



# TUBAF

Die Ressourcenuniversität.  
Seit 1765.

## Bodendynamik

Kennwertermittlung

Dominik Kern

26. Juni 2024

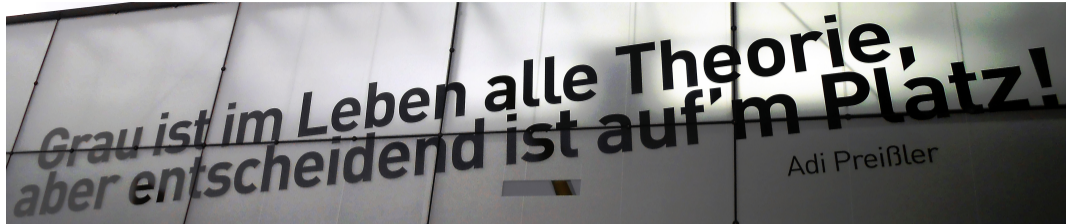


Abbildung: Inschrift am Borusseum Dortmund

- Abschätzung aufgrund von Erfahrung
- Abschätzung anhand von Formeln
- Messung im Gelände und Labor

## Dynamische Bodenkennwerte

- Elastische Parameter
- Dämpfung
- zyklenabhängige Parameter

## Einflussgrößen

Scherverzerrungsamplitude; mittlerer allseitiger, statischer Druck; Porenzahl; Anzahl der Belastungszyklen; Sättigungsgrad; Überkonsolidierungsgrad; Schubspannungszustand; Frequenz; Verformungsgeschichte; Korncharakteristik; Bodenstruktur; Temperatur, ...

**Messgröße:** Weg-, Geschwindigkeits-, Beschleunigungs- und Kraftaufnehmer

**Bezugspunkt:** relativ oder absolut

Sensoren und Verstärker haben ihre eigene Dynamik, die eventuell berücksichtigt werden muss.

# Einteilung

- Oberflächen-Geophysik
- Bohrloch-Geophysik
- dynamische Eindringversuche
- Drucksondierungen
- seismische Drucksondierungen
- Spezialversuche

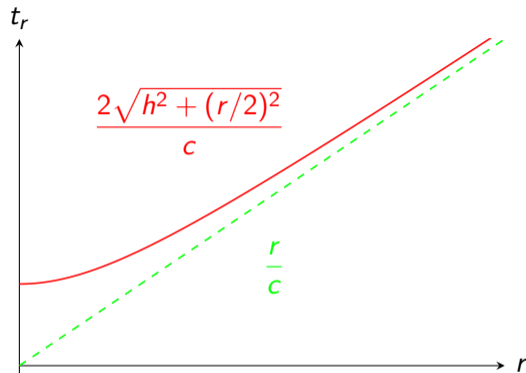
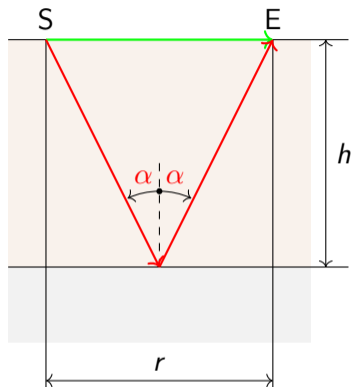
In Feldversuchen werden meist Wellengeschwindigkeiten

$$c_P = \sqrt{\frac{E_b}{\rho}} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}}$$

$$c_S = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

gemessen, aus denen  $G$  und  $E_b = \lambda + 2G = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}$  unmittelbar folgen. Die Querdehnung ergibt sich aus

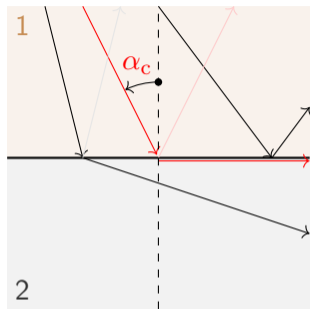
$$\nu = \frac{c_P^2 - 2c_S^2}{2(c_P^2 - c_S^2)}.$$



