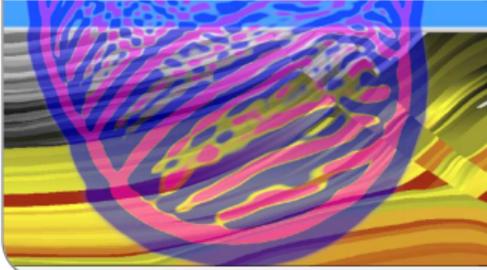


# Einführung in die Geophysik I

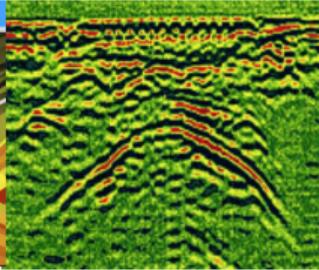
## Refraktionsseismik

Thomas Bohlen, Ellen Gottschämmer, Geophysikalisches Institut, Fakultät für Physik

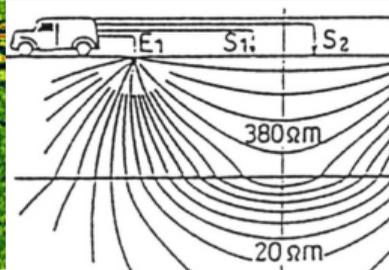
Seismik



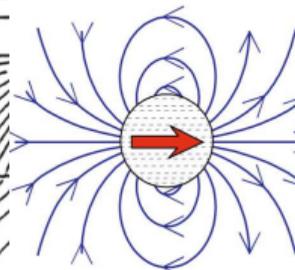
Georadar



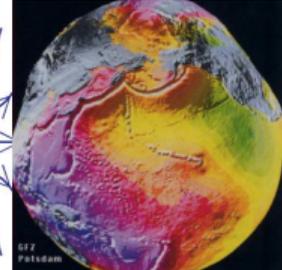
Geoelektrik



Magnetik



Gravimetrie



# Inhalte der Vorlesung im Semester WS 2020/21

1	Einführung	(20.10)
2	Seismische Wellenausbreitung	(20.10, 27.10)
3	Refraktionsseismik	(03.11)
4	Reflexionsseismik	(10.11)
5	Elektromagnetische Verfahren	(17.11, 24.11)
6	Geoelektrik	(01.12)
7	Gravimetrie	(08.12, 15.12)
8	Magnetik	(12.01, 19.01)
9	weitere Themen	(26.01, 02.02)

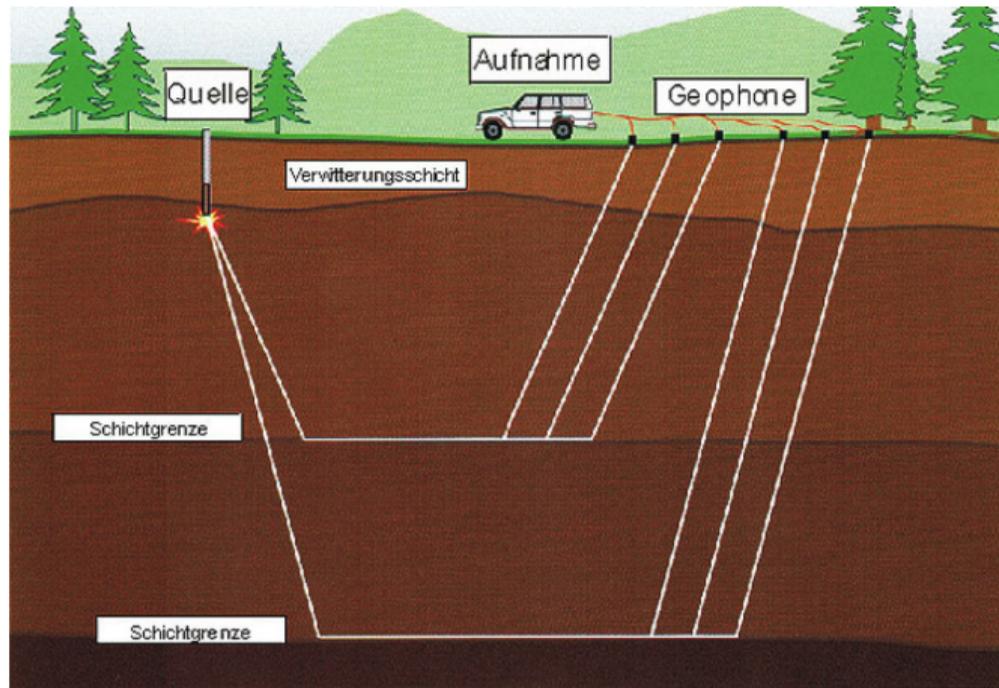
# Agenda

- Einführung
- Auswertung der Laufzeiten von Kopfwellen
  - Söhlige Schichtgrenze
  - Geneigte Schichtgrenze
  - Mehrere Schichtgrenzen
- Anwendungsbeispiele
- Laufzeittomographie
- Zusammenfassung
- Referenzen

# Agenda

- Einführung
- Auswertung der Laufzeiten von Kopfwellen
  - Söhlige Schichtgrenze
  - Geneigte Schichtgrenze
  - Mehrere Schichtgrenzen
- Anwendungsbeispiele
- Laufzeitomographie
- 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

