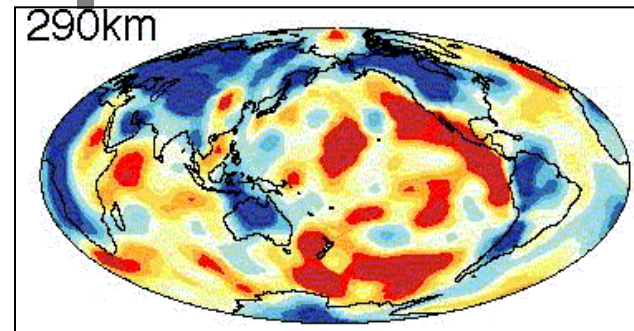
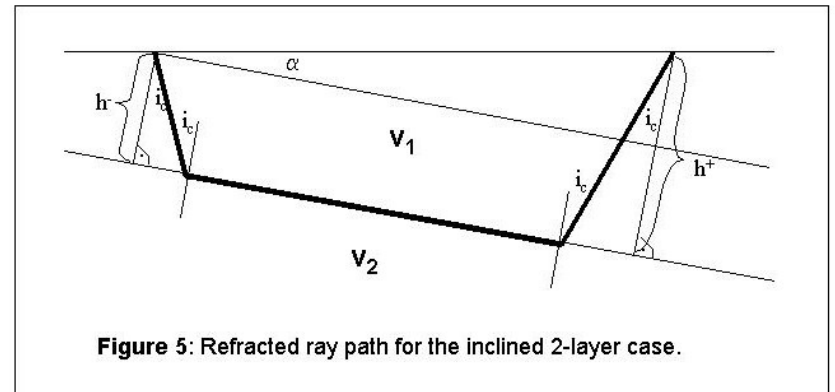


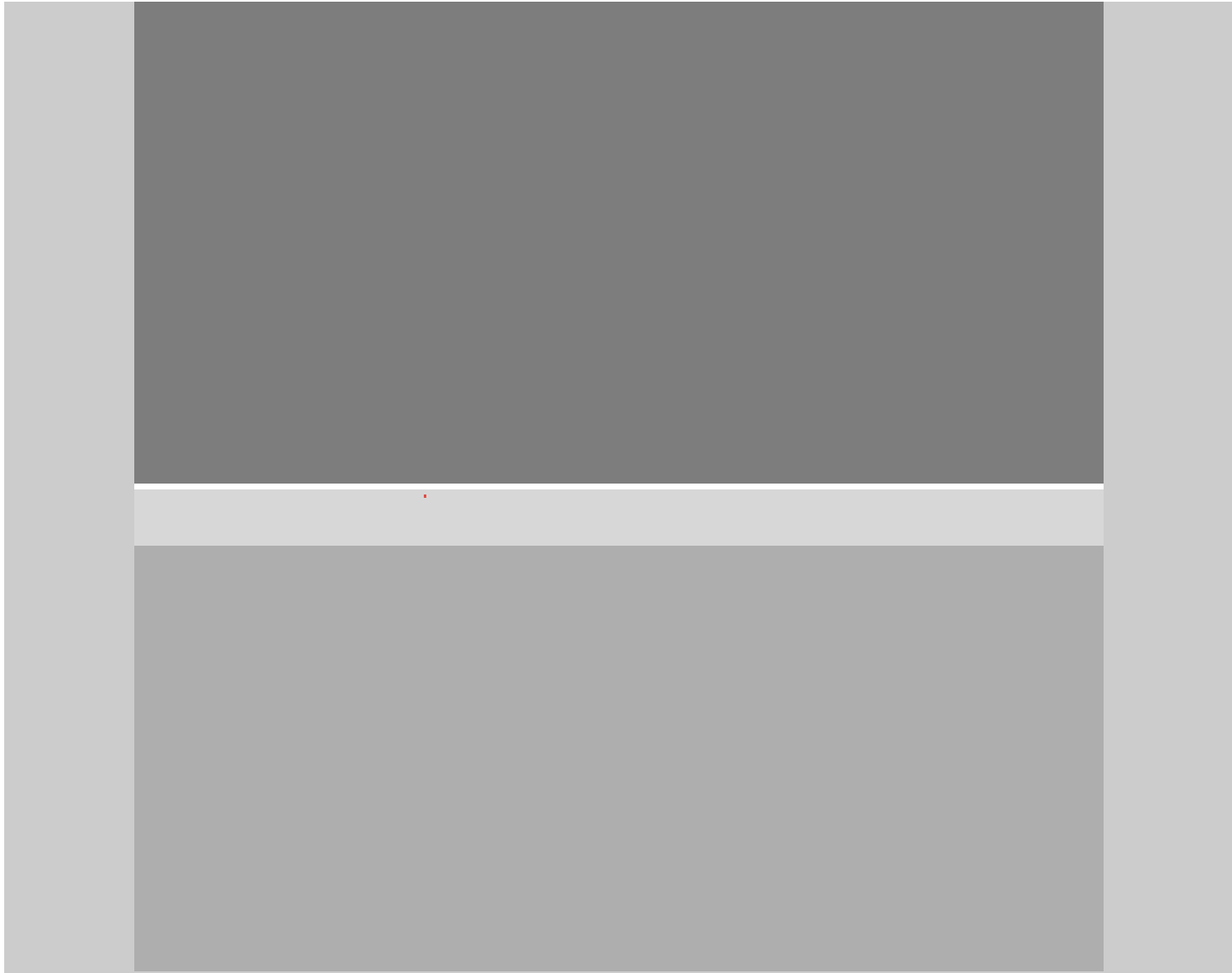
Refraktionsseismik

- **Zweischichtfall**
 - Laufzeitdiagramme
 - Inversionsproblem
- **Dreischichtfall**
- **Geneigte Schicht**
- **N-Schichtfall**
- **Anwendungen**
- **Seismische Tomographie**

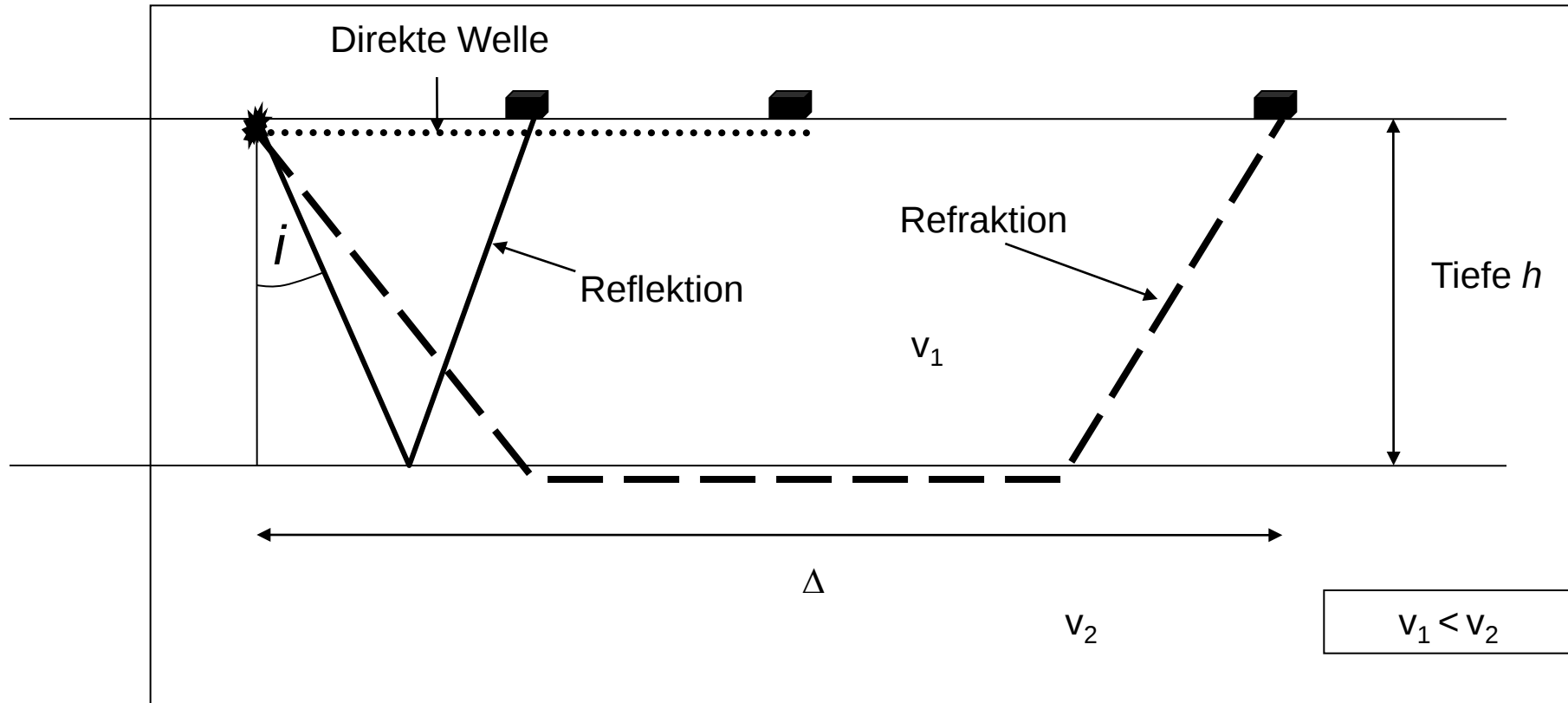


Theorie zu diesem Kapitel als **Skript** erhältlich (in Englisch) -> download area
Außerdem: Keary, Kapitel 5; Mussett, Kapitel 6

Snapshots and Seismogramme: Refraktierte Wellen



Refraktionsprofil



Geometrie des Reflexions/Refraktionsexperiments. Drei Phasen werden bei größeren Distanzen beobachtet: die direkte Welle, die reflektierte Welle und die refraktierte Welle.

Refraktionsexperiment: Ankunftszeiten

Direkte Welle

$$t_{dir} = \Delta / v_1$$

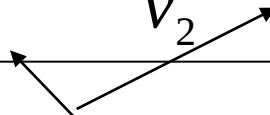
Reflektierte Welle

$$t_{refl} = \frac{2}{v_1} \sqrt{(\Delta/2)^2 + h^2}$$

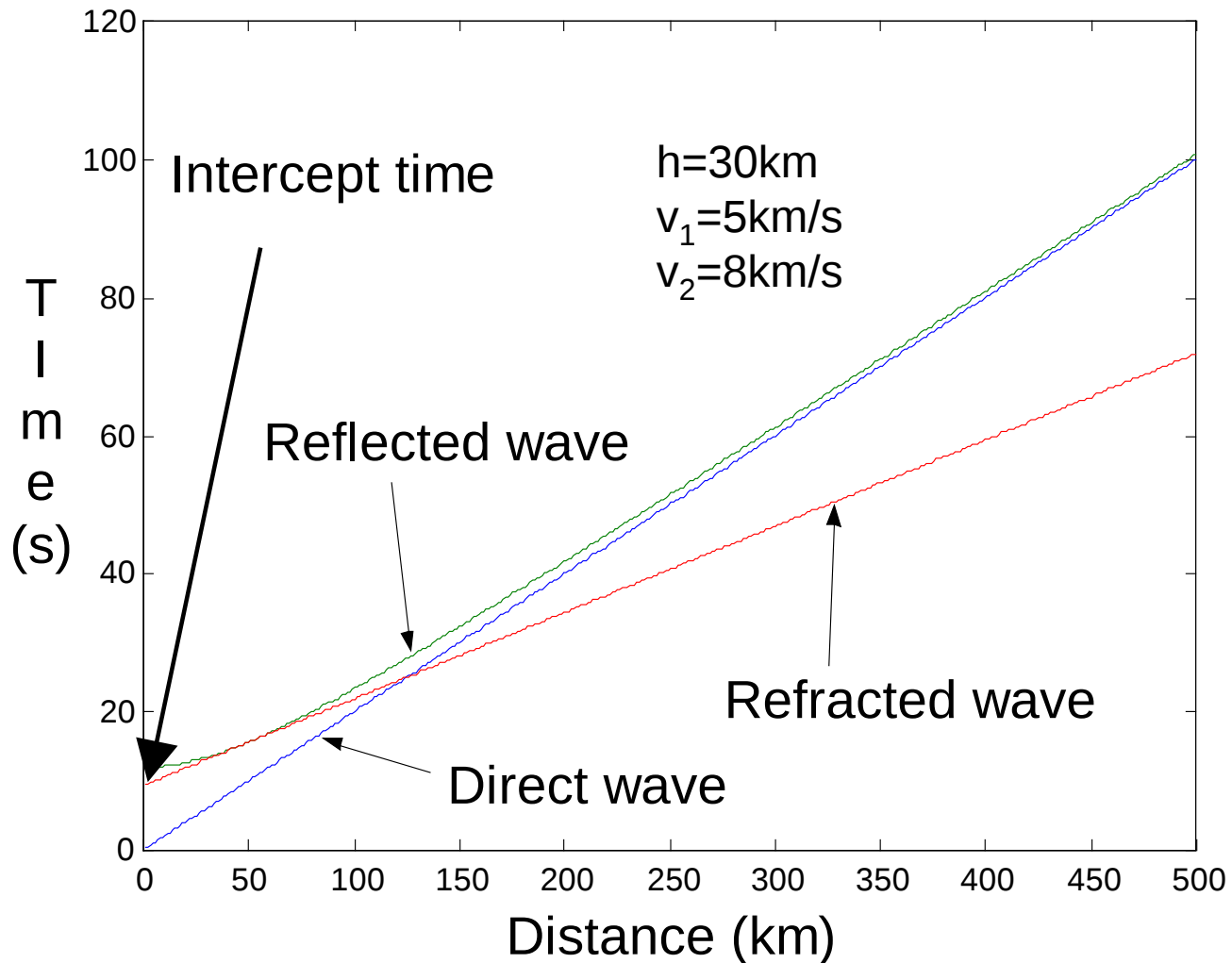
Refraktierte Welle

$$t_{refr} = \frac{2h \cos i_c}{v_1} + \frac{\Delta}{v_2} = t_{refr}^i + \frac{\Delta}{v_2}$$

Interzeptzeit



Zweischichtfall Laufzeitdiagramm



Dies würde einem einfachen Modell der Kruste und des oberen Mantels entsprechen.

Kritische Distanz: Überholdistanz

Die **kritische Distanz** Δ_c ist die Entfernung, bei der die refraktierte Welle gemäß der Strahlentheorie erstmals beobachtet werden kann (tatsächlich wird sie wegen finitem Frequenzgehalt schon bei kleineren Entfernungen beobachtet). Die kritische Distanz ergibt sich aus

kritische Distanz
$$\Delta_c = 2h \tan i_c$$

der kritische Winkel i_c ist gegeben durch das Snellius Gesetz. Wenn wir die Laufzeit der direkten Welle mit der Laufzeit der refraktierten Welle gleichsetzen ergibt sich die

Überholdistanz

$$\Delta_{\ddot{u}} = 2h \sqrt{\frac{v_2 + v_1}{v_2 - v_1}}$$

Das Inversionsproblem **Erdmodell aus Laufzeitkurven**

- Bestimme v_1 aus der Steigung ($1/v_1$) der direkten Welle
- Bestimme v_2 aus der Steigung ($1/v_2$) der refraktierten Welle
- Bestimme kritischen Winkel aus v_1 und v_2 .
- Lies Interzeptzeit t_i aus Laufzeitkurve der refraktierten Welle
- Bestimme Tiefe h mit

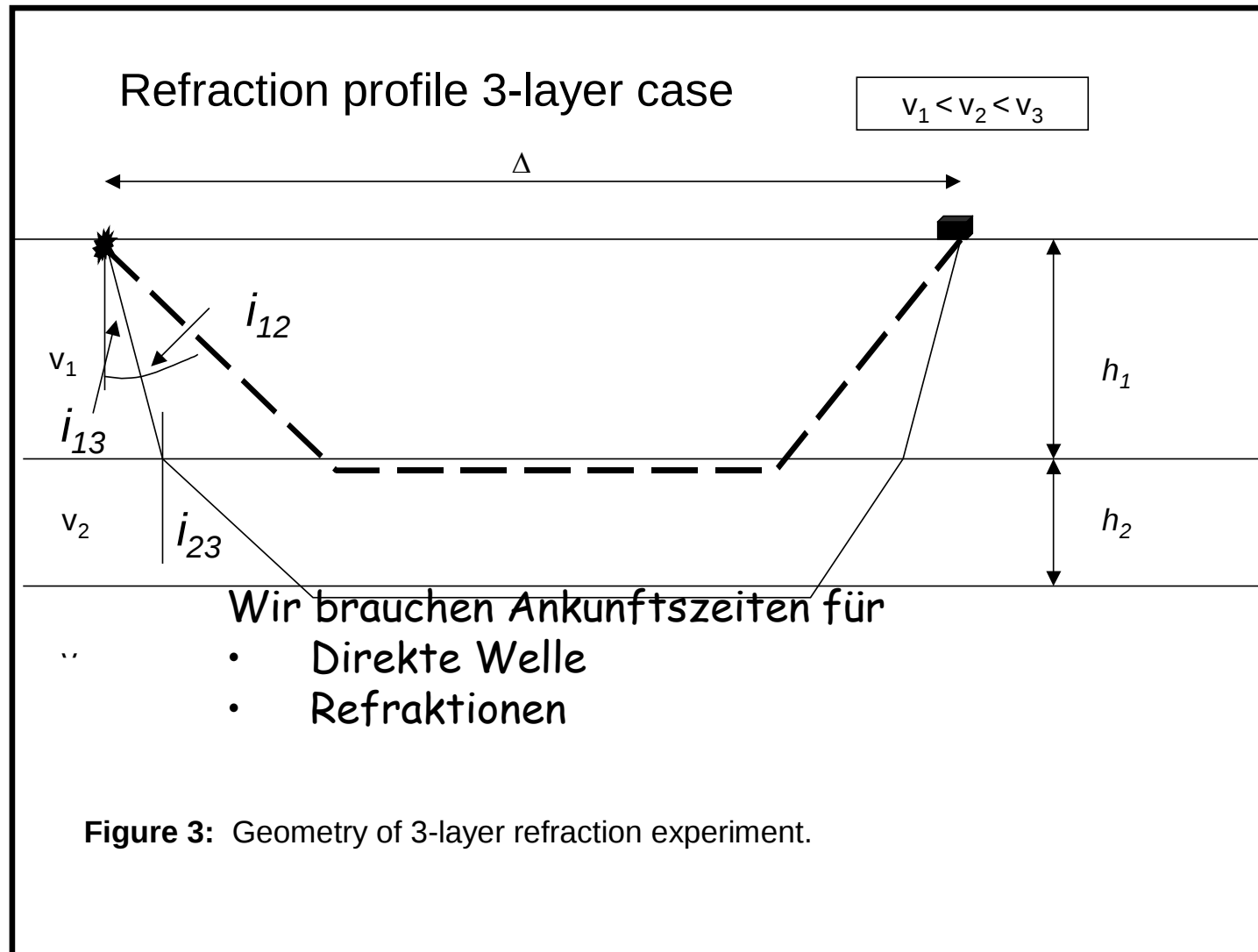
oder

$$h = \frac{v_1 t_i}{2 \cos i_c}$$

- Ermittle Überholdistanz aus Laufzeitkurve und bestimme h mit

$$\Delta_{\ddot{u}} = 2h \sqrt{\frac{v_2 + v_1}{v_2 - v_1}}$$

Dreischichtfall



Dreischichtenfall Ankunftszeiten

Direkte Welle

$$t_1 = \Delta / v_1$$

Refraktion in Schicht 2

$$t_2 = \frac{2h_1 \cos i_{12}}{v_1} + \frac{\Delta}{v_2} = t^{i2} + \frac{\Delta}{v_2}$$

