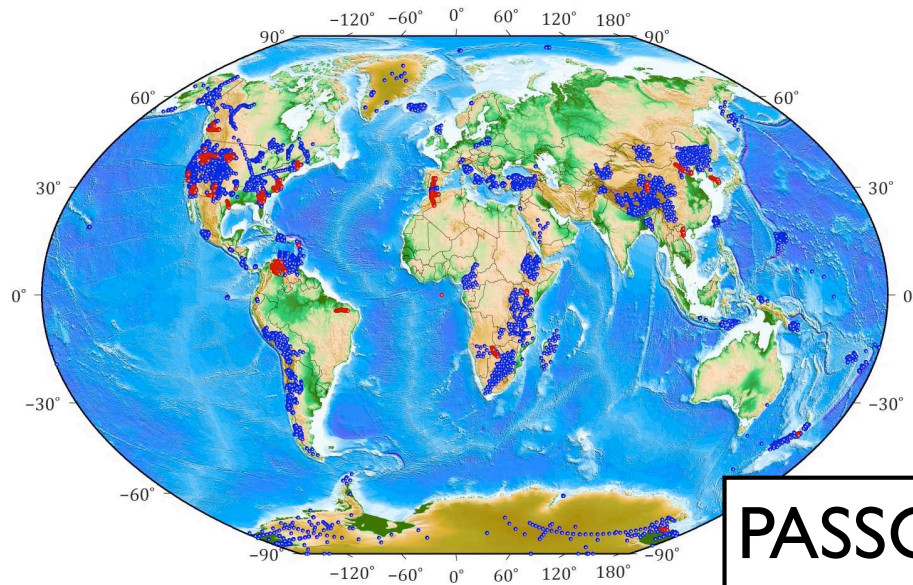
# seismische Netzwerke



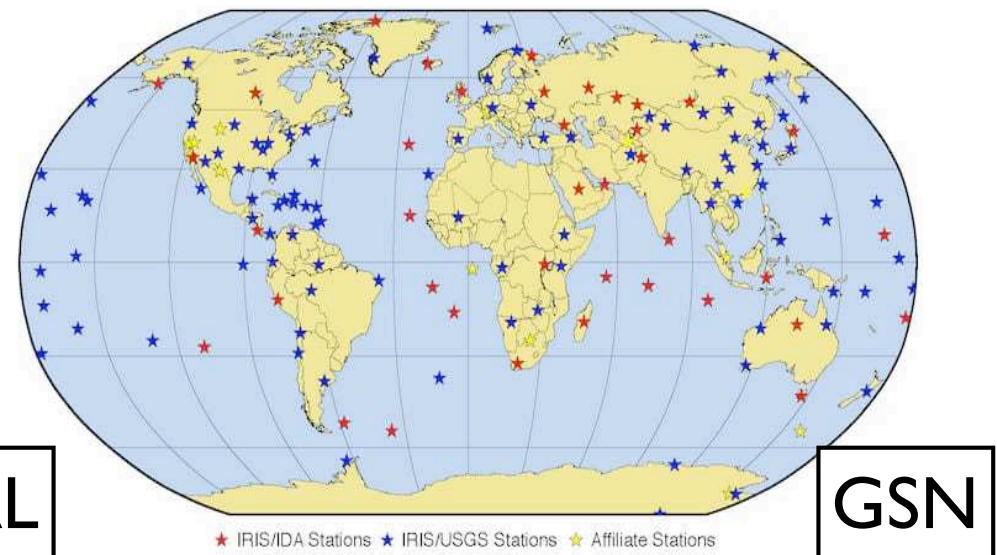
Schweizerischer Erdbebendienst



Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization



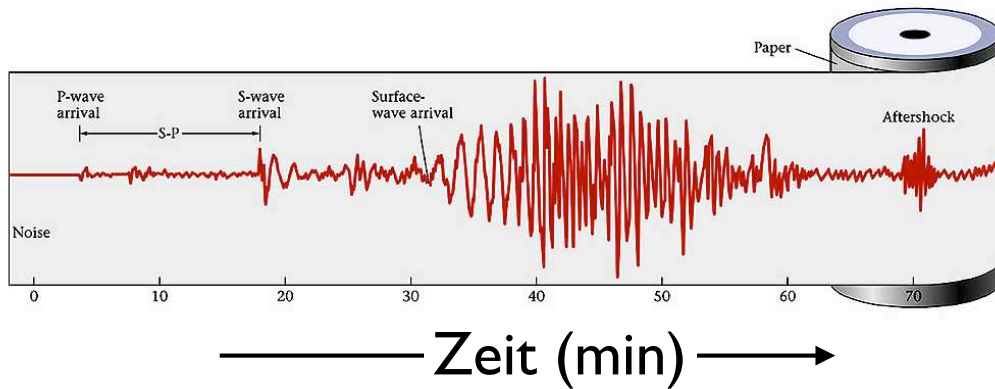
Portable Array Seismic Studies of the Continental Lithosphere



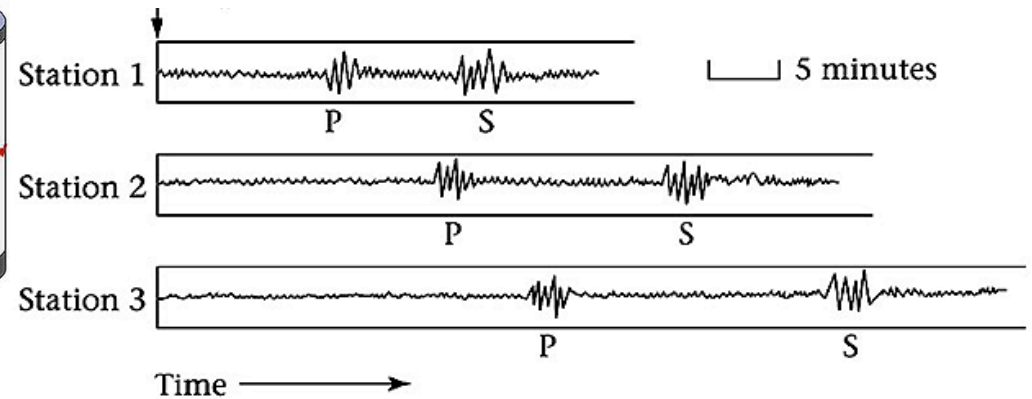
Global Seismographic Network

**wo ist das Epizentrum ?**

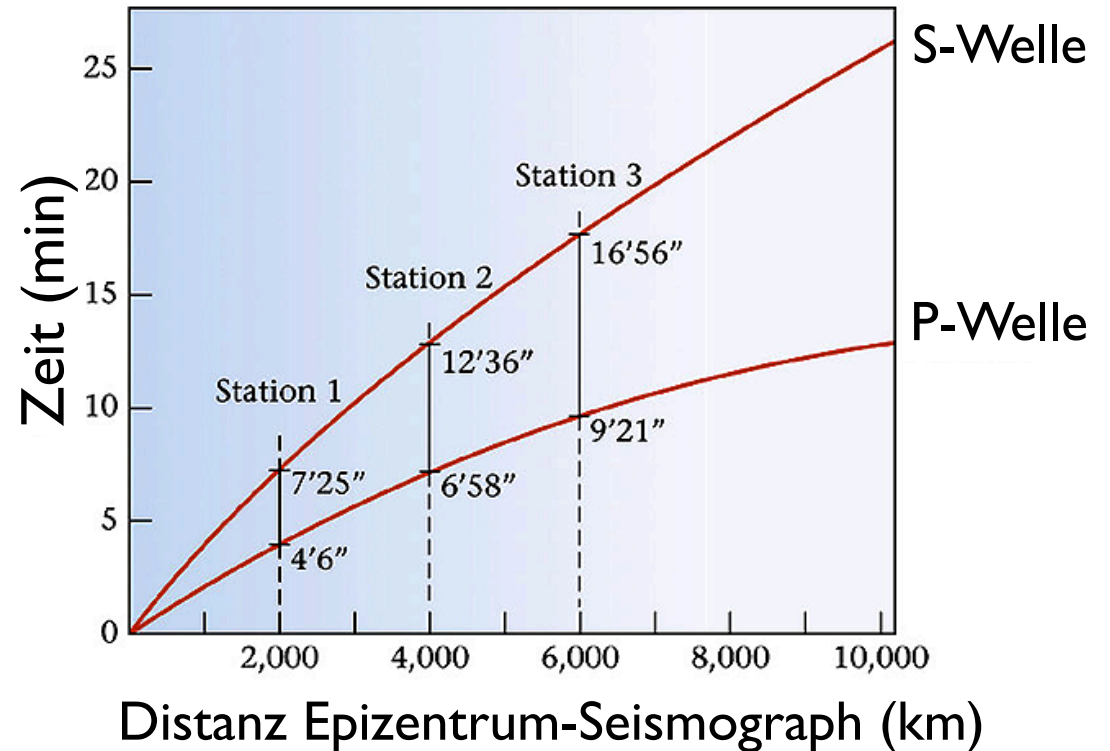
# Erdbebenwellen - Laufzeiten



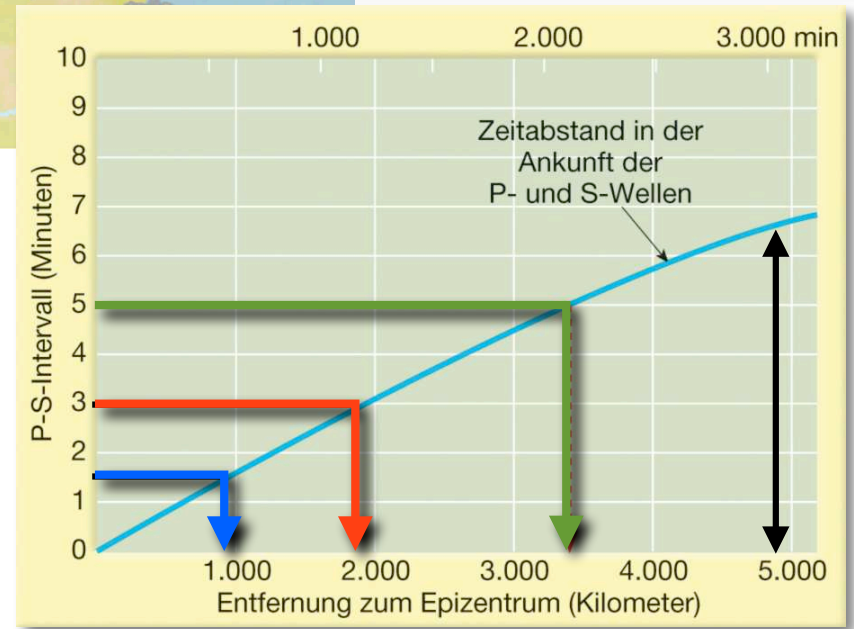
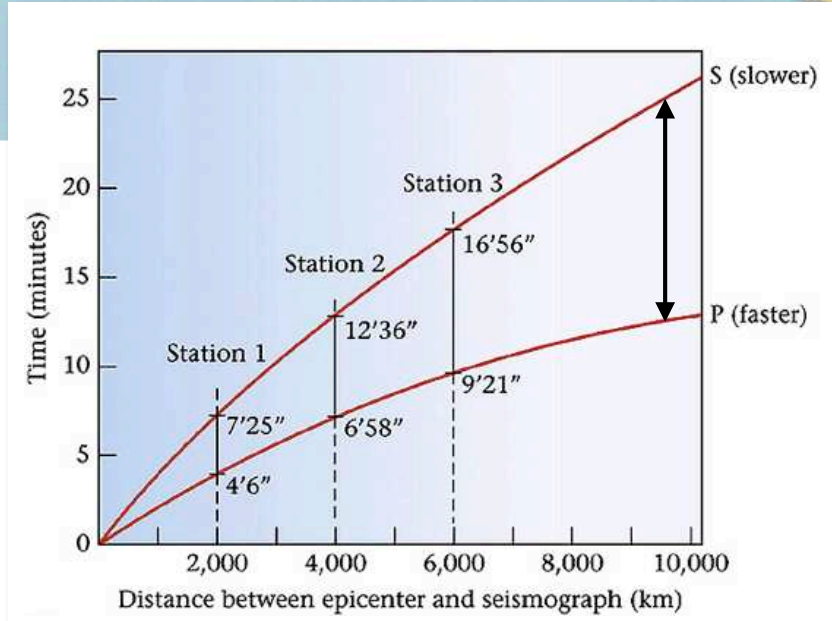
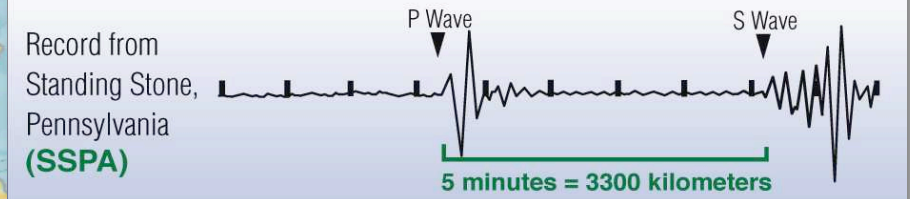
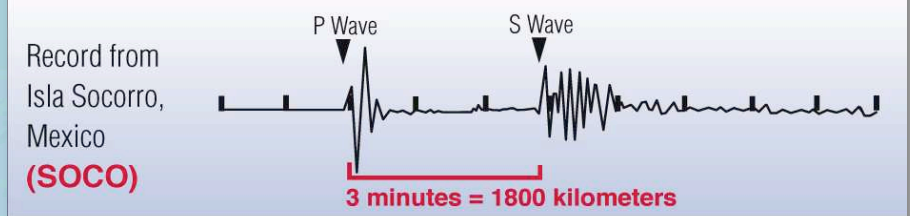
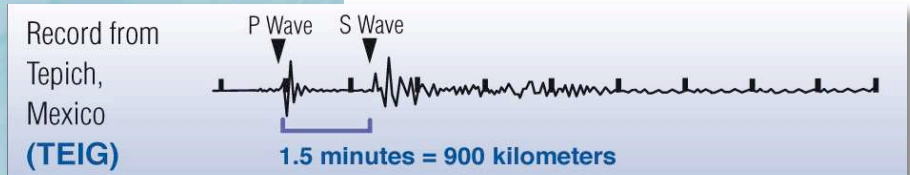
## Ankunftszeiten