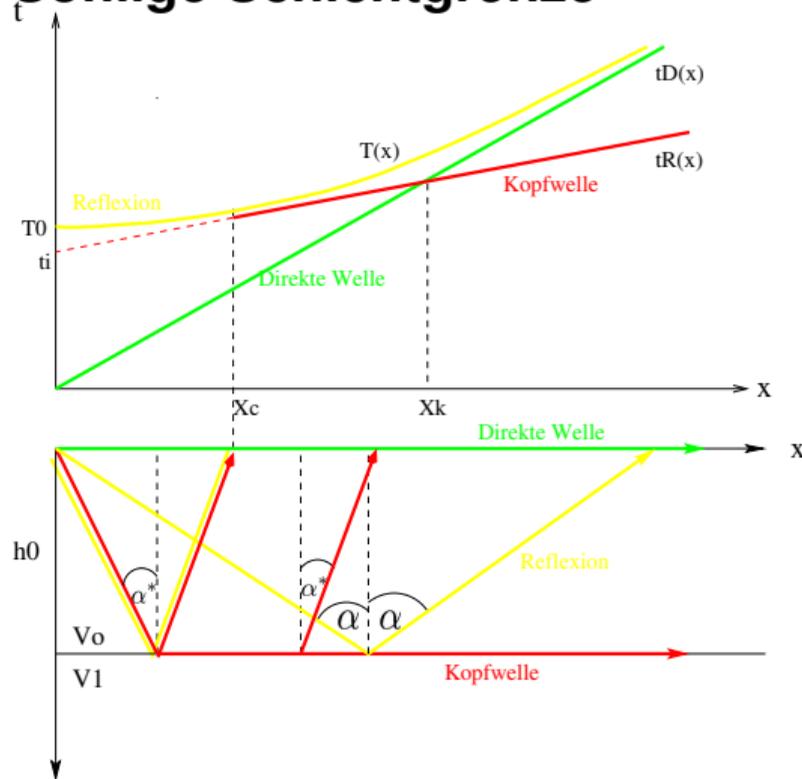
# Agenda

- Einführung
- Auswertung der Laufzeiten von Kopfwellen
  - Söhlige Schichtgrenze
  - Geneigte Schichtgrenze
  - Mehrere Schichtgrenzen
- Anwendungsbeispiele
- Laufzeitomographie
- Zusammenfassung
- Referenzen

# Agenda

- Einführung
- Auswertung der Laufzeiten von Kopfwellen
  - Söhlige Schichtgrenze
  - Geneigte Schichtgrenze
  - Mehrere Schichtgrenzen
- Anwendungsbeispiele
- Laufzeittomographie
- Zusammenfassung
- Referenzen