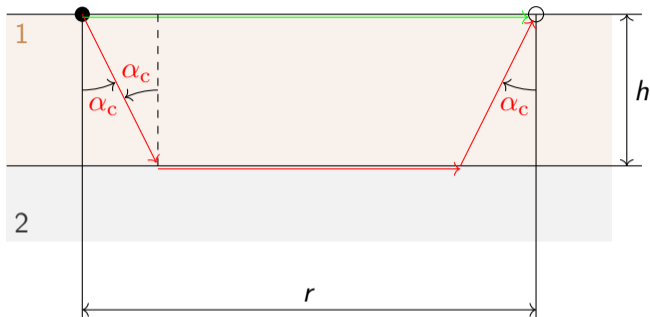
Wellenpfade und Laufzeitdiagramm

Voraussetzung: möglichst hoher Reflexionskoeffizient der Schichtgrenze

# Refraktionsseismik 1/4

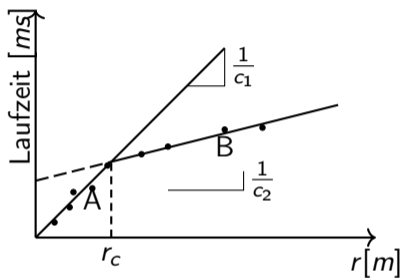


$$\sin \alpha_c = \frac{c_1}{c_2}$$



$$t_A = \frac{r}{c_1}$$

$$t_B = \frac{2h}{c_1 \cos \alpha_c} + \frac{r - 2h \tan \alpha_c}{c_2}$$



Laufzeitdiagramm [Sch17]

Voraussetzung  $c_2 > c_1$

Abstand  $r_c$  gleicher Laufzeit

$$\begin{aligned}
 t_A &= t_B \\
 \frac{r_c}{c_1} &= \frac{2h}{c_1 \cos \alpha_c} + \frac{r_c - 2h \tan \alpha_c}{c_2} \\
 &= \frac{2h}{c_1 \cos \alpha_c} + \frac{r_c - 2h \tan \alpha_c}{c_1 / \sin \alpha_c} \\
 &= \frac{2h}{c_1 \cos \alpha_c} + \frac{r_c \sin \alpha_c}{c_1} - \frac{2h \sin^2 \alpha_c}{c_1 \cos \alpha_c}
 \end{aligned}$$

Zwischenergebnis

$$r_c(1 - \sin \alpha_c) = 2h \frac{1 - \sin^2 \alpha_c}{\cos \alpha_c}$$

$$r_c(1 - \sin \alpha_c) = 2h \frac{1 - \sin^2 \alpha_c}{\cos \alpha_c}$$

$$r_c(1 - \sin \alpha_c) = 2h \cos \alpha_c$$

$$h = \frac{r_c(1 - \sin \alpha_c)}{2 \cos \alpha_c}$$

Erinnerung an den kritischen Winkel  $\sin \alpha_c = \frac{c_1}{c_2}$

$$h = \frac{r_c(1 - c_1/c_2)}{2\sqrt{1 - (c_1/c_2)^2}} = \frac{r_c(c_2 - c_1)}{2\sqrt{c_2^2 - c_1^2}} = \frac{r_c(c_2 - c_1)}{2\sqrt{(c_2 - c_1)(c_2 + c_1)}}$$

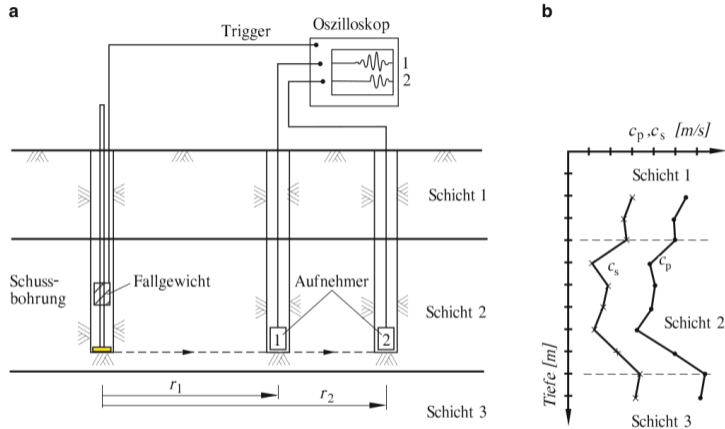
$$h = \frac{r_c}{2} \sqrt{\frac{c_2 - c_1}{c_2 + c_1}}$$

Erweiterungen:

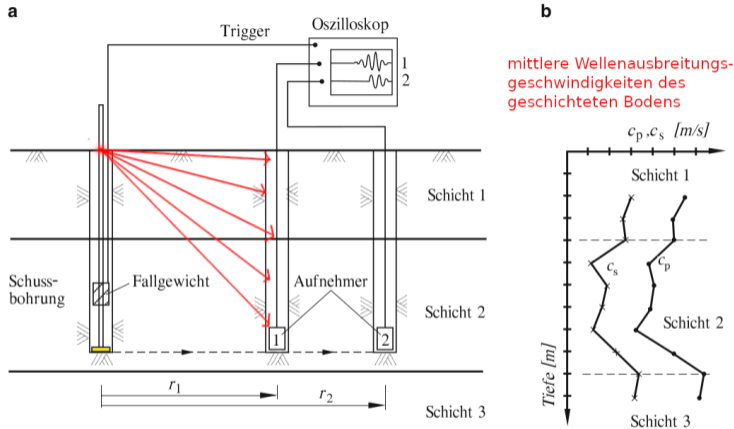
- aus Messung in entgegengesetzter Richtung lässt sich der Neigungswinkel der Bodenschicht bestimmen,
- auch für mehr als zwei Schichten anwendbar.