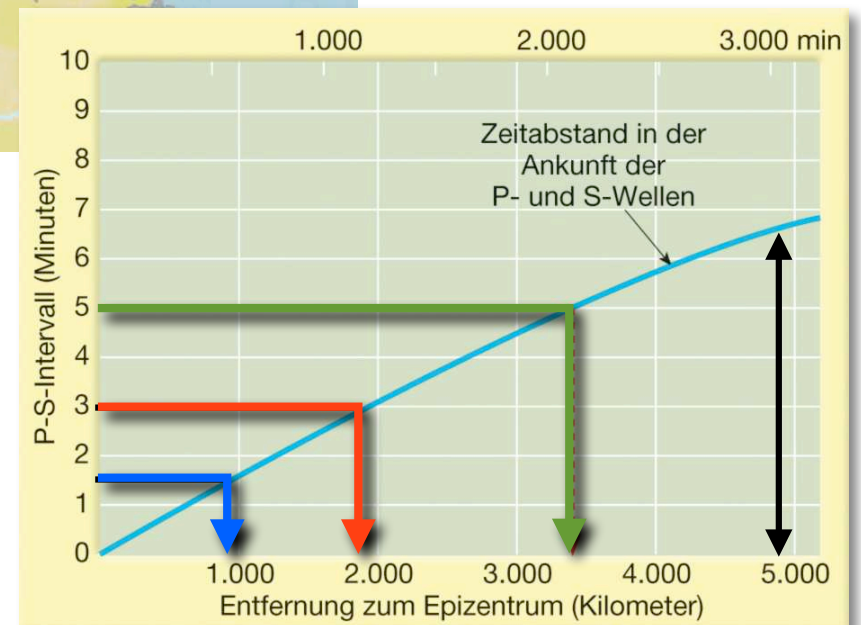
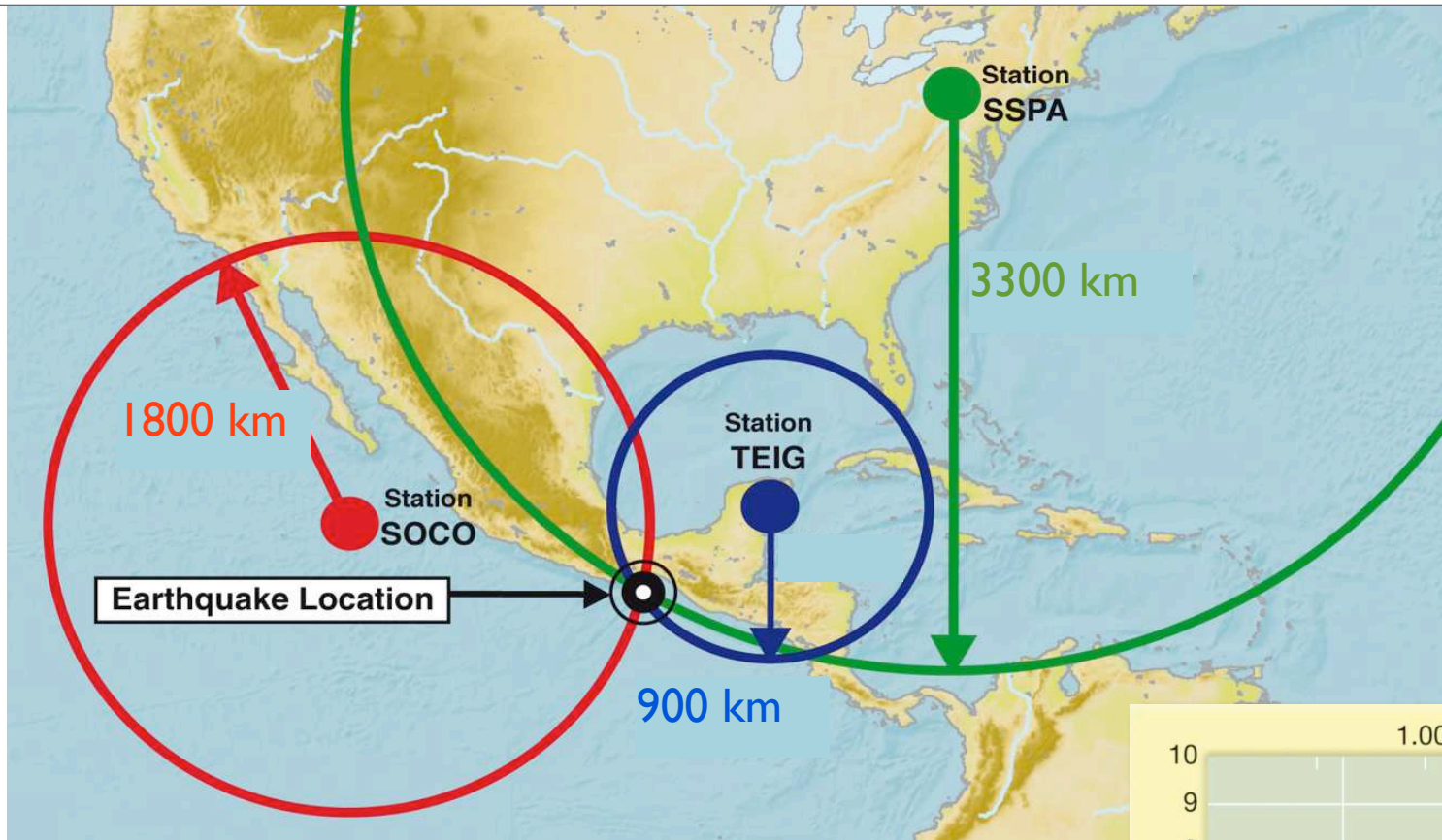
P - Welle schneller  
S - Welle langsamer



# Laufzeitenunterschiede



# wo ist das Epizentrum ?





... die berühmte  
"nach oben offene  
Richterskala"

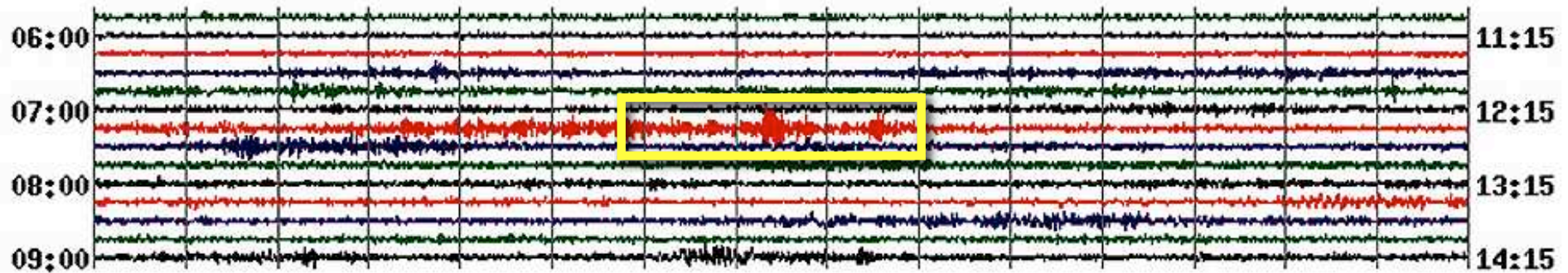
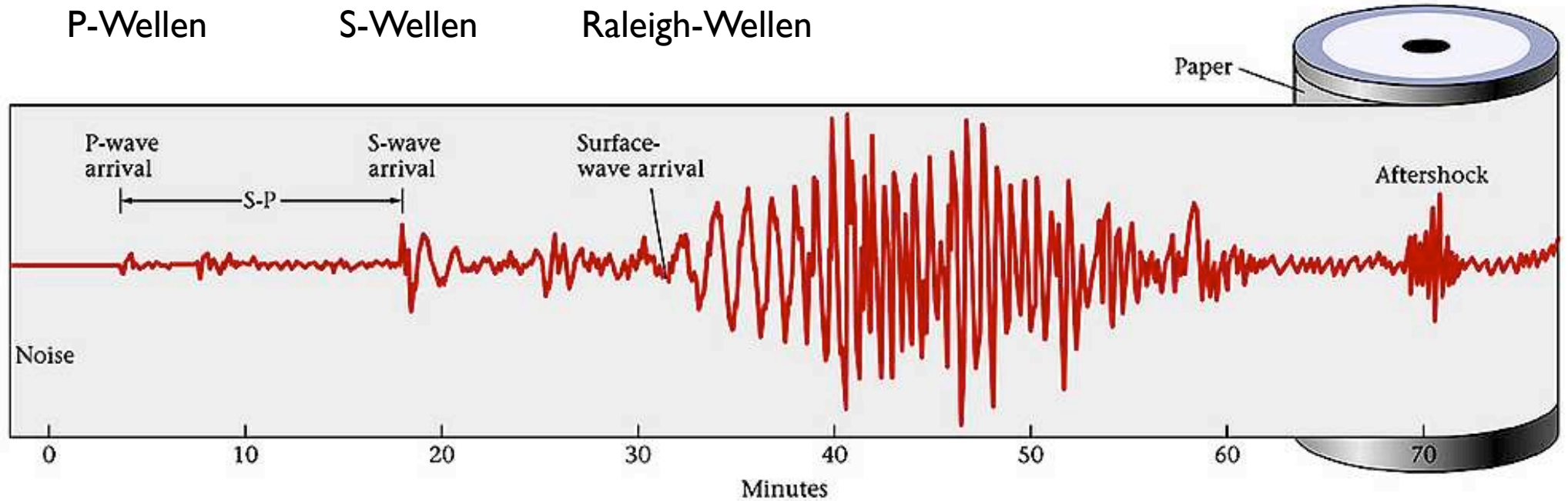
# Amplituden

P-Wellen

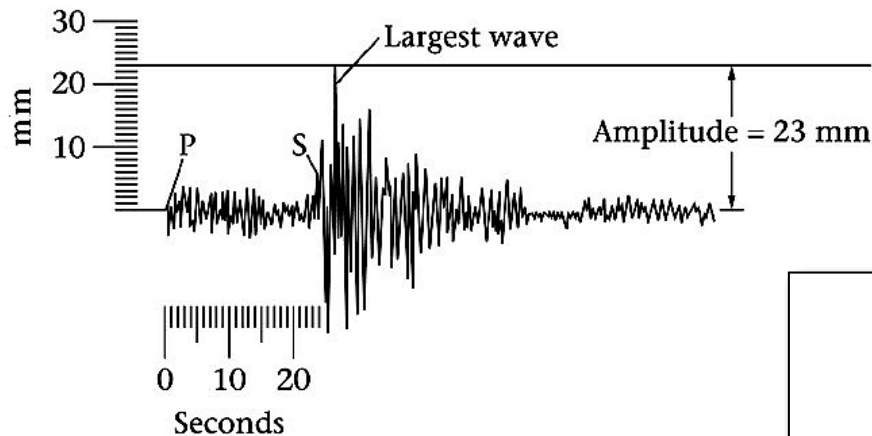
S-Wellen

Love-Wellen

Raleigh-Wellen



# Magnitude

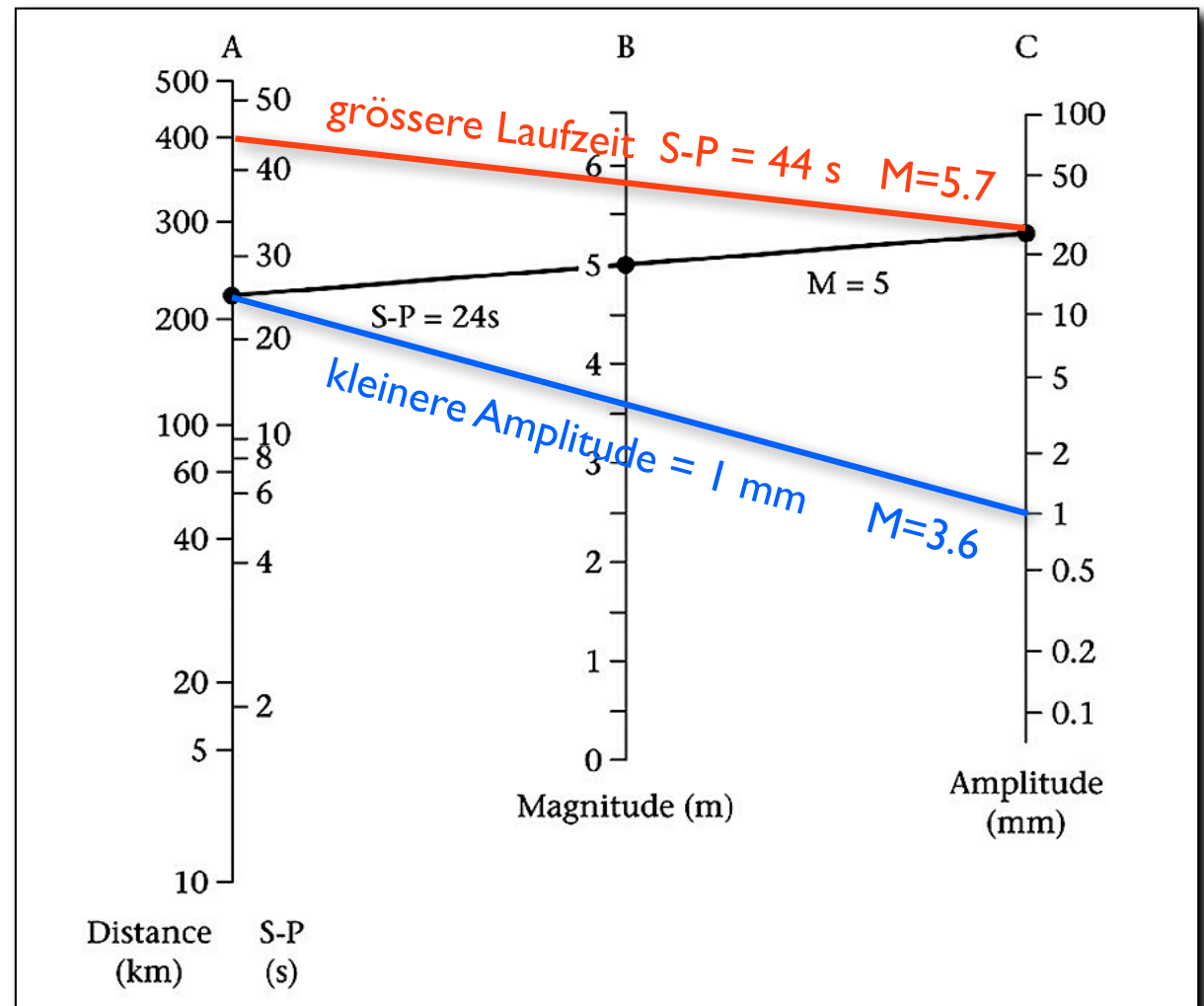


Amplitude = 23 mm

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)



