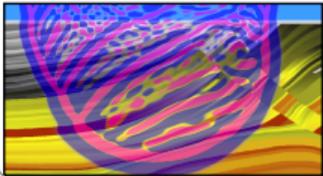


# Einführung in die Geophysik I

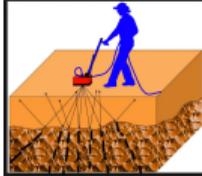
## Refraktionsseismik

T. Bohlen, Geophysikalisches Institut, Fakultät für Physik

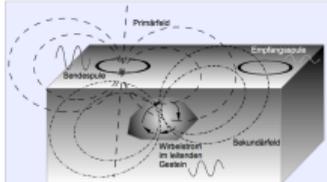
**Seismik**



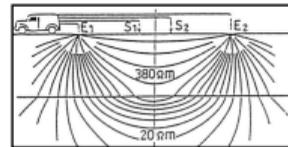
**Georadar**



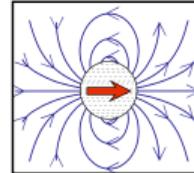
**Elektromagnetik**



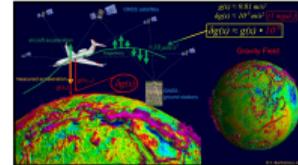
**Geoelektrik**



**Magnetik**



**Gravimetrie**



# Inhalte der Vorlesung

Einführung in die Geophysik I, WS 2024/25

	Datum	Vorlesung (09:45-11:15h) Kl. HS B	Übungen (11:30-12:30h Kl. HS B oder 17:30-18:30h Physikhochhaus Raum 2/17)
1	23.10.24	Einführung, Wellenausbreitung	
2	30.10.24	Wellenausbreitung	
3	06.11.24	Refraktionsseismik	U1: Moduln
4	13.11.24	Reflexionsseismik	Ü2: Refraktionsseismik
	20.11.24	Studieninformationstag	
5	27.11.24	Elektromagnetische Wechselwirkungen	Ü3: Reflexionsseismik
6	04.12.24	Georadar	
7	11.12.24	Elektromagnetik	Ü4: Georadar
8	18.12.24	Elektromagnetik	
9	08.01.25	Geelektrik	
10	15.01.25	Magnetik	Ü5: Geoelektrik
11	22.01.25	Magnetik	
12	29.01.25	Gravimetrie	Ü6: Magnetik
13	05.02.25	Gravimetrie	Ü7: Gravimetrie
	12.02.25	Klausur	

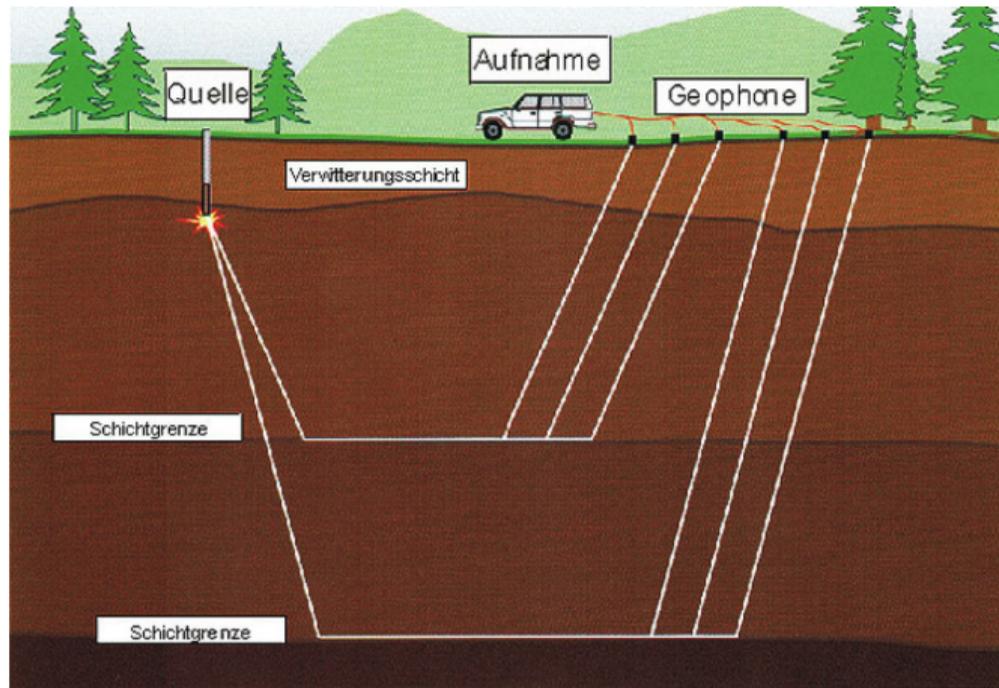
# Agenda

1. Einführung
2. Söhlige Schichtgrenze
3. Geneigte Schichtgrenze
4. Geneigter Mehrschichtfall
5. Schichtgrenze mit Topographie
6. Laufzeittomographie
7. Zusammenfassung

# Agenda

1. Einführung
2. Söhlige Schichtgrenze
3. Geneigte Schichtgrenze
4. Geneigter Mehrschichtfall
5. Schichtgrenze mit Topographie
6. Laufzeittomographie
7. Zusammenfassung

# 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 söhligen Schicht über einen Halbraum
- 2 Auswertung bei einer söhligen Schicht über einen Halbraum
- 3 Laufzeitgleichungen bei einer geneigten Schicht über einen Halbraum und Auswertung
- 4 Rekonstruktion bei Topographie der Schichtgrenze
- 5 Laufzeittomographie bei komplexen Geschwindigkeitsmodellen

# Agenda

1. Einführung
2. Söhlige Schichtgrenze
3. Geneigte Schichtgrenze
4. Geneigter Mehrschichtfall
5. Schichtgrenze mit Topographie
6. Laufzeittomographie
7. Zusammenfassung