Grenzen:

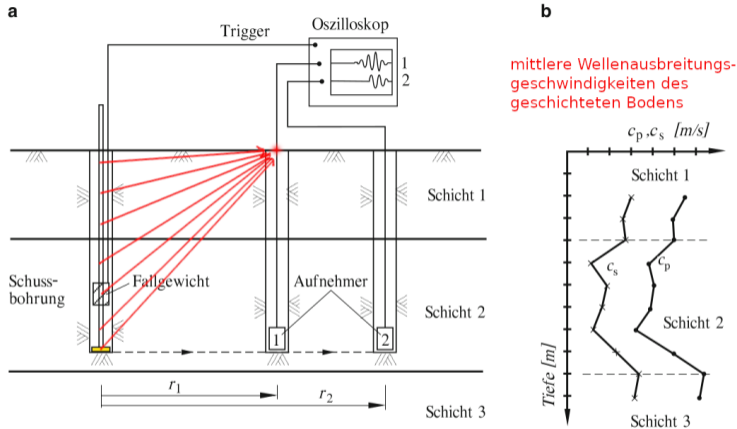
- die tieferen Schichten müssen höheren Wellengeschwindigkeiten aufweisen ( $c_2 > c_1$ ),
- bei P-Wellen stellt der Grundwasserspiegel eine Schichtgrenze dar,
- bei größeren Messentfernungen ist der Wellenweg, die *terrestrische Brachistochrone* [KN22], gekrümmt.



**Abb. 23.19** Cross-Hole-Versuch, nach Empfehlungen „Baugruddynamik“ (2002). **a** Prinzipielle Anordnung; **b** Wellen-Geschwindigkeitsprofil

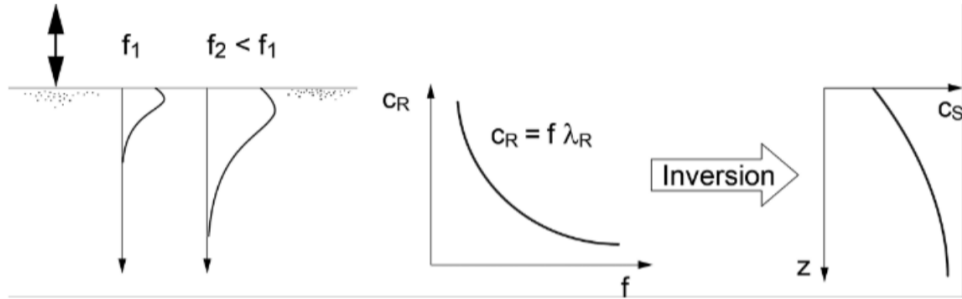


**Abb. 23.19** ~~Cross~~-Hole-Versuch, nach Empfehlungen „Baugruddynamik“ (2002). **a** Prinzipielle Anordnung; **b** Wellen-Geschwindigkeitsprofil



**Abb. 23.19** ~~Cross~~-Hole-Versuch, nach Empfehlungen „Baugrunderdynamik“ (2002). **a** Prinzipielle Anordnung; **b** Wellen-Geschwindigkeitsprofil