# Gutenberg-Richter - Skala

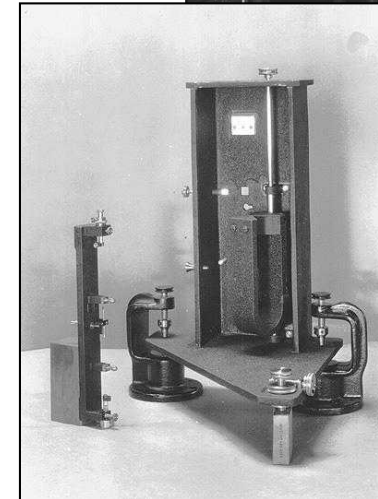
$$M_L = \log_{10}(A/T)_{\max} + q(\Delta, h)$$

- $M_L$  Magnitude (body wave magnitude)  
 $A_0$  maximale **Amplitude** ( $\mu\text{m}$ )  
 $T$  Periode (s)  
 $q$  Korrekturfunktion  
 $\Delta$  Winkelabstand Seismograph - Herd ( $^\circ$ )  
 $h$  Herdtiefe (km)

für Magnituden bis  $M_{6.5}$



Gutenberg  
in seinem  
Wohnzimmer



Anderson-Wood Seismograf

# Momentenmagnitude

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

Produkt aus Steifigkeit (Schermodul)  
mal durchschnittlicher Slip-Distanz (m)  
mal Bruchfläche (m<sup>2</sup>)

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

Konsistent mit der Richterskala

für Magnituden ab M6.5

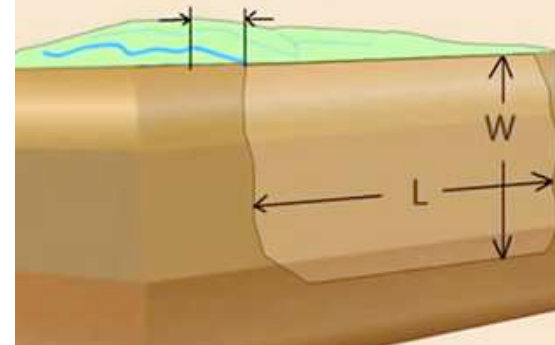
Seismisches Moment:

$$M_0 = \mu \cdot D \cdot A$$

$\mu$  Steifigkeit des Gesteins

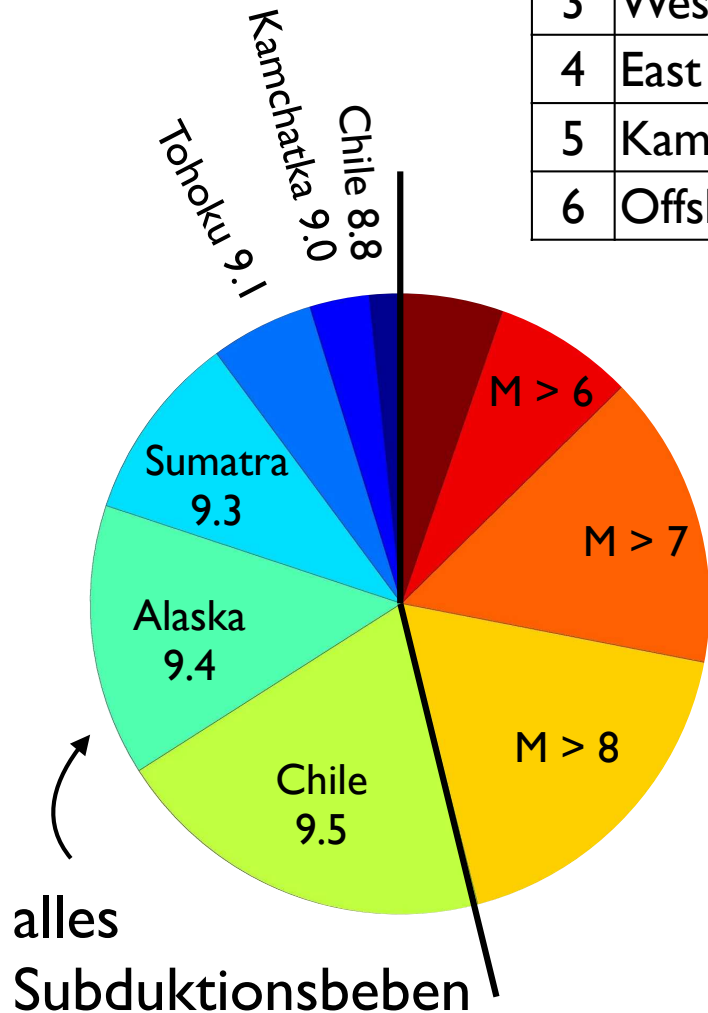
D Länge des Versatzes

A Fläche der aktiven Verwerfung



# Hitliste der Erdbeben

	Weltweit	Datum	Magnitude
1	Valdivia, Chile	22. 5. 1960	9.5
2	Prince William Sound, Alaska	28. 3. 1964	9.2
3	West Coast of Northern Sumatra	26. 12. 2004	9.1
4	East Coast of Honshu, Japan	11. 3. 2011	9
5	Kamchatka	4. 11. 1952	9
6	Offshore Maule, Chile	27. 2. 2010	8.8



	Schweiz	Datum	Magnitude
1	Basel BS	18. 10. 1356	6.6
2	Churwalden GR	3. 9. 1295	6.2
3	Stalden-Visp VS	25. 7. 1524	6.2
4	Aigle VD	11. 3. 1584	5.9
5	Unterwalden NW	18. 9. 1601	5.9
6	Ardon VS	April 1524	5.8

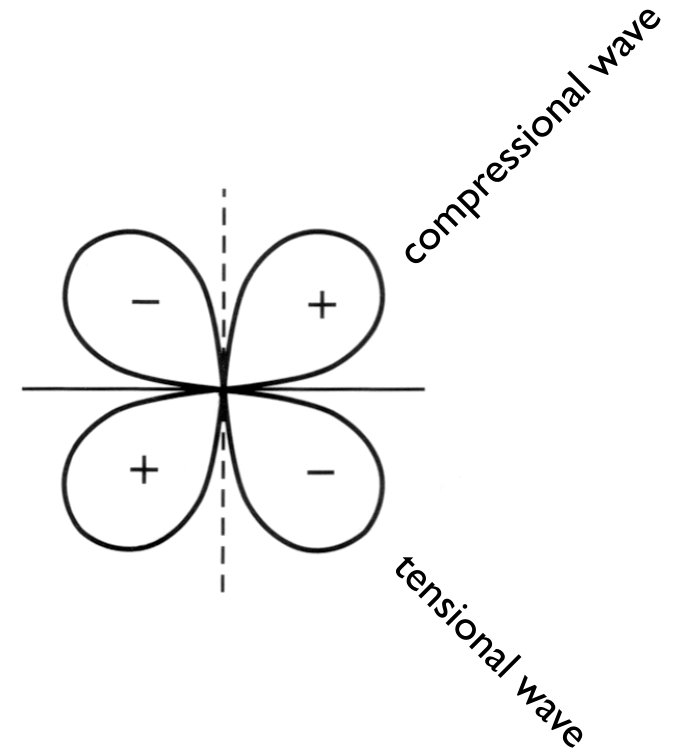
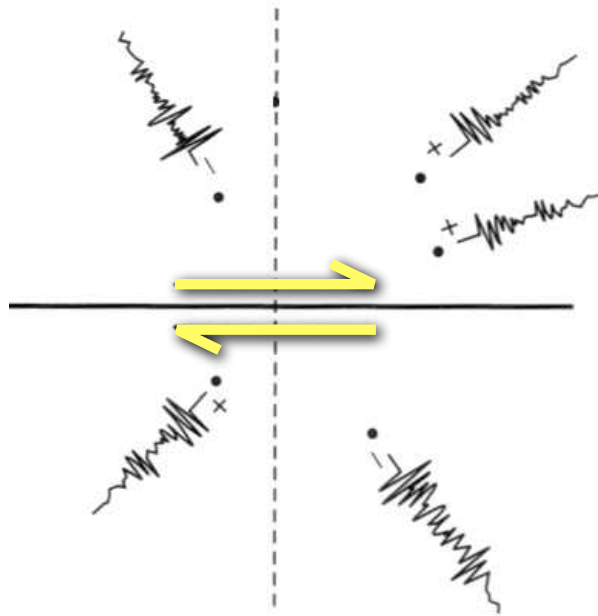
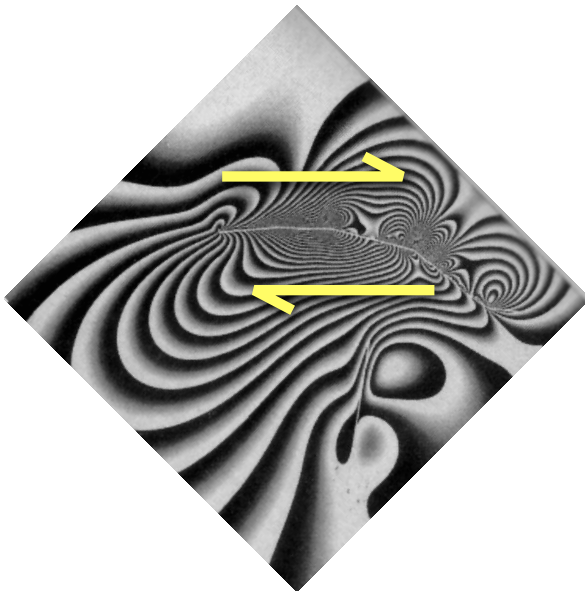
# Herdflächenlösungen

(... nichts für die Küche ...)

# Herdfächenlösung

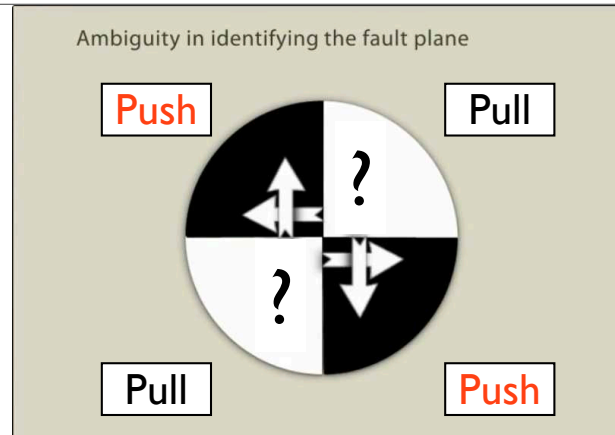
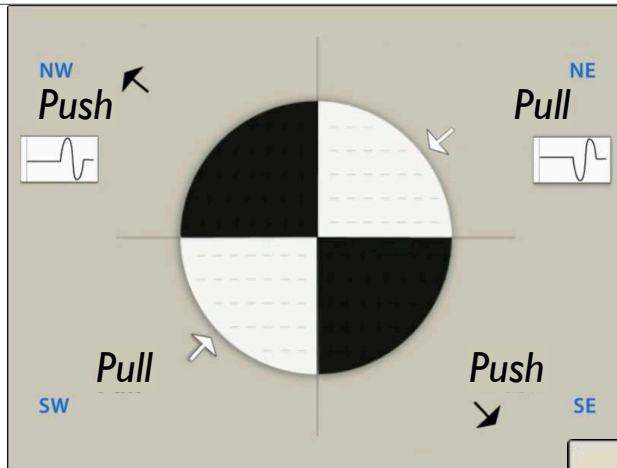


+ = up = push = C  
- = down = pull = T

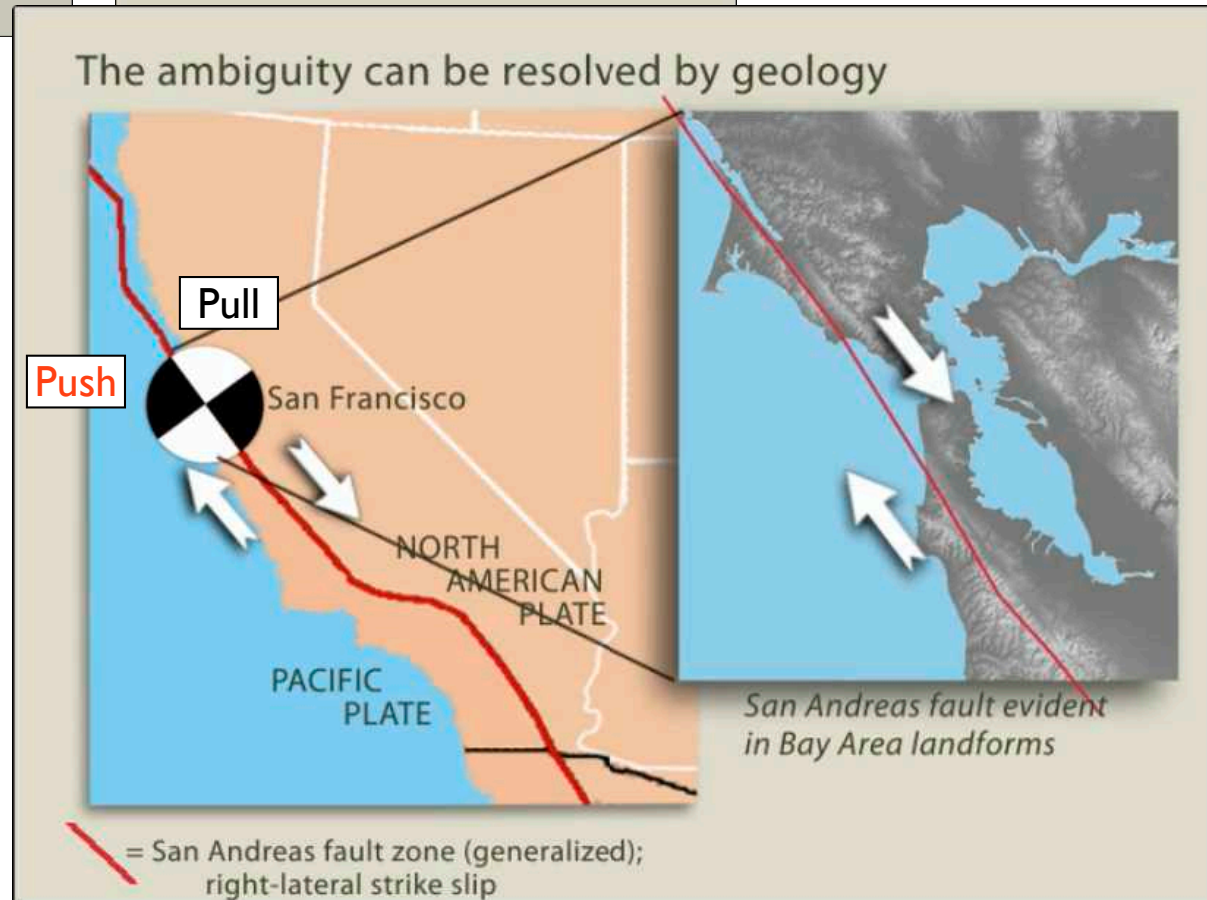




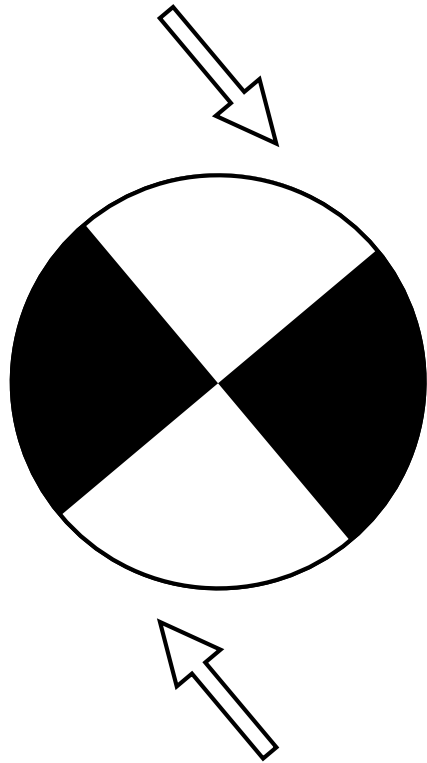
# welches ist die Bruchfläche ?