Refraktion in Schicht 3

$$t_3 = \underbrace{\frac{2h_1 \cos i_{13}}{v_1} + \frac{2h_2 \cos i_{23}}{v_2}}_{t^{i3}} + \frac{\Delta}{v_3} = t^{i3} + \frac{\Delta}{v_3}$$

mit ...

$$\frac{\sin i_{13}}{v_1} = \frac{\sin i_{23}}{v_2} = \frac{\sin i_{33}}{v_3} = \frac{1}{v_3}$$

Dreischichtfall Laufzeitkurven

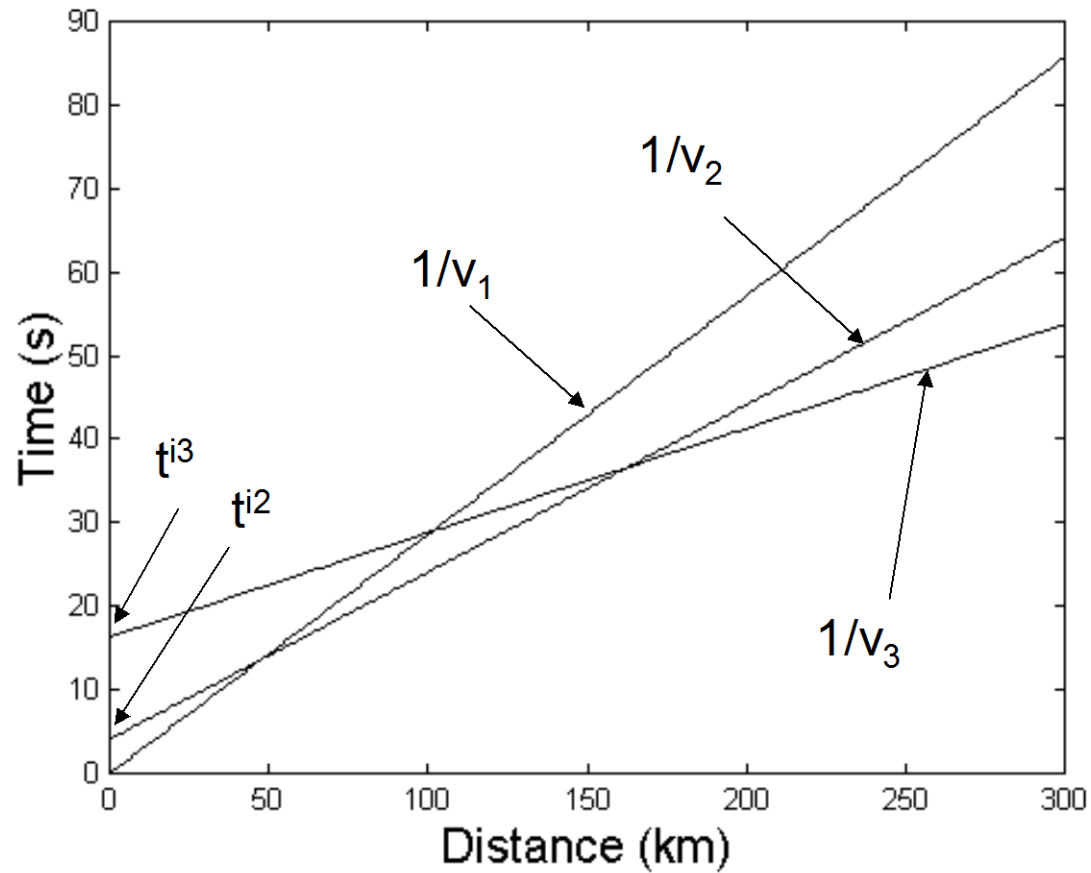


Figure 4: Travel-time diagram for the 3-layer case

Das Inversionsproblem

Dreischichtfall

- Bestimme Geschwindigkeiten v_{1-3} aus Steigungen $(1/v_{1-3})$ der Laufzeitkurven
- Lies Interzeptzeit t^{i2} der Refraktion in Schicht 2.
- Bestimme Höhe h_1 mit der Gleichung für t_2 damit ,

$$h_1 = \frac{v_1 t^{i2}}{2 \cos i_{12}} \quad \text{where} \quad i_{12} = \arcsin \frac{v_1}{v_2}$$

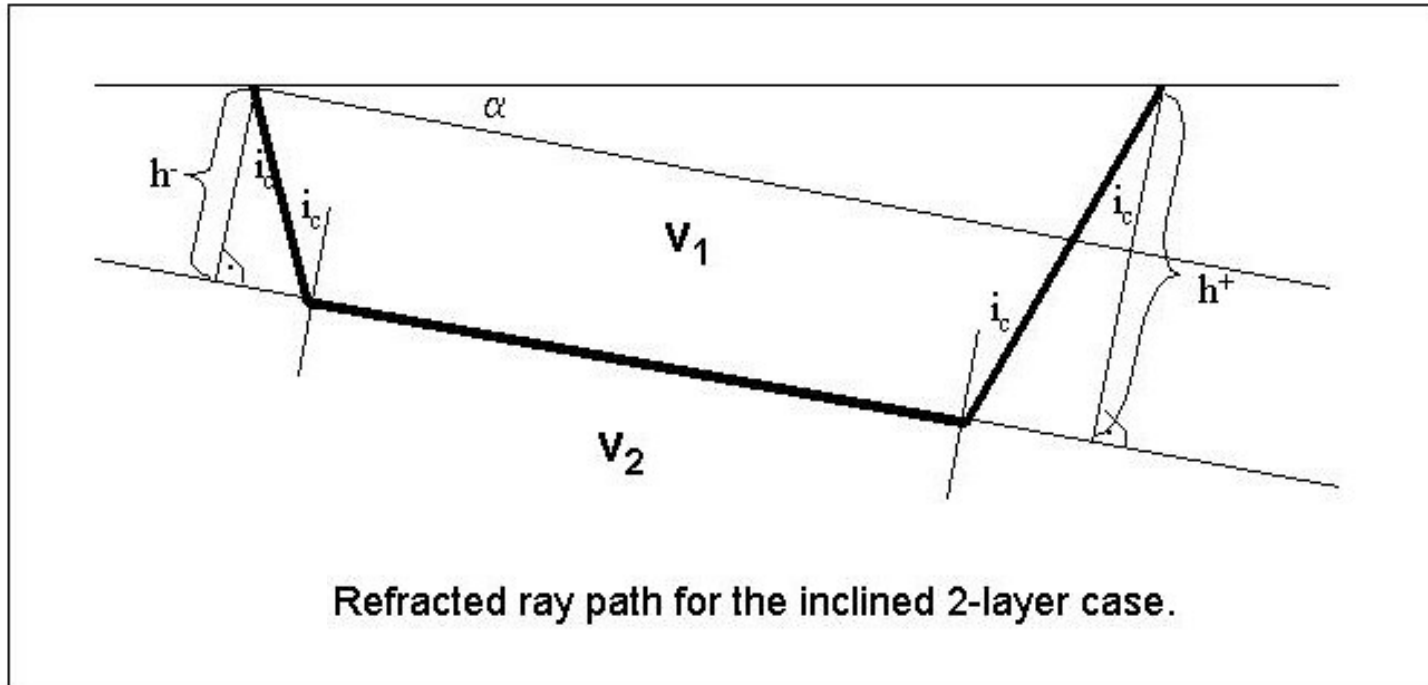
- Lies Interzeptzeit t^{i3} der Refraktion in Schicht 3.
- Berechne mit h_1 eine Zwischeninterzeptzeit t^*

$$t^* = t^{i3} - \frac{2h_1 \cos i_{13}}{v_1} \quad \text{where} \quad i_{13} = \arcsin \frac{v_1}{v_3}$$

- Mit t^* berechne h_2 der Schicht 2

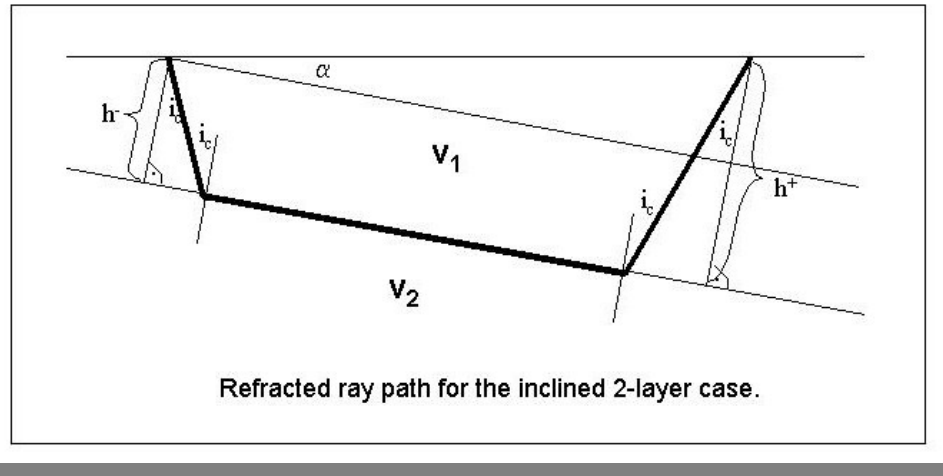
$$h_2 = \frac{v_2 t^*}{2 \cos i_{23}} \quad \text{mit} \quad i_{23} = \arcsin \frac{v_2}{v_3}$$

Geneigte Schicht



Mit dieser asymmetrischen Anordnung benötigen wir Schüsse von beiden Seiten um h^+ und h^- zu bestimmen.

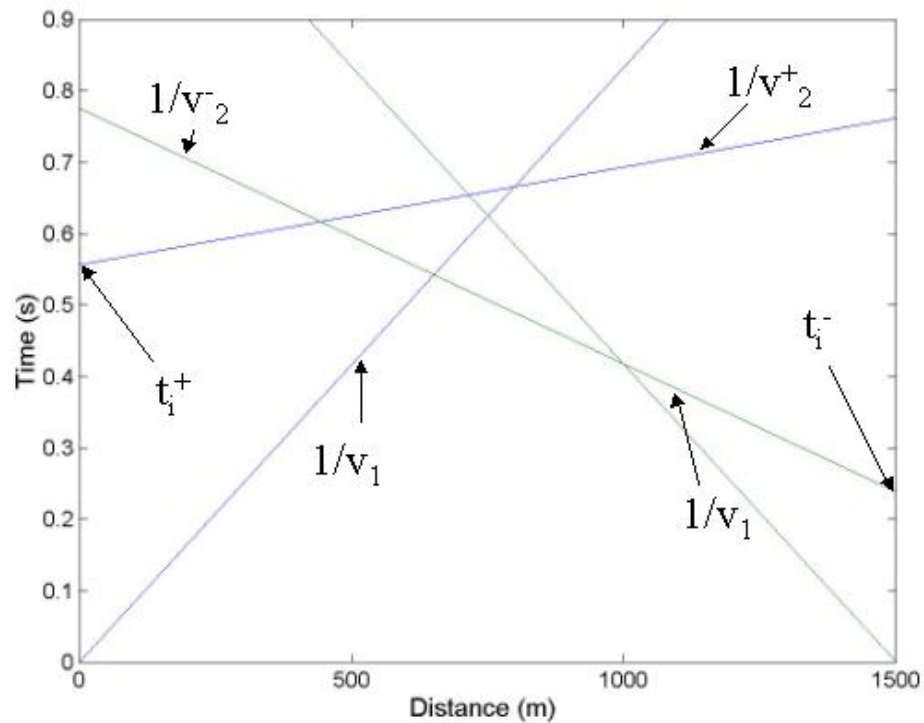
Geneigte Schicht Laufzeiten



$$t_{refr}^- = \frac{2h^- \cos i_c}{v_1} + \frac{\sin(i_c + \alpha)}{v_1} \Delta = t_i^- + \frac{1}{v_2^-} \Delta$$

$$t_{refr}^+ = \frac{2h^+ \cos i_c}{v_1} + \frac{\sin(i_c - \alpha)}{v_1} \Delta = t_i^+ + \frac{1}{v_2^+} \Delta$$

Geneigte Schicht Laufzeitkurven



Travel-time diagram for the inclined-layer case for the model in the previous figure.

Inversionproblem **Geneigte Schicht**

- Bestimme Geschwindigkeiten v_1 and $v_2^{+/-}$ aus den Steigungen der Laufzeitkurven.

- Bestimme α and v_2 über:

$$\sin(i_c + \alpha) = \frac{v_1}{v_2^-} \Rightarrow i_c + \alpha = \arcsin \frac{v_1}{v_2^-}$$
$$\sin(i_c - \alpha) = \frac{v_1}{v_2^+} \Rightarrow i_c - \alpha = \arcsin \frac{v_1}{v_2^+}$$

$$\frac{(i + \alpha) + (i - \alpha)}{2} = i \Rightarrow v_2 = \frac{v_1}{\sin i}$$
$$\frac{(i + \alpha) - (i - \alpha)}{2} = \alpha$$

- Lies Interzeptzeiten t_i^+ and t_i^- aus den Laufzeitkurven. Bestimme die Distanz von der Schichtgrenze mit

$$h^- = \frac{v_1 t_i^-}{2 \cos i_c}$$
$$h^+ = \frac{v_1 t_i^+}{2 \cos i_c}$$

- Zeichne Kreise um die Schusspunkte mit Radius $h^{+/-}$ und finde die Tangente dazu -> Schichtgrenze

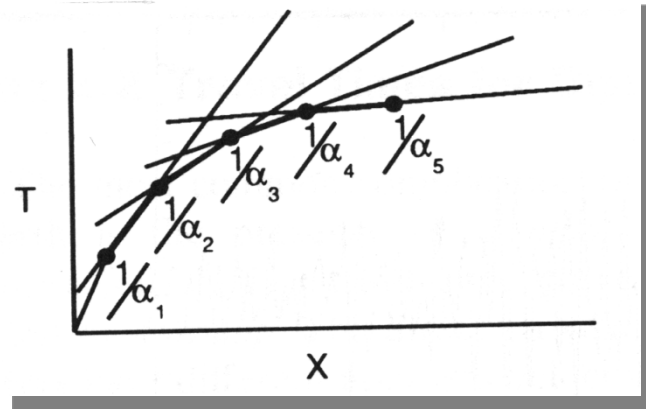
Der n-Schicht-Fall

$$t_2 = \frac{2h_1 \cos i_{12}}{v_1} + \frac{\Delta}{v_2} = t^{i2} + \frac{\Delta}{v_2}$$

$$t_3 = \underbrace{\frac{2h_1 \cos i_{13}}{v_1} + \frac{2h_2 \cos i_{23}}{v_2}}_{t^{i3}} + \frac{\Delta}{v_3} = t^{i3} + \frac{\Delta}{v_3}$$

Dies lässt sich erweitern auf n Schichten:

$$t_n = \frac{\Delta}{v_n} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{2h_i \cos i_{in}}{v_i}$$
$$i_{in} = \sin^{-1}\left(\frac{v_i}{v_n}\right)$$



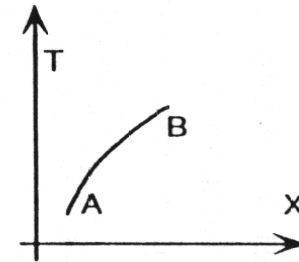
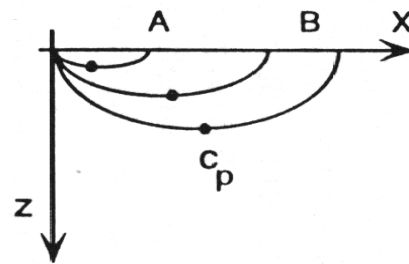
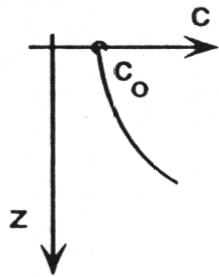
Kontinuierliche Geschwindigkeitsmodelle

Velocity Model

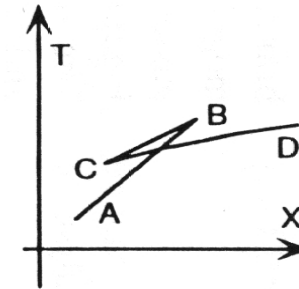
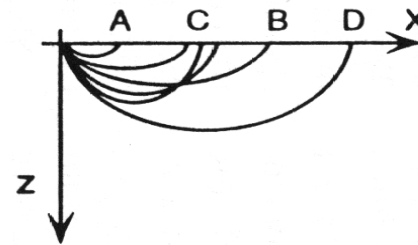
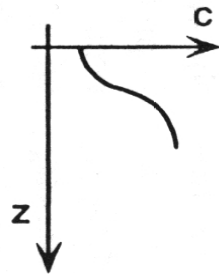
Ray Paths

Travel Time

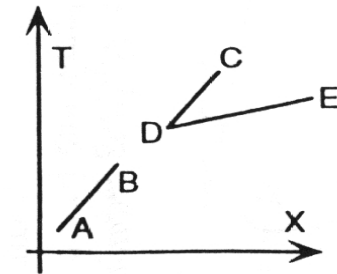
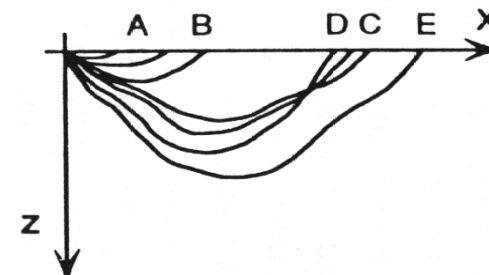
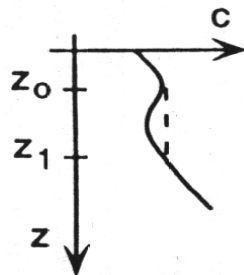
a



b



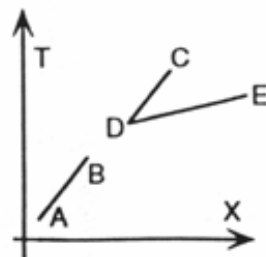
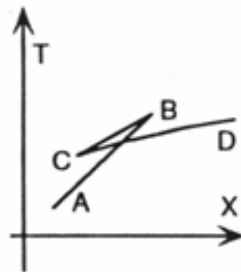
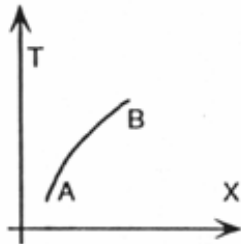
c



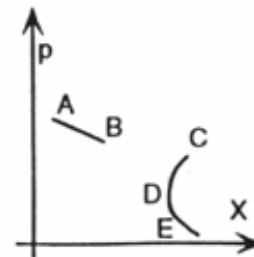
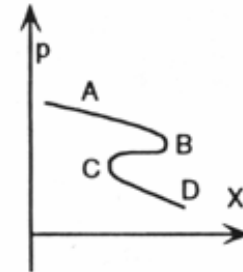
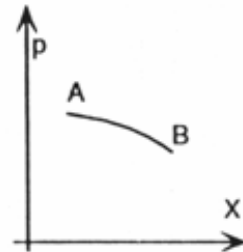
$\tau(p)$ Darstellung

Hier ist p der Strahlparameter, also die Steigung der Laufzeitkurve, τ ist der y-Achsenabschnitt der Laufzeitkurve (Interzeptzeit)