# Söhlige Schichtgrenze



Direkte Welle

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

Reflexion

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

Kopfwelle

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

Intercept-Zeit

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

Kritische Entfernung

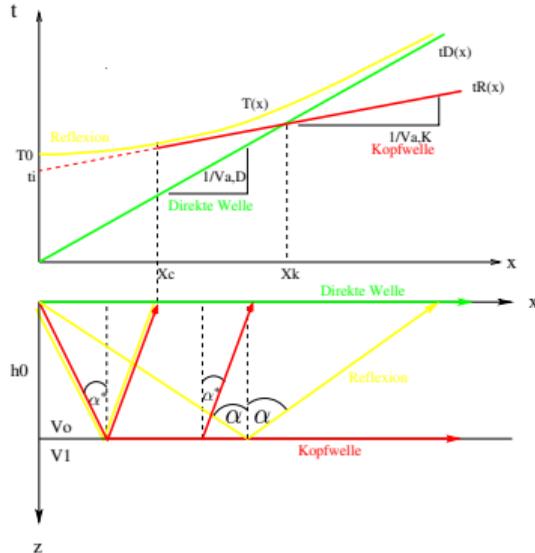
$$x_c = 2h_0 \tan(\alpha^*)$$

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

Knickpunkt

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

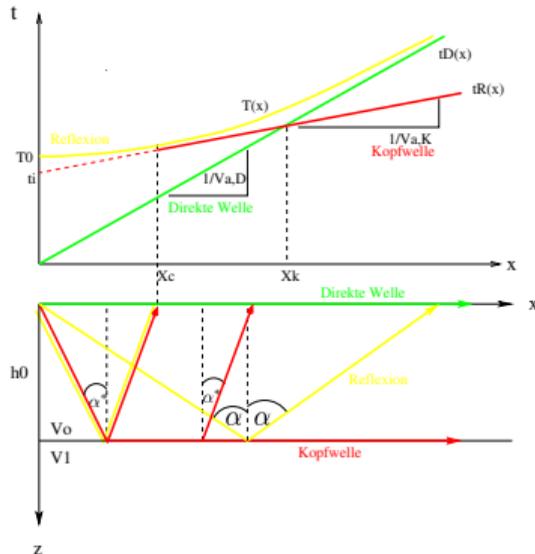
# Auswertung söhlig Schichtgrenze



## Modellparameter

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

# Auswertung söhlige 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  $x_k \rightarrow h_0$

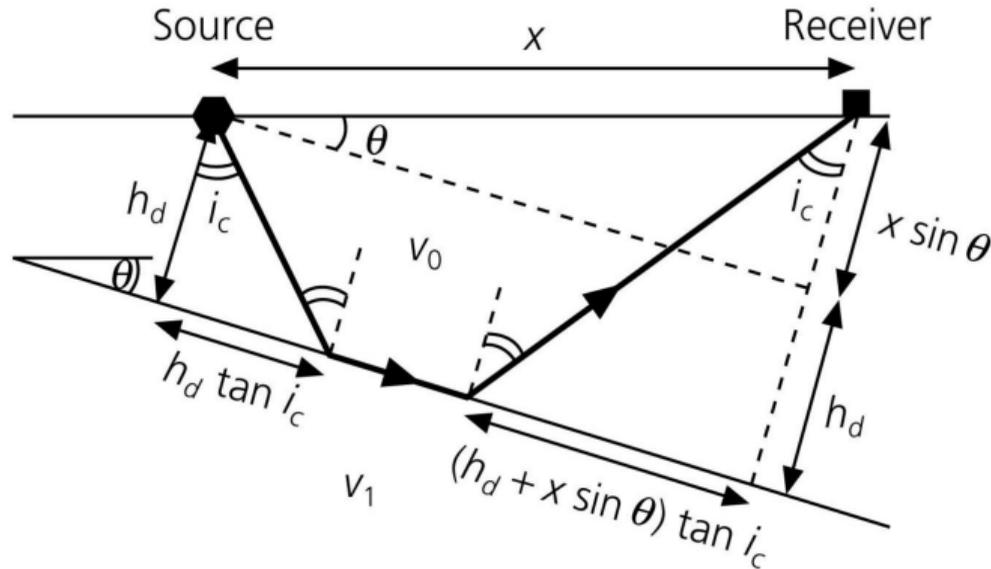
Scheingeschwindigkeit = scheinbare horizontale Geschwindigkeit = Steigung der Laufzeitkurve

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

# Agenda

- Einführung
- Auswertung der Laufzeiten von Kopfwellen
  - Söhlige Schichtgrenze
  - Geneigte Schichtgrenze
  - Mehrere Schichtgrenzen
- Anwendungsbeispiele
- 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

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

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

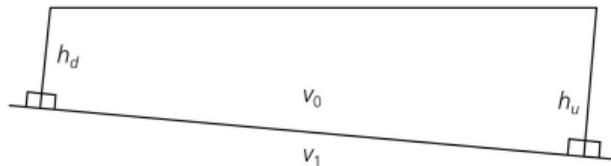
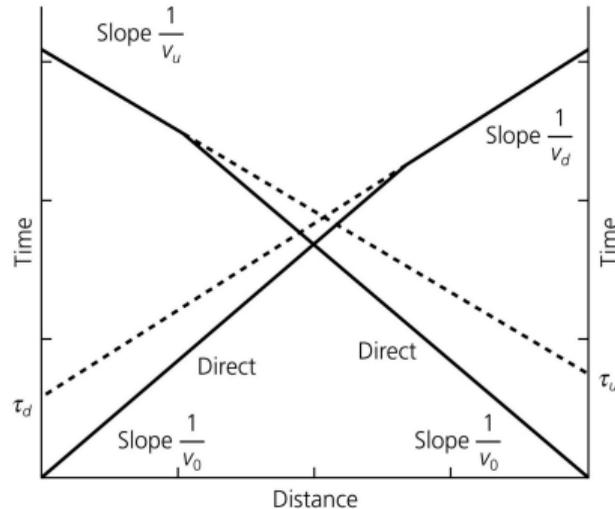
$$\begin{aligned} t_{R,d}(x) &= \frac{x}{v_0} [\sin(i_c) \cos(\theta) + \sin(\theta) \cos(i_c)] + \frac{2h_d \cos(i_c)}{v_0} \\ &= \frac{x \sin(i_c + \theta)}{v_0} + \frac{2h_d \cos(i_c)}{v_0} \end{aligned}$$

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

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

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

# Geneigte Schichtgrenze - Laufzeiten




---

Laufzeit der Kopfwelle (downdip)

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

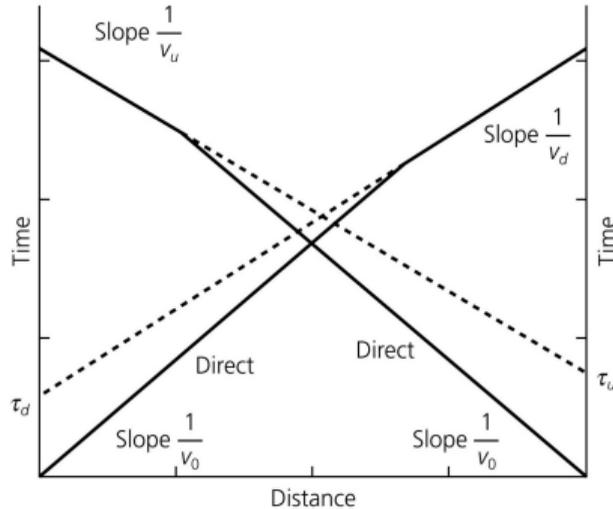
Scheinbare Geschwindigkeit:

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

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


---

# Geneigte Schichtgrenze - Laufzeiten




---

Laufzeit der Kopfwelle (downdip)

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

Scheinbare Geschwindigkeit:

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

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


---

Laufzeit der Kopfwelle (updip)

