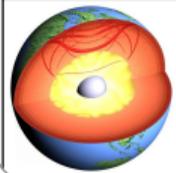


Einführung in die Geophysik I

Refraktionsseismik

Thomas Bohlen, Geophysikalisches Institut, Fakultät für Physik

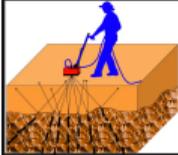
Seismologie



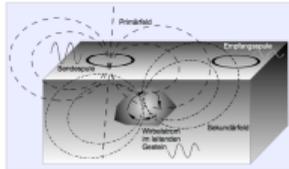
Seismik



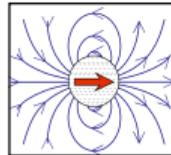
Georadar



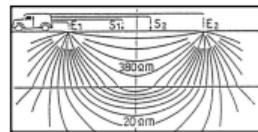
Elektromagnetik



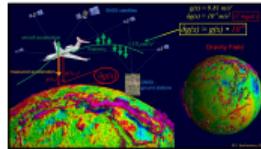
Magnetik



Geoelektrik



Gravimetrie



Inhalte der Vorlesung

Einführung in die Geophysik I, WS 2023/24, Kl. HS B

#	Datum	Vorlesung (09:45-11:15h)	Übungen (11:30-12:30h)
1	25.10.23	Einführung, Wellenausbreitung	
	01.11.23	Feiertag	
2	08.11.23	Wellenausbreitung	
3	15.11.23	Refraktionsseismik	Ü1: Moduln
	22.11.23	Studieninformationstag, Keine Vorlesung	
4	29.11.23	Reflexionsseismik	Ü2: Refraktionsseismik
5	06.12.23	Elektromagnetische Wechselwirkungen	Ü3: Reflexionsseismik
6	13.12.23	Goradar	
7	20.12.23	Geoelektrik	Ü4: Georadar
8	10.01.24	Gravimetrie	Ü5: Geoelektrik
9	17.01.24	Gravimetrie	
10	24.01.24	Magnetik	Ü6: Gravimetrie
11	31.01.24	Magnetik	
12	07.02.24	EM-Verfahren	Ü7: Magnetik
	14.02.24	Klausur	

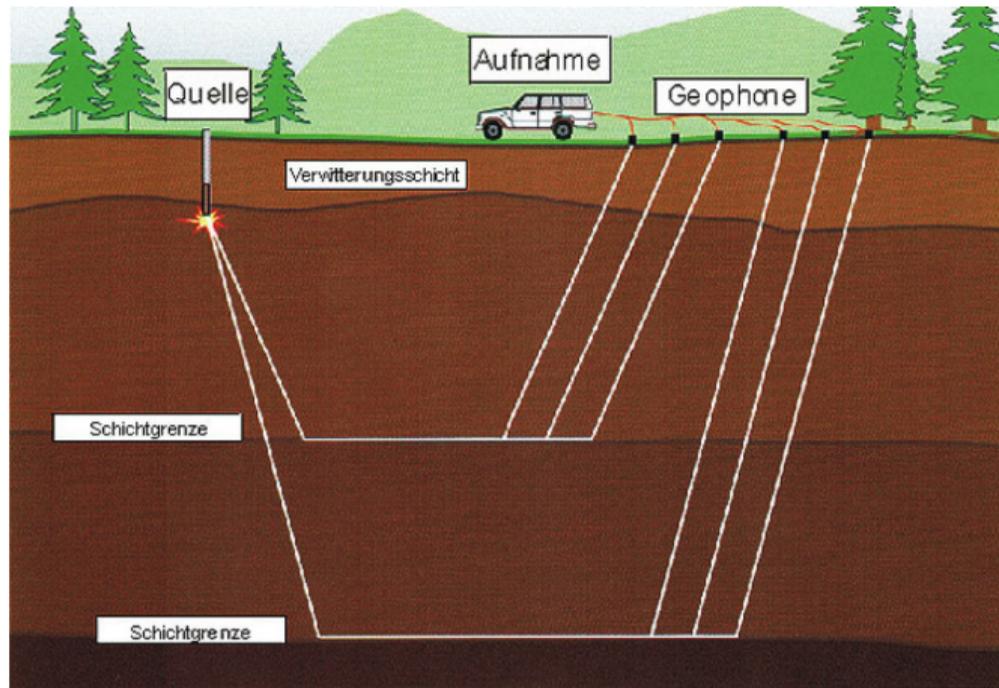
Agenda

- Einführung
- Söhlige Schichtgrenze
- Geneigte Schichtgrenze
- Komplexere Modelle
- Laufzeittomographie
- Zusammenfassung
- Referenzen

Agenda

- Einführung
- Söhlige Schichtgrenze
- Geneigte Schichtgrenze
- Komplexere Modelle
- Laufzeittomographie
- Zusammenfassung
- Referenzen

Prinzip der Refraktionsseismik



Ziel ist die Durchschallung mit Kopfwellen:

- 1 Kartierung der Topographie von Grenzflächen
- 2 Tomographie des Oberbaus

Prinzip der Refraktionsseismik

- Transmissioneometrie: Durchschallung des Oberbaus von unten mit Kopfwellen.
Möglichkeiten:
 - ① Kartierung der Topographie des Refraktors
 - ② Rekonstruktion der Geschwindigkeiten des Oberbaus (Refraktionstomographie)
- Mindestens eine prominente und lateral kontinuierliche Grenzfläche
- Relativ große Entfernungen zwischen Quelle und Empfänger
- Anwendung auf verschiedenen Skalen von der oberflächennahen Erkundung (Grundwasser, 10 m Tiefe) bis zur Kartierung der Grenze zwischen Kruste und Mantel (20-40 km Tiefe)

Vorlesungsinhalte heute

- 1 Laufzeitgleichungen bei einer söhligem Schicht über einen Halbraum
- 2 Auswertung bei einer söhligem Schicht über einen Halbraum
- 3 Laufzeitgleichungen bei einer geneigten Schicht über einen Halbraum und Auswertung
- 4 Komplexere Geschwindigkeitsmodelle - Typische Laufzeitkurven
- 5 Laufzeittomographie
- 6 Zusammenfassung

Agenda

- Einführung
- **Söhlige Schichtgrenze**
- Geneigte Schichtgrenze
- Komplexere Modelle
- Laufzeittomographie
- Zusammenfassung
- Referenzen