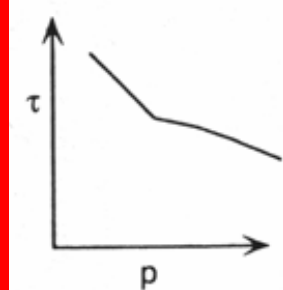
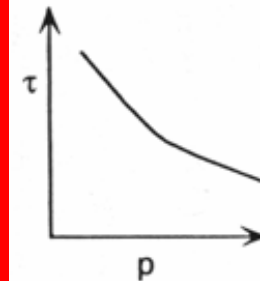
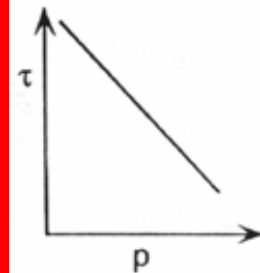
Travel Time



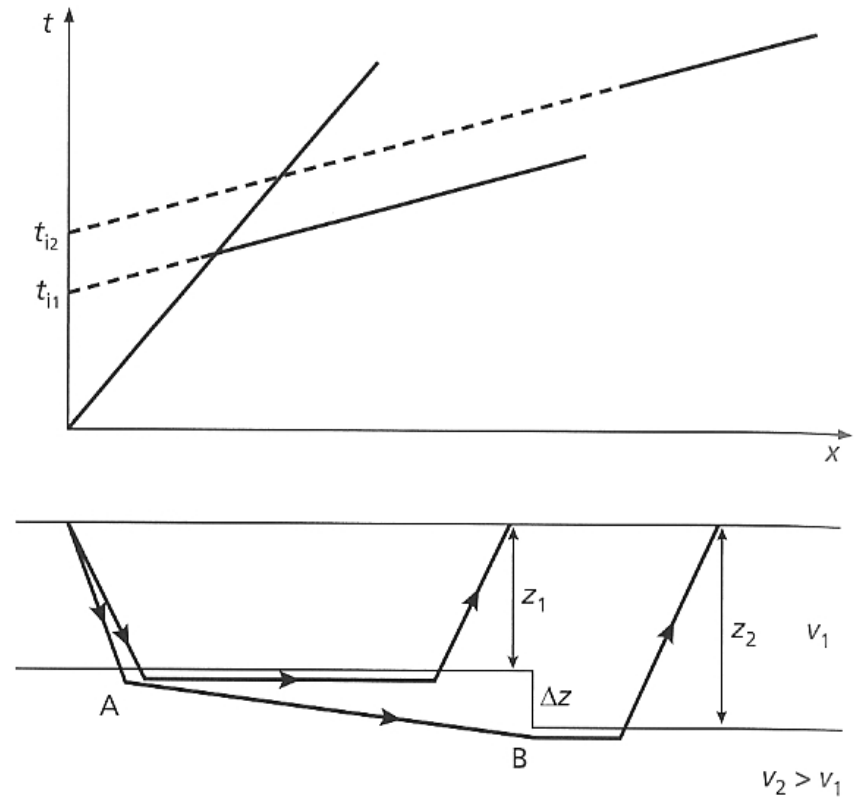
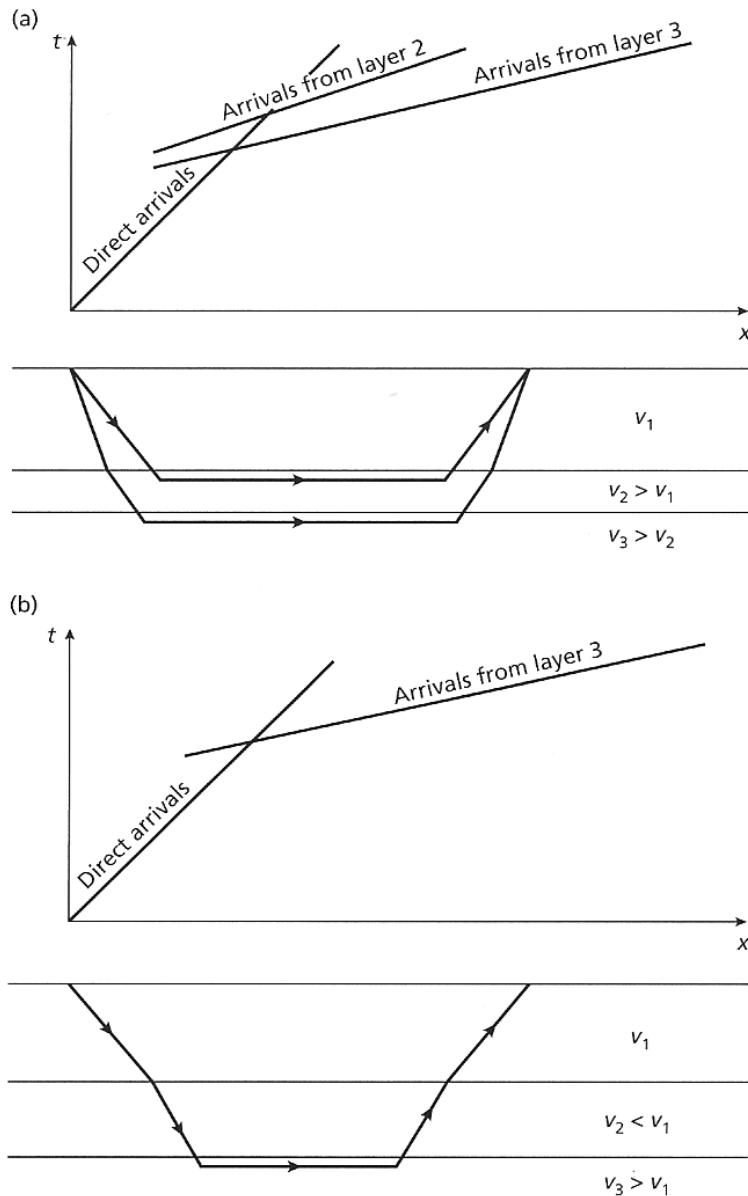
p vs X



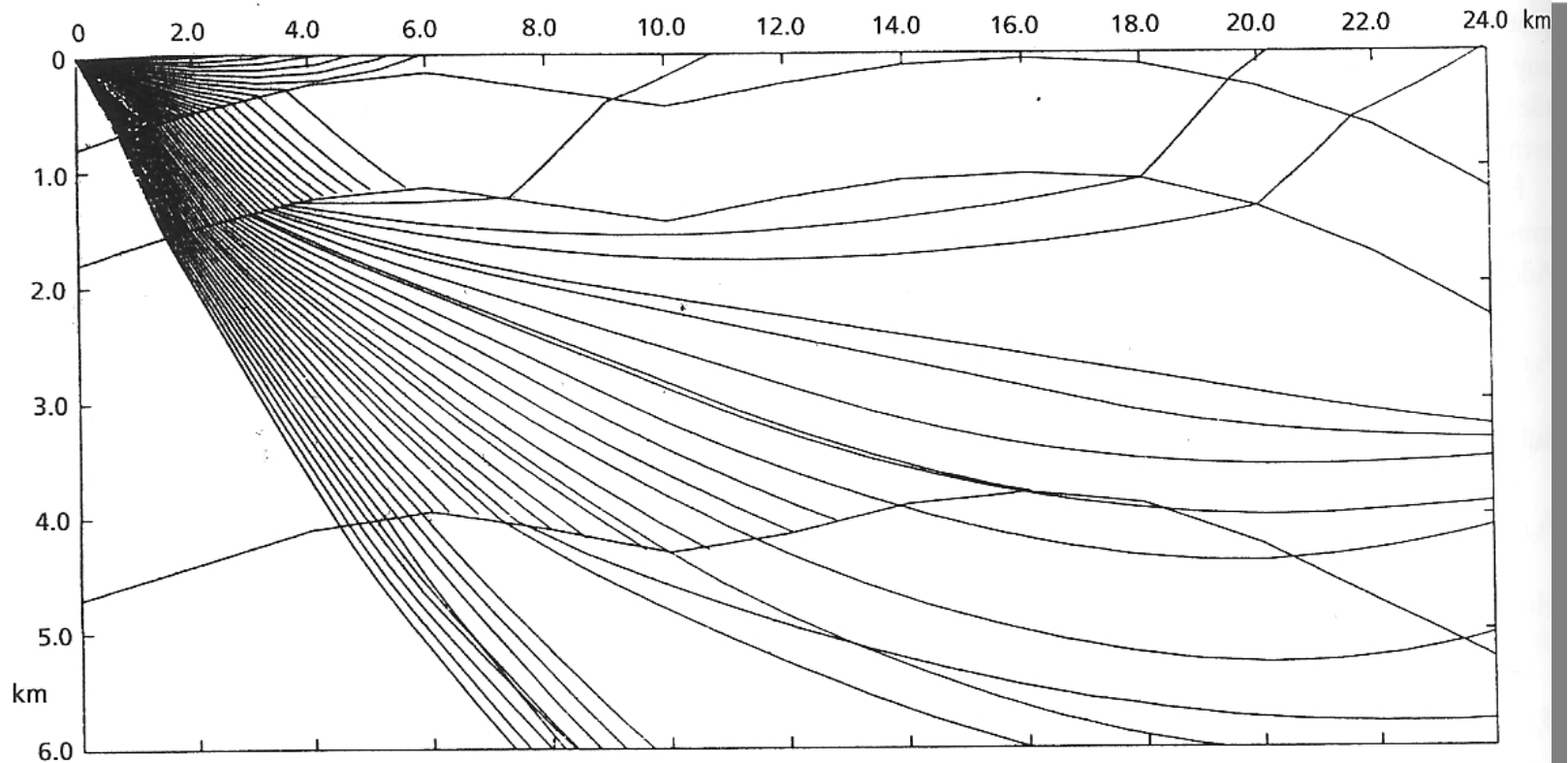
τ vs p



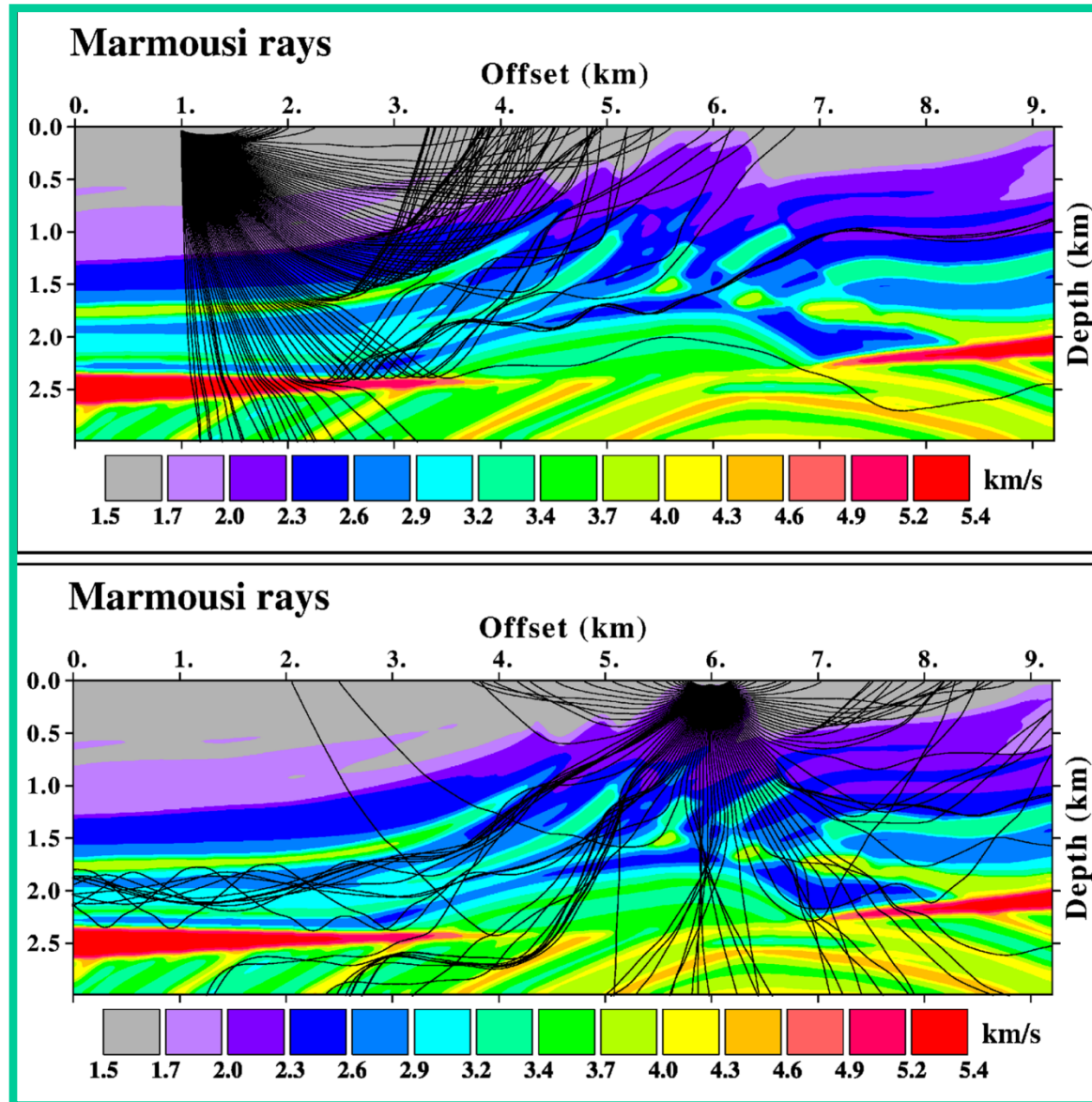
Verborgene Schichten – Verwerfungen



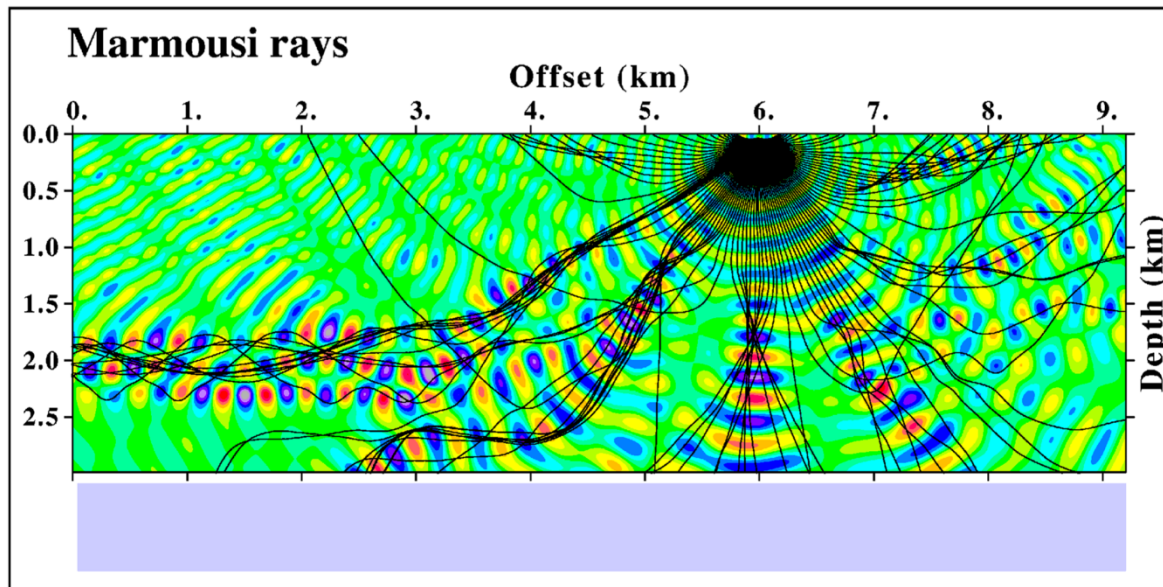
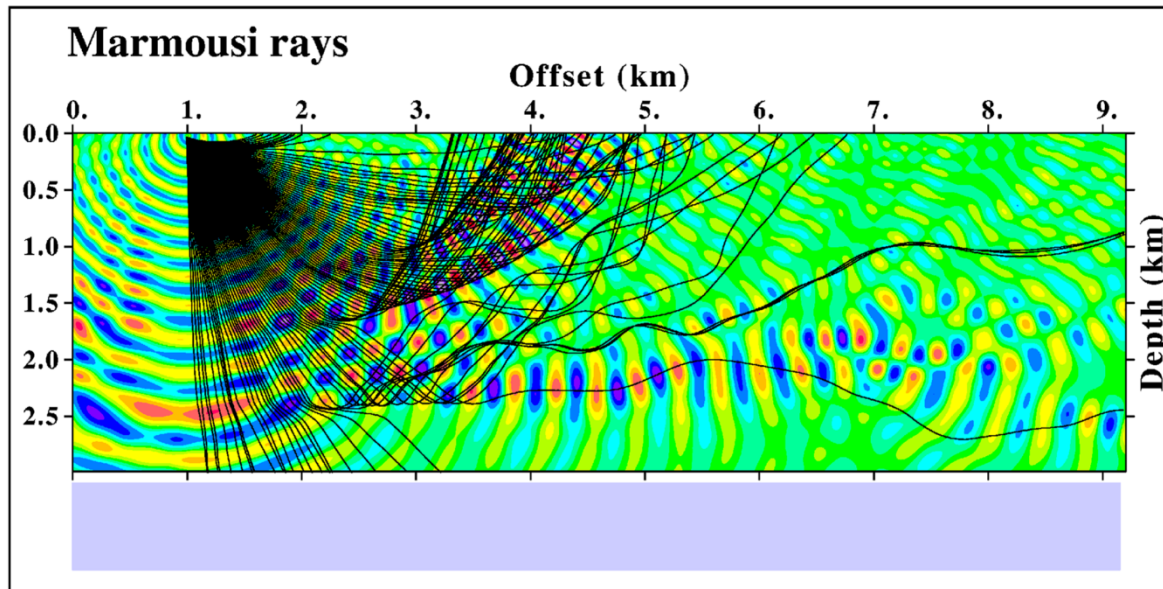
Strahlen in komplexen Modellen



Realistisches Reservoir Modell (Marmousi)

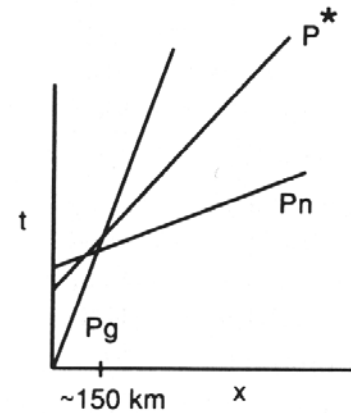
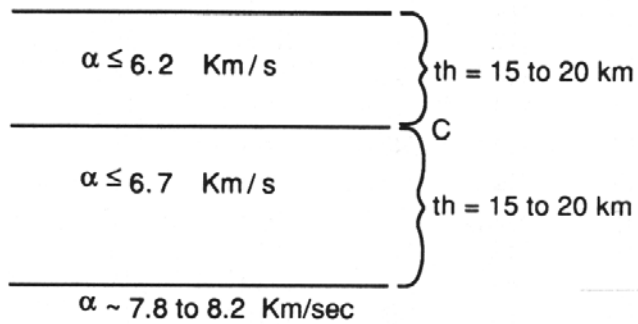