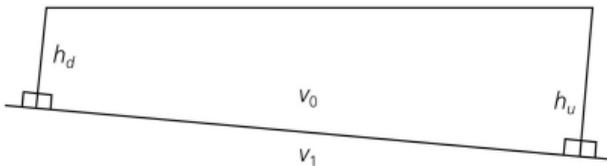
$$t_{R,u}(x) = \frac{x}{v_u} + \tau_u$$

Scheinbare Geschwindigkeit

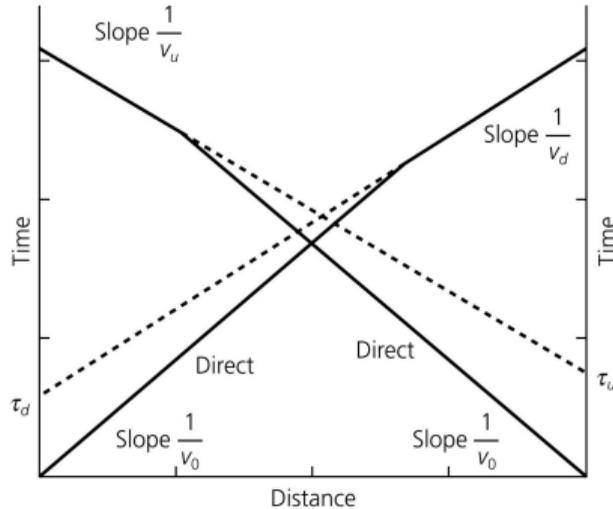
$$v_u = \frac{v_0}{\sin(i_c - \theta)} \neq v_1$$

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


---



# Geneigte Schichtgrenze - Laufzeiten




---

Laufzeit der Kopfwelle (downdip)

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

Scheinbare Geschwindigkeit:

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

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


---

Laufzeit der Kopfwelle (updip)

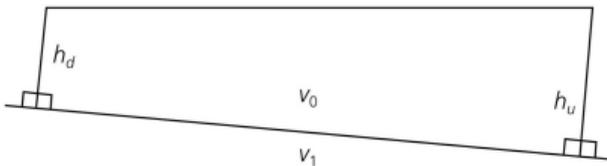
$$t_{R,u}(x) = \frac{x}{v_u} + \tau_u$$

Scheinbare Geschwindigkeit

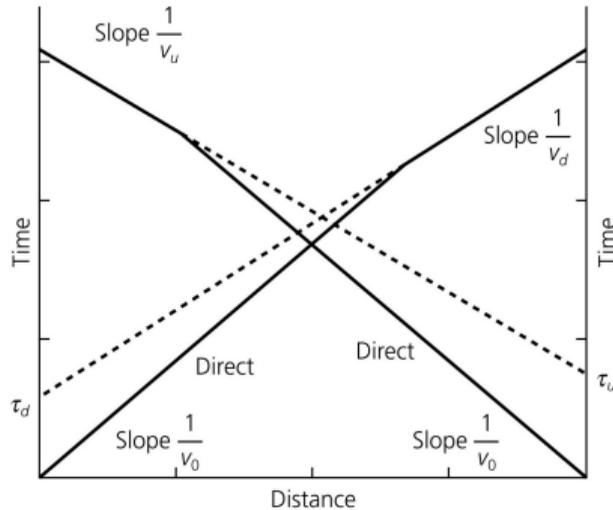
$$v_u = \frac{v_0}{\sin(i_c - \theta)} \neq v_1$$

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


---



# Geneigte Schichtgrenze - Laufzeiten




---

Schichtneigung:

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

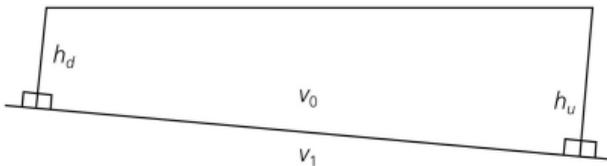
Kritischer Winkel:

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

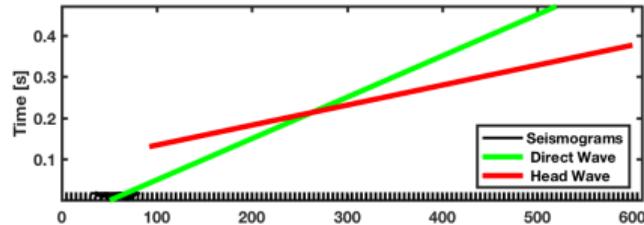
Halbraumgeschwindigkeit:

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

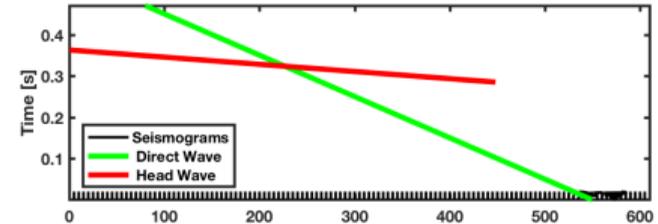
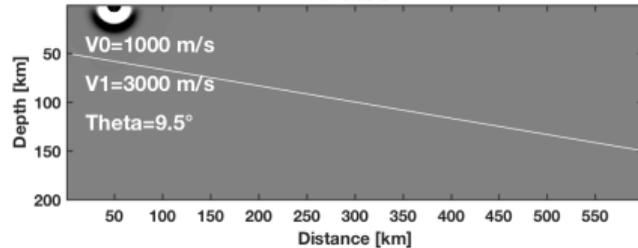