Hammerschlag-Seismik

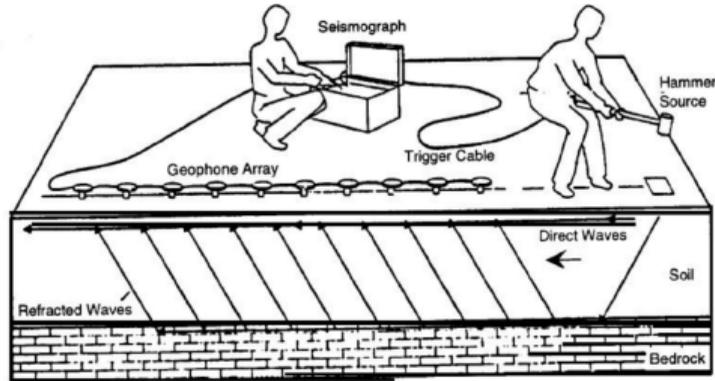
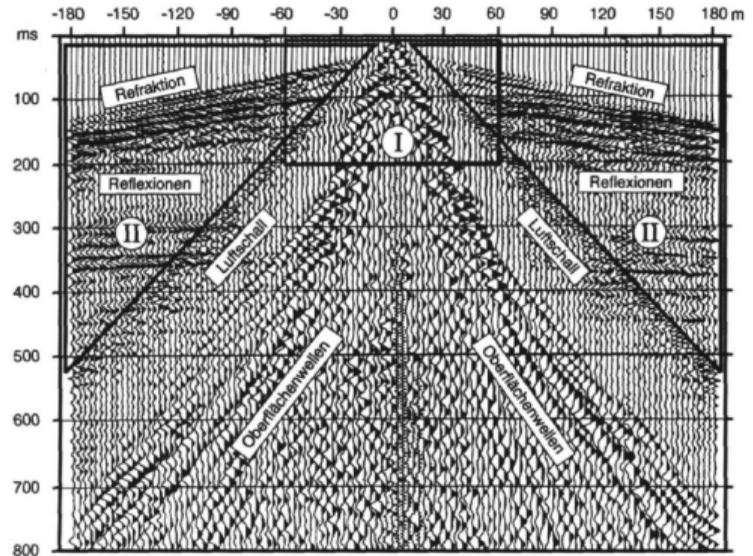
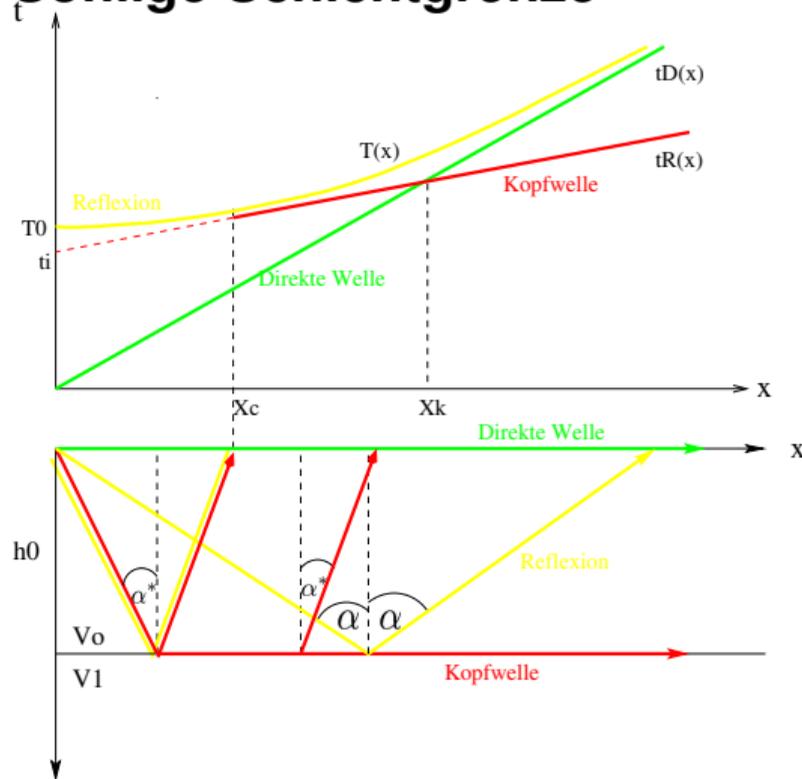


Abb. 1: Refraktionsseismik mit Signalanregung durch Hammerschlag



Datenbeispiel

Söhlige Schichtgrenze



Direkte Welle

$$t_D = \frac{x}{v_0}$$

Reflexion

$$T^2(x) = \frac{x^2}{v_0^2} + T_0^2, T_0 = \frac{2h_0}{v_0}$$

Kopfwelle

$$t_R = t_i + \frac{x}{v_1}$$

Intercept-Zeit

$$t_i = 2h_0 \sqrt{v_0^{-2} - v_1^{-2}}$$

Kritische Entfernung

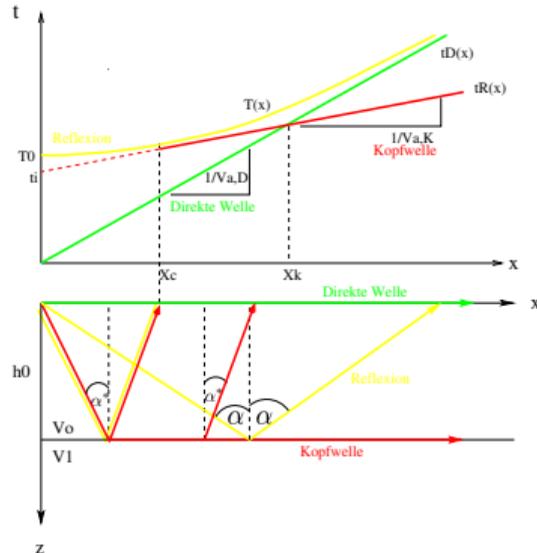
$$x_c = 2h_0 \tan(\alpha^*)$$

$$\alpha^* = \arcsin(v_0/v_1)$$

Knickpunkt

$$x_k = 2h_0 \sqrt{\frac{v_1 + v_0}{v_1 - v_0}}$$

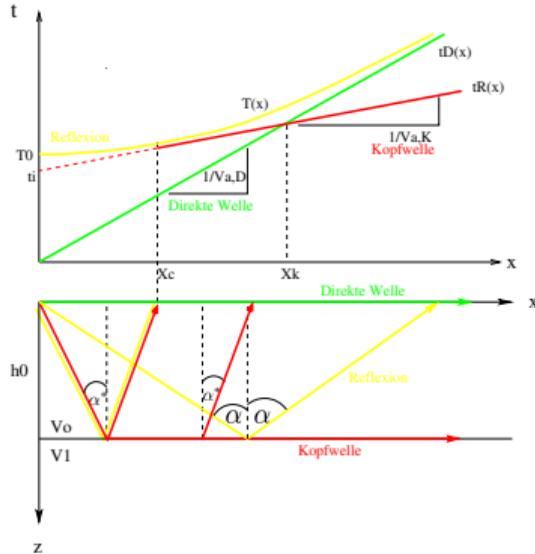
Auswertung söhlig Schichtgrenze



Modellparameter

- 1 Schichtmächtigkeit h_0
- 2 Schichtgeschwindigkeit v_0
- 3 Halbraumgeschwindigkeit v_1

Auswertung söhlig Schichtgrenze



Modellparameter

- 1 Schichtmächtigkeit h_0
- 2 Schichtgeschwindigkeit v_0
- 3 Halbraumgeschwindigkeit v_1