Vergleich mit Simulation



Beispiel: Erdkruste

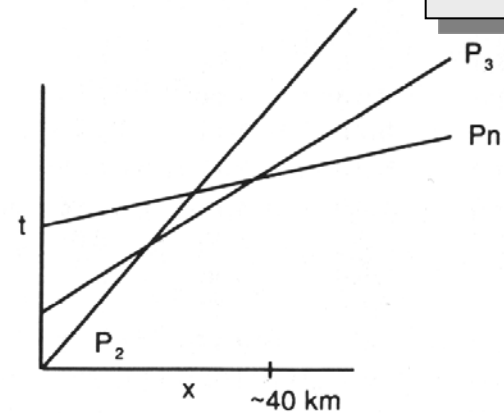
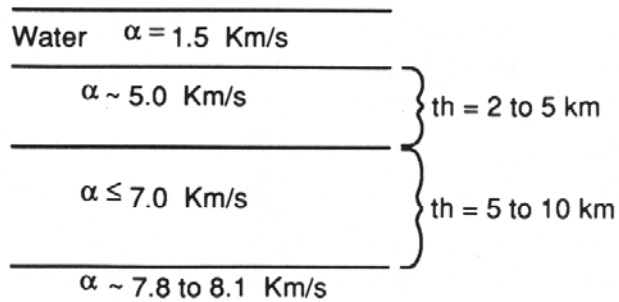
a



**Continental crust (a)
oceanic crust (b)**

**Mit entsprechenden
Laufzeiten**

b



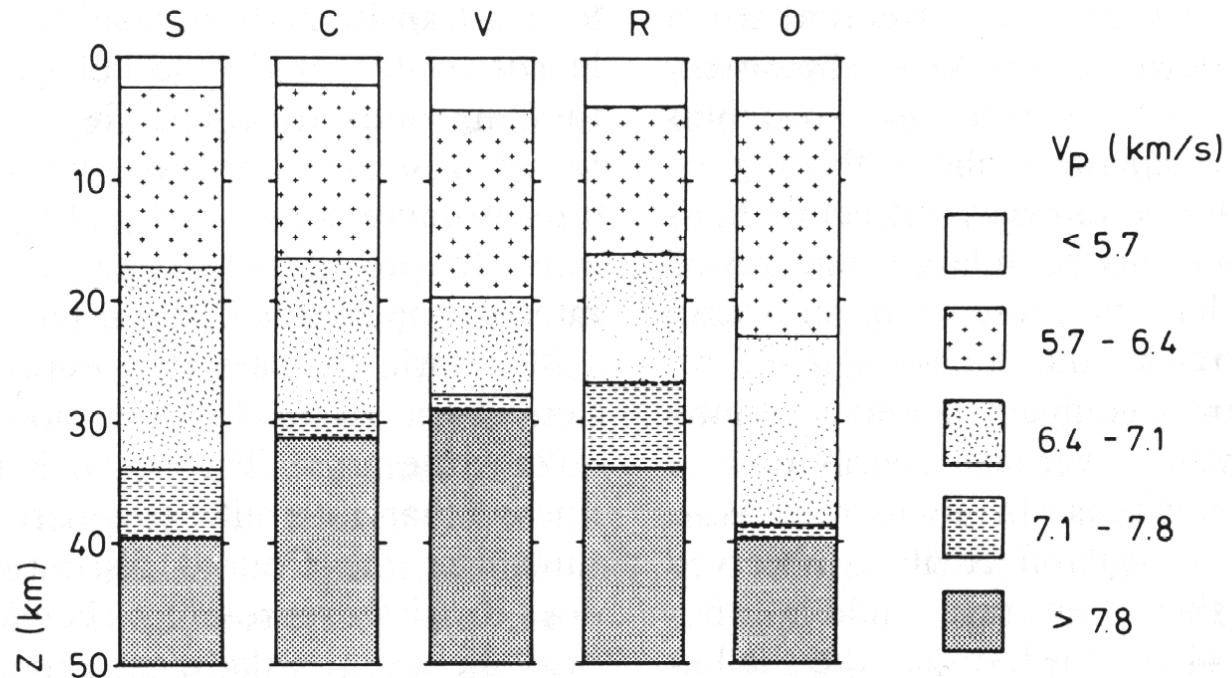
The Erdkruste: Minerale und Geschwindigkeiten

TABLE 3-3

Average Crustal Abundance, Density and Seismic Velocities of Major Crustal Minerals

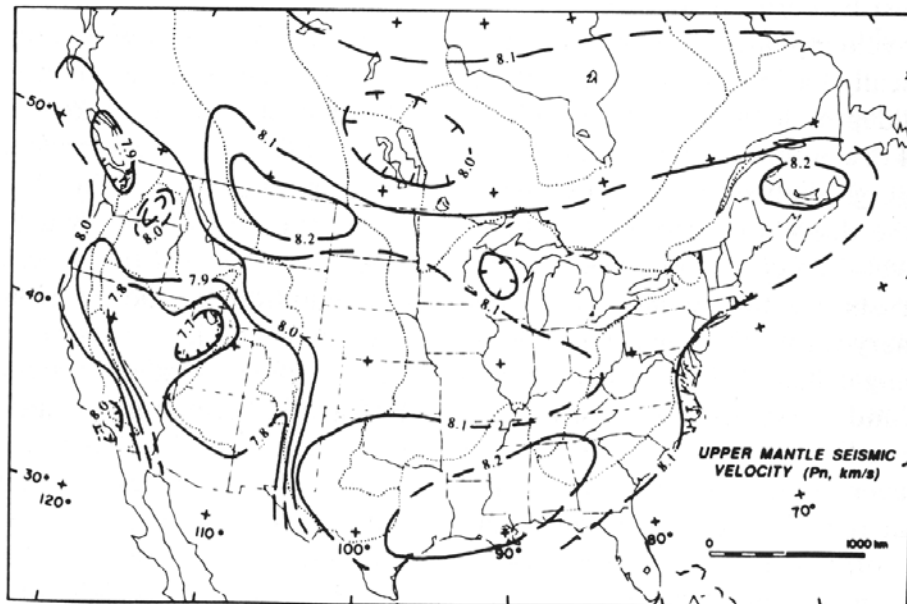
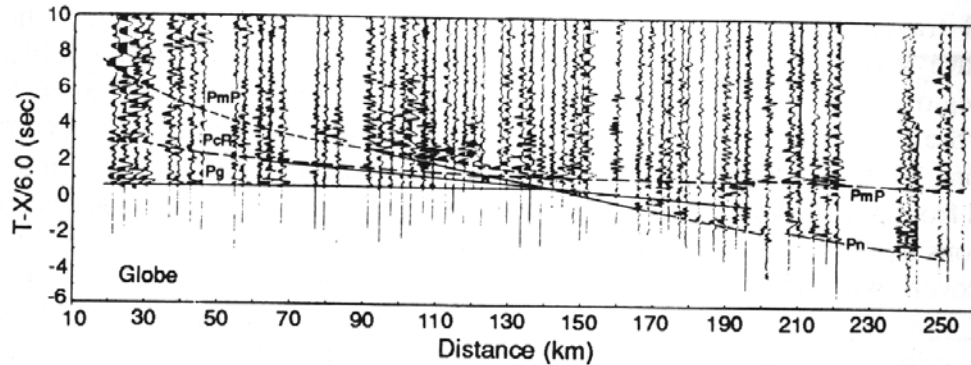
Mineral	Volume percent	ρ (g/cm ³)	V_p (km/s)	V_s (km/s)
Quartz	12	2.65	6.05	4.09
K-feldspar	12	2.57	5.88	3.05
Plagioclase	39	2.64	6.30	3.44
Micas	5	2.8	5.6	2.9
Amphiboles	5	3.2	7.0	3.8
Pyroxene	11	3.3	7.8	4.6
Olivine	3	3.3	8.4	4.9

Erdkruste: Typen



S shields, **C** Caledonian provinces, **V** Variscan provinces, **R** rifts, **O** orogens

Die Erdkruste: Refraktionsexperimente



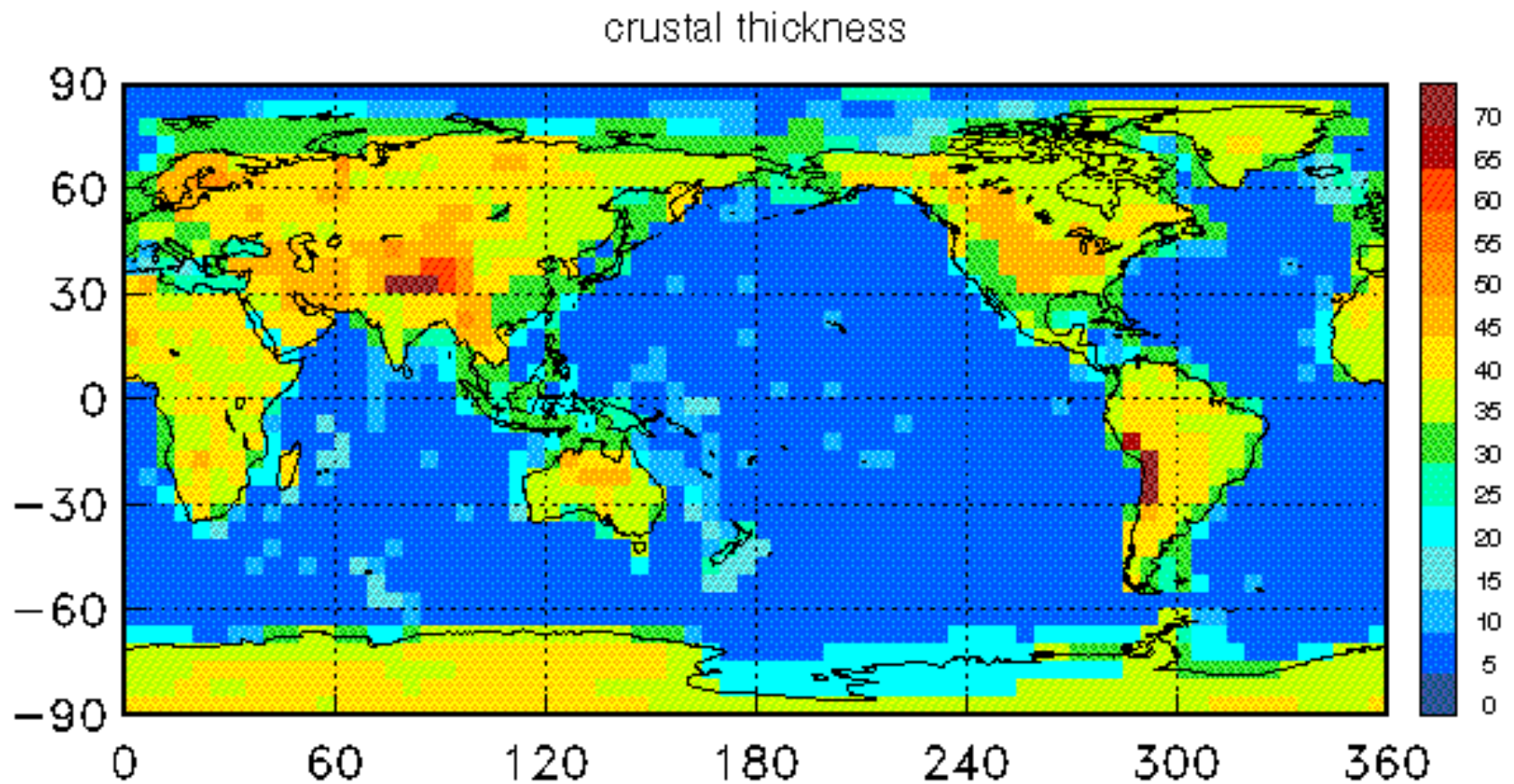
Profil über N-Amerika:

P_{mP} Moho Reflektion

P_n Moho Refraktion

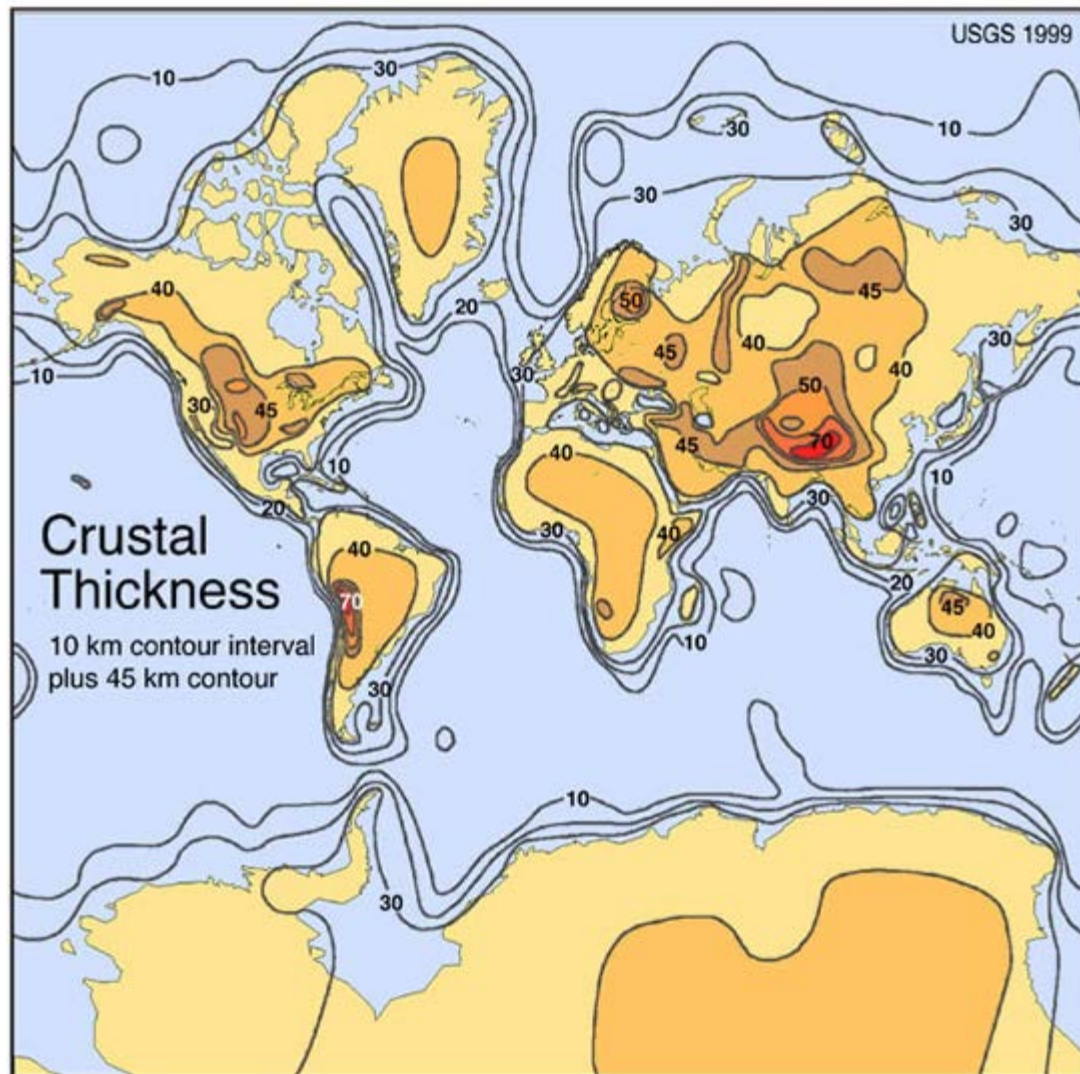
P_g Direkte P-Welle

Globales Krustenmodell

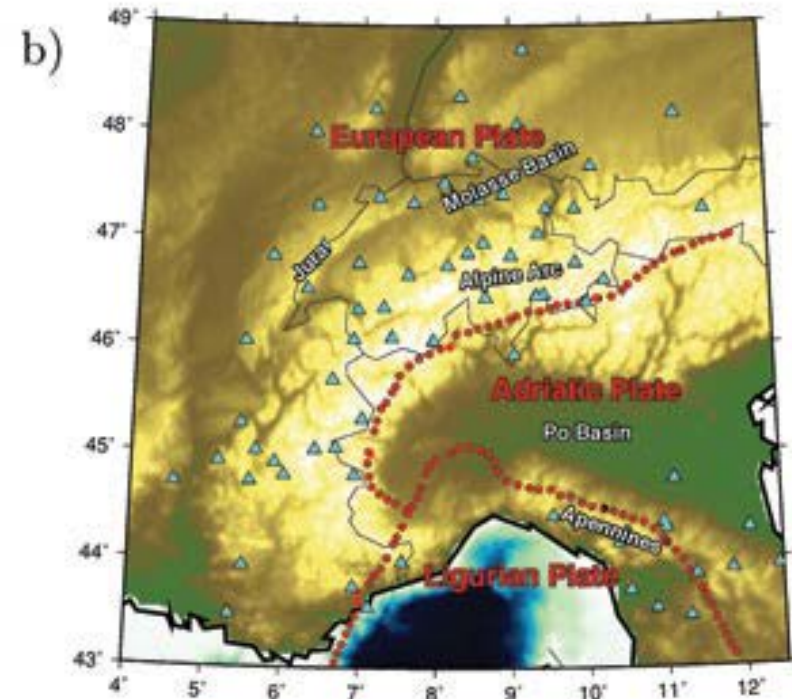
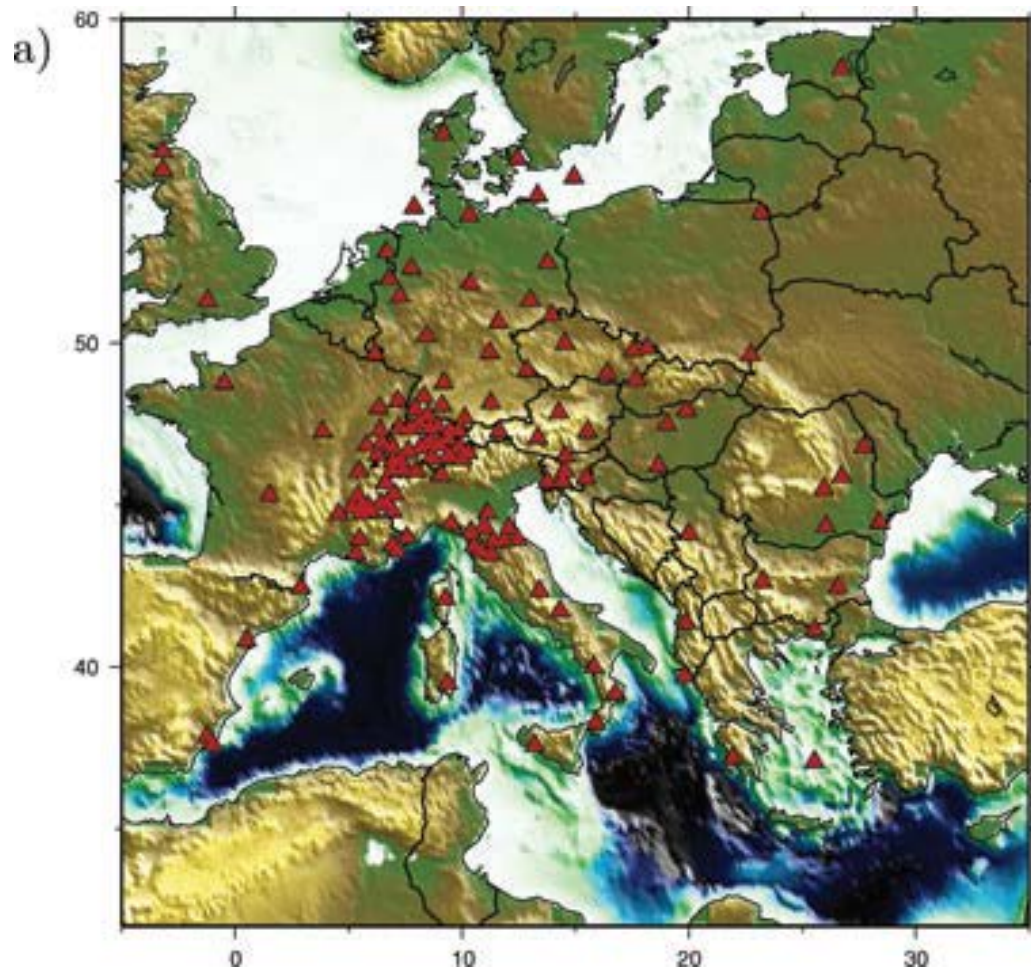