# Hammerschlag-Seismik

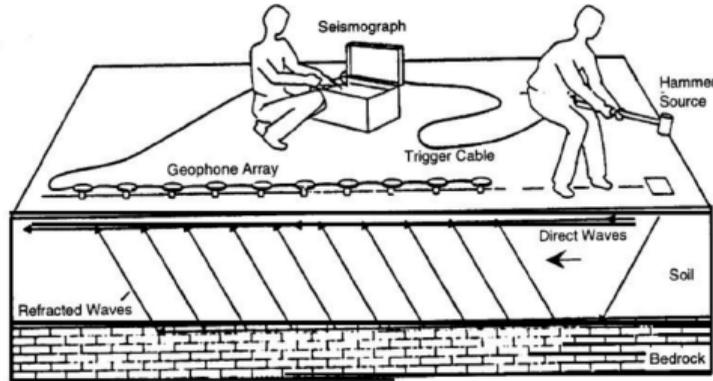
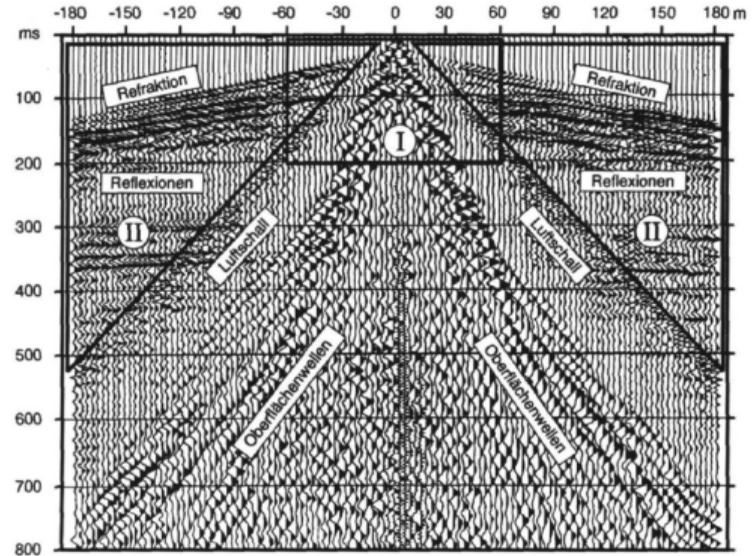
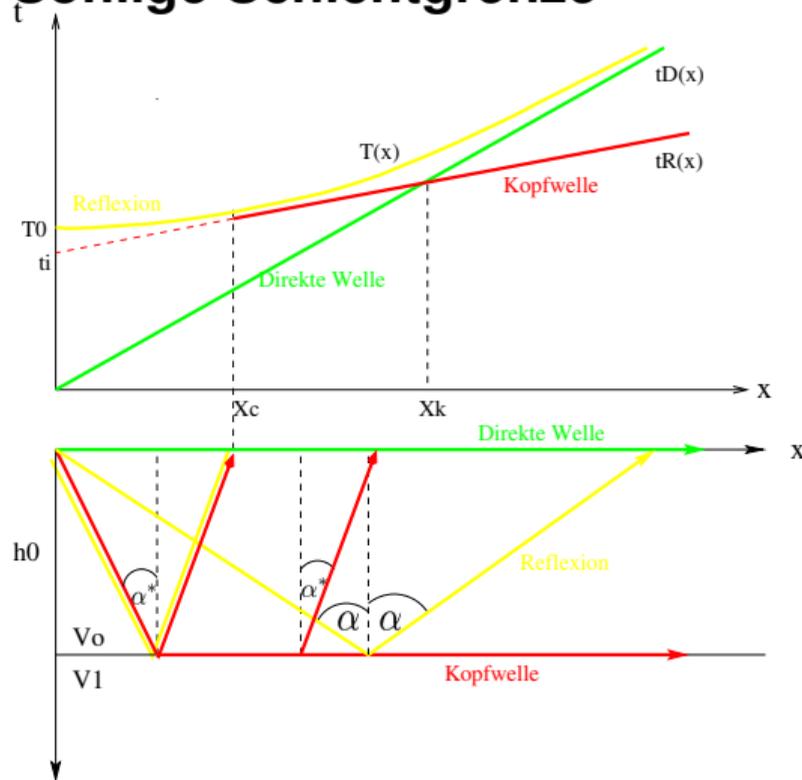