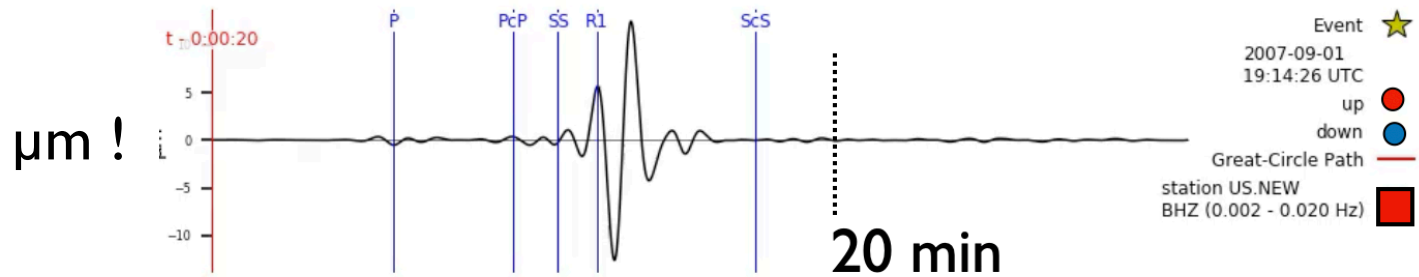
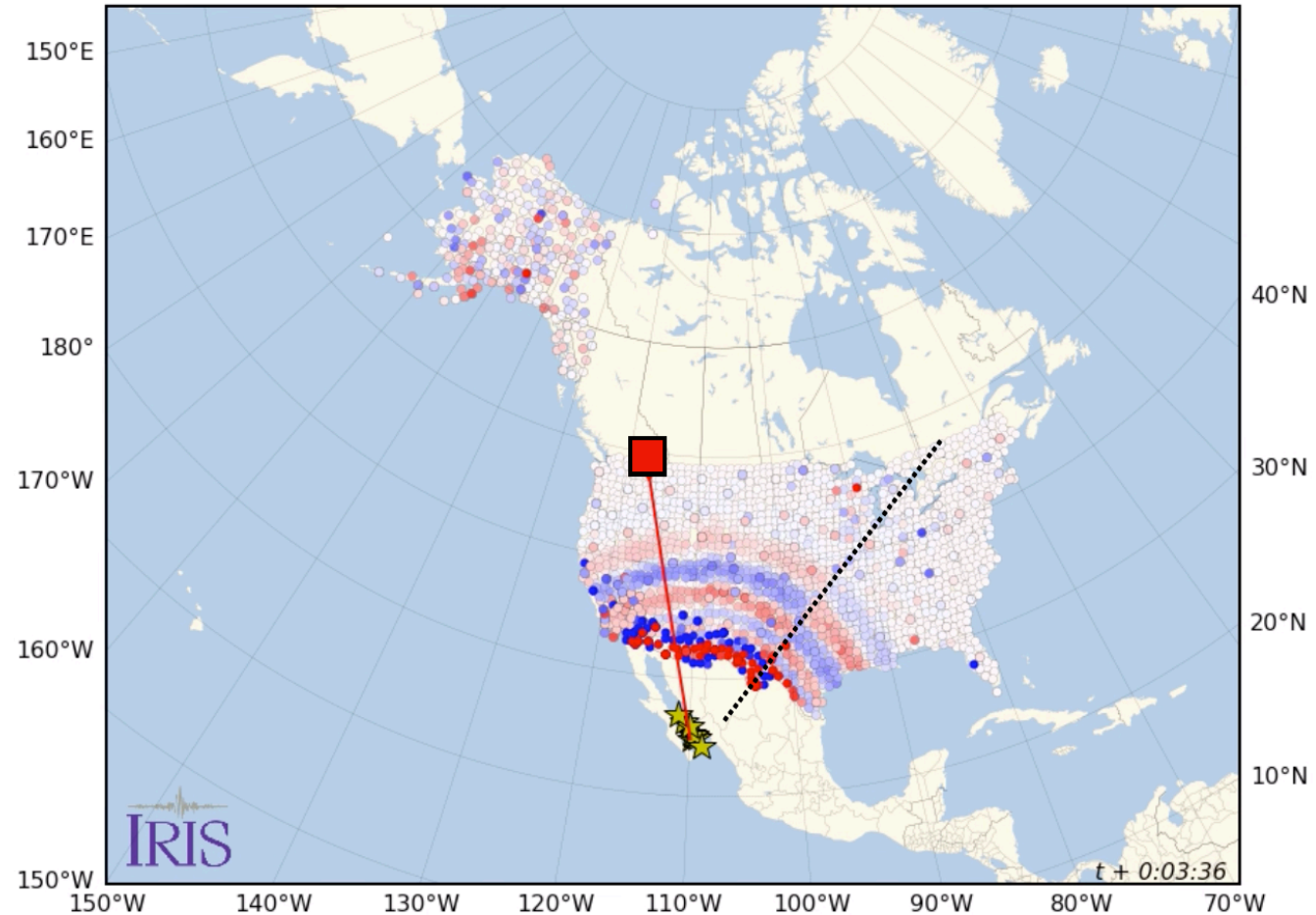
geologische Einsicht:



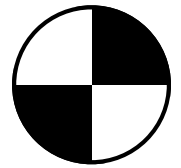
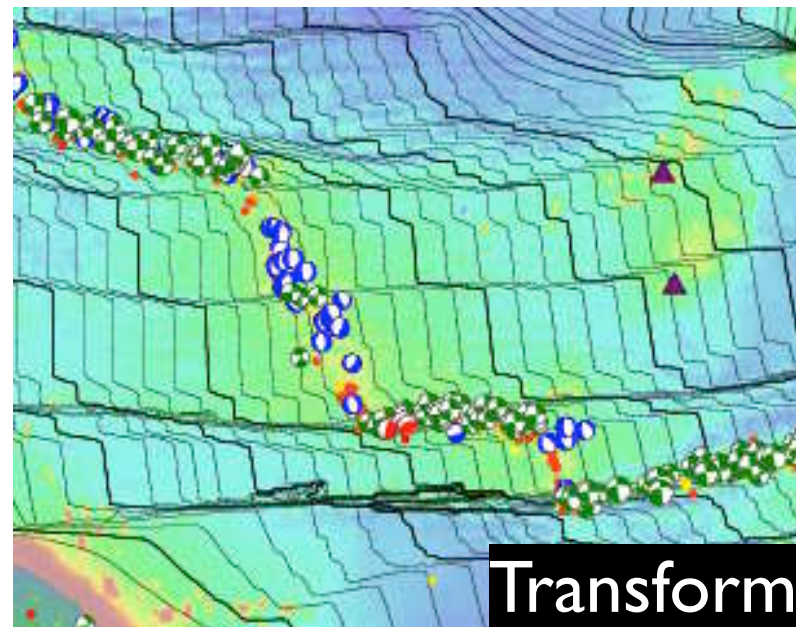
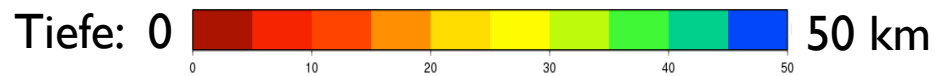
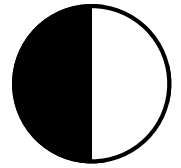
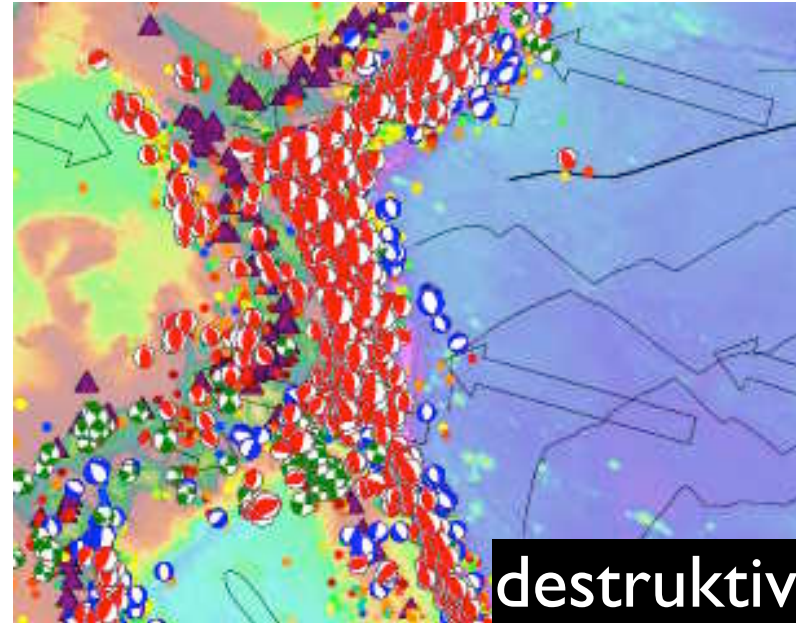
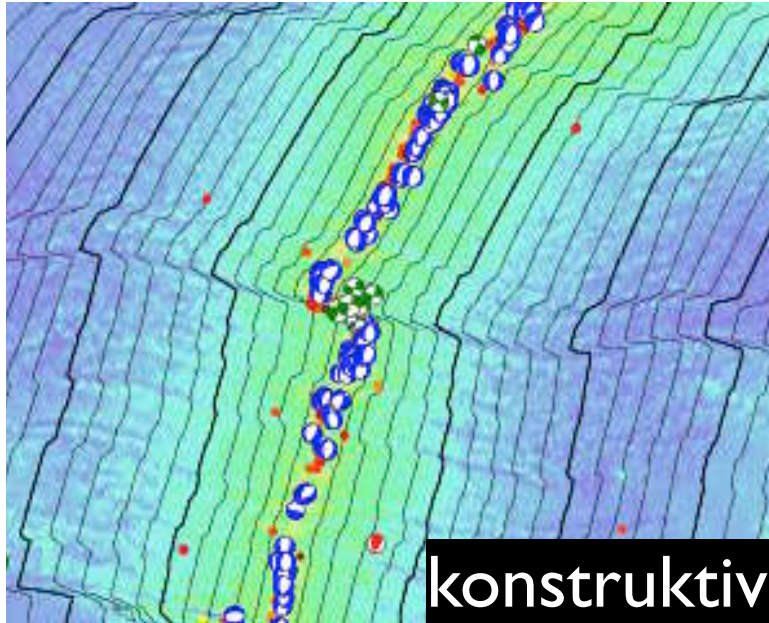
# push und pull



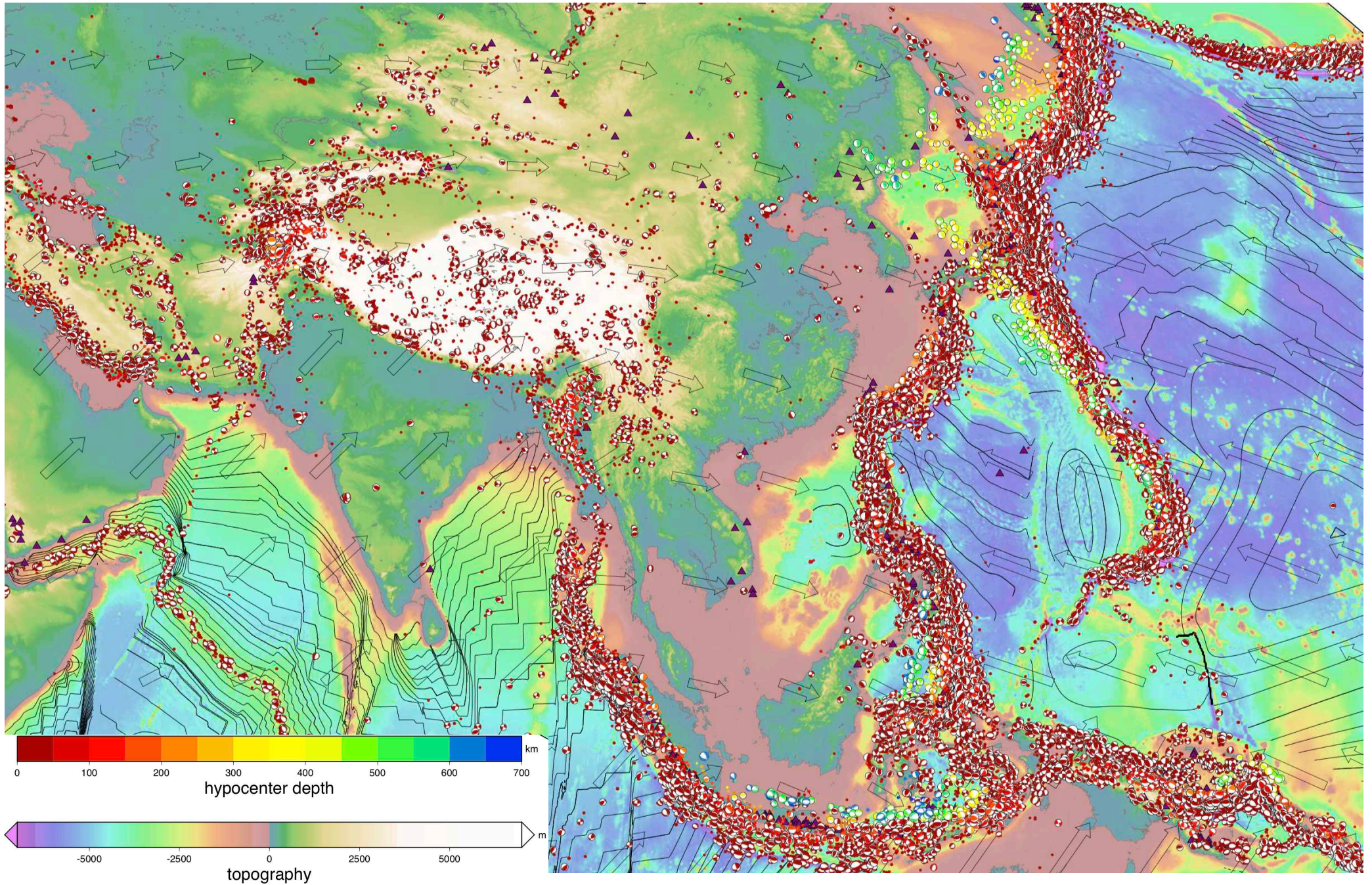
Super (Combined) GMV—Gulf of California, 2007-2019