Krustendicke in km kompiliert aus seismischen Daten

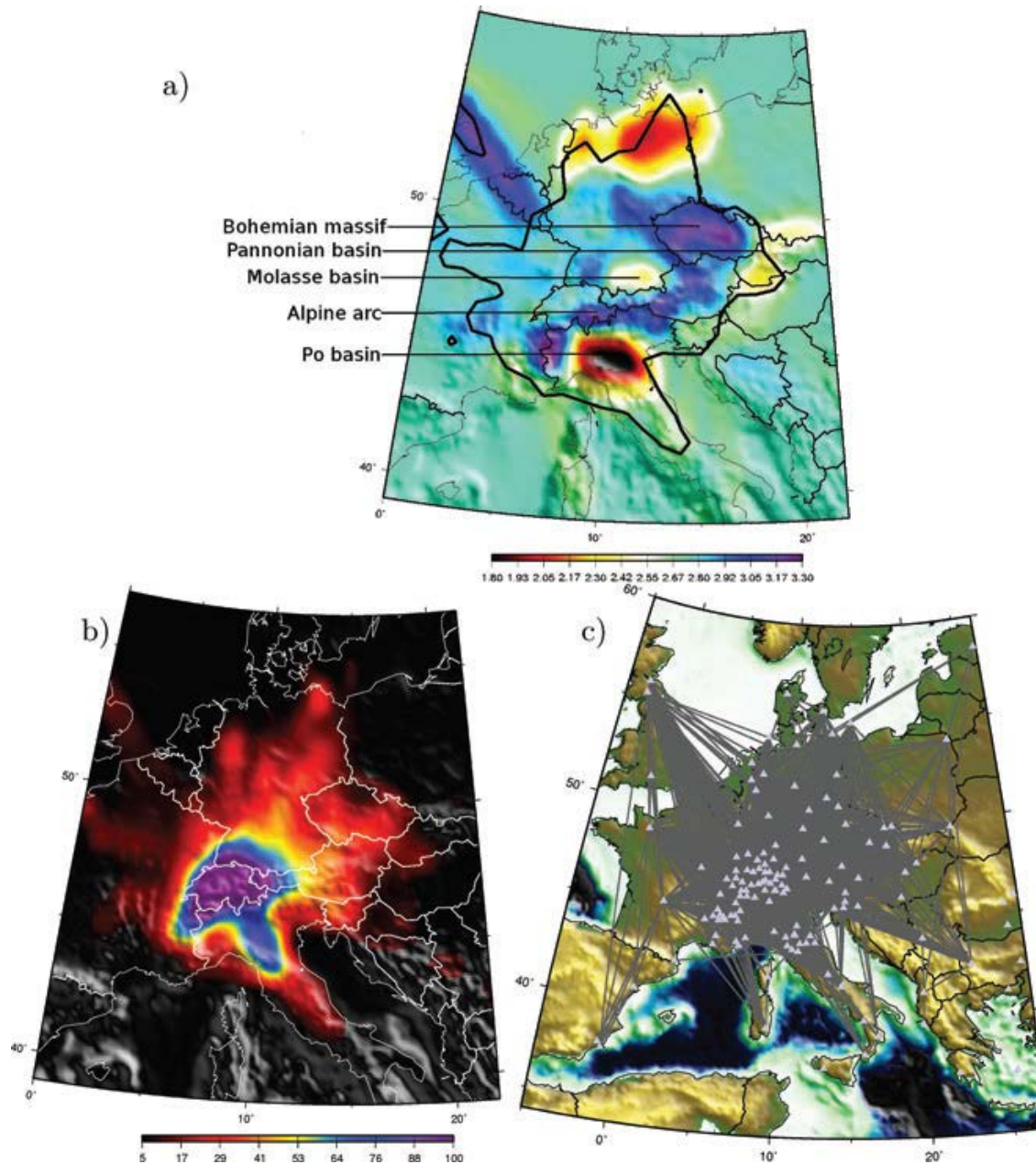
Moho Depth



Heute: Krustenmodelle mit Rauschen! (Stehly et al., GJI, 2009)

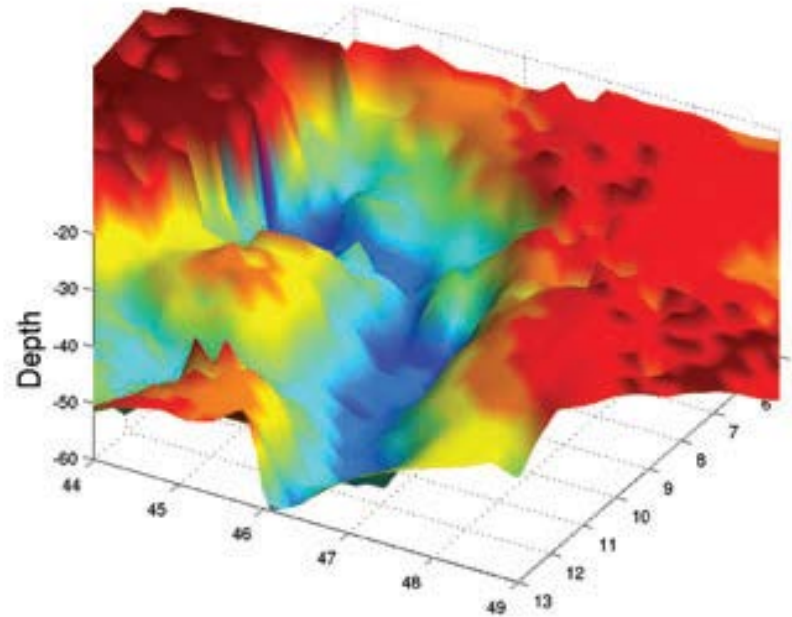


Rayleigh Wellen Geschwindigkeit (Stehly et al., GJI, 2009)

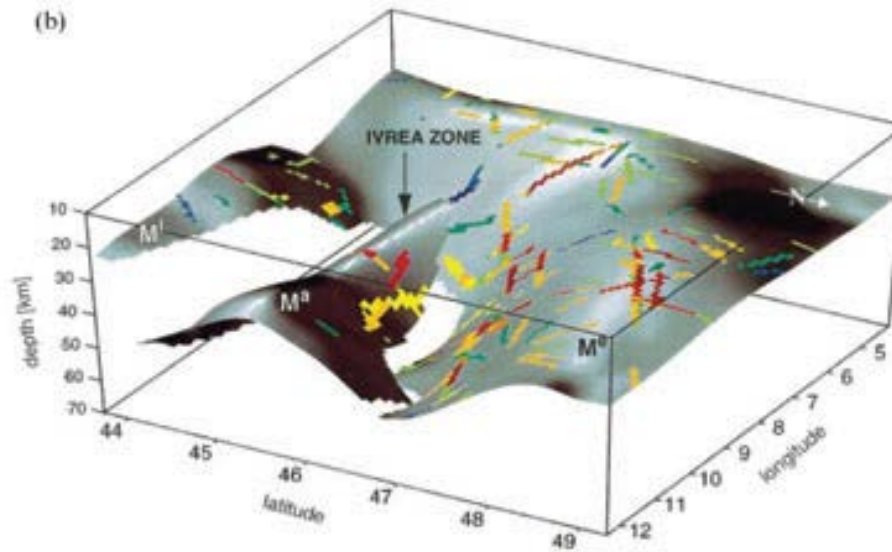


Moho topo unter den Alpen (Stehly et al., GJI, 2009)

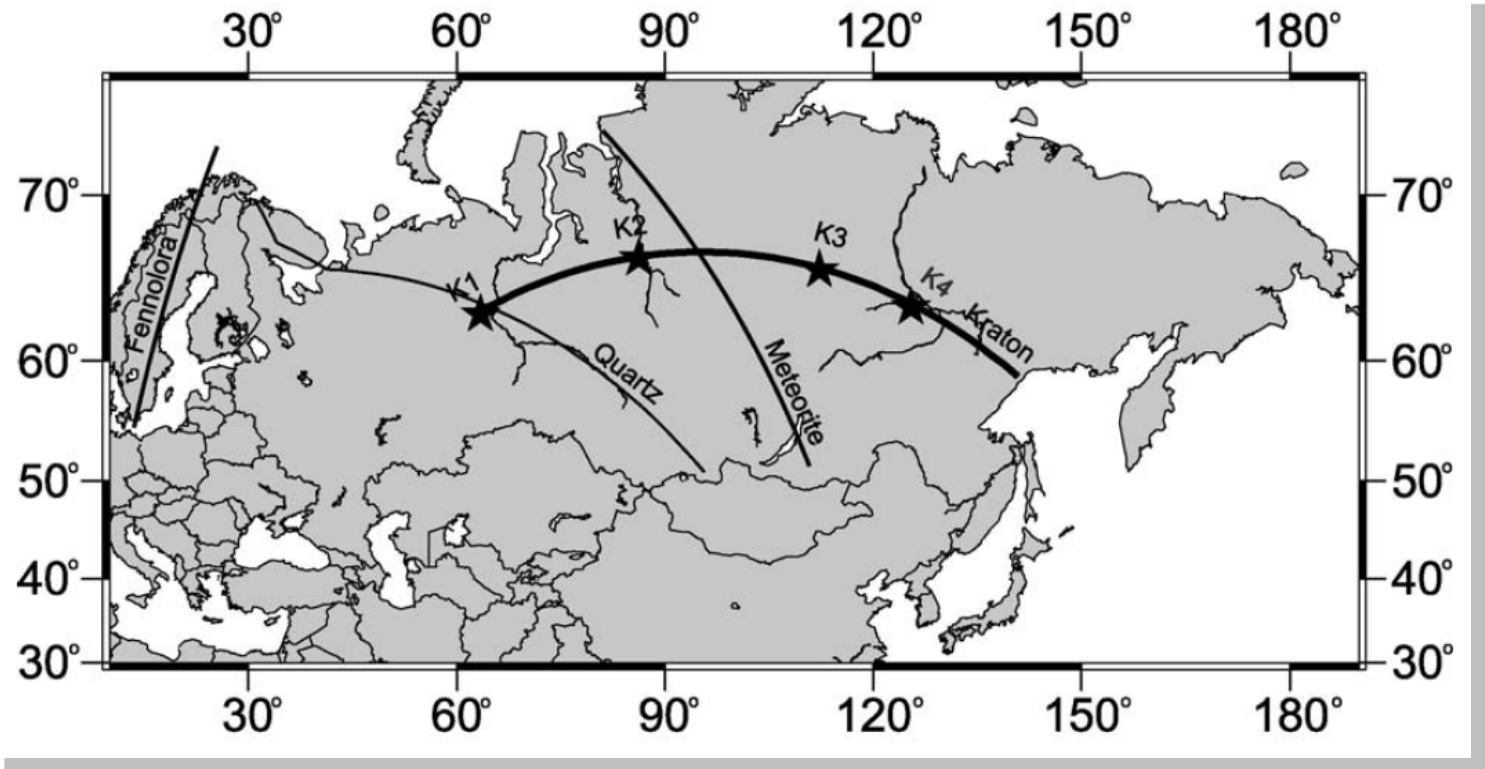
a)



b)

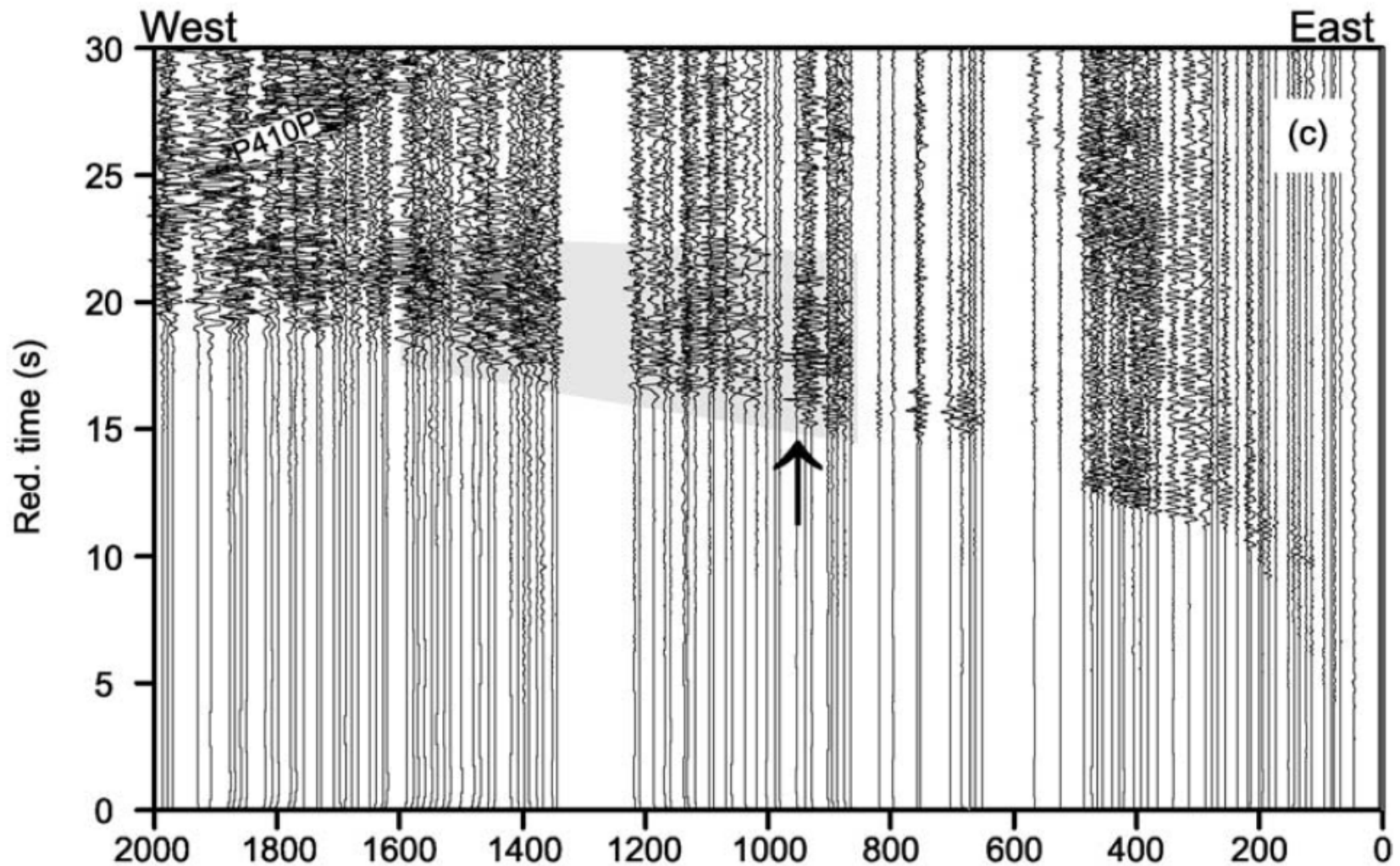


Peaceful nuclear explosions (PNEs)