Abb. 1: Refraktionsseismik mit Signalanregung durch Hammerschlag



Datenbeispiel

# Söhlige Schichtgrenze



Direkte Welle

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

Reflexion

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

Kopfwelle

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

Intercept-Zeit

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

Kritische Entfernung

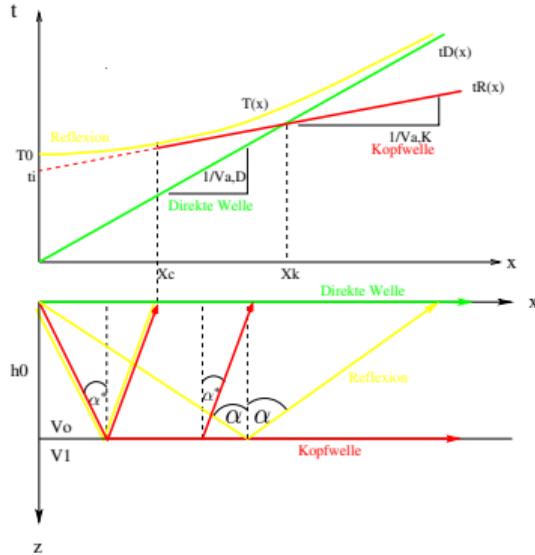
$$x_c = 2h_0 \tan(\alpha^*)$$

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

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  $v_1$

## Beobachtungsgrößen

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

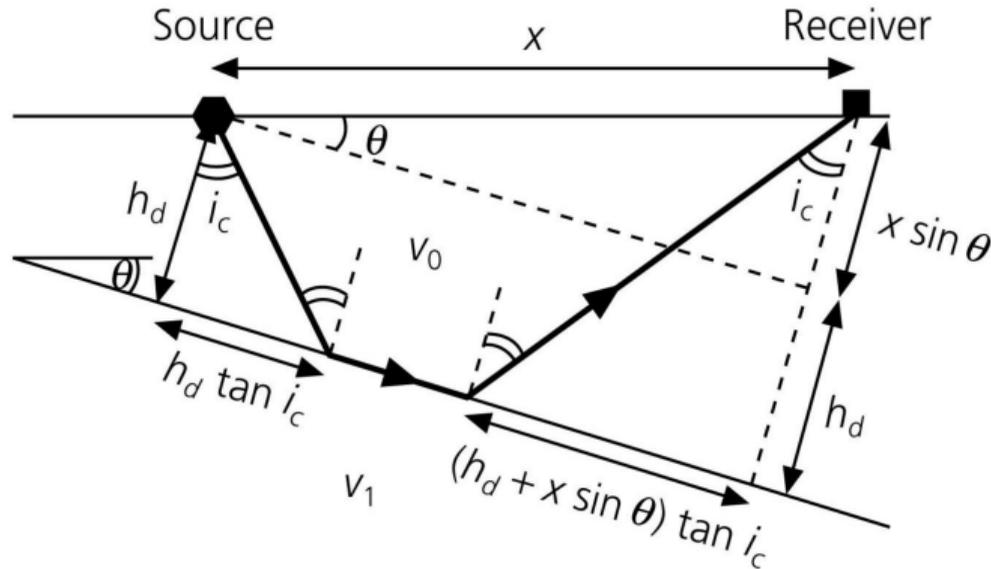
Scheingeschwindigkeit = scheinbare horizontale Geschwindigkeit = Steigung der Laufzeitkurve

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

# Agenda

1. Einführung
2. Söhlige Schichtgrenze
3. Geneigte Schichtgrenze
4. Geneigter Mehrschichtfall
5. Schichtgrenze mit Topographie
6. Laufzeittomographie
7. Zusammenfassung

# 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

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

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

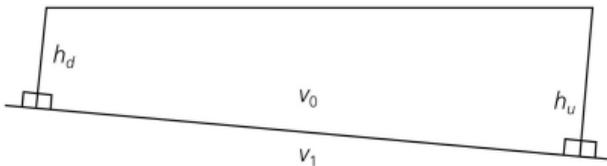
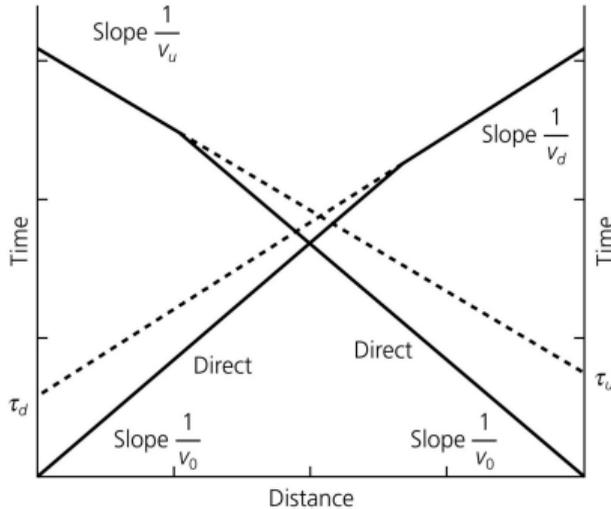
$$\begin{aligned} t_{R,d}(x) &= \frac{x}{v_0} [\sin(i_c) \cos(\theta) + \sin(\theta) \cos(i_c)] + \frac{2h_d \cos(i_c)}{v_0} \\ &= \frac{x \sin(i_c + \theta)}{v_0} + \frac{2h_d \cos(i_c)}{v_0} \end{aligned}$$

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

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

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

# Geneigte Schichtgrenze - Laufzeiten




---

Laufzeit der Kopfwelle (downdip)

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

Scheinbare Geschwindigkeit:

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

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


---

Laufzeit der Kopfwelle (updip)

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

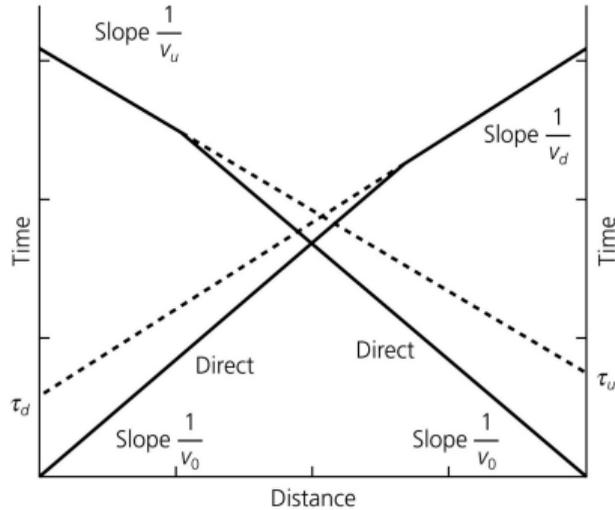
Scheinbare Geschwindigkeit

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

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


---

# Geneigte Schichtgrenze - Laufzeiten




---

Schichtneigung:

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

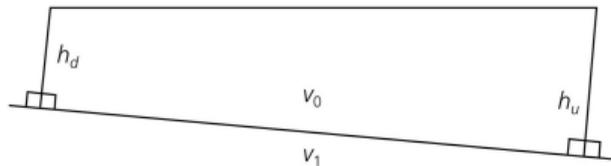
Kritischer Winkel:

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

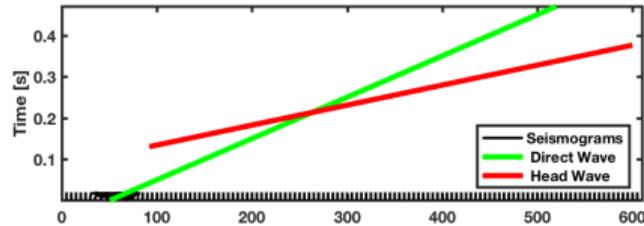
Halbraumgeschwindigkeit:

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

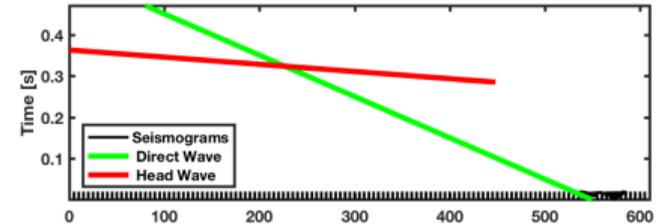
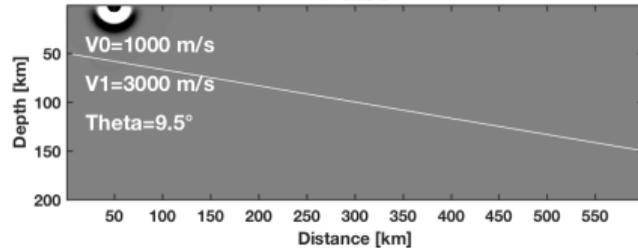