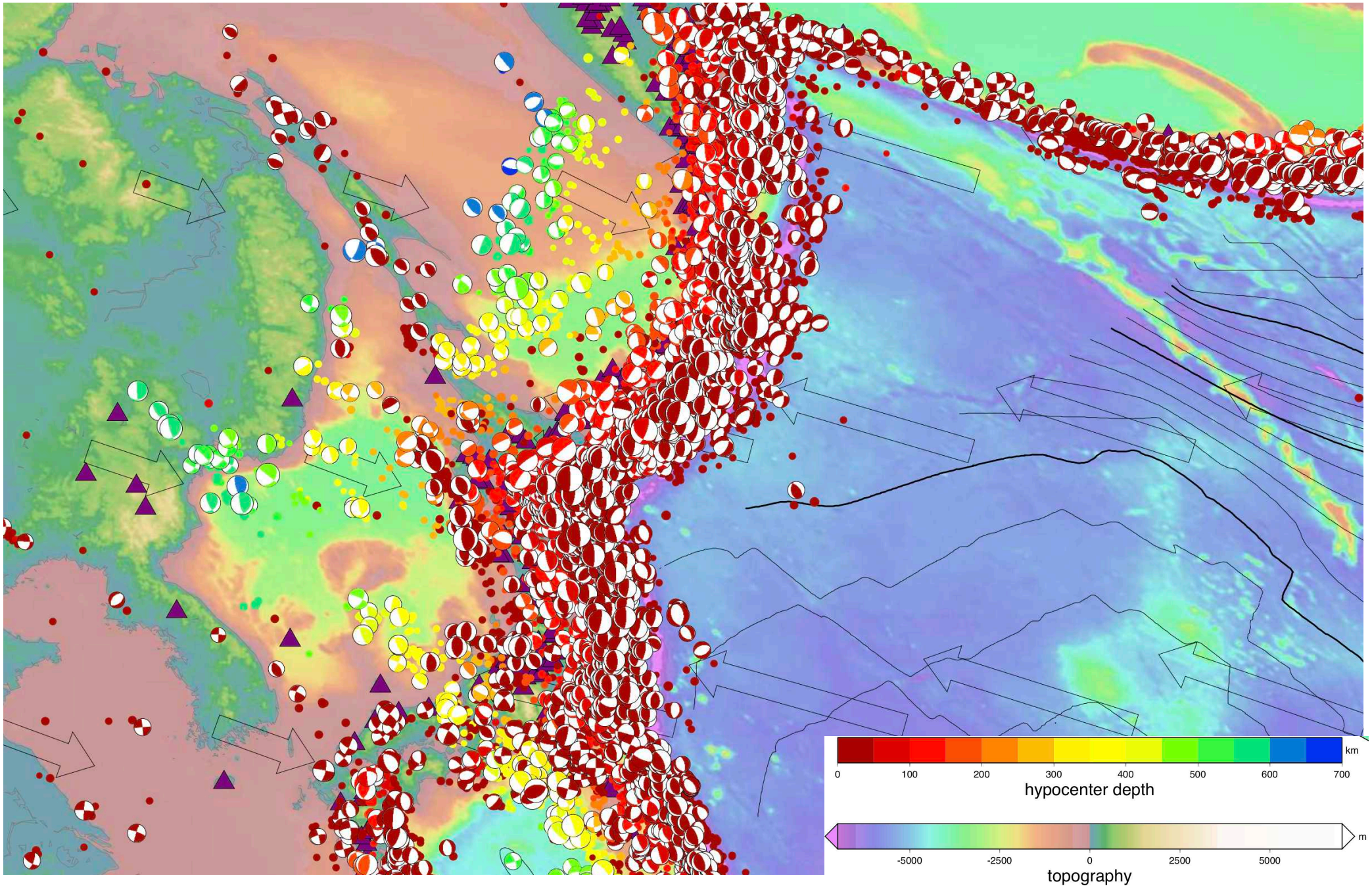
# Plattengrenzen - Erdbebensarten



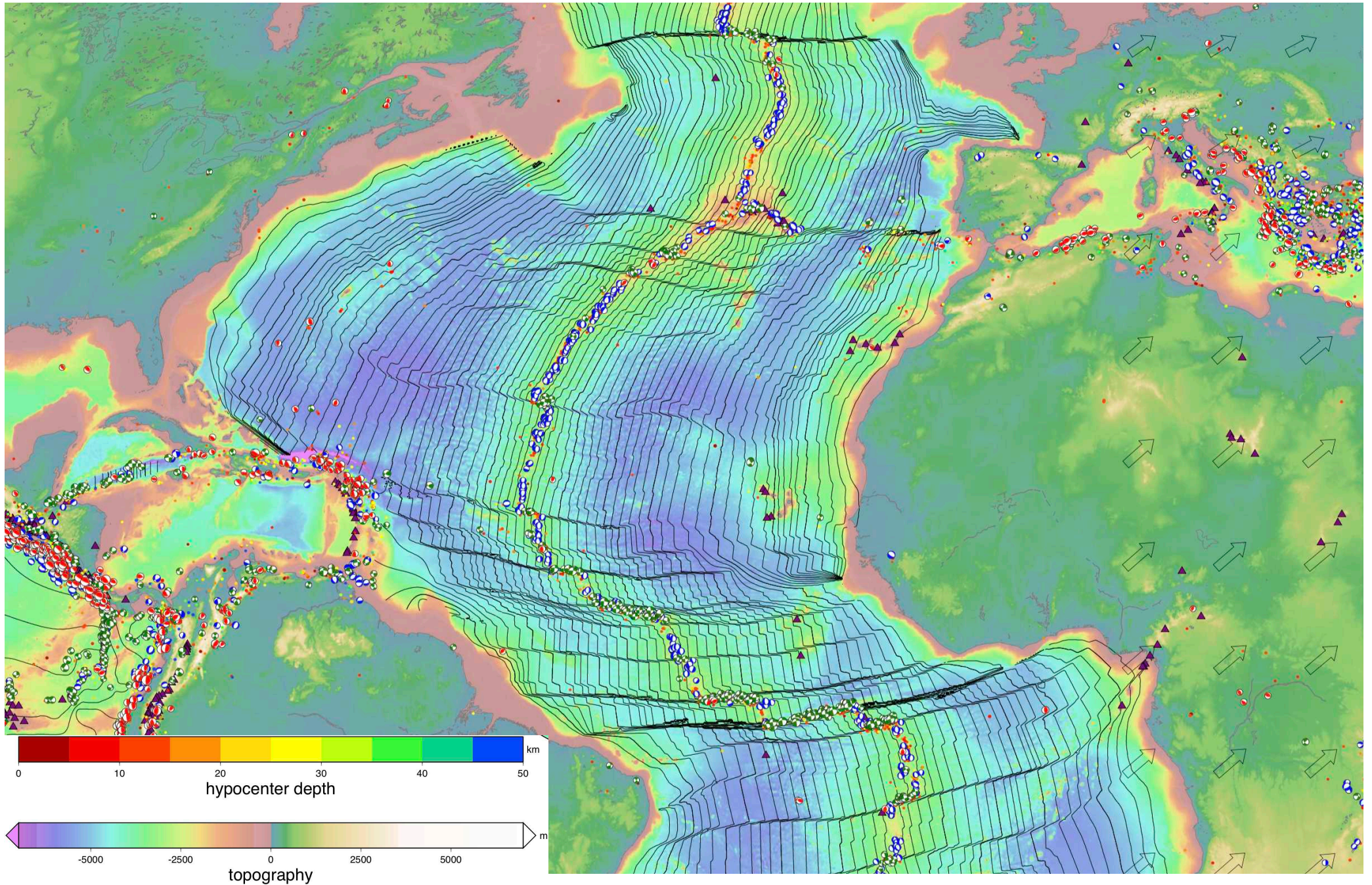
# Tiefbeben – Subduktionen



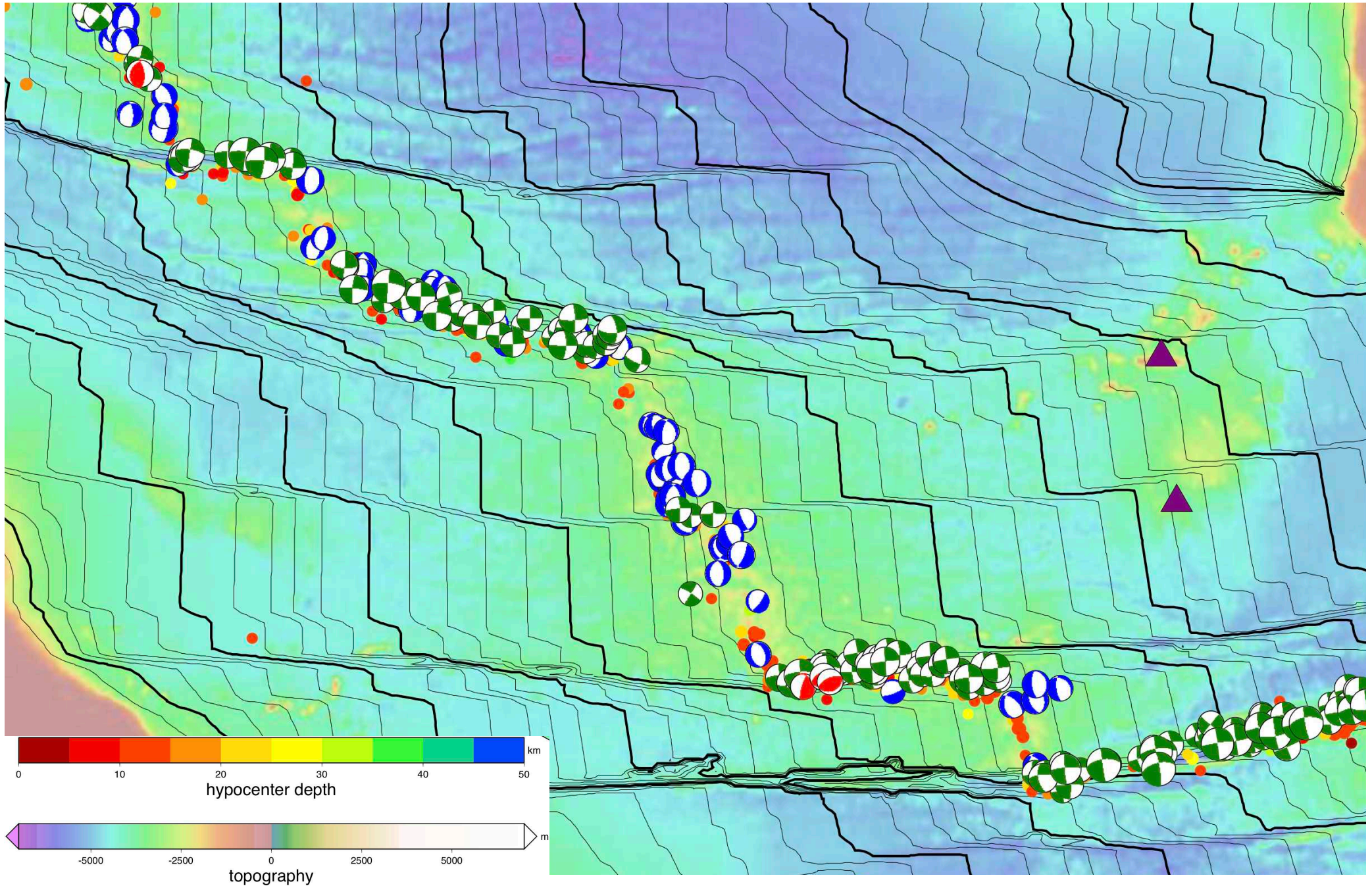
# Tiefbeben – Subduktionen



# seichte Beben – Transforms



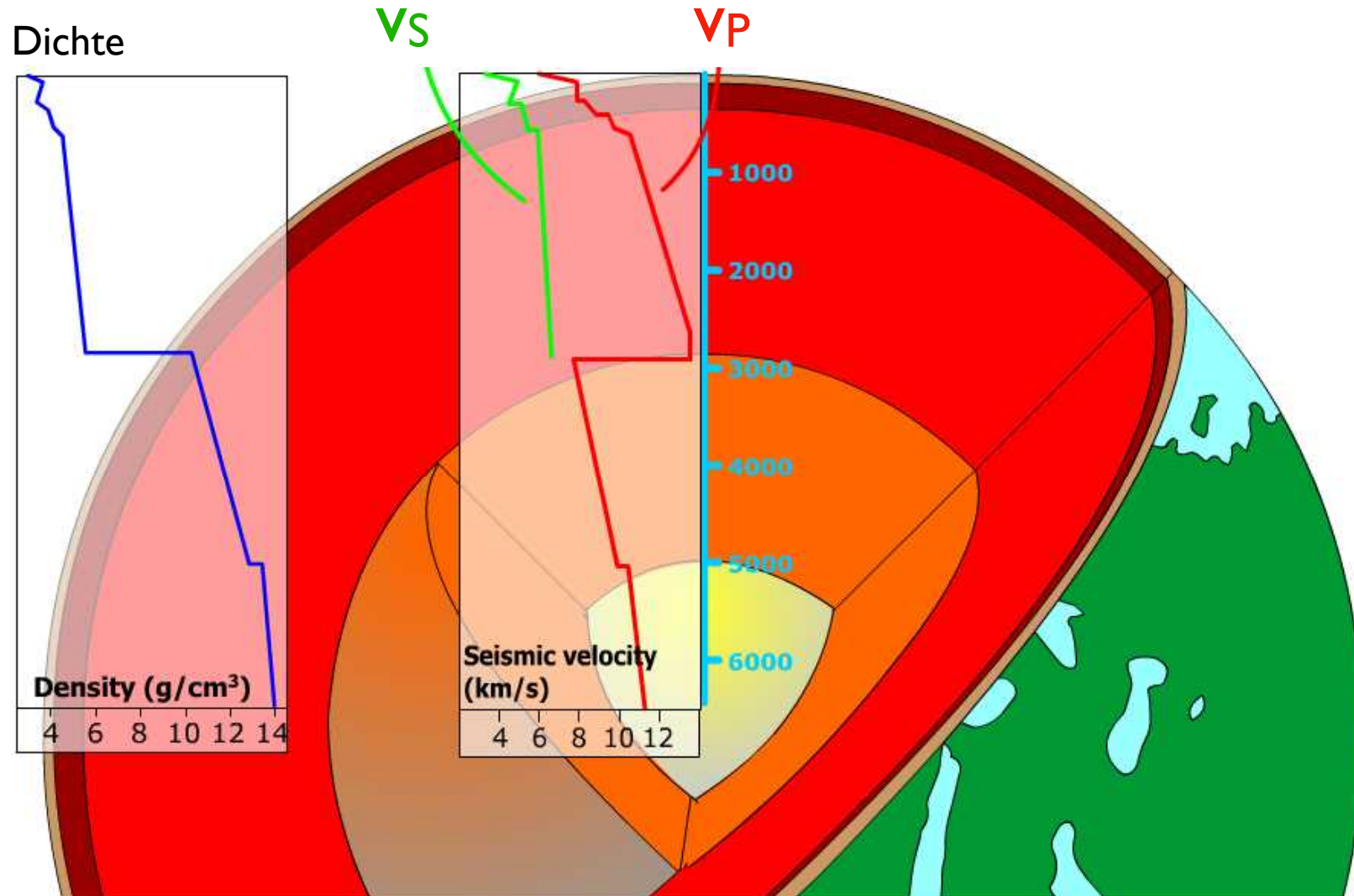
# shallow Earthquakes – Transforms



# seismische Tomographie



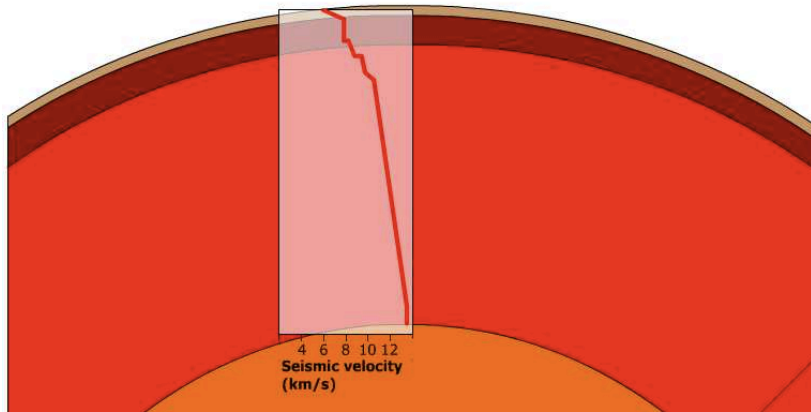
## Wellen-Geschwindigkeiten



# $v_P$ und $v_S = f(T)$

## Normale P-Wellengeschwindigkeiten im Mantel

P-waves