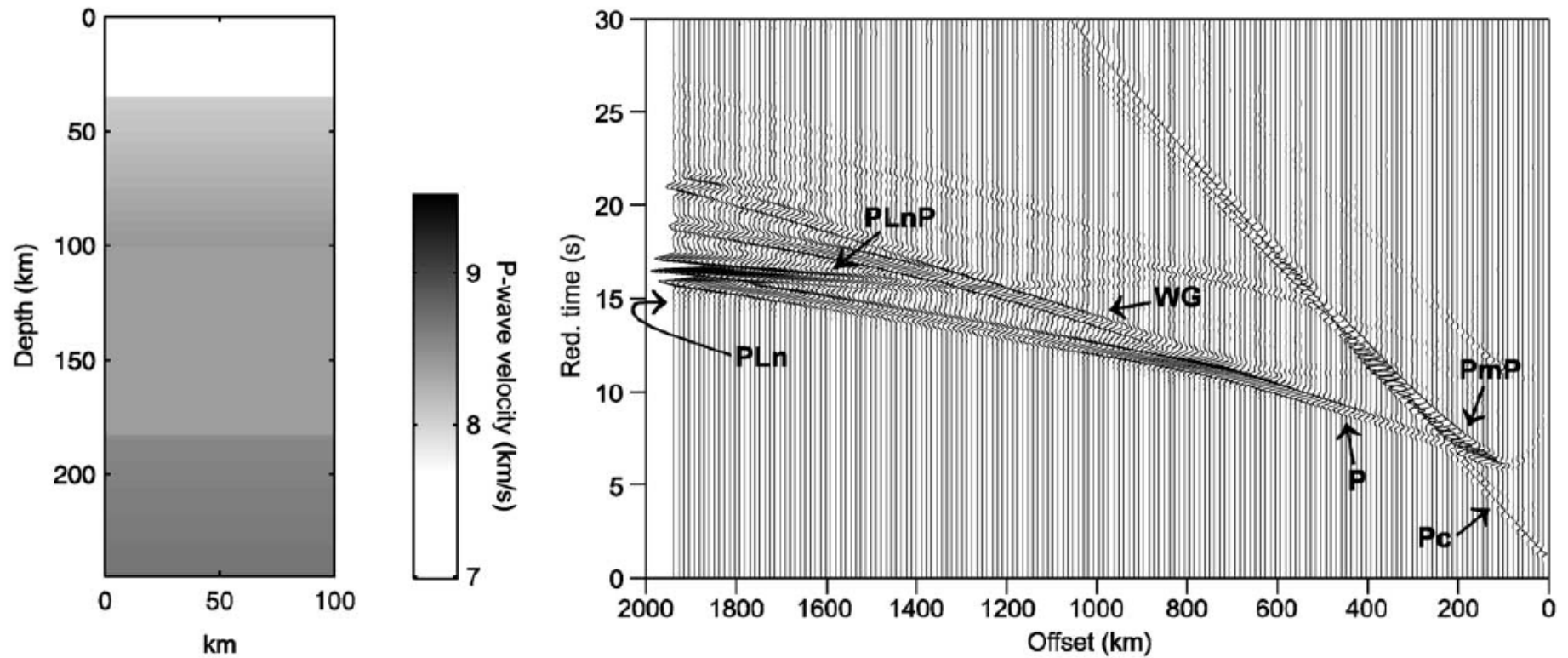


PNE figures from Nielsen et al. 2002

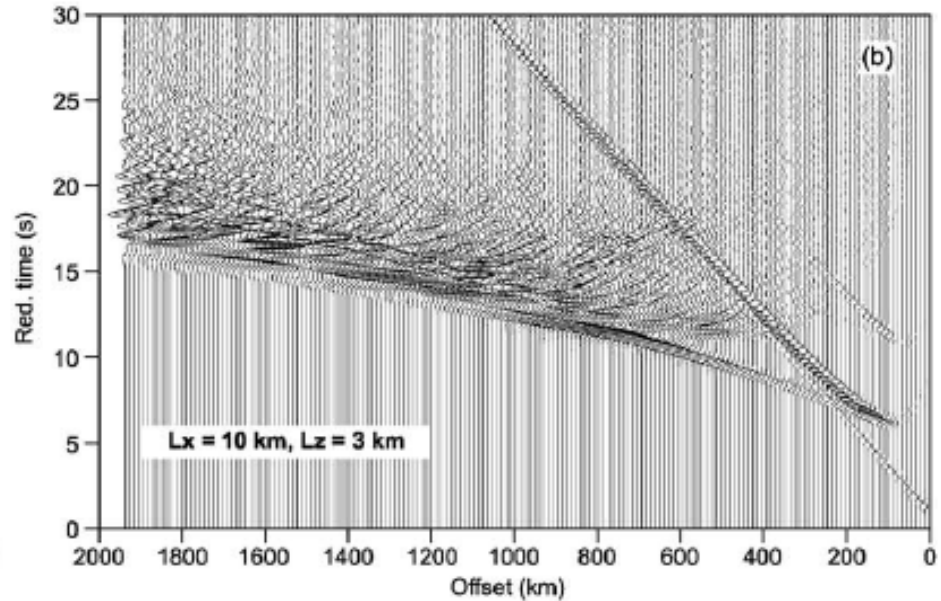
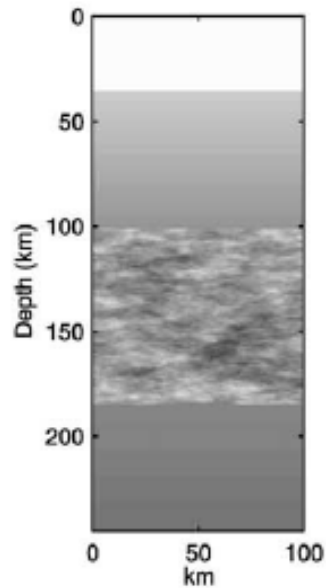
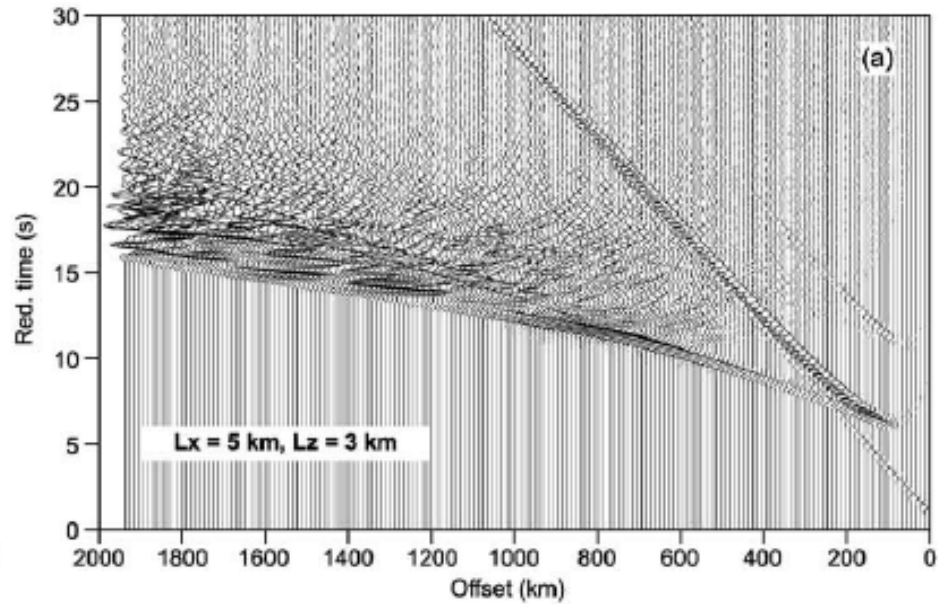
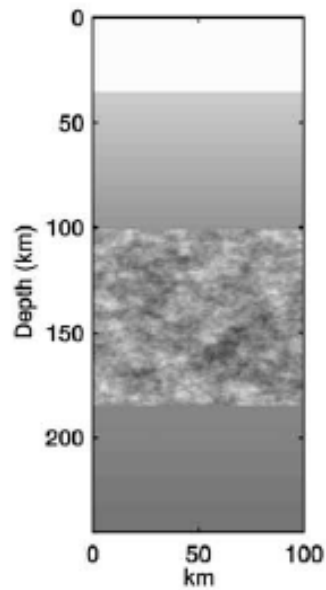
Beobachtete Seismogramme (reduzierte Zeit)



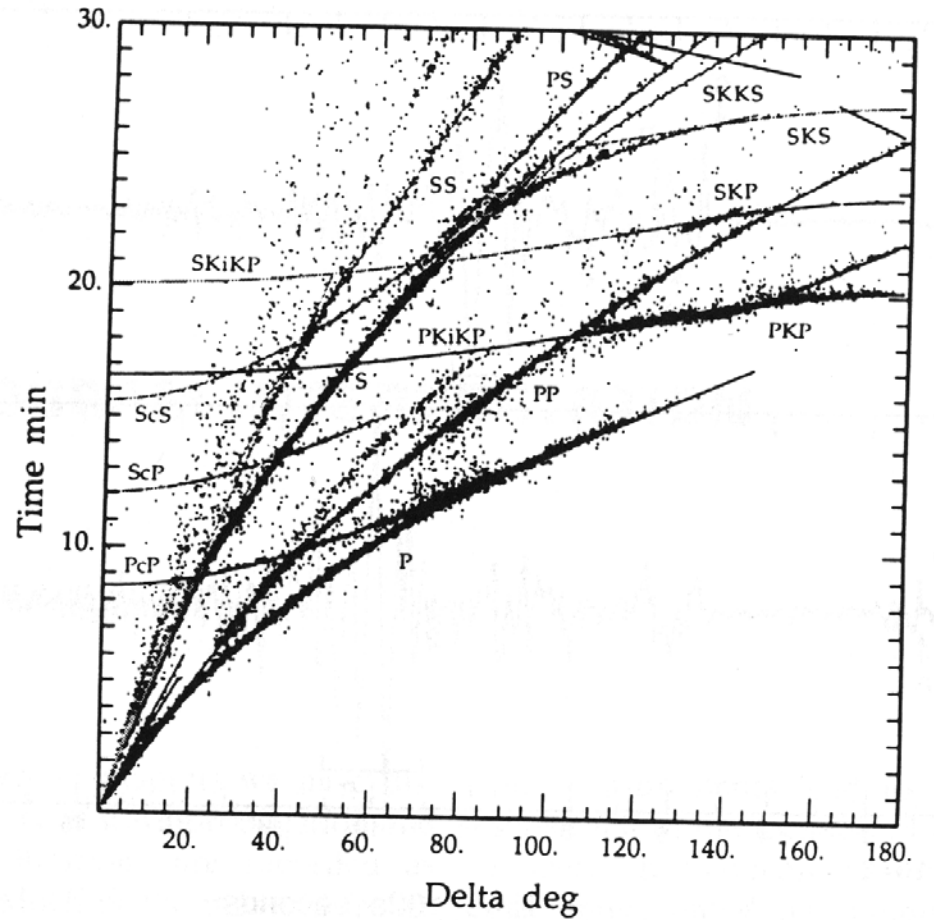
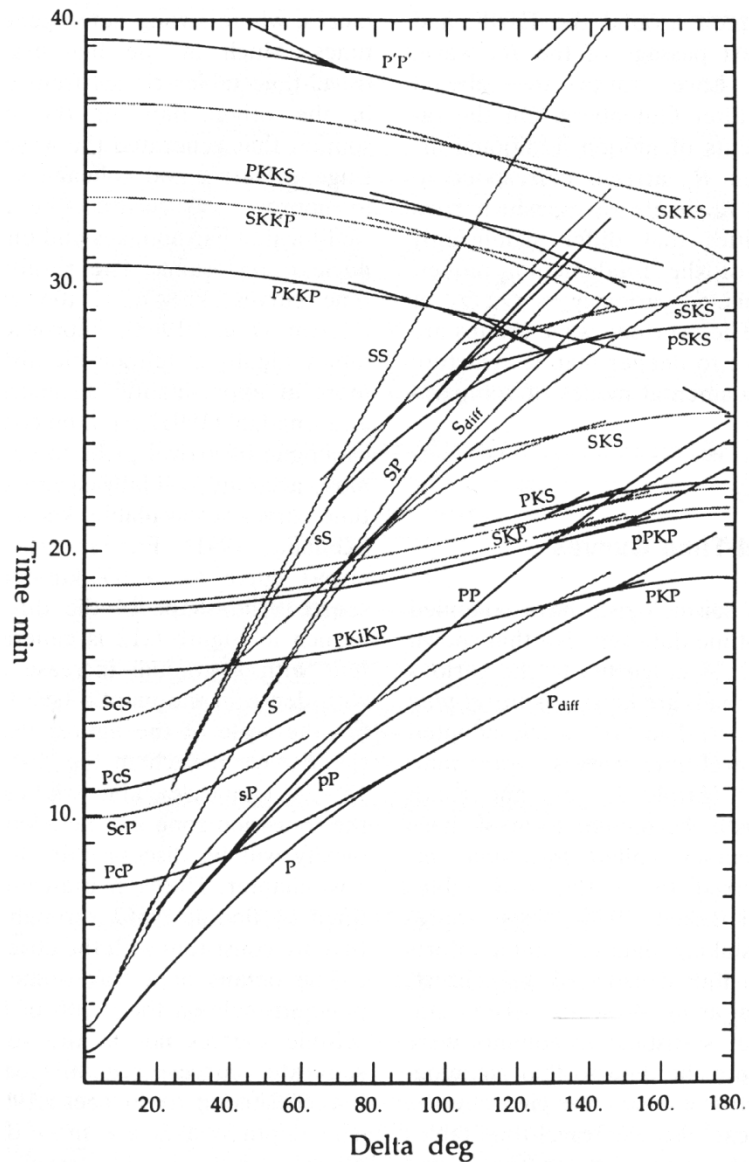
Synthetische (berechnete) Seismogramme



Seismogramme mit streuendem oberem Mantel

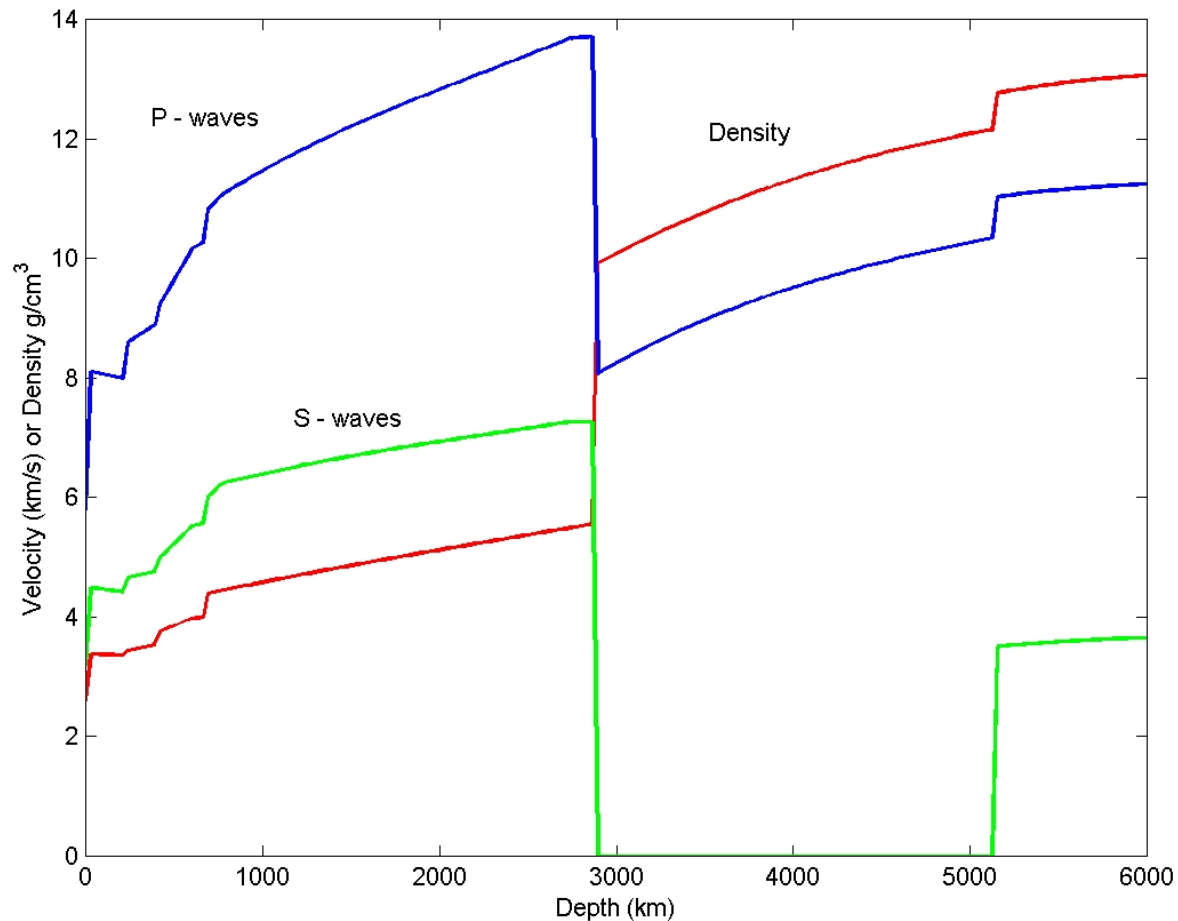


Globale Seismologie Laufzeiten



PREM; 1D P-S Geschwindigkeiten und Dichte

PREM: Preliminary Reference Earth Model (Dziewonski and Anderson, 1981)



Seismische Tomographie

· Angenommen wir haben eine Menge Laufzeitmessungen (verschiedene Messstationen, verschiedene Erdbeben, verschiedene seismische Phasen)

Im Allgemeinen suchen wir das Erdmodell m , welches die Differenz der **beobachteten** mit den **berechneten** Laufzeiten minimiert

$$\sum_{\text{traveltimes}} T_{\text{obs}} - T_{\text{theory}}(m) = \text{Min!}$$

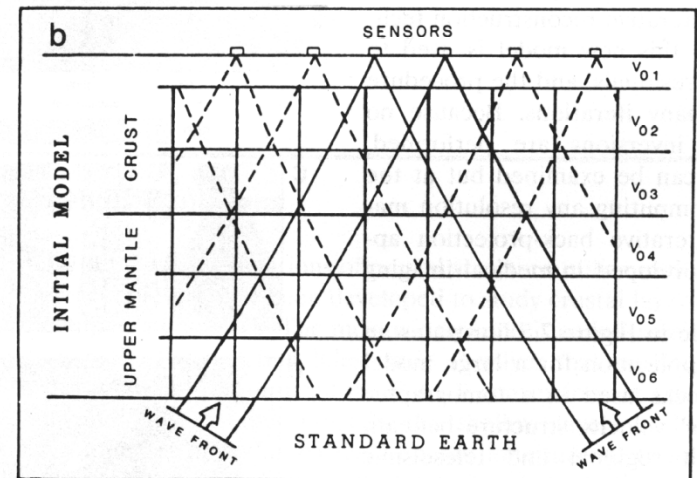
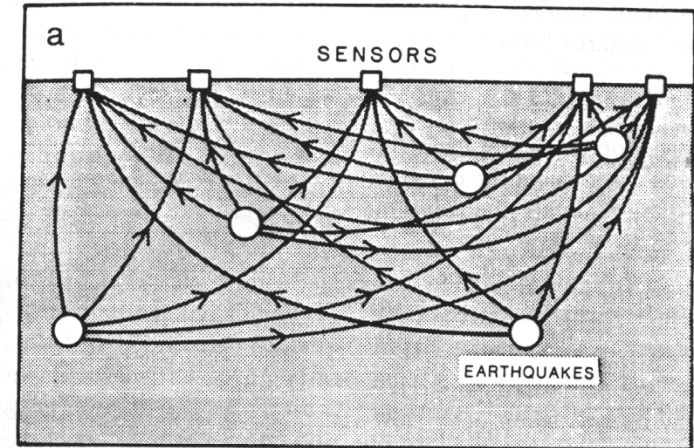
Für kugelsymmetrische Medien kann dieses Problem analytisch gelöst werden.

Seismische Tomographie

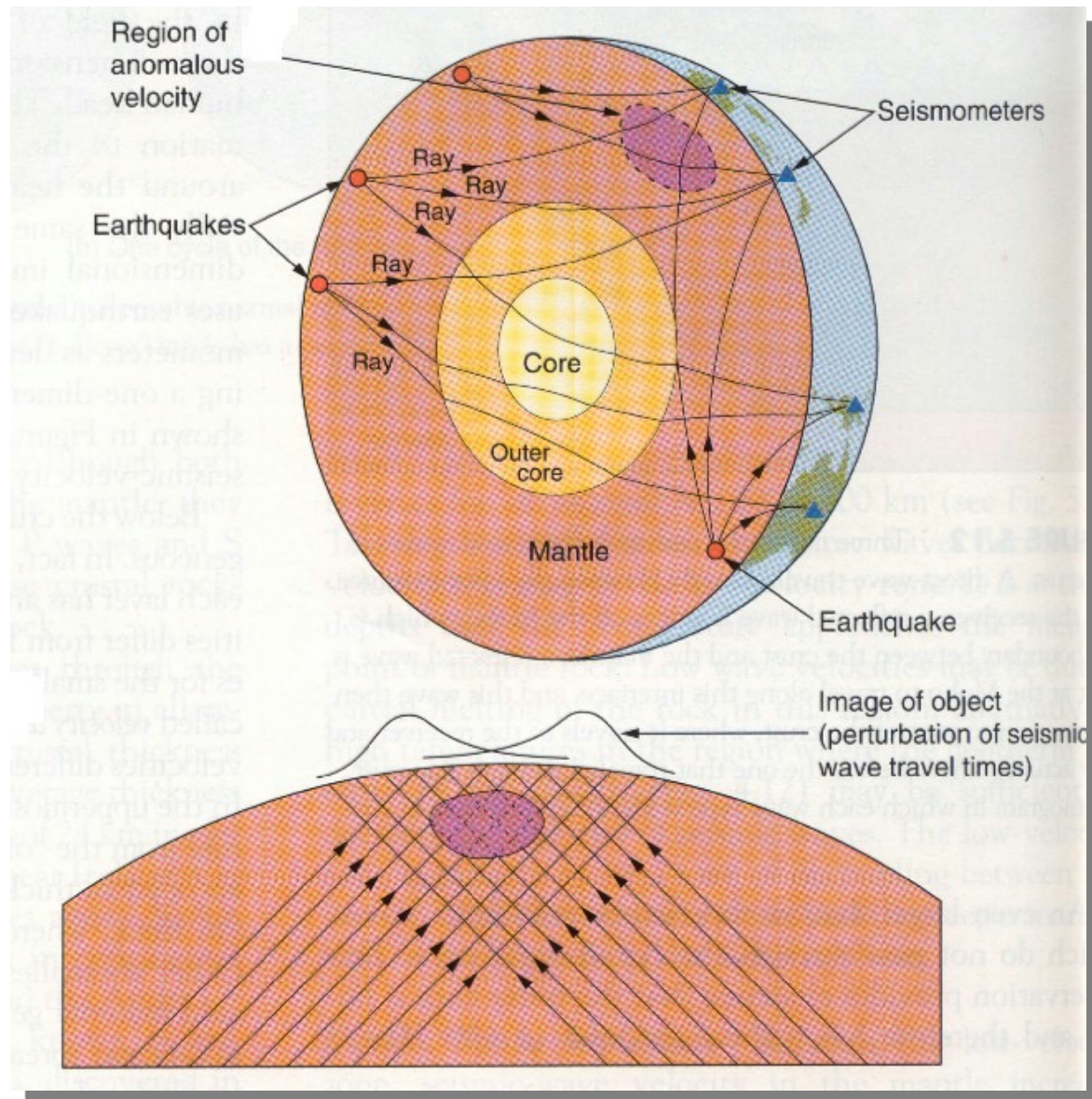
Die 3D Variationen der seismischen Geschwindigkeiten enthalten wertvolle Informationen über die Dynamik des Erdinneren.