---



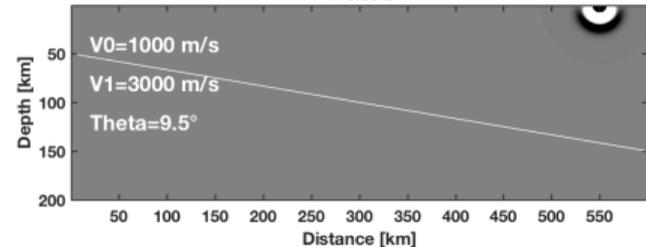
# Akustische Simulation - geneigte Schichtgrenze



T=0.05 s



T=0.05 s



## Hinschuss (downdip)

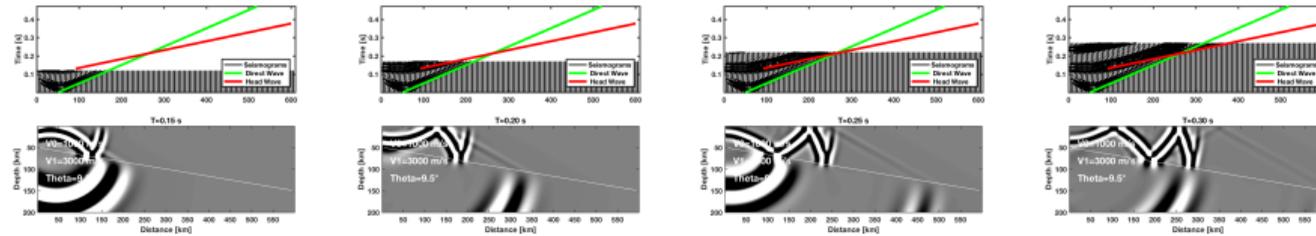
- geringere Überholentfernung  $x_k$
- geringere Scheingeschwindigkeit der Kopfwellen

## Rückschuss (downdip)

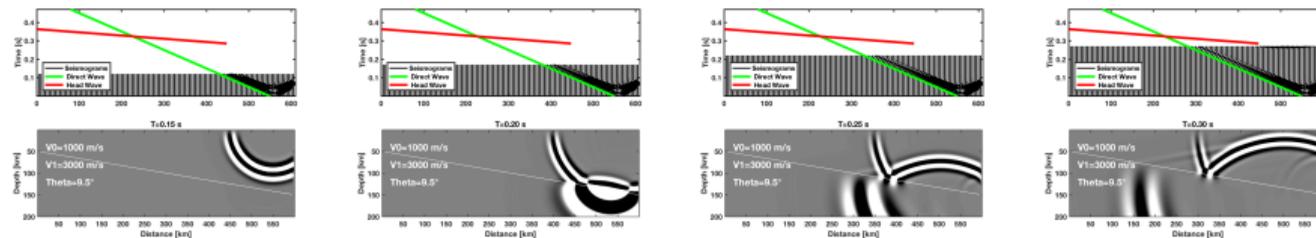
- höhere Überholentfernung  $x_k$
- höhere Scheingeschwindigkeit der Kopfwellen

# Akustische Simulation - geneigte Schichtgrenze

## Hinschuss



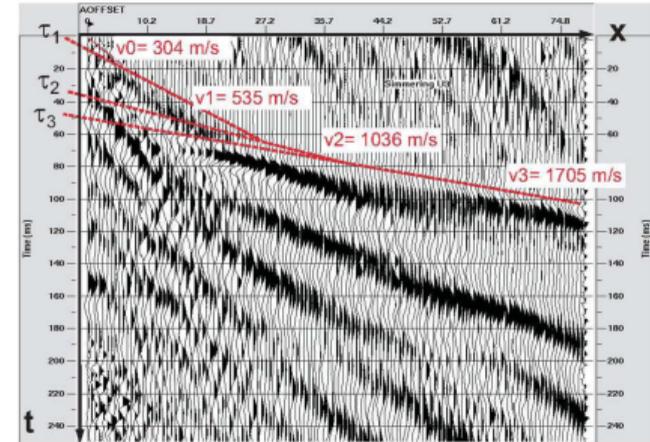
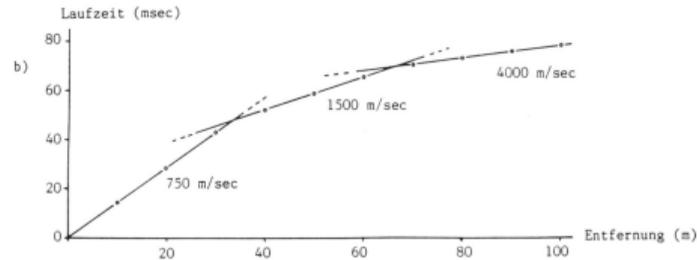
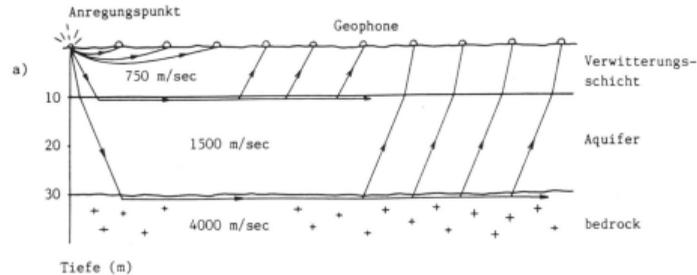
## Rückschuss