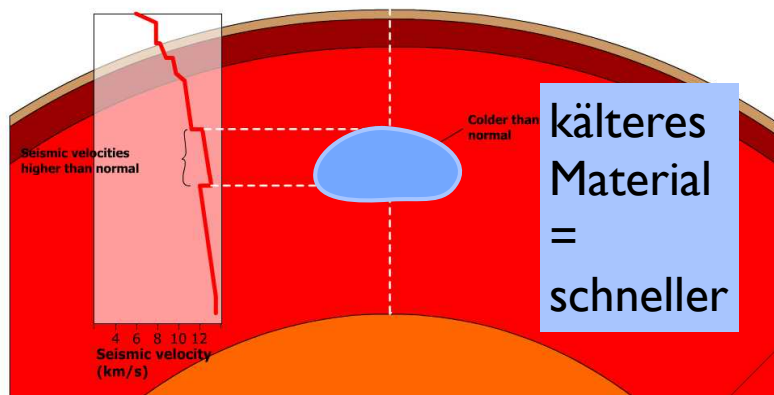


pro memoria

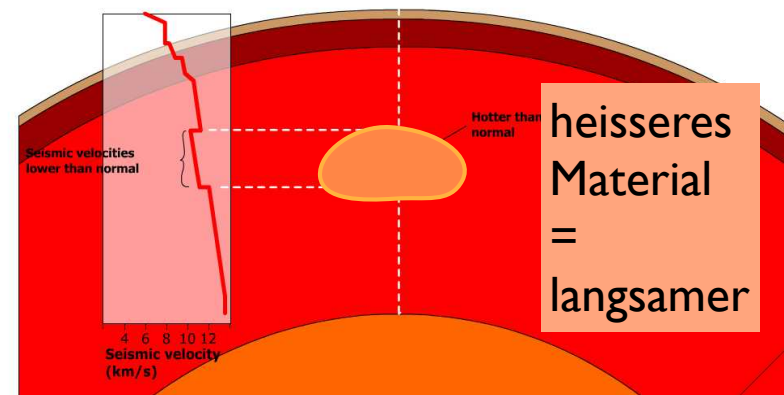
$$\text{Geschwindigkeit} = \sqrt{\frac{\text{Elastizitätsmodul}}{\text{Dichte}}}$$

## Einfluss von Temperaturvariationen

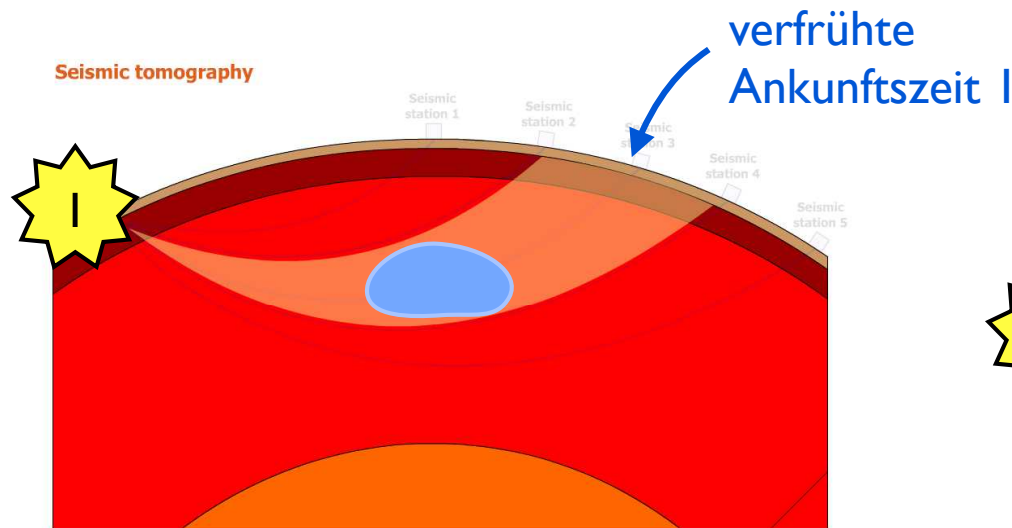
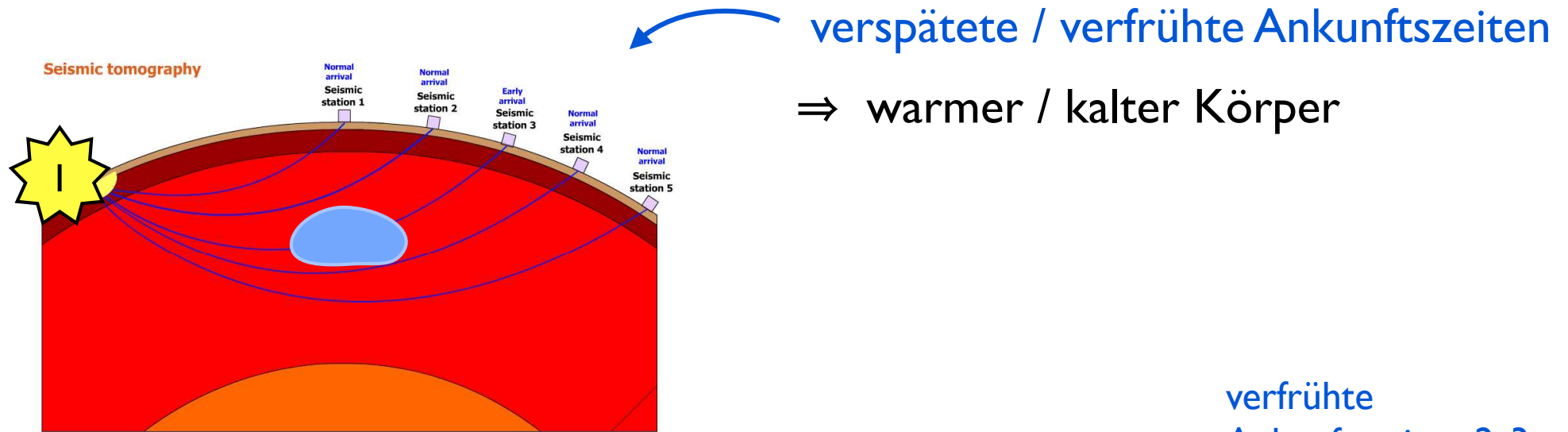
Temperature variations in the mantle



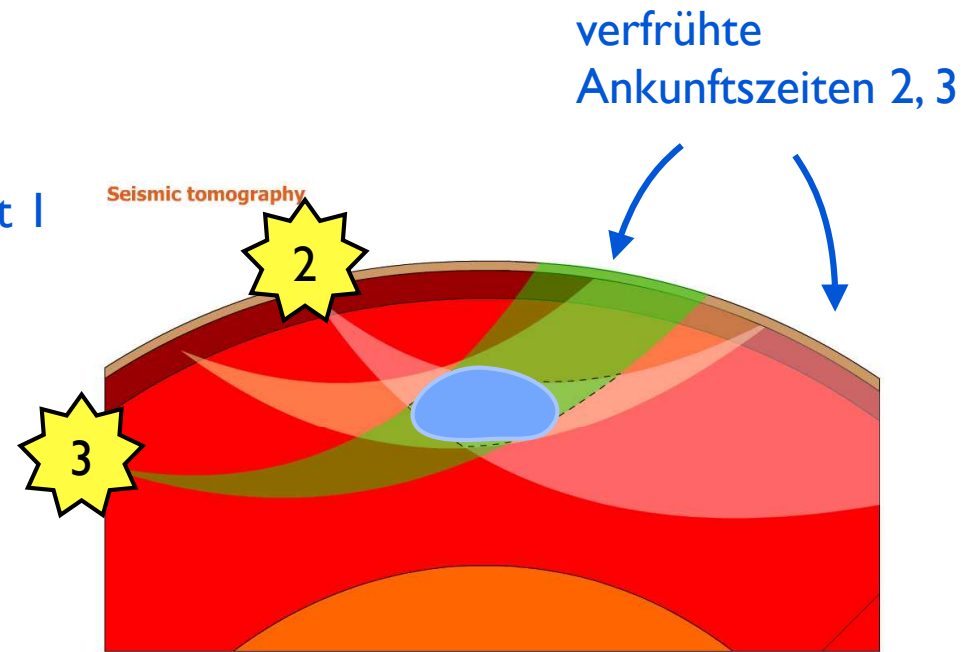
Temperature variations in the mantle



# P-Wellen Ankunftszeiten

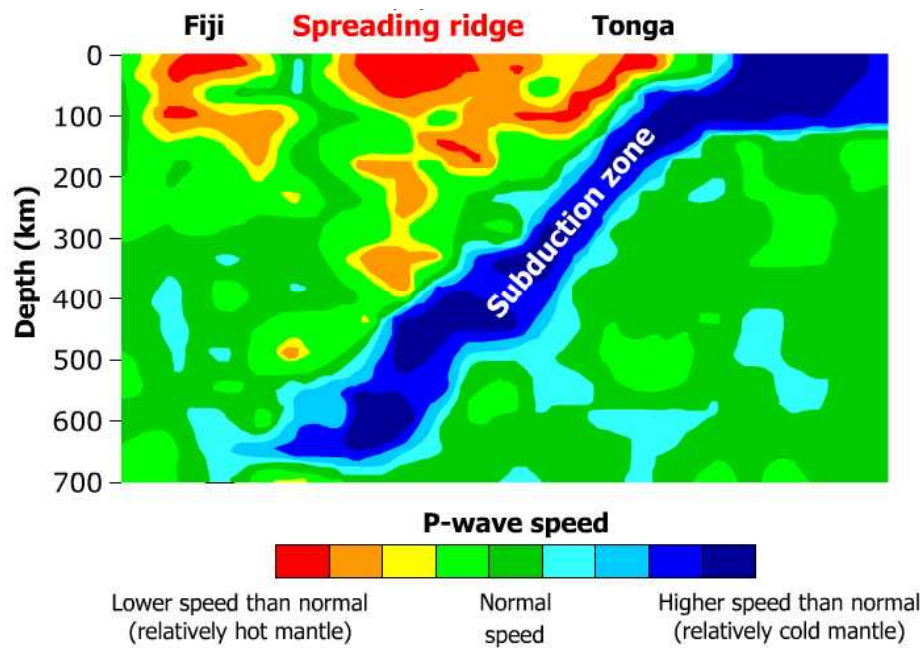
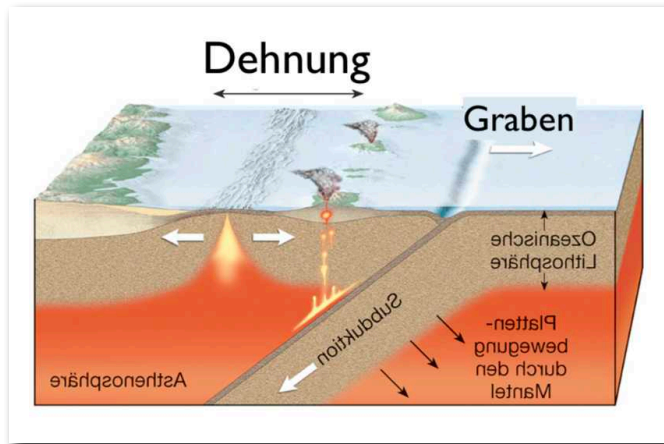