---



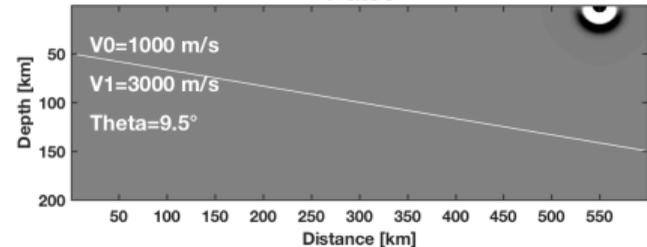
# Akustische Simulation - geneigte Schichtgrenze



T=0.05 s



T=0.05 s



## Hinschuss (downdip)

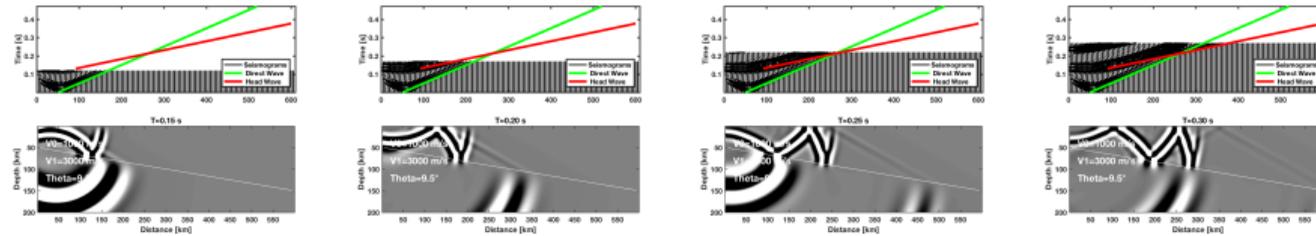
- geringere Überholentfernung  $x_k$
- geringere Scheingeschwindigkeit der Kopfwelle

## Rückschuss (downdip)

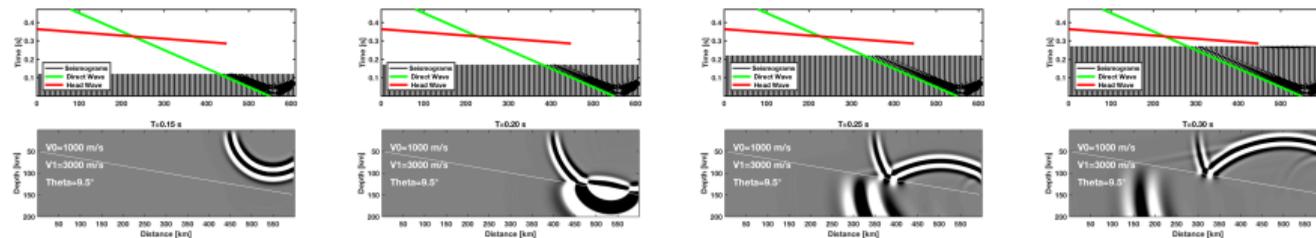
- höhere Überholentfernung  $x_k$
- höhere Scheingeschwindigkeit der Kopfwelle

# Akustische Simulation - geneigte Schichtgrenze

## Hinschuss



## Rückschuss



# Agenda

1. Einführung
2. Söhlige Schichtgrenze
3. Geneigte Schichtgrenze
4. Geneigter Mehrschichtfall
5. Schichtgrenze mit Topographie
6. Laufzeittomographie
7. Zusammenfassung

# Geneigter Mehrschichtfall

Laufzeitgleichung für n Schichten

$$t_n = \frac{x \sin(\beta_1)}{v_1} + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{h_i (\cos(\alpha_i) + \cos(\beta_i))}{v_i}$$

$$\alpha_i = \theta_{in} - \gamma_i \quad \beta_i = \theta_{in} + \gamma_i \quad \theta_{in} = \sin^{-1}(v_1/v_n)$$

Auswertung 1. Schicht ergibt:  $v_1, v_2, \alpha_1, \beta_1$

Auswertung 2. Refraktierte liefert :

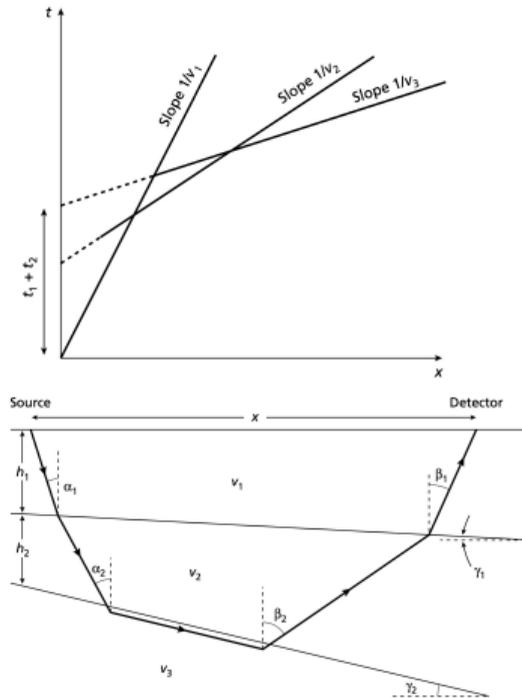
$$t_3 = \frac{x \sin(\beta_1)}{v_1} + \frac{h_1 (\cos(\alpha_1) + \cos(\beta_1))}{v_1} + \frac{h_2 (\cos(\alpha_2) + \cos(\beta_2))}{v_2}$$

$$\theta_2 = \frac{1}{2} \left[ \sin^{-1}(v_2/v_{3d}) + \sin^{-1}(v_2/v_{3u}) \right] \quad (\text{krit. Winkel})$$

$$\gamma_2 = \frac{1}{2} \left[ \sin^{-1}(v_2/v_{3d}) - \sin^{-1}(v_2/v_{3u}) \right] \quad (\text{Schichtneigung})$$

$$h_2 = \frac{(t_{i3} - t_{i2}) v_2}{(\cos(\alpha_2) + \cos(\beta_2))} \quad (\text{Schichtmächtigkeit})$$