# Agenda

- Einführung
- Auswertung der Laufzeiten von Kopfwellen
  - Söhlige Schichtgrenze
  - Geneigte Schichtgrenze
  - Mehrere Schichtgrenzen
- Anwendungsbeispiele
- Laufzeittomographie
- Zusammenfassung
- Referenzen

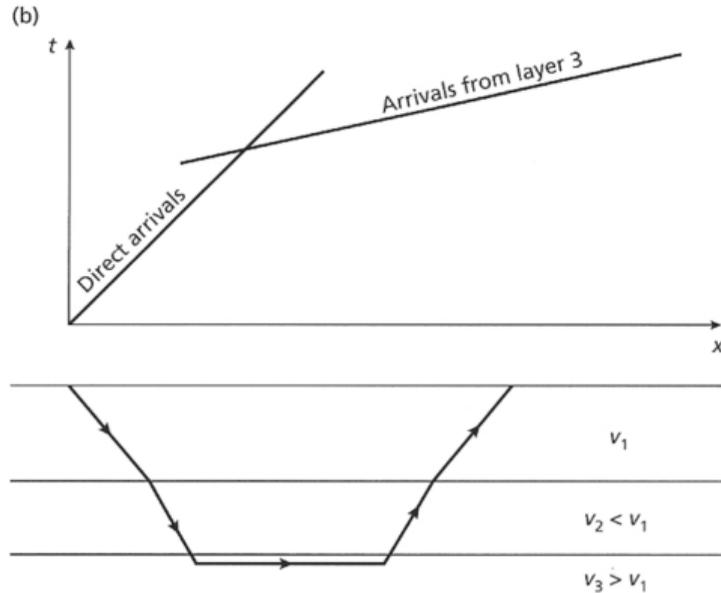
# Mehrere Schichten



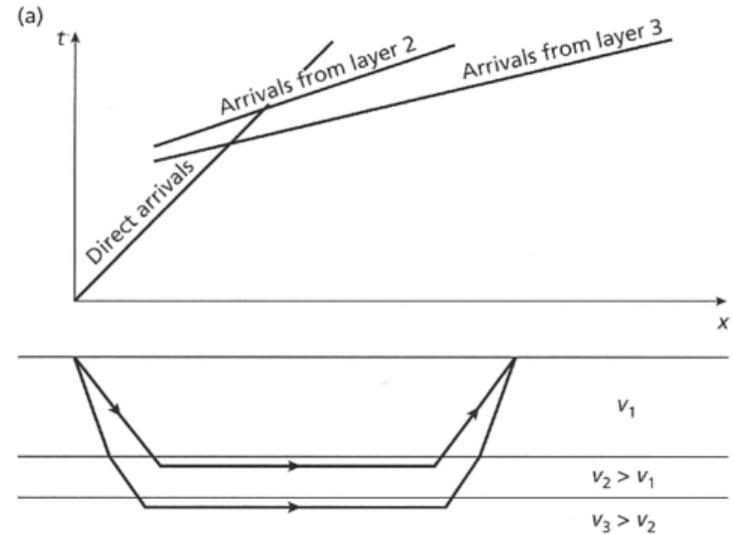
Datenbeispiel

Mehrere Knickpunkte deutet auf eine mehrere Schichten hin.

# Unsichtbare Schichten



Geschwindigkeitsabnahme - keine Kopfwellen



Dünne Schicht - Kopfwelle nicht als Ersteinsatz

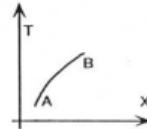
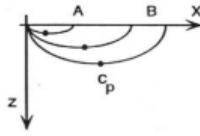
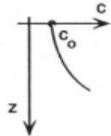
# Kontinuierliche Geschwindigkeitsveränderungen

Velocity Model

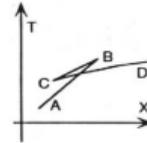
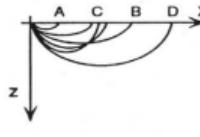
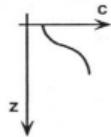
Ray Paths

Travel Time

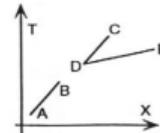
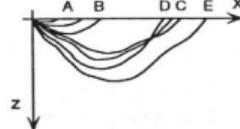
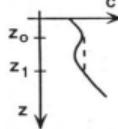
a



b



c



- Es gilt das Brechungsgesetz
- Geschwindigkeitszunahme:  
Strahl kehrt zur Erdoberfläche zurück
- Geschwindigkeitsabnahme:  
Strahl "dreht" in die Tiefe
- Es können Schleifen entstehen:  
Mehrere Strahlen erreichen den gleichen Beobachtungspunkt

Stein &amp; Wysession (2003)

# Agenda

- Einführung
- Auswertung der Laufzeiten von Kopfwellen
  - Söhlige Schichtgrenze
  - Geneigte Schichtgrenze
  - Mehrere Schichtgrenzen
- **Anwendungsbeispiele**
- Laufzeitomographie
- Zusammenfassung
- Referenzen