Seismische Tomographie zielt darauf ab, die Perturbationen der Geschwindigkeiten um ein Referenzmodell zu finden.

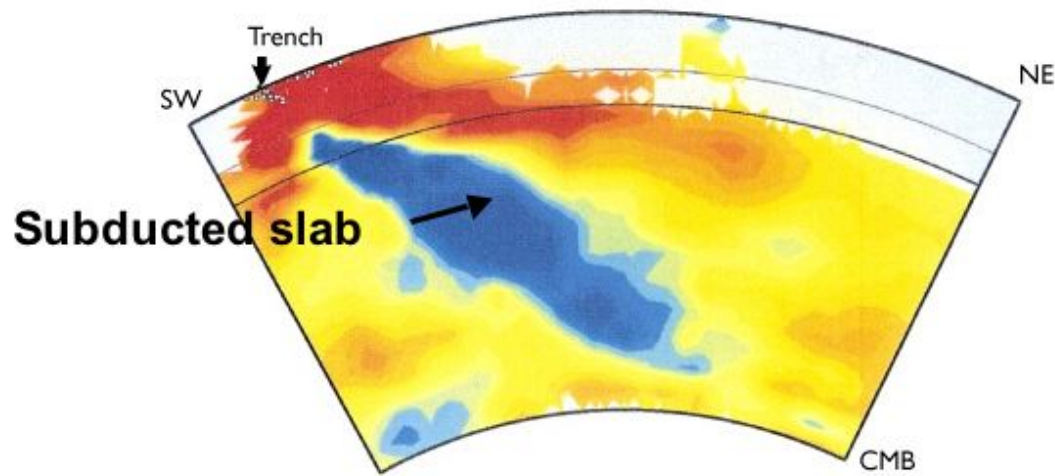
Gibt es Unterschiede zur **medizinischen Tomographie**?



Globale Tomographie



Seismic Tomography Scan of a Section of the Mantle



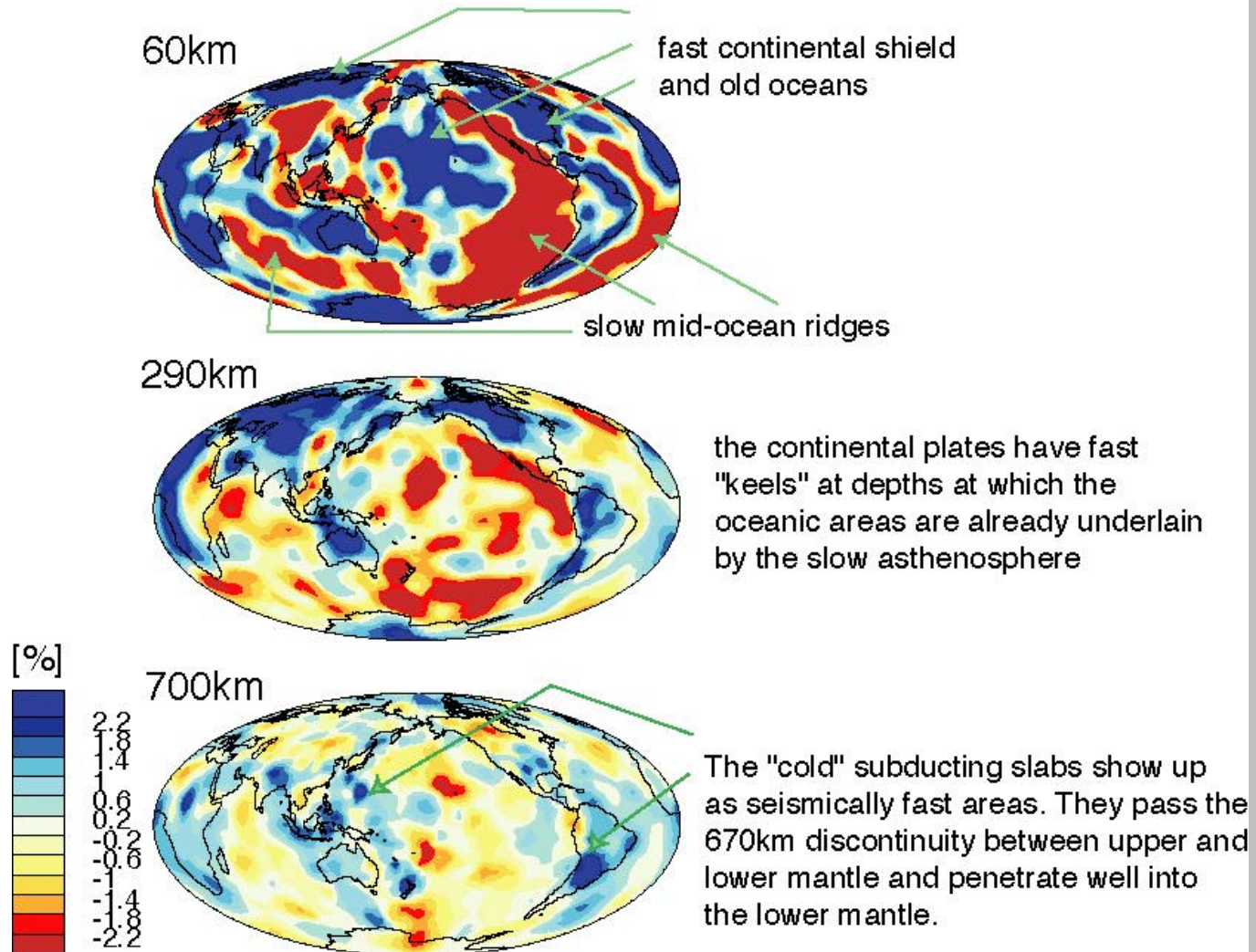
Seismic tomography records variations in P-wave velocity, which correlate with the temperatures of matter in Earth's interior.

- Slower P waves, indicating warmer-than-average matter
- Average-speed P waves, indicating average-temperature matter
- Faster P waves, indicating cooler-than-average matter
- No data

Fig. 19.9

Upper mantle: 3-D structure

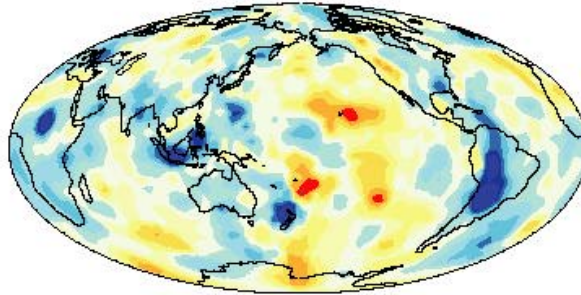
SB4L18-Upper Mantle



Mid-mantle: 3-D structure

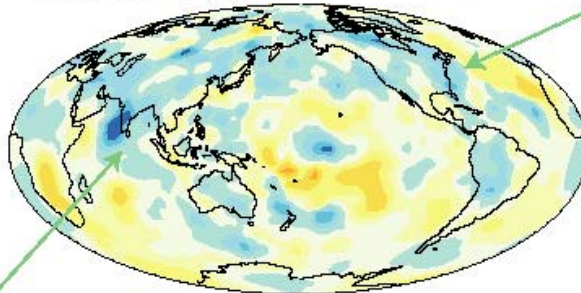
SB4L18-Mid-Mantle

925 km

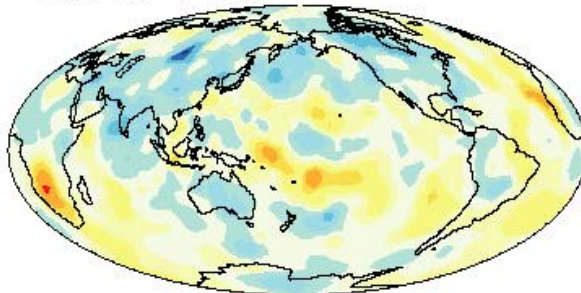


Some of the "cold" subducting slabs can be traced well into the lower mantle. E.g. old Farallon and Tethian subducting slabs.

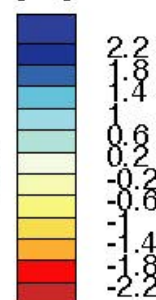
1525 km



1825 km

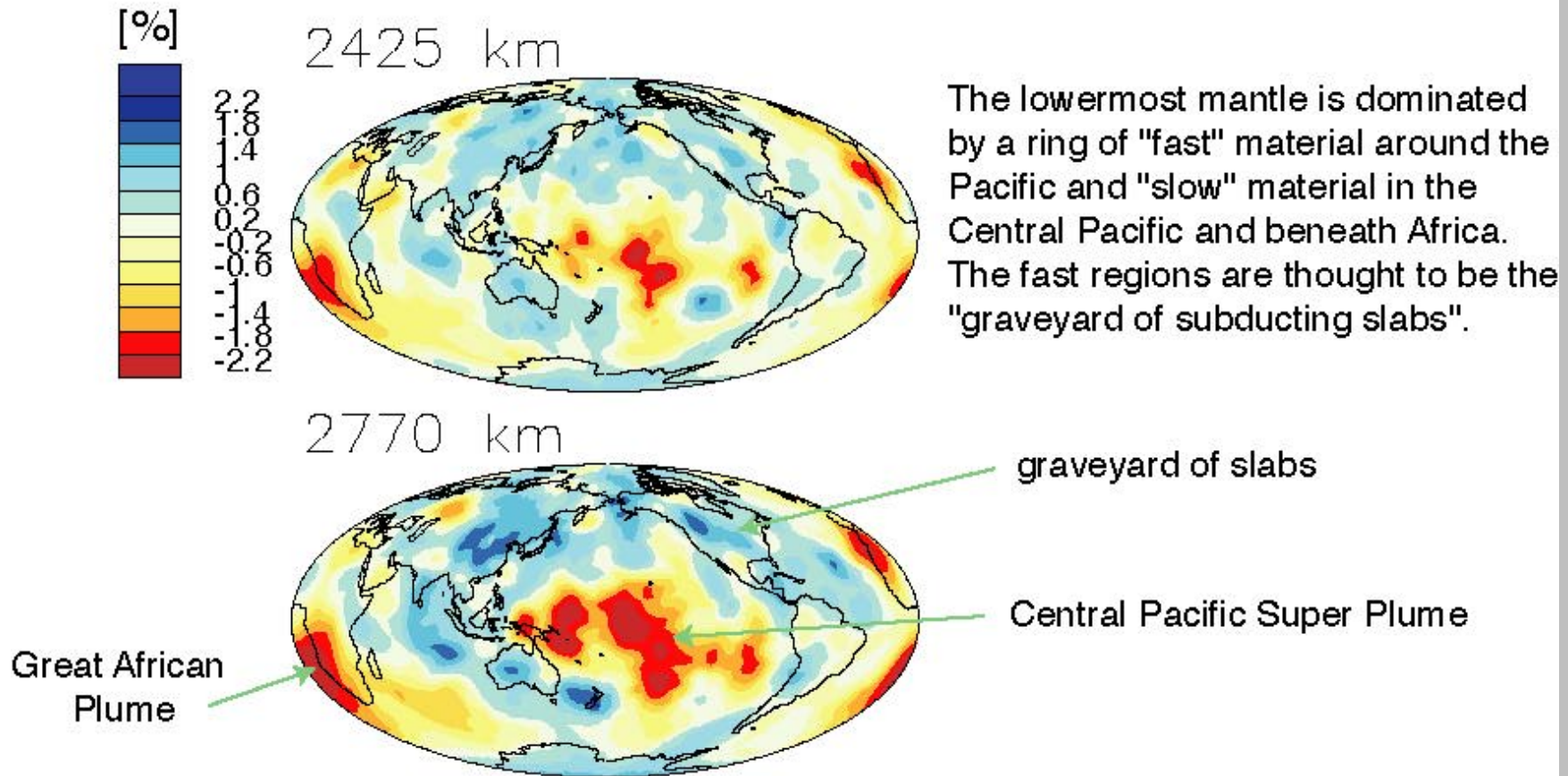


[%]