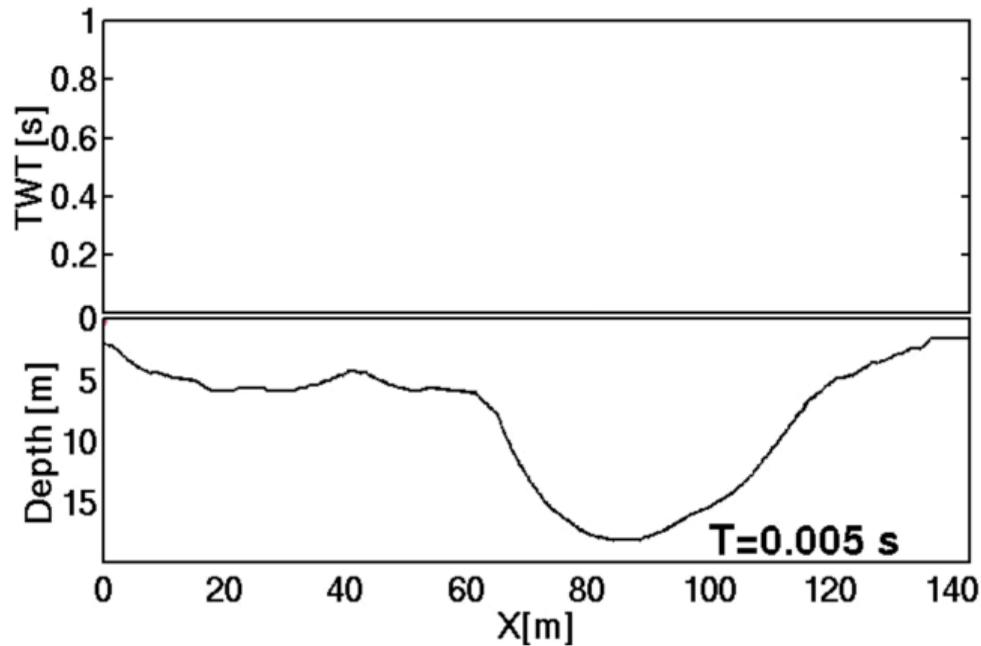
erweiterbar auf beliebig viele Schichten (von oben nach unten).



# Agenda

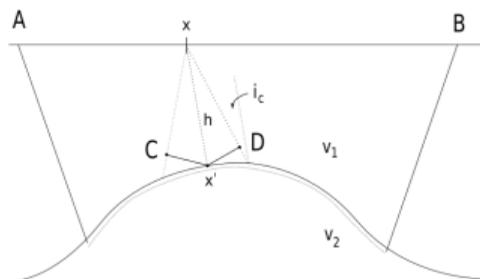
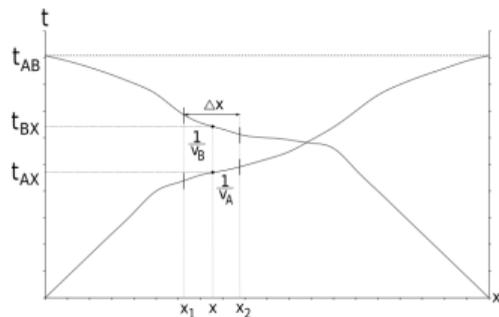
1. Einführung
2. Söhlige Schichtgrenze
3. Geneigte Schichtgrenze
4. Geneigter Mehrschichtfall
5. Schichtgrenze mit Topographie
6. Laufzeittomographie
7. Zusammenfassung

# Topographie des Refraktors



→ Plus-Minus-Methode

# Plus-Minus-Methode



Laufzeitkurven bei Schicht mit Topographie.

$$t_{AB} = t_{AX'} + t_{BX'} = t_{AC} + t_{BD}$$

$$t_{AX} = t_{AC} + t_{CX} = t_{AC} + \frac{h \cos(i_c)}{v_1}$$

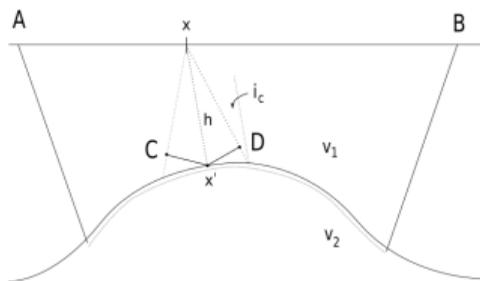
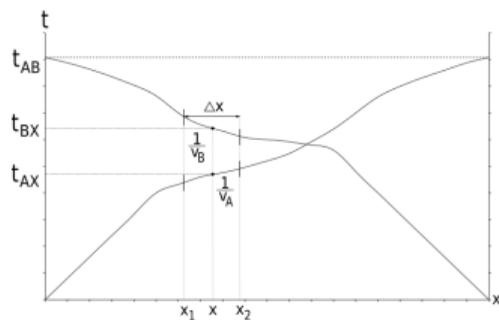
$$t_{BX} = t_{BD} + \frac{h \cos(i_c)}{v_1}$$

$$t^+ := t_{AX} + t_{BX} - t_{AB}$$

$$= t_{AC} + t_{BD} + \frac{2h \cos(i_c)}{v_1} - t_{AB}$$

$$= \frac{2h \cos(i_c)}{v_1}$$

# Plus-Minus-Methode



Laufzeitkurven bei Schicht mit Topographie.