1. Erdbeben

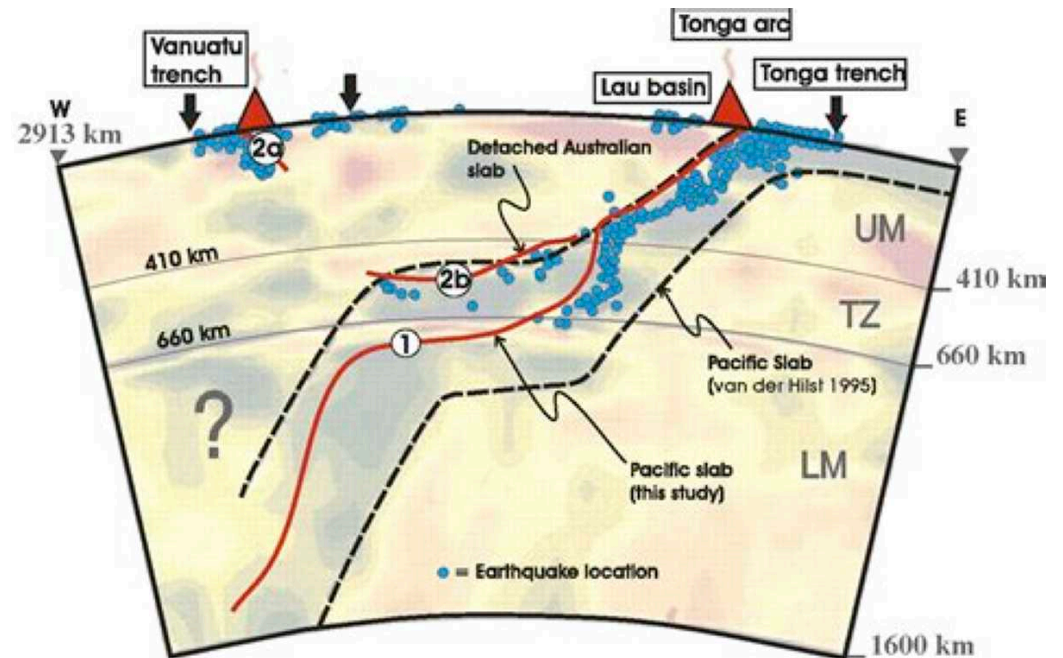


2., 3. Erdbeben

# Modell versus Beobachtung

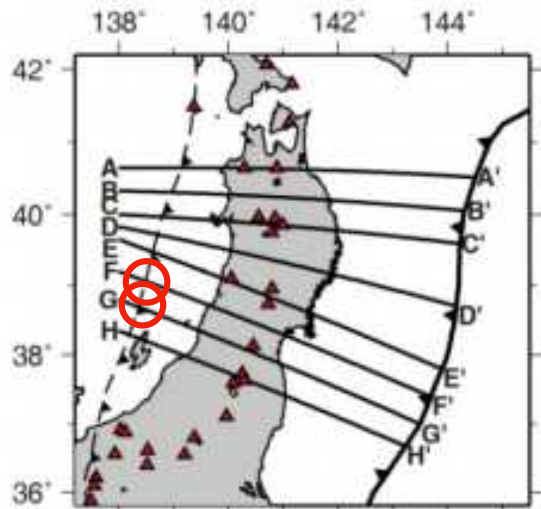
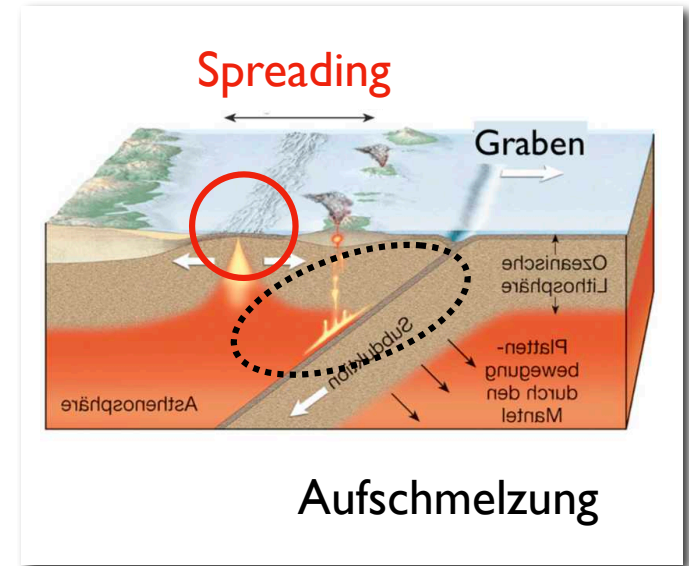
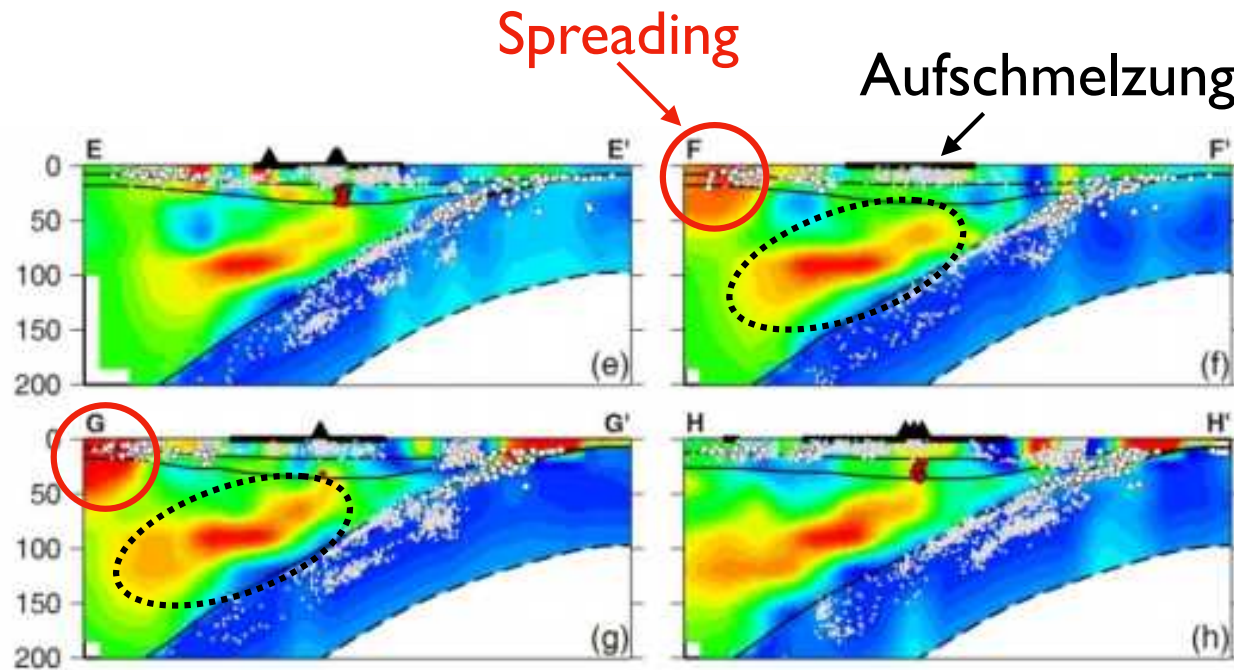


Tomogramm

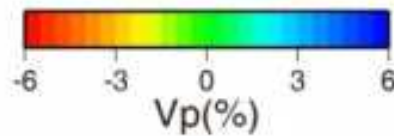


verfeinerte Interpretation

# back arc spreading

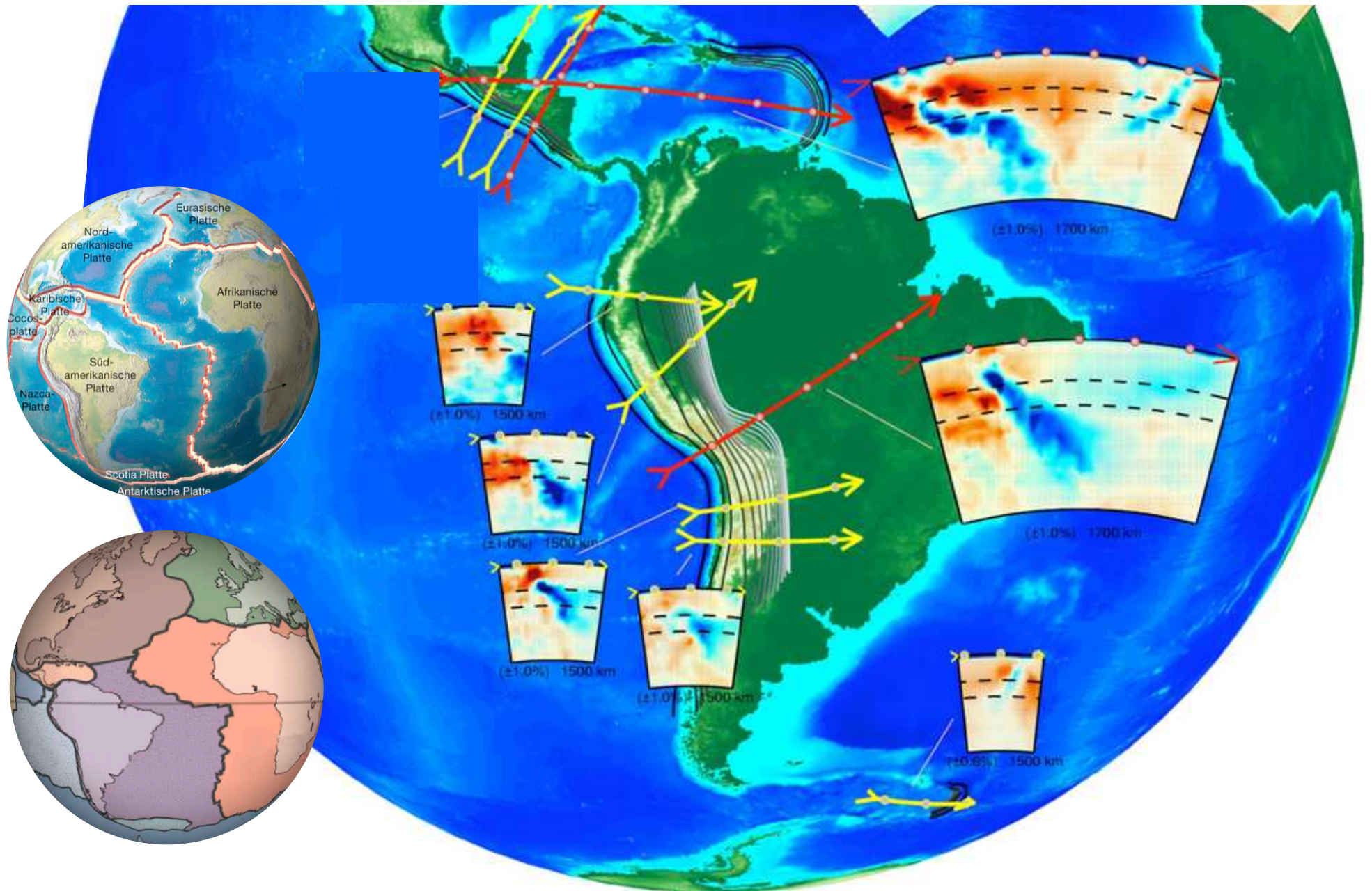


Honshu, Japan

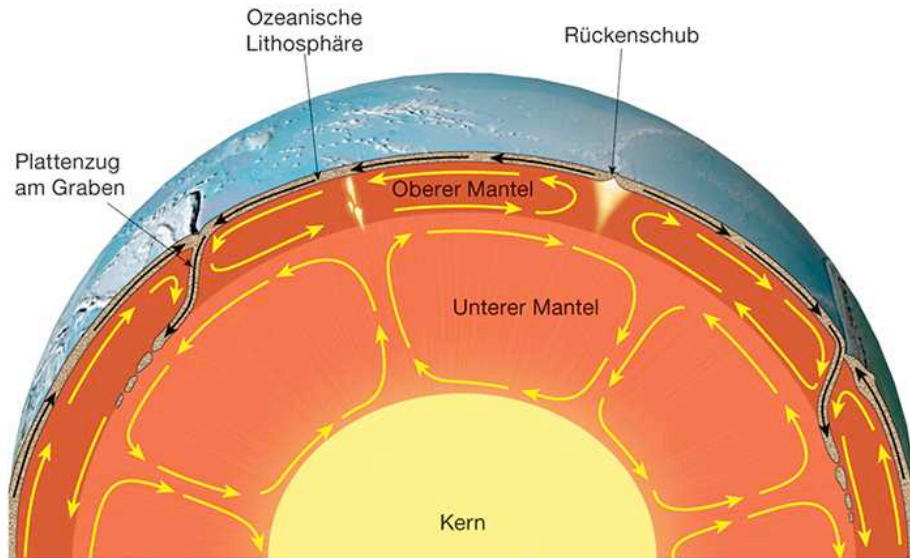


P- Welle

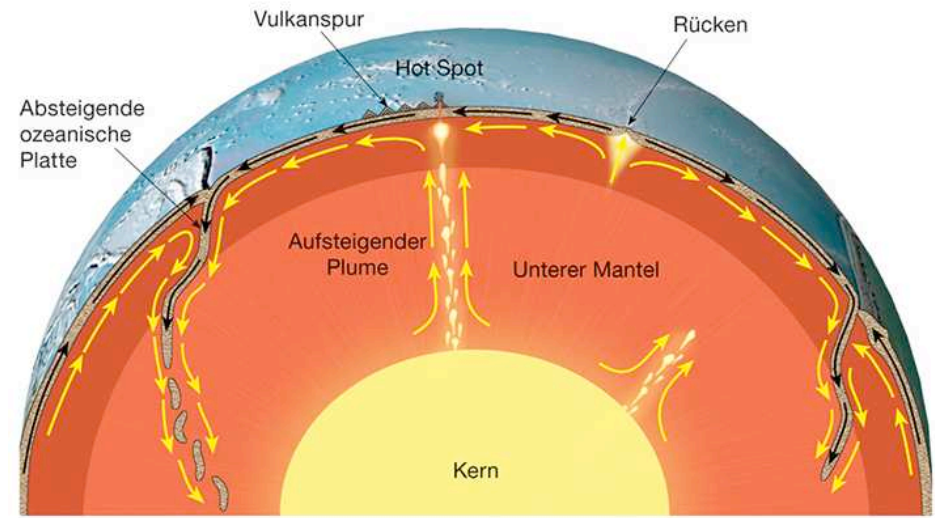
# Subduktionszonen



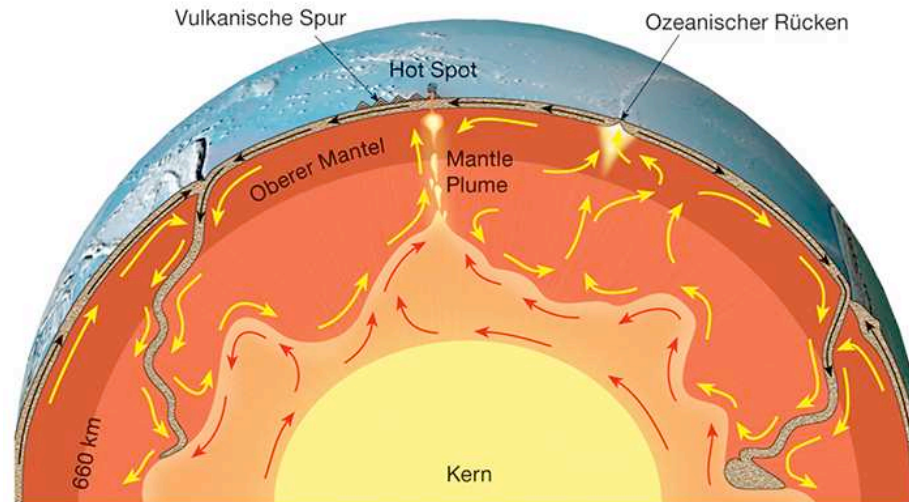
# wie sieht's aus ?