Beobachtungsgrößen

- 1 Scheingeschwindigkeit dir. Welle $\rightarrow v_0$
- 2 Scheingeschwindigkeit Kopfwelle $\rightarrow v_1$
- 3 Intercept-Zeit $t_i \rightarrow h_0$
- 4 Knickpunkt $x_k \rightarrow h_0$

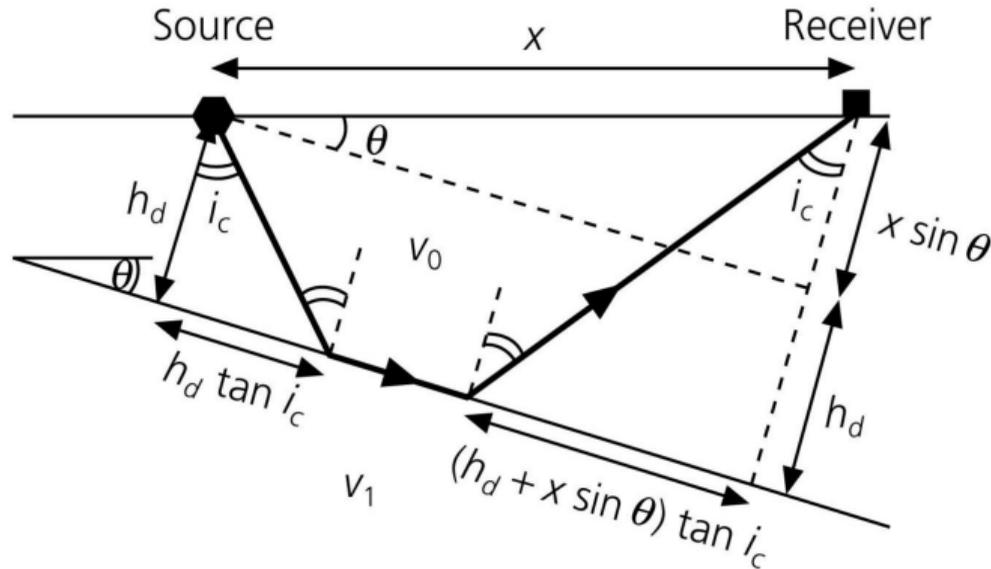
Scheingeschwindigkeit = scheinbare horizontale Geschwindigkeit = Steigung der Laufzeitkurve

$$v_a = \frac{\partial T(x)}{\partial x} \approx \frac{\Delta T}{\Delta x} \text{ (Steigungsdreieck).}$$

Agenda

- Einführung
- Söhlige Schichtgrenze
- **Geneigte Schichtgrenze**
- Komplexere Modelle
- Laufzeittomographie
- Zusammenfassung
- Referenzen

Geneigte Schichtgrenze - Laufzeitgleichung



$$t_{R,d}(x) = \frac{1}{v_1} (x \cos(\theta) - h_d \tan(i_c) - (h_d + x \sin(\theta)) \tan(i_c)) + \frac{1}{v_0} \left(\frac{h_d}{\cos(i_c)} + \frac{h_d}{\cos(i_c)} + \frac{x \sin(\theta)}{\cos(i_c)} \right)$$

Geneigte Schichtgrenze - Laufzeitgleichung

$$t_{R,d}(x) = \frac{1}{v_1} (x \cos(\theta) - h_d \tan(i_c) - (h_d + x \sin(\theta)) \tan(i_c)) + \frac{1}{v_0} \left(\frac{h_d}{\cos(i_c)} + \frac{h_d}{\cos(i_c)} + \frac{x \sin(\theta)}{\cos(i_c)} \right)$$

$$t_{R,d}(x) = \frac{1}{v_1} (x \cos(\theta) - 2h_d \tan(i_c) - x \sin(\theta) \tan(i_c)) + \frac{1}{v_0} \left(\frac{2h_d}{\cos(i_c)} + \frac{x \sin(\theta)}{\cos(i_c)} \right)$$

$$v_1 = \frac{v_0}{\sin(i_c)}$$

$$t_{R,d}(x) = \frac{\sin(i_c)}{v_0} (x \cos(\theta) - 2h_d \tan(i_c) - x \sin(\theta) \tan(i_c)) + \frac{1}{v_0} \left(\frac{2h_d}{\cos(i_c)} + \frac{x \sin(\theta)}{\cos(i_c)} \right)$$

$$t_{R,d}(x) = \frac{x}{v_0} \left[\sin(i_c) \cos(\theta) - \sin(\theta) \sin(i_c) \tan(i_c) + \frac{\sin(\theta)}{\cos(i_c)} \right] - \frac{2h_d \tan(i_c) \sin(i_c)}{v_0} + \frac{2h_d}{v_0 \cos(i_c)}$$

$$= \frac{x}{v_0} \left[\sin(i_c) \cos(\theta) + \frac{\sin(\theta)}{\cos(i_c)} (1 - \sin^2(i_c)) \right] - \frac{2h_d \sin^2(i_c)}{v_0 \cos(i_c)} + \frac{2h_d}{v_0 \cos(i_c)}$$

Geneigte Schichtgrenze - Laufzeitgleichung

$$t_{R,d}(x) = \frac{x}{v_0} \left[\sin(i_c) \cos(\theta) + \frac{\sin(\theta)}{\cos(i_c)} (1 - \sin^2(i_c)) \right] + \frac{2h_d}{v_0 \cos(i_c)} (1 - \sin^2(i_c))$$

$$\cos^2(i_c) = 1 - \sin^2(i_c)$$

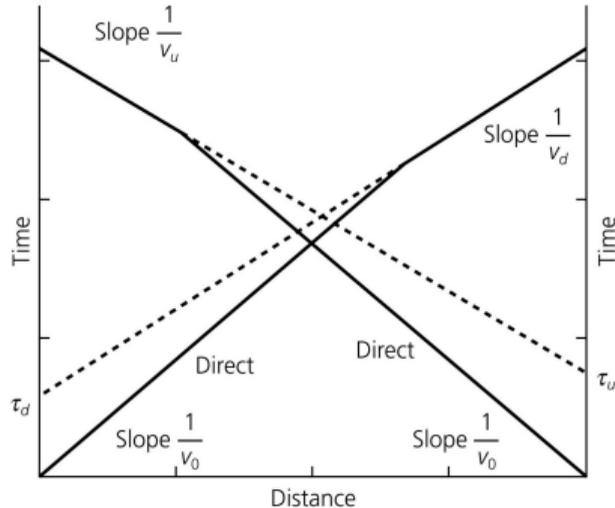
$$\begin{aligned} t_{R,d}(x) &= \frac{x}{v_0} [\sin(i_c) \cos(\theta) + \sin(\theta) \cos(i_c)] + \frac{2h_d \cos(i_c)}{v_0} \\ &= \frac{x \sin(i_c + \theta)}{v_0} + \frac{2h_d \cos(i_c)}{v_0} \end{aligned}$$