$$t^- := t_{AX} - t_{BX} - t_{AB}$$

$$t^-(x_2) = t_{Ax_2} - t_{Bx_2} - t_{AB}$$

$$t^-(x_1) = t_{Ax_1} - t_{Bx_1} - t_{AB}$$

---

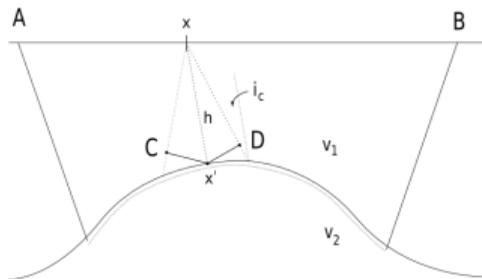
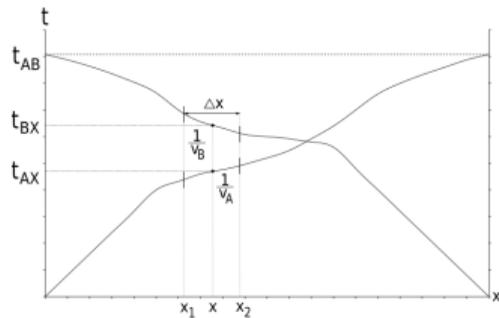

$$\Delta t^-(x) = t^-(x_2) - t^-(x_1)$$

$$= (t_{Ax_2} - t_{Ax_1}) - (t_{Bx_2} - t_{Bx_1})$$

$$\frac{\Delta t^-(x)}{\Delta x} = \frac{\Delta t_{AX}}{\Delta x} - \frac{\Delta t_{BX}}{\Delta x} \approx \frac{2}{v_2}$$

$$\frac{2}{v_2} = \frac{1}{v_a} + \frac{1}{v_b}$$

# Plus-Minus-Methode



Laufzeitkurven bei Schicht mit Topographie.

Tabellenkalkulation:

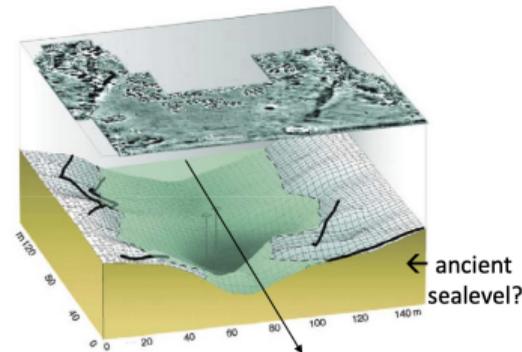
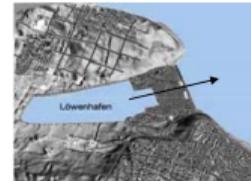
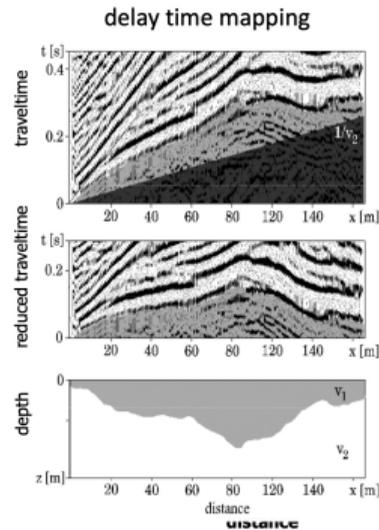
$x$	$t_{AX}$	$t_{BX}$	$t^+$	$t^-$	$\Delta t^-$	$h$	$v_2$
0							
$\Delta x$							
$2 \cdot \Delta x$							
$3 \cdot \Delta x$							
$\vdots$							
$\vdots$							

$$\Delta t^- = t^-(x + \Delta x) - t^-(x - \Delta x)$$

$$v_2 = \frac{2\Delta x}{\Delta t^-} \quad h = \frac{t^+ v_1}{2 \cos(i_c)} \quad \text{Lottiefe !}$$

$$\cos(i_c) = \sqrt{1 - \frac{v_1^2}{v_2^2}}$$

# Beispiel für die Plus-Minus-Methode: Scherwellenseismik im Löwenhafen von Milet



[Woelz and Rabbel, 2005]

# Agenda

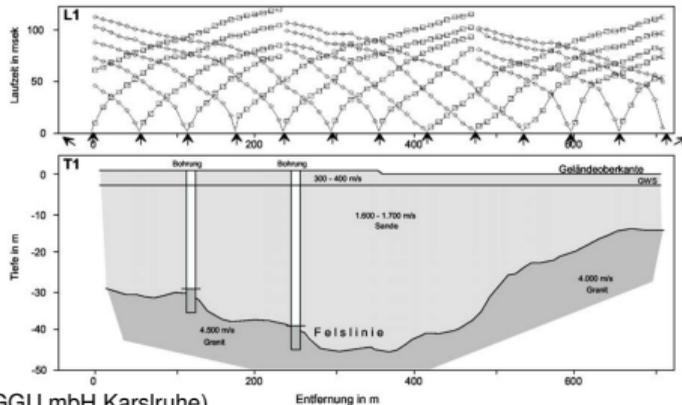
1. Einführung
2. Söhlige Schichtgrenze
3. Geneigte Schichtgrenze
4. Geneigter Mehrschichtfall
5. Schichtgrenze mit Topographie
6. Laufzeittomographie
7. Zusammenfassung

# 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:

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

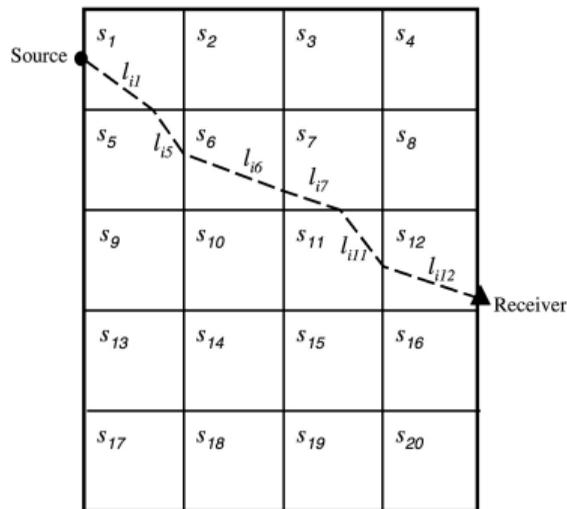
Diskret:

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

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

$s_j$  Langsamkeit in der Zelle  $j$

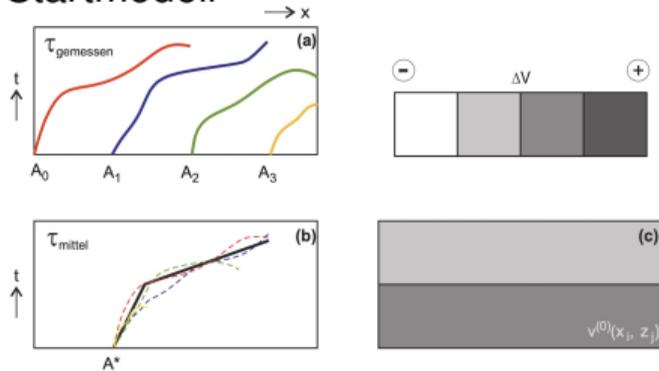
Ergebnis: Glatte Geschwindigkeitsmodelle