# Hammerschlag-Seismik

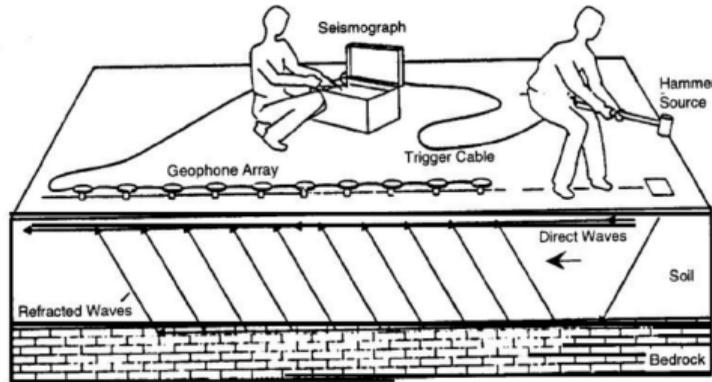
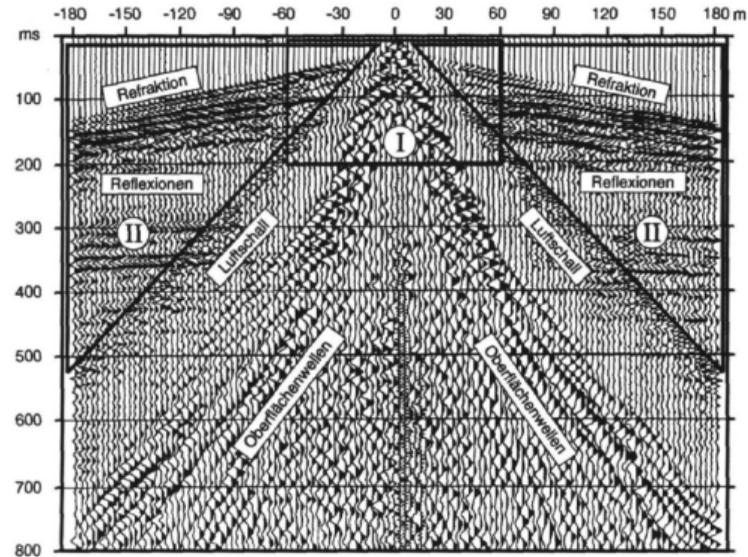
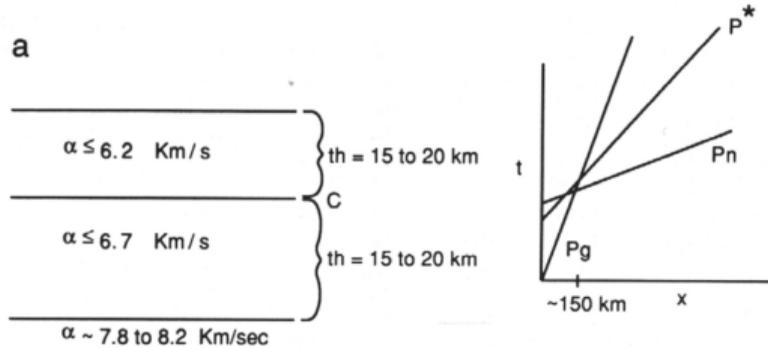


Abb. 1: Refraktionsseismik mit Signalanregung durch Hammerschlag

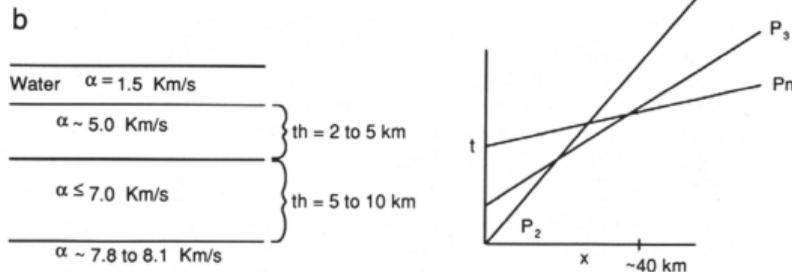


Datenbeispiel

# Laufzeiten kontinentale und ozeanische Kruste



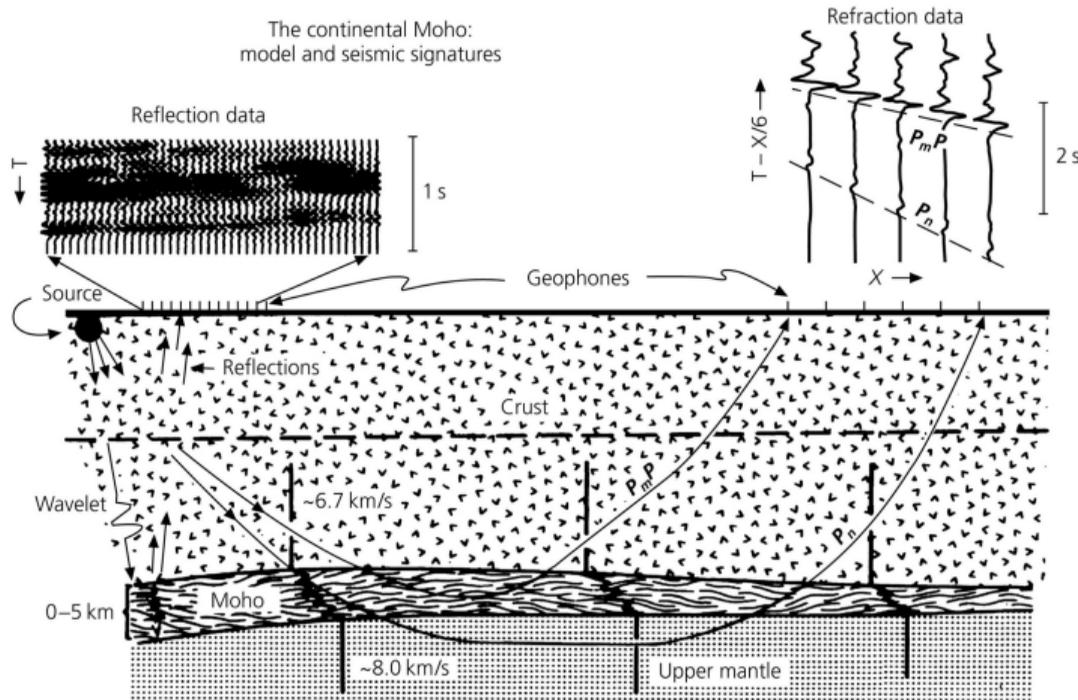
- Kontinentale Kruste
- P<sub>g</sub>: Welle durch obere Kruste
- P\* Refraktion in der Kruste
- P<sub>n</sub> Kopfwelle an der Moho
- Knickpunkt  $x_k \approx 150$  km