$$t_{R,d}(x) = \frac{x}{v_d} + \tau_d$$

$$v_d = \frac{v_0}{\sin(i_c + \theta)} \quad (\text{"Scheingeschwindigkeit"})$$

$$\tau_d = \frac{2h_d \cos(i_c)}{v_0} \quad (\text{"Intercept - Zeit"})$$

Geneigte Schichtgrenze - Laufzeiten



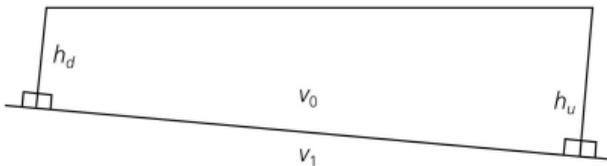
Laufzeit der Kopfwelle (downdip)

$$t_{R,d}(x) = \frac{x}{v_d} + \tau_d$$

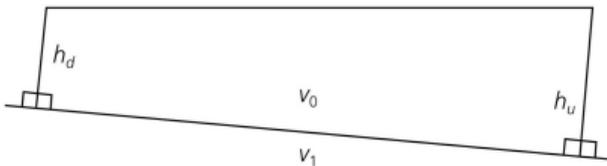
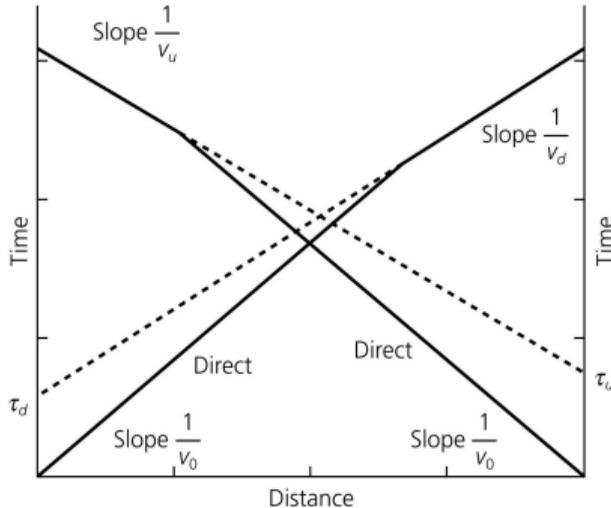
Scheinbare Geschwindigkeit:

$$v_d = \frac{v_0}{\sin(i_c + \theta)} \neq v_1$$

$$\text{Intercept-Zeit: } \tau_d = \frac{2h_d \cos(i_c)}{v_0}$$



Geneigte Schichtgrenze - Laufzeiten



Laufzeit der Kopfwelle (downdip)

$$t_{R,d}(x) = \frac{x}{v_d} + \tau_d$$

Scheinbare Geschwindigkeit:

$$v_d = \frac{v_0}{\sin(i_c + \theta)} \neq v_1$$

Intercept-Zeit: $\tau_d = \frac{2h_d \cos(i_c)}{v_0}$

Laufzeit der Kopfwelle (updip)

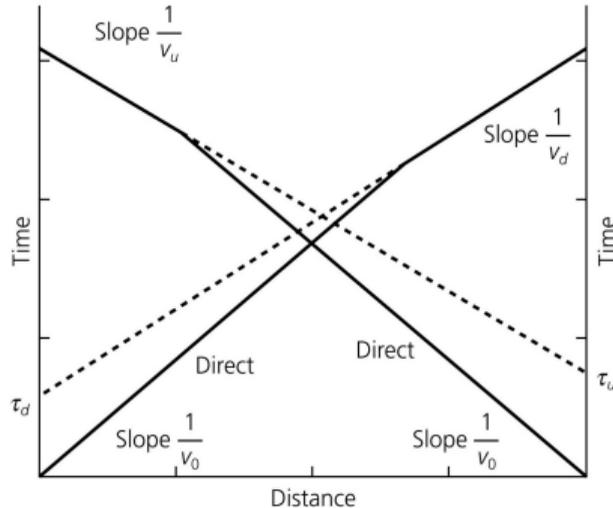
$$t_{R,u}(x) = \frac{x}{v_u} + \tau_u$$

Scheinbare Geschwindigkeit

$$v_u = \frac{v_0}{\sin(i_c - \theta)} \neq v_1$$

Intercept-Zeit: $\tau_u = \frac{2h_u \cos(i_c)}{v_0}$

Geneigte Schichtgrenze - Laufzeiten



Laufzeit der Kopfwelle (downdip)

$$t_{R,d}(x) = \frac{x}{v_d} + \tau_d$$

Scheinbare Geschwindigkeit:

$$v_d = \frac{v_0}{\sin(i_c + \theta)} \neq v_1$$

Intercept-Zeit: $\tau_d = \frac{2h_d \cos(i_c)}{v_0}$

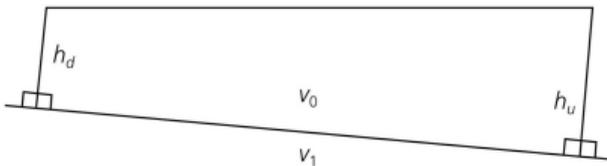
Laufzeit der Kopfwelle (updip)

$$t_{R,u}(x) = \frac{x}{v_u} + \tau_u$$

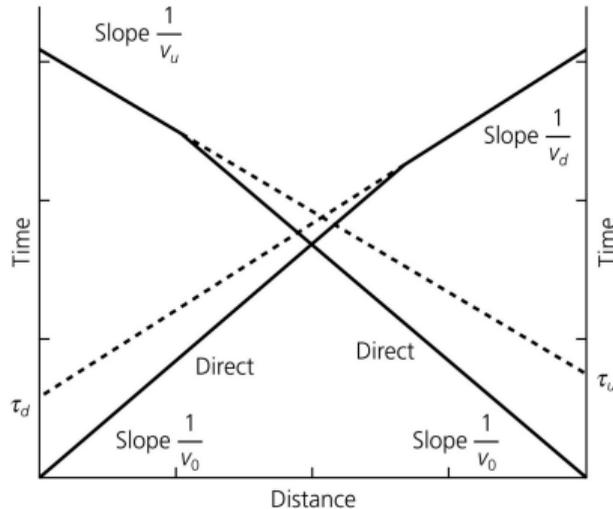
Scheinbare Geschwindigkeit

$$v_u = \frac{v_0}{\sin(i_c - \theta)} \neq v_1$$

Intercept-Zeit: $\tau_u = \frac{2h_u \cos(i_c)}{v_0}$



Geneigte Schichtgrenze - Laufzeiten



Schichtneigung:

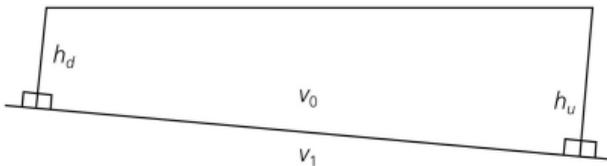
$$\theta = \frac{1}{2} \left(\arcsin\left(\frac{v_0}{v_d}\right) - \arcsin\left(\frac{v_0}{v_u}\right) \right)$$

Kritischer Winkel:

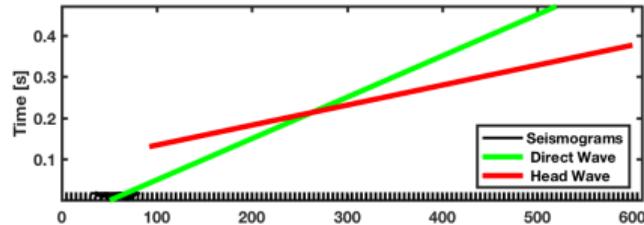
$$i_c = \frac{1}{2} \left(\arcsin\left(\frac{v_0}{v_d}\right) + \arcsin\left(\frac{v_0}{v_u}\right) \right)$$

Halbraumgeschwindigkeit:

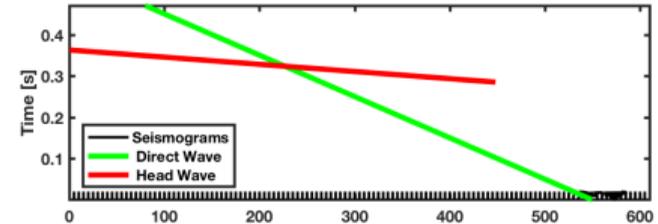
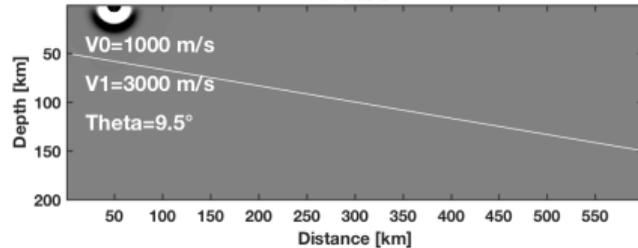
$$\frac{1}{2} \left(\frac{1}{v_u} + \frac{1}{v_d} \right) = \frac{\cos(\theta)}{v_1} \approx \frac{1}{v_1}$$



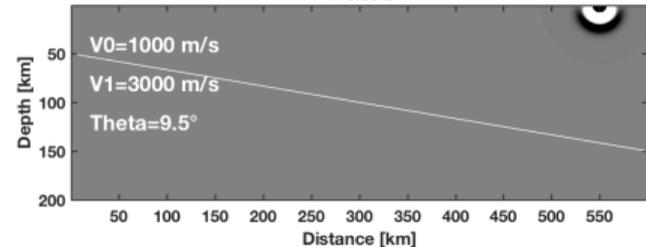
Akustische Simulation - geneigte Schichtgrenze



T=0.05 s



T=0.05 s



Hinschuss (downdip)

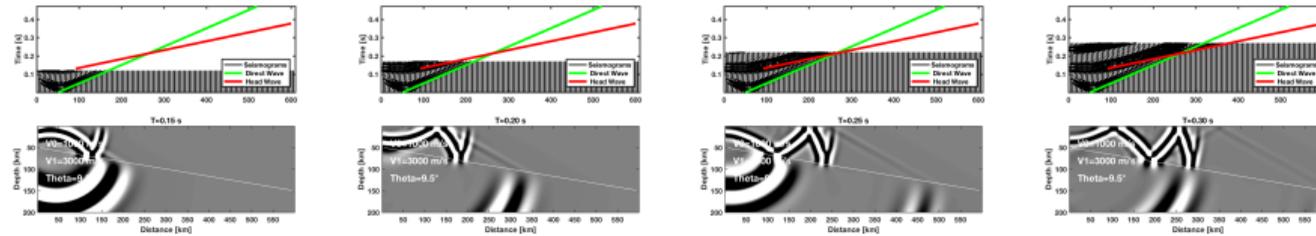
- geringere Überholentfernung x_k
- geringere Scheingeschwindigkeit der Kopfwelle

Rückschuss (updip)

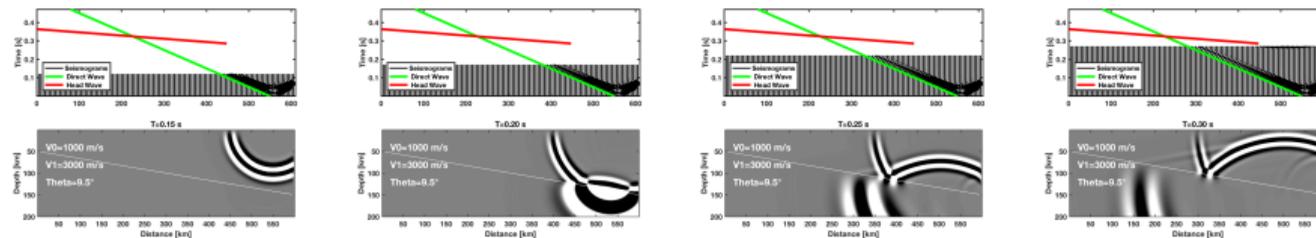
- höhere Überholentfernung x_k
- höhere Scheingeschwindigkeit der Kopfwelle

Akustische Simulation - geneigte Schichtgrenze

Hinschuss



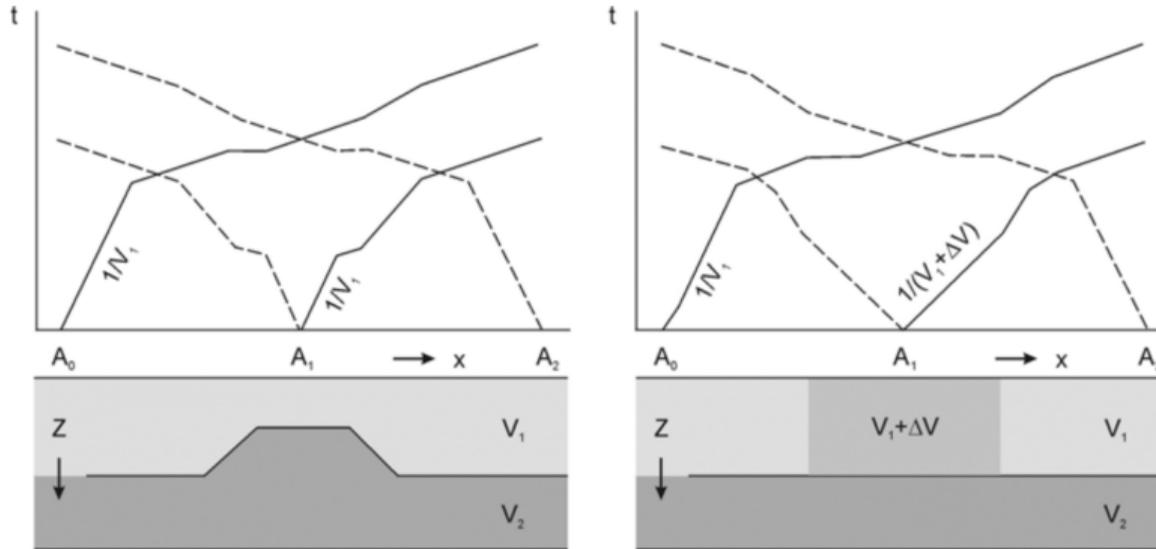
Rückschuss



Agenda

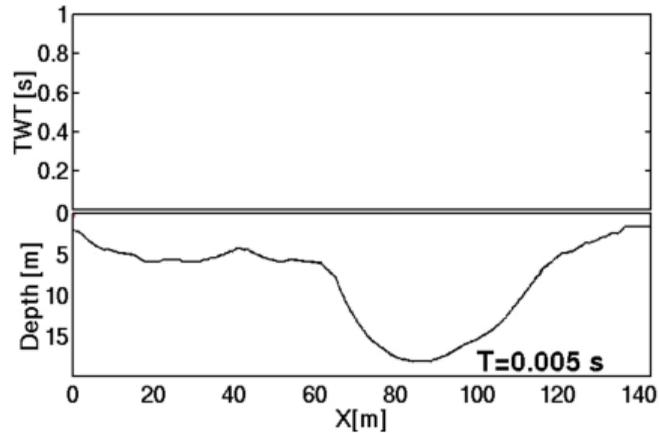
- Einführung
- Söhlige Schichtgrenze
- Geneigte Schichtgrenze
- **Komplexere Modelle**
- Laufzeittomographie
- Zusammenfassung
- Referenzen

Laterale Heterogenität



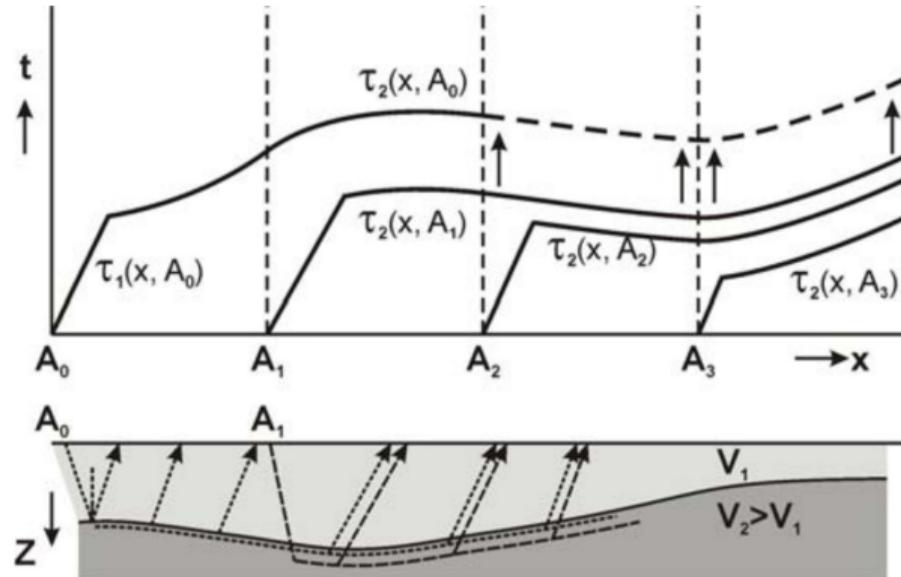
Einfluss lateraler Heterogenität auf die Laufzeitkurve.

Topographie des Refraktors



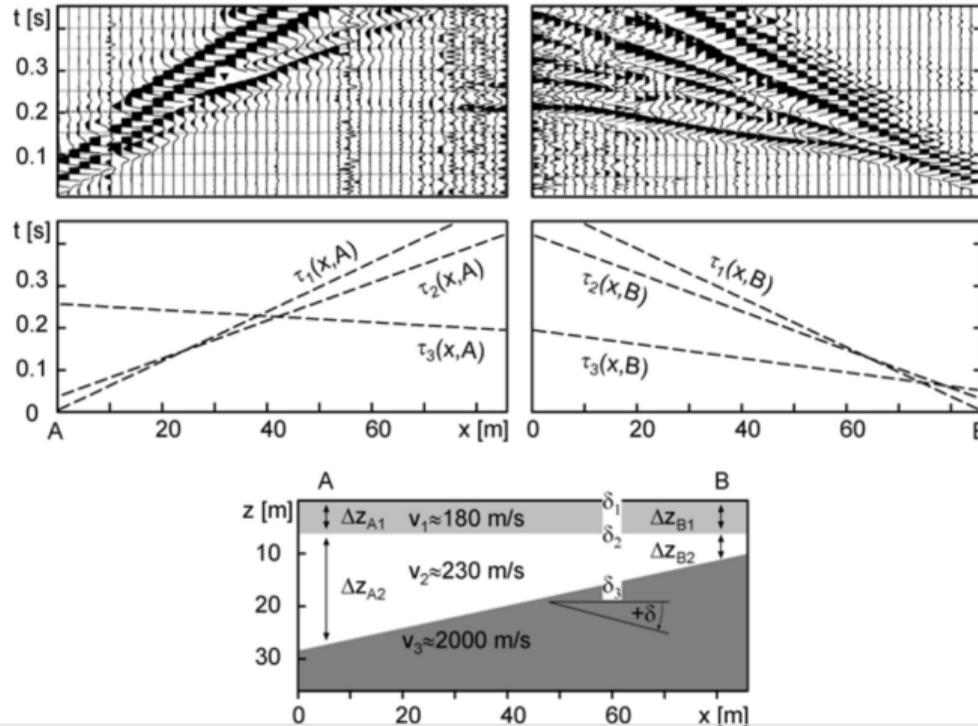
→ Laufzeit tomographie

Topographie des Refraktors



Parallelität refrakterter Laufzeitäste.

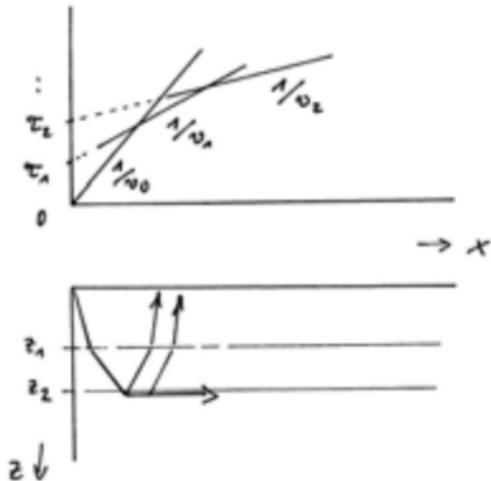
Mehrere Schichten



Auswertung söhliger Mehrschichtfall

Mehrschicht fall :