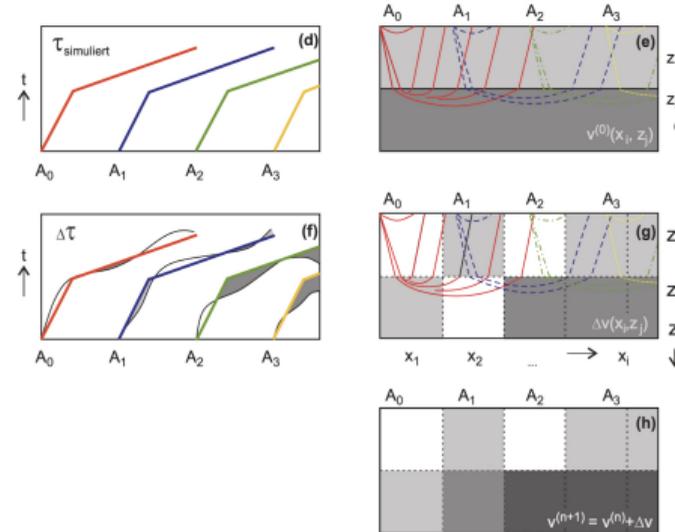
Diskretisierung des Langsamkeitsmodells  $s_j$  und des  $i$ -ten Strahlenweges  $l_{ij}$  bei einer Laufzeitomographie

# Laufzeittomographie

## Startmodell

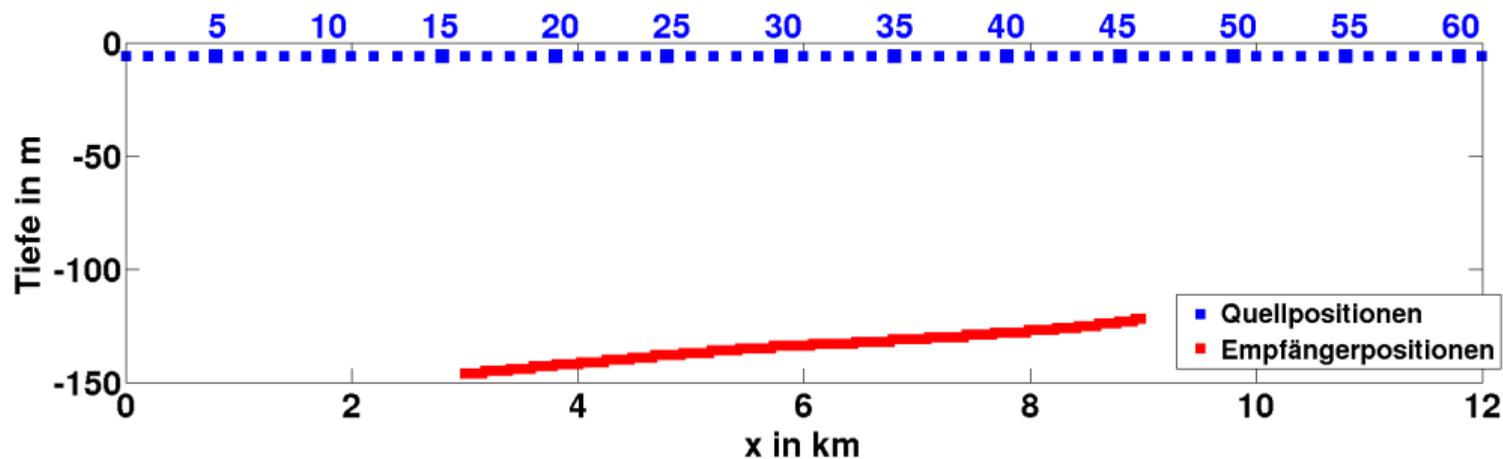


## Iterative Modellanpassung



[Clauser, 2018]

# Tomographie von marinen Tauchwellen

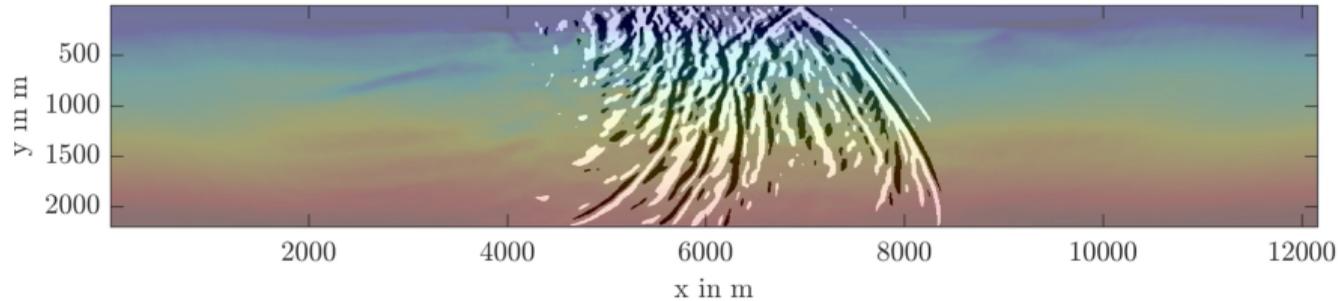


Ozean-Boden-Kabel: 6 km, Maximaler Offset ca. 9 km, Wassertiefe ca. 130 m, 61 Quellpunkte, 240 Hydrophone

Kunert [2015]