# R-Wellen Dispersionsmessung

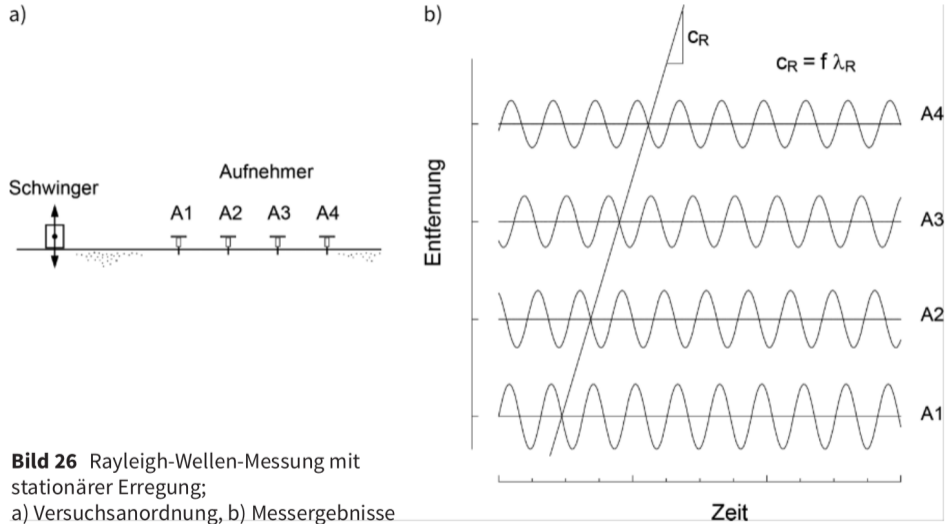


**Bild 25** Ermittlung der Scherwellengeschwindigkeit aus Oberflächenwellenmessungen

[Vre17]

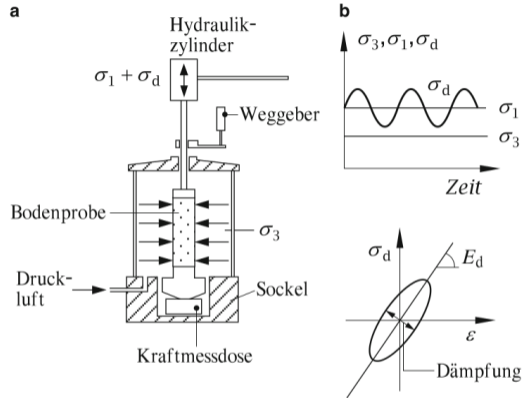
Einfache Inversionsregel: Die Rayleigh-Wellengeschwindigkeit entspricht den Bodeneigenschaften in einer Tiefe  $z = -\frac{\lambda_R}{2}$ .

# R-Wellen Dispersionsmessung



**Bild 26** Rayleigh-Wellen-Messung mit stationärer Erregung;  
a) Versuchsanordnung, b) Messergebnisse

- Besonders aussagekräftig um die Schwingungsübertragung eines Geländes zu charakterisieren,
- Materialdämpfung kann mit ermittelt werden,
- weitgehend unabhängig vom Grundwasserspiegel.
- Nachteile: Platzbedarf, starke Schwingungsquelle nötig und nicht geeignet um dünne Schichten zu identifizieren.

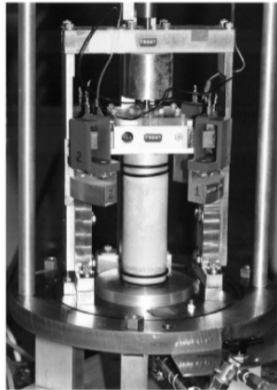
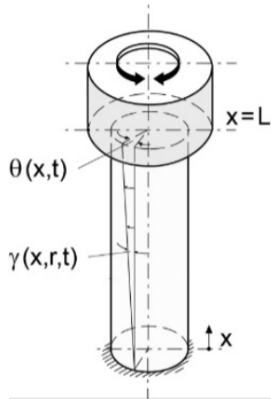


**Abb. 23.20** Dreiaxialgerät mit zyklischer Belastungseinrichtung. **a** Gerät; **b** Versuchsergebnisse

Abbildung aus *Grundlagen der Geotechnik* [Sch17]

YouTube Office Hours: CEEN 341 – Lab 9 – Triaxial Shear Test (CU) on Sand

# Schwingversuche



**Bild 28**  
Resonant-Column-Versuch

[Vre17]

Eigenfrequenz  $\rightsquigarrow$  Schubmodul  
Frequenzgang oder Ausschwingen  $\rightsquigarrow$  Dämpfung

..siehe Übung.

- Zyklische Zug-, Torsions- und Scherversuche

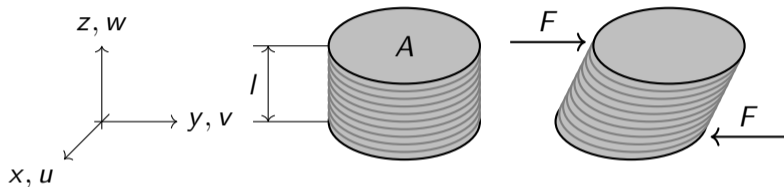


Abbildung: Geometrie des Scherversuchs

- Ultraschallmessung, ähnlich zu Bohrlochmessungen im Gelände

Kleinmaßstäbliche Modelle des realen Aufbaus werden in der Zentrifuge definierten Belastungen ausgesetzt (Ähnlichkeitstheorie).



*NGCF COFS: Introduction to the National Geotechnical Centrifuge Facility*

**Tabelle:** Unterschiede zwischen Feld- und Labormessungen

Labor	Feld
Einzelproben	Mittelungen
Störungen durch Entnahme	