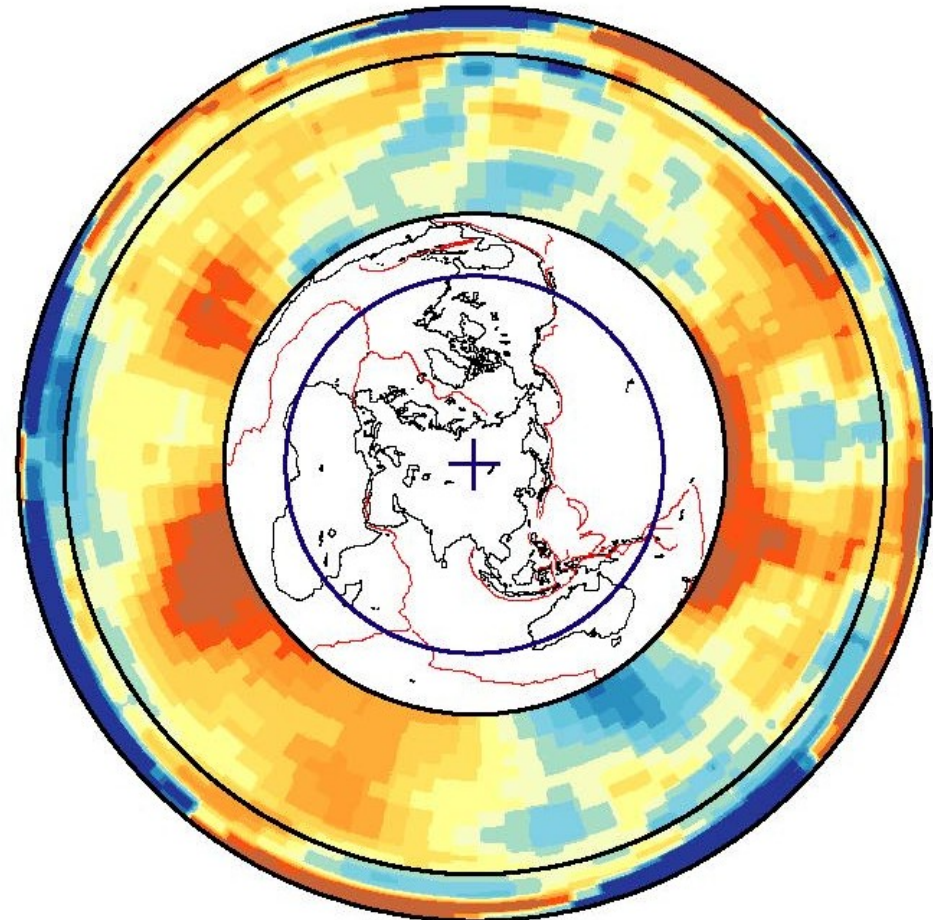
Lower Mantle: 3-D structure

SB4L18-Lowermost Mantle

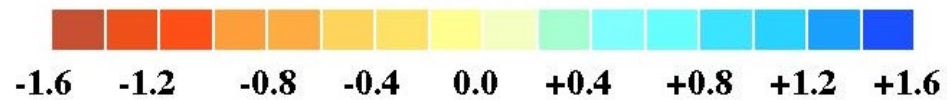


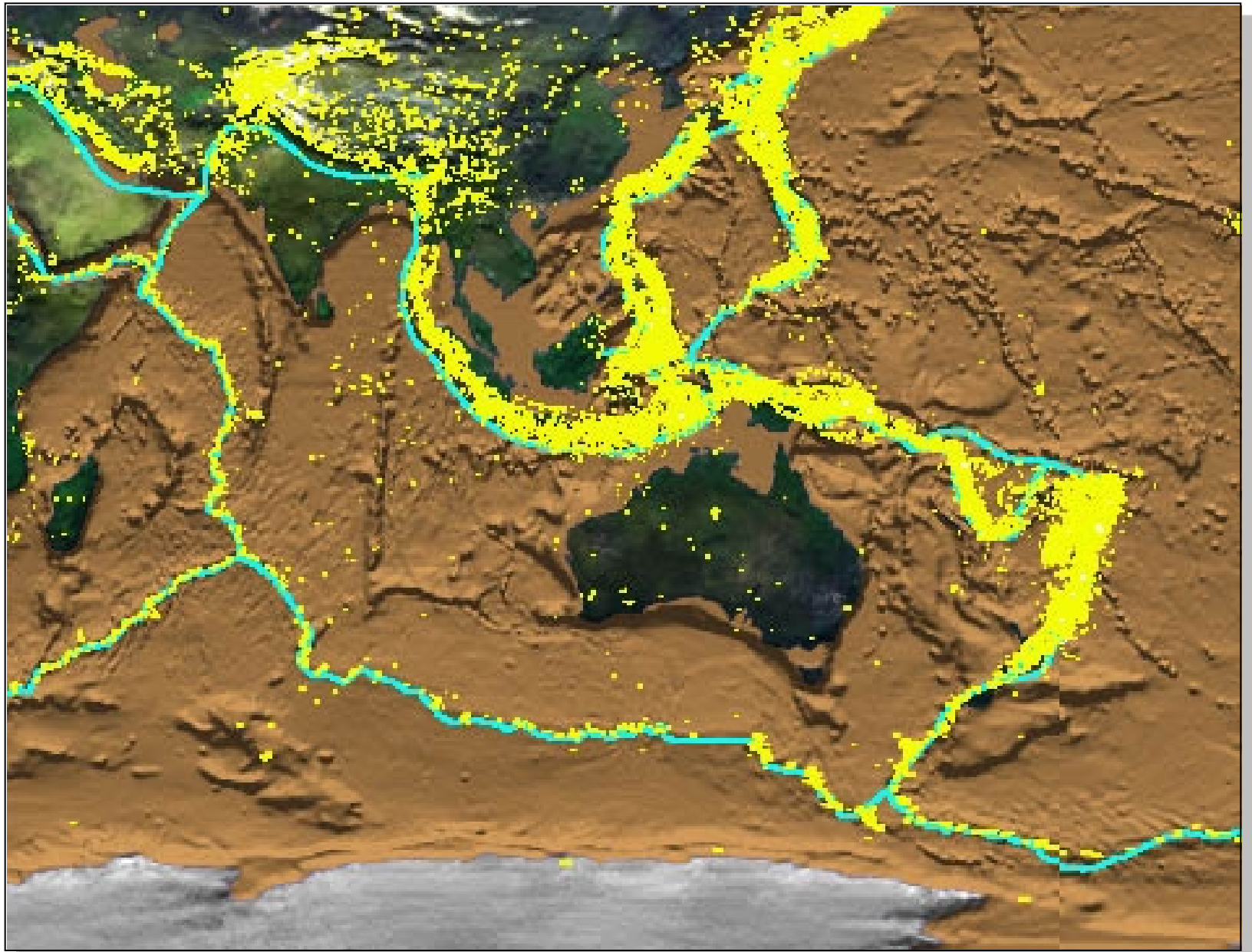
Global Cut: 3-D structure

SB4L18

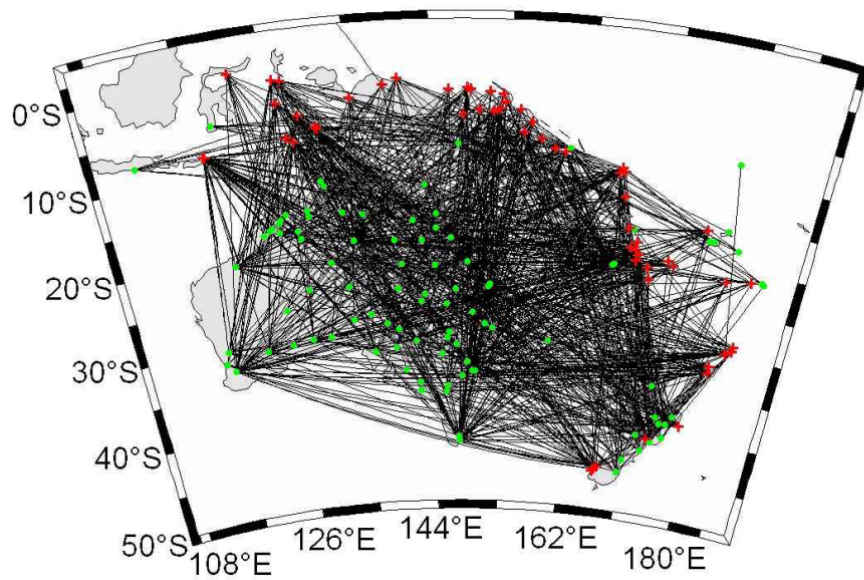


% dV_s/V_s

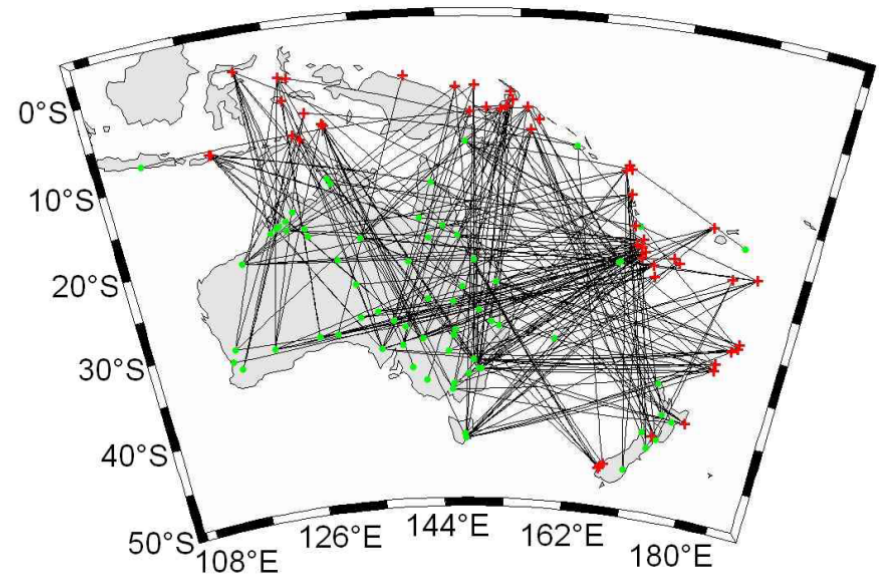




Strahlenabdeckung

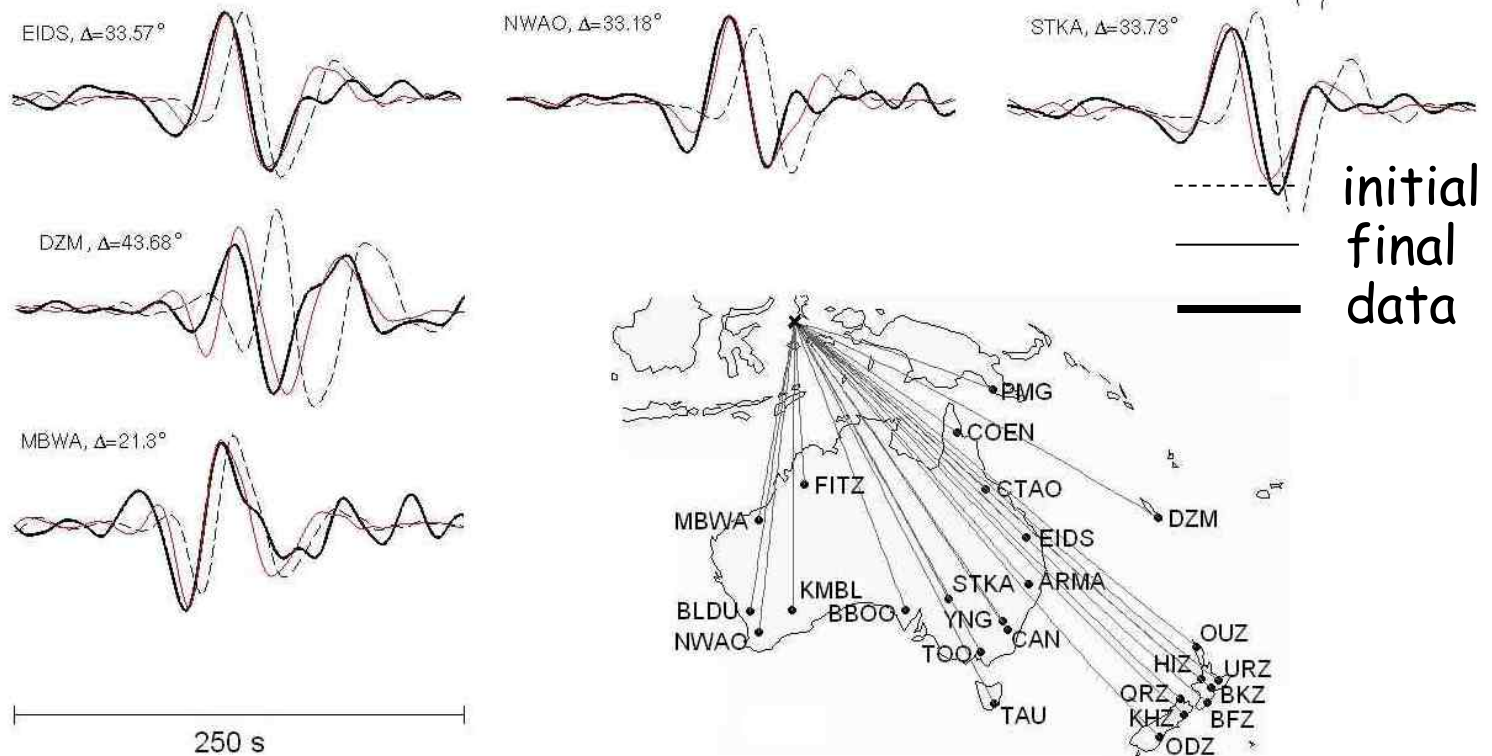


Rayleigh waves

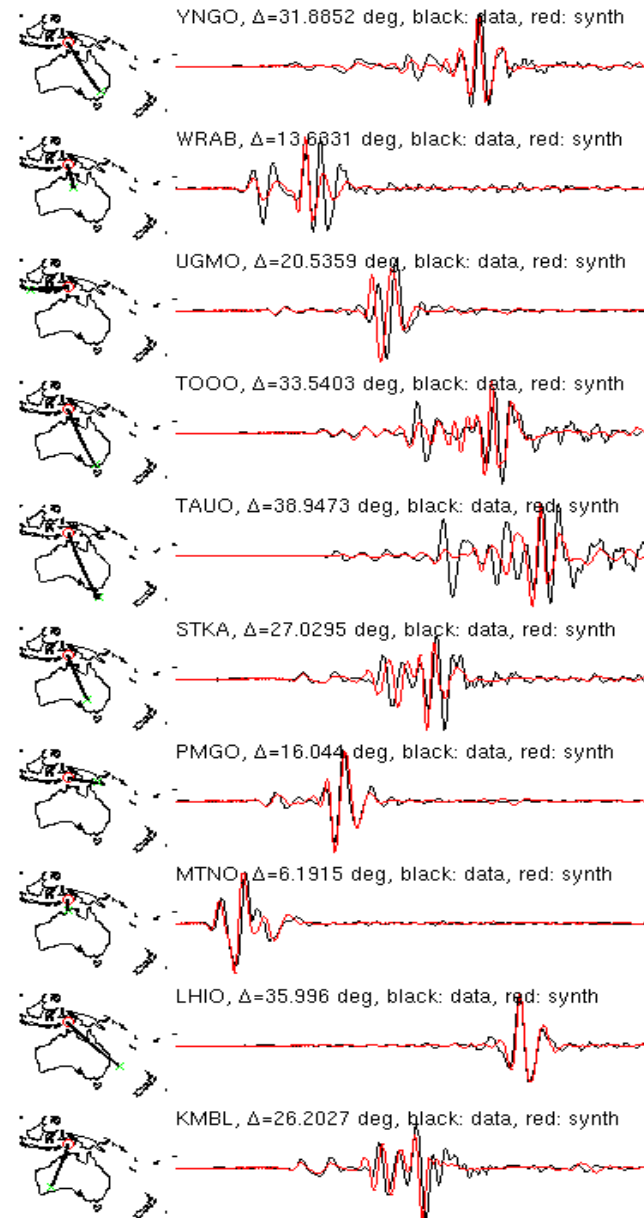
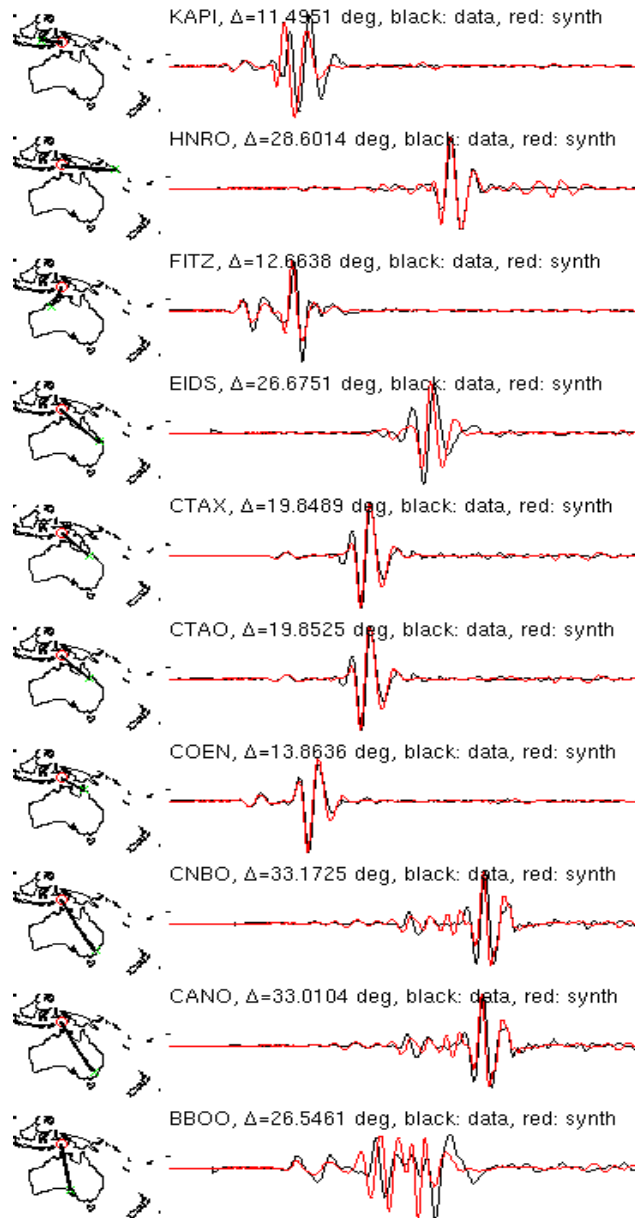


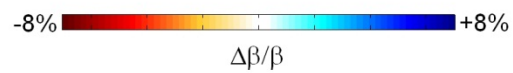
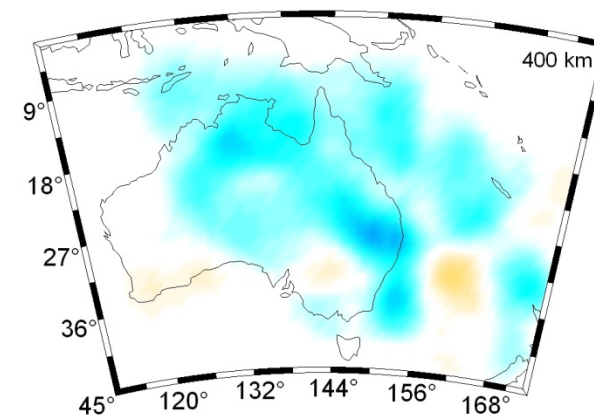
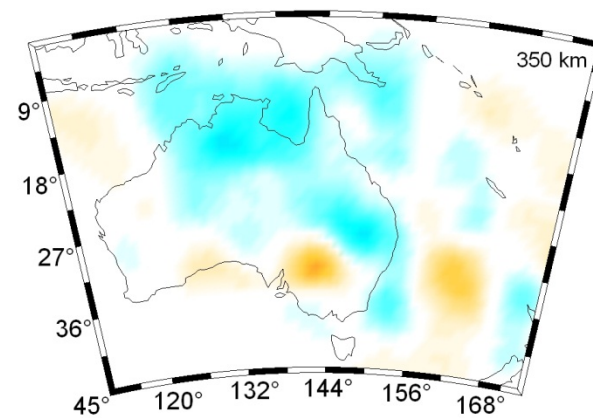
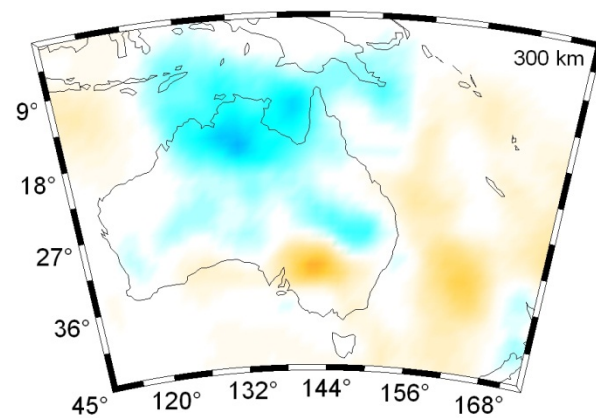
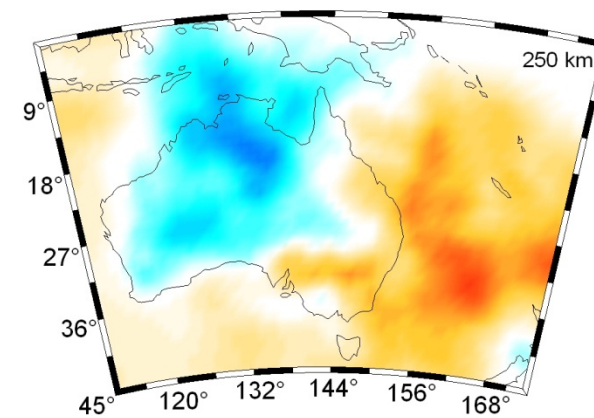
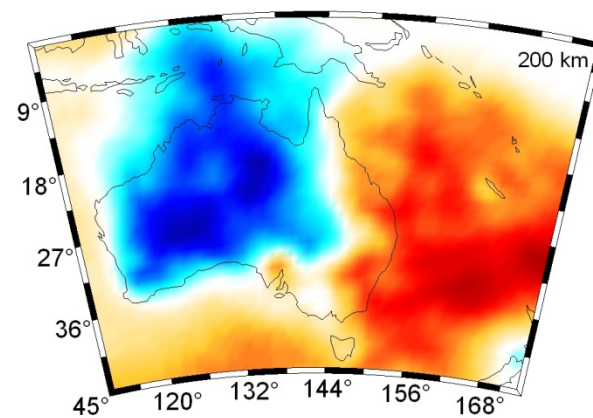
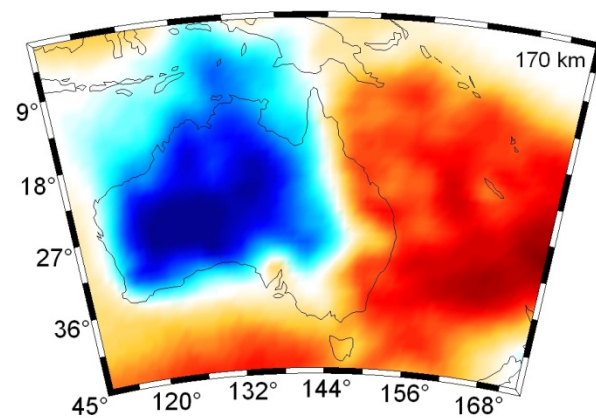
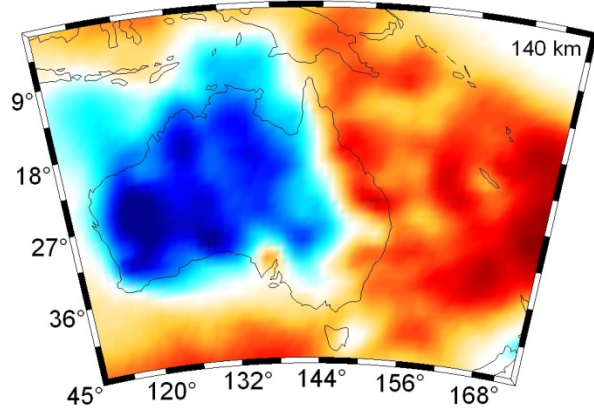
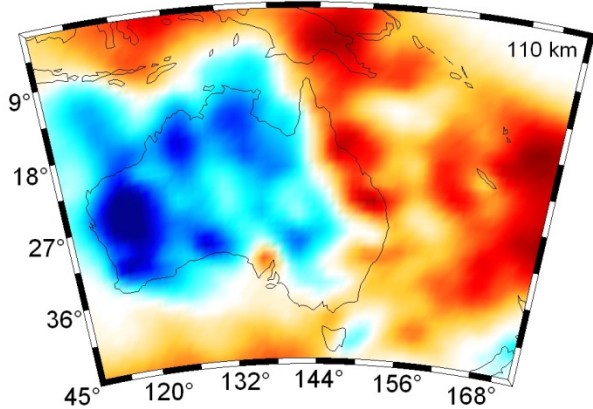
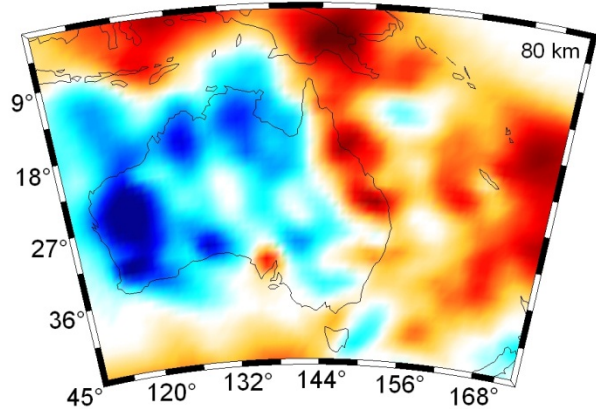
S waves

Wellenformen Anpassen (Inversion)



Beobachtung (schwarz), Theorie (rot)





Zusammenfassung Refraktionsseismik

- Wenn sich die Geschwindigkeiten mit der Tiefe erhöhen beobachtet man **Refraktionen**
- Refraktionen breiten sich im schnelleren Medium in horizontaler Richtung aus und **strahlen zur Oberfläche**
- Refraktierte Wellen erlauben die **Bestimmung der Geschwindigkeits-Tiefenverteilung**
- Die Verallgemeinerung des Konzept für 3D Medien führt zur **seismischen Tomographie**
- **Tomographische Abbildungen** können große Unsicherheiten enthalten wegen ungenügender Strahlabdeckung oder verdeckter Regionen (zB Niedriggeschwindigkeitszonen etc.)
- Die Zukunft liegt in der direkten Modellierung der gesamten beobachteten Wellenformen -> **Wellenformtomographie**