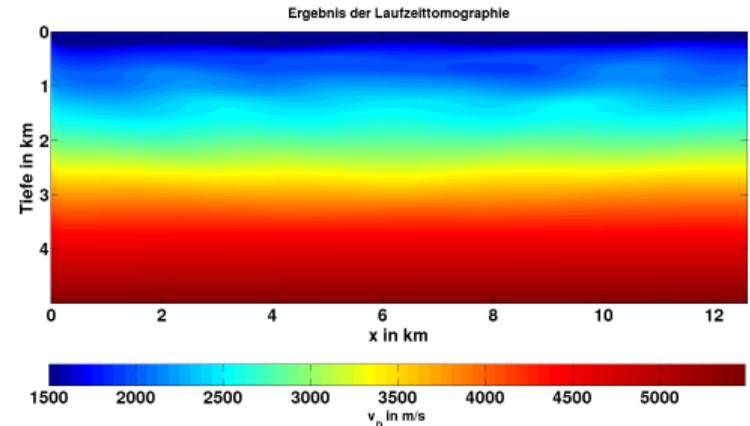
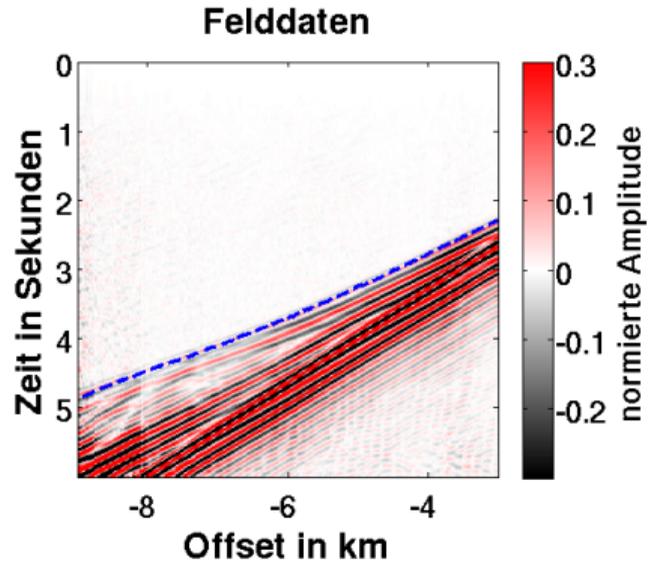
# Tomographie von marinen Tauchwellen

## Akustische Simulation der Wellenausbreitung



Kunert [2015]

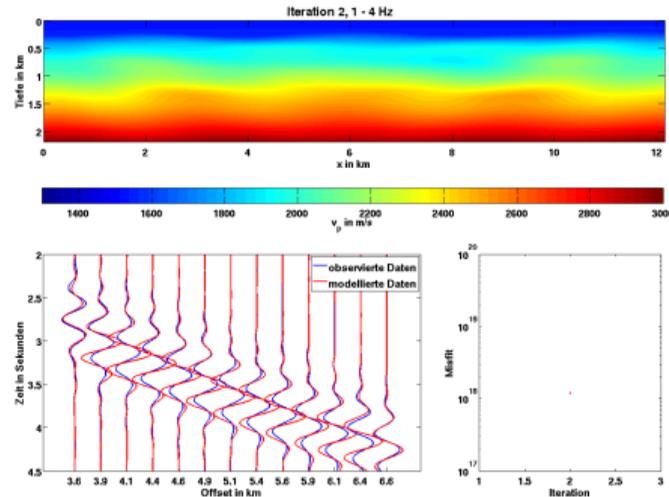
# Tomographie von marinen Tauchwellen



Kunert [2015]

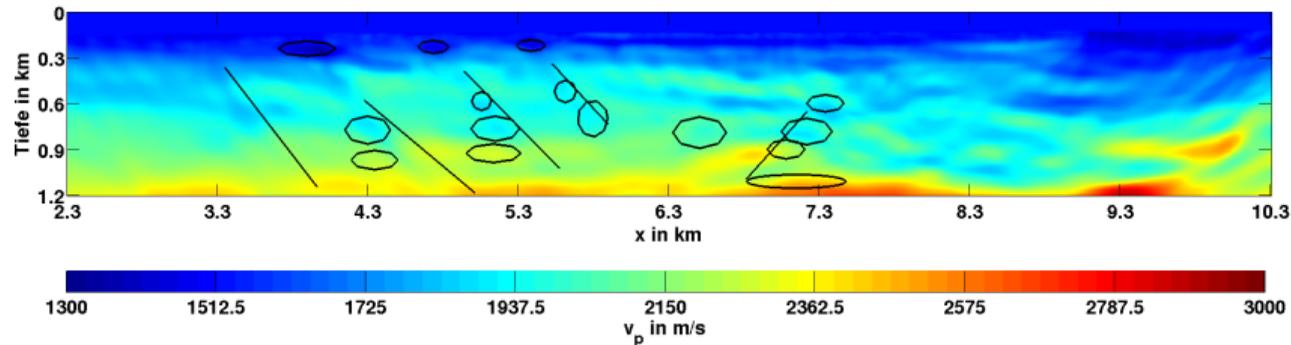
# Tomographie von marinen Tauchwellen

Durchführung einer Inversion der Signalformen



# Tomographie von marinen Tauchwellen

Ergebnis der Inversion der Signalformen



Zu erkennen sind Verwerfungen und Gasansammlungen (Zonen niedriger Geschwindigkeit)

Kunert [2015]

# Agenda

1. Einführung
2. Söhlige Schichtgrenze
3. Geneigte Schichtgrenze
4. Geneigter Mehrschichtfall
5. Schichtgrenze mit Topographie
6. Laufzeittomographie
7. Zusammenfassung

## 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.

# Referenzen I

- C. Clauser. *Grundlagen der angewandten Geophysik - Seismik, Gravimetrie*. Springer Berlin Heidelberg, 2018. ISBN 9783662553107. doi: 10.1007/978-3-662-55310-7. URL <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-55310-7>.
- P. Kearey, M. Brooks, and I. A. Hill. *An introduction to geophysical exploration*. Blackwell Science, 2002. URL <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:140703221>.
- M. Kunert. Anwendung der 2D akustischen Wellenforminversion auf OBC-Daten. Master's thesis, Karlsruhe Institute of Technology, 2015. URL <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000052718>.
- S. Woelz and W. Rabbel. Seismic prospecting in archaeology: a 3d shear-wave study of the ancient harbour of miletus (turkey). *Near Surface Geophysics*, 3(4):245–257, 2005. ISSN 1873-0604. doi: <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2005020>. URL <https://www.earthdoc.org/content/journals/10.3997/1873-0604.2005020>.