- Ozeanische Kruste
- P<sub>2</sub>: Welle durch Wasser
- P<sub>3</sub> Refraktion in der Kruste
- P<sub>n</sub> Kopfwelle an der Moho
- Knickpunkt  $x_k \approx 40$  km

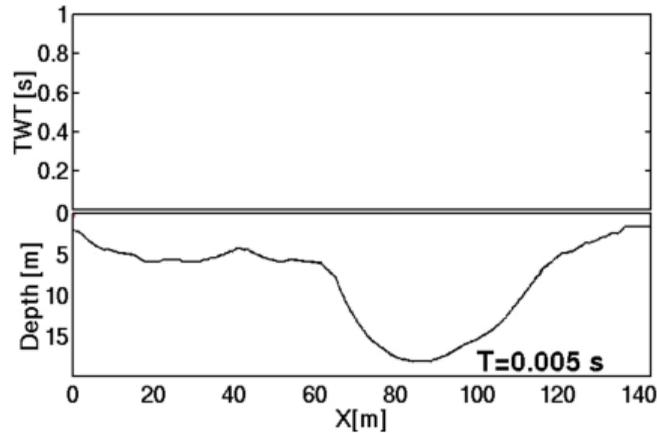
# Weitwinkel-Seismik

The continental Moho:  
model and seismic signatures



- Struktur der Kruste und Kartierung der Moho
- P<sub>m</sub>P: Weitwinkelreflexion an der Moho
- P<sub>n</sub>: Kopfwelle entlang der Moho

# Topographie des Refraktors



→ Laufzeittomographie

# Agenda

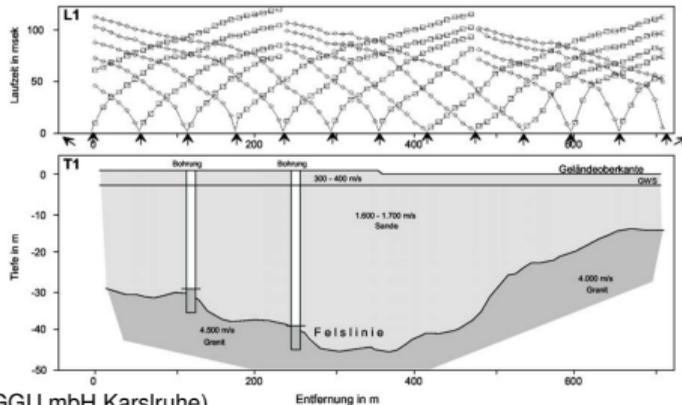
- Einführung
- Auswertung der Laufzeiten von Kopfwellen
  - Söhlige Schichtgrenze
  - Geneigte Schichtgrenze
  - Mehrere Schichtgrenzen
- Anwendungsbeispiele
- **Laufzeittomographie**
- Zusammenfassung
- Referenzen

# 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:

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

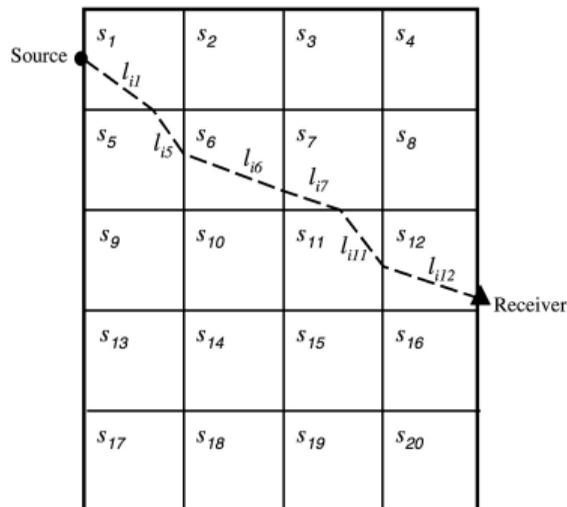
Diskret:

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

$l_{ij}$  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



# Agenda

- Einführung
- Auswertung der Laufzeiten von Kopfwellen
  - Söhlige Schichtgrenze
  - Geneigte Schichtgrenze
  - Mehrere Schichtgrenzen
- Anwendungsbeispiele
- Laufzeitomographie
- **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
- Auswertung der Laufzeiten von Kopfwellen
  - Söhlige Schichtgrenze
  - Geneigte Schichtgrenze
  - Mehrere Schichtgrenzen
- Anwendungsbeispiele
- Laufzeitomographie
- 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/>