Generalisierte Intercept-Zeitformel :



kritisches Winkel
für n-te Schicht :

$$\sin i_{c,n} = \frac{v_0}{v_n}$$

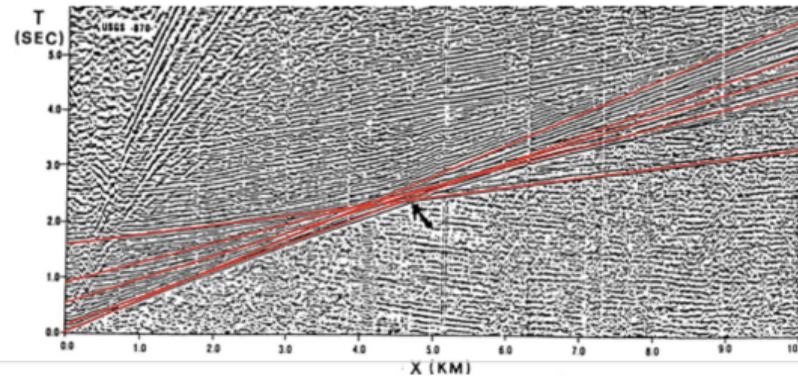
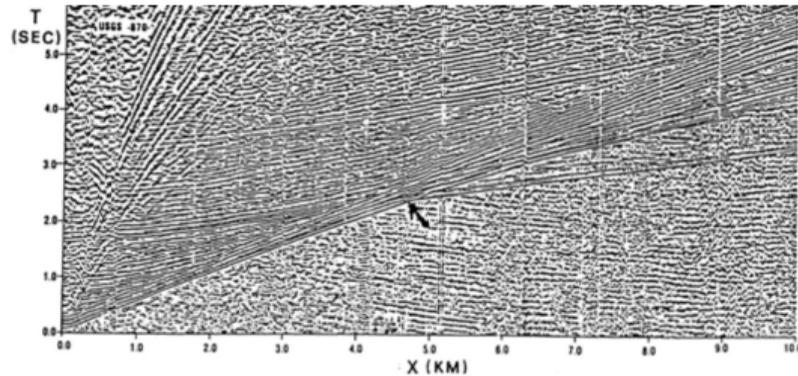
$$\cos i_{c,n} = \sqrt{1 - v_0^2/v_n^2}$$

Rekursionsformel :

$$z_n = \frac{v_n}{2 \cos i_{c,n}} \left(\tau_n - \sum_{i=1}^{n-1} \frac{2 z_i \cos i_{c,i}}{v_i} \right)$$

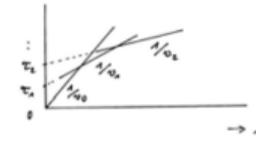
erweiterbar für geneigte Schichten
(s. Sheriff + Geldart, 1994)

Datenbeispiel mehrere Schichten



Mehrschicht fall :

Generalisierte Intercept-Zeitformel :



kritischer Winkel
für n-te Schicht :

$$\sin i_{c,n} = \frac{v_n}{v_{n+1}}$$

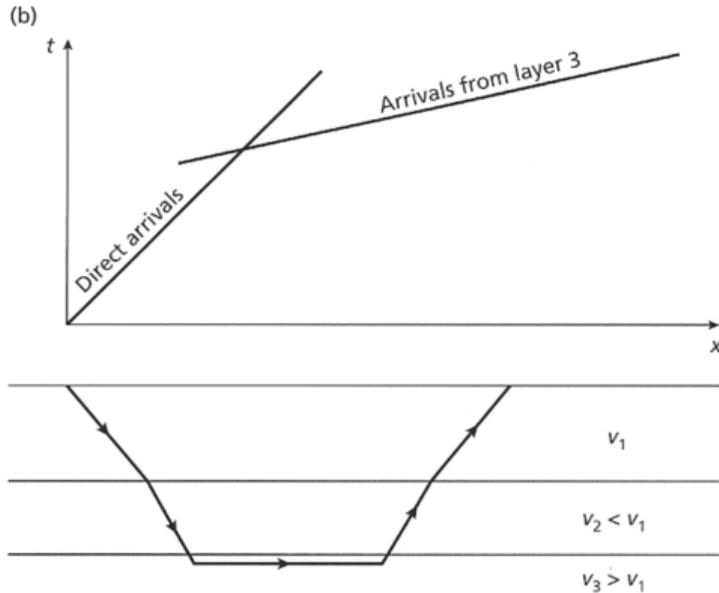
$$\cos i_{c,n} = \sqrt{1 - \frac{v_n^2}{v_{n+1}^2}}$$

Relevanzformel :

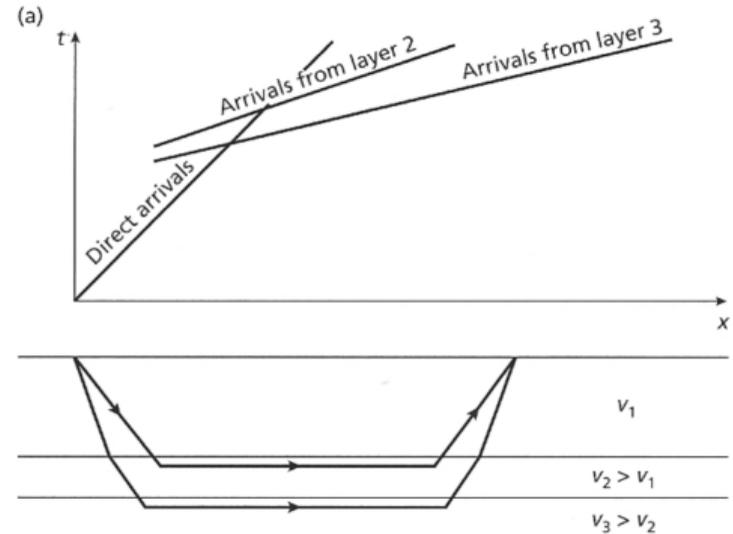
$$z_n = \frac{v_n}{2 \cos i_{c,n}} \left(T_n - \sum_{i=1}^{n-1} \frac{2 z_i \cos i_{c,i}}{v_i} \right)$$

Erweiterter für geneigte Schichten
(s. Sheriff + Geldart, 1994)

Unsichtbare Schichten



Geschwindigkeitsabnahme - keine Kopfwellen



Dünne Schicht - Kopfwellen nicht als Ersteinsatz

Agenda

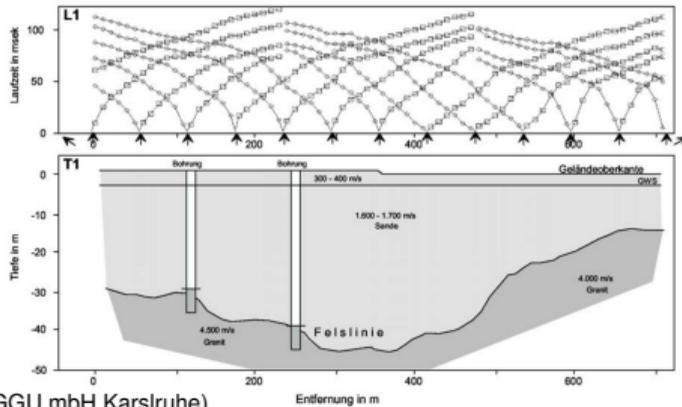
- Einführung
- Söhlige Schichtgrenze
- Geneigte Schichtgrenze
- Komplexere Modelle
- **Laufzeittomographie**
- Zusammenfassung
- Referenzen

Laufzeittomographie

- Bei komplexer Struktur des Oberbaus und/oder komplexer Topographie des Refraktors
- Inversion eines Geschwindigkeitsmodells, welches alle beobachteten Laufzeiten

$$\sum_i (T_{obs,i} - T_{pred,i}(m)) = Min!$$

- Iterative Verbesserung des Geschwindigkeitsmodells m durch Gradientenverfahren



(GGU mbH Karlsruhe)

- Anpassung von beobachteten und berechneten Ersteinsatzzeiten (direkte Wellen und Kopfwellen)

Prinzip der Laufzeitomographie

Laufzeit:

$$T = \int_l \frac{dl}{v(l)} = \int_l s(l) dl, \quad s = \text{Langsamkeit}$$

Minimierung:

$$\int_l s(l) dl = \Delta T = T_{obs} - T_{pred} = \text{Min!}$$

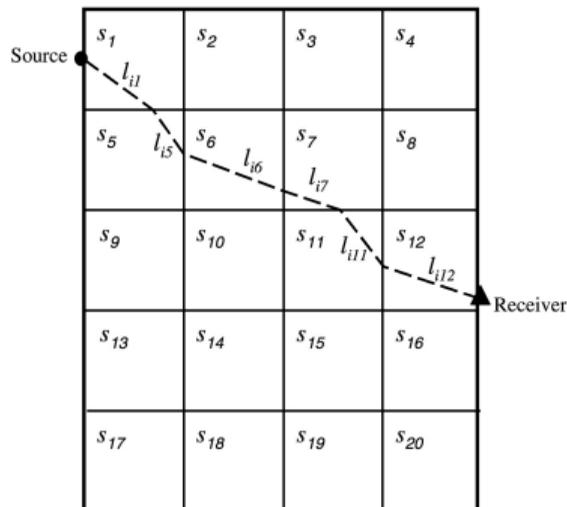
Diskret:

$$\Delta T = \sum_{i=1}^n l_{ij} s_j = \text{Min!}$$

l_{ij} Weglänge des Strahls i in der Zelle j

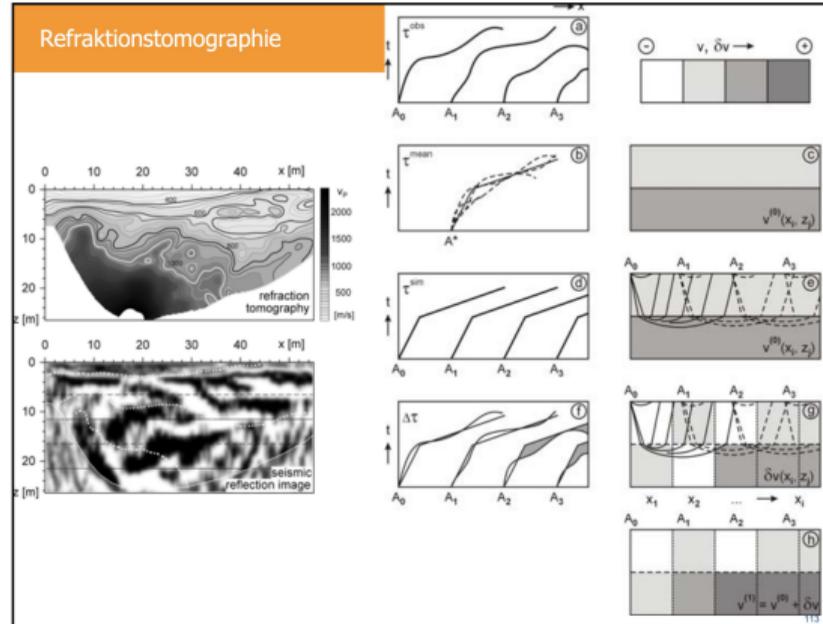
s_j Langsamkeit in der Zelle j

Ergebnis: Glatte Geschwindigkeitsmodelle

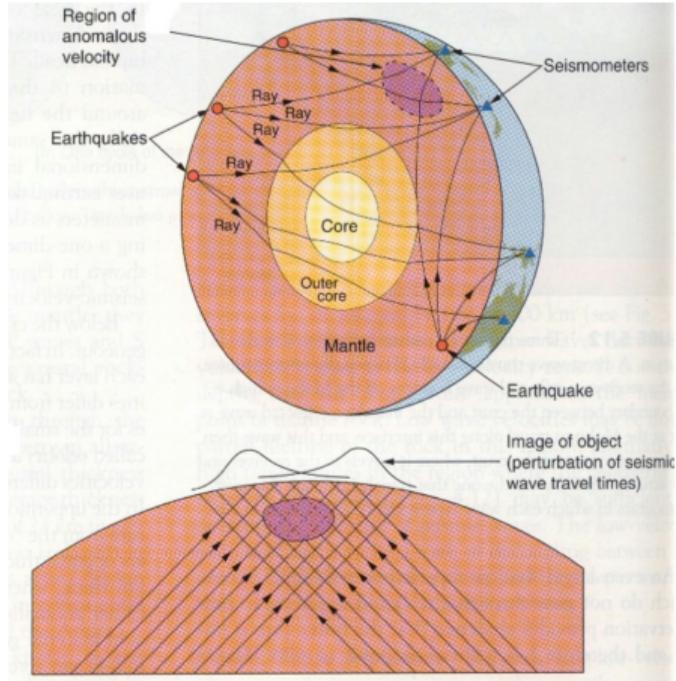


Diskretisierung des Langsamkeitsmodells s_j und des i -ten Strahlenweges l_{ij} bei einer Laufzeitomographie

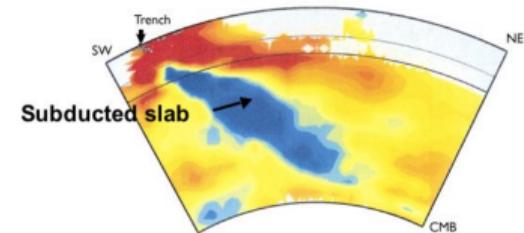
Oberflächennahe Refraktionstomographie



Globale Laufzeitomographie



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

Agenda

- Einführung
- Söhlige Schichtgrenze
- Geneigte Schichtgrenze
- Komplexere Modelle
- Laufzeittomographie
- **Zusammenfassung**
- Referenzen

Zusammenfassung

- Söhlige Schicht über Halbraum: Rekonstruktion der Geschwindigkeiten v_0 und v_1 und Mächtigkeit h_0 direkt aus den Scheingeschwindigkeiten (Steigungen der Laufzeitkurven in der Seismogramm-Sektion)
- Bei einer geneigten Schicht sind mindestens 2 Schußpunkte nötig (Hin- und Rückschuß)
- Bei komplexer Topographie des Refraktors und/oder komplexem Oberbau ist eine Laufzeittomographie nötig
- Eine Laufzeittomographie kann auf verschiedenen Skalen durchgeführt werden und liefert glatte Geschwindigkeitsmodelle



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

✉ Thomas.Bohlen@kit.edu

🔗 <http://www.gpi.kit.edu/>

Veröffentlicht unter  Lizenz.

Agenda

- Einführung
- Söhlige Schichtgrenze
- Geneigte Schichtgrenze
- Komplexere Modelle
- Laufzeittomographie
- Zusammenfassung
- Referenzen

Referenzen

Stein, S. & Wysession, M. (2003), *An introduction to Seismology, Earthquake, and Earth Structure*, Blackwell Publishing.

URL: <http://levee.wustl.edu/seismology/book/>