Lagenbau in 660 km Tiefe

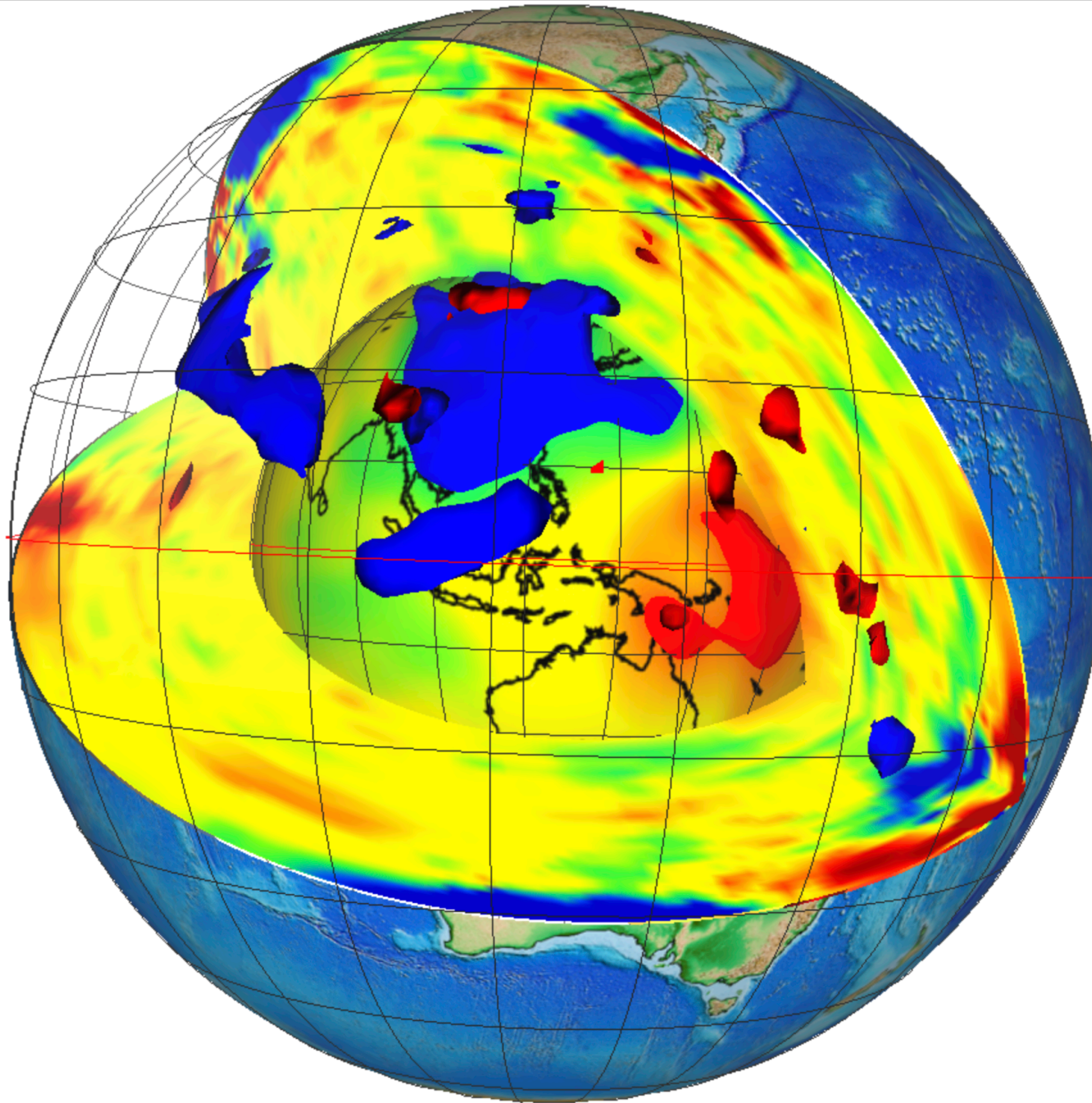


Konvektion im gesamten Mantel



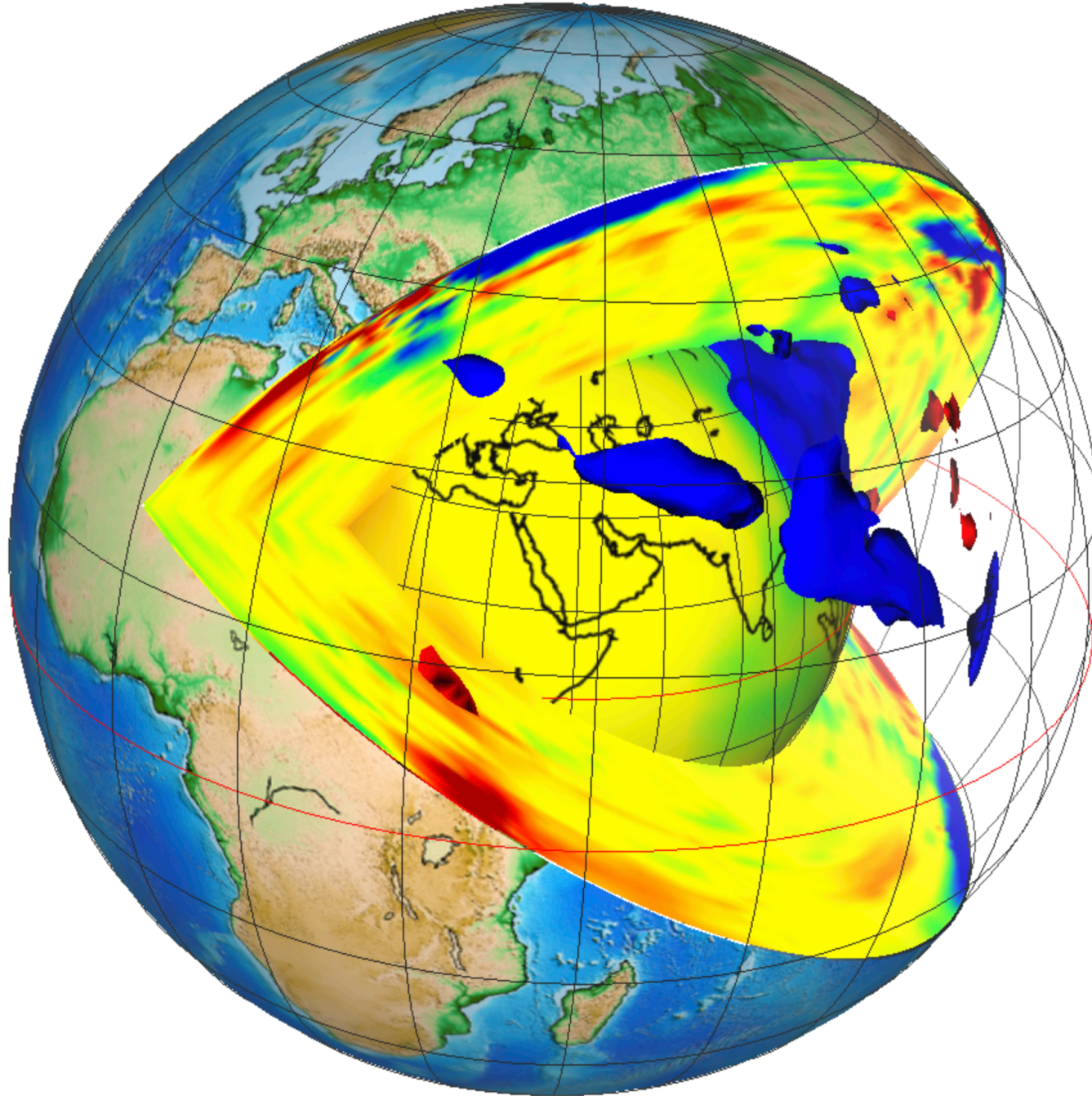
Lagenstruktur im tiefen Mantel

# P-Wellen von Japan ...



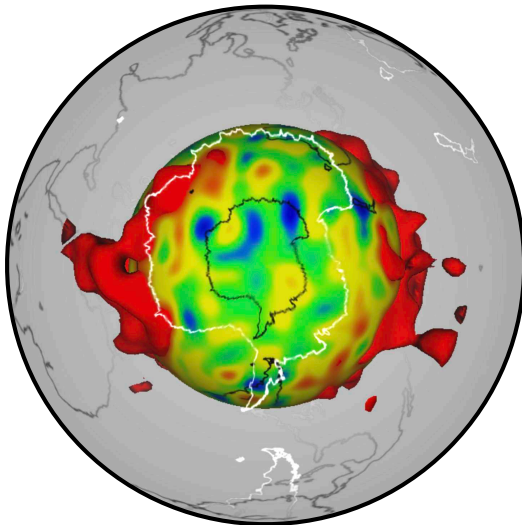
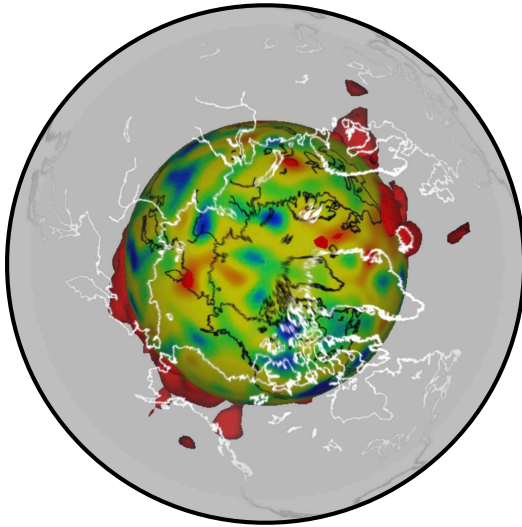


# ... bis Europa



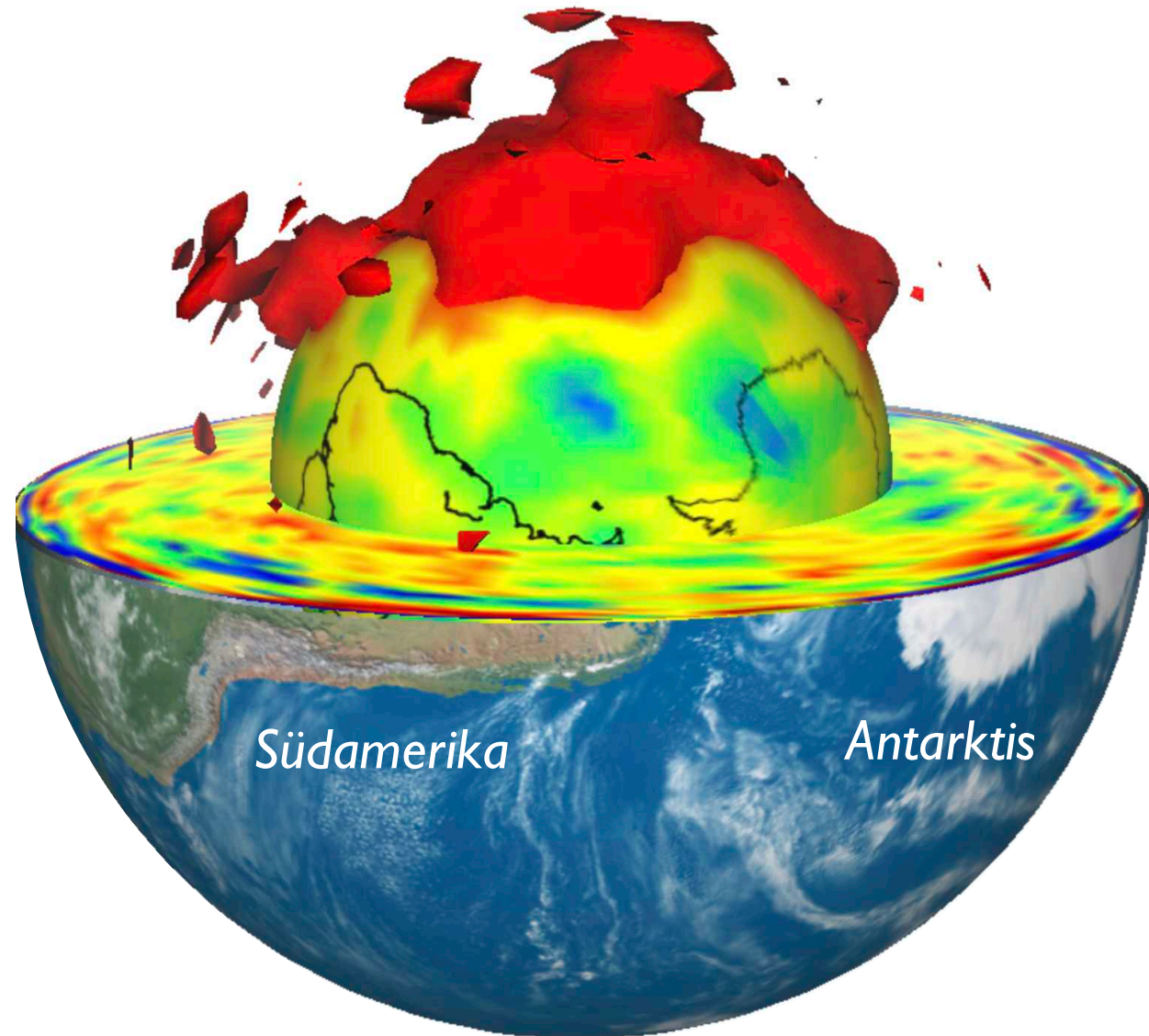
# enigmatische LLSVPs

von Norden



von Süden

## Large Low-Shear-Velocity Provinces



**zusammenfassend ...**



von Erdbeben zur seismischen Tomographie

- ✓ die Natur seismischer Wellen
- ✓ die Physik dahinter
- ✓ die Entstehung von Erdbebenwellen
- ✓ Aufzeichnung seismischer Wellen
- ✓ Information aus seismischen Wellen
- ✓ seismische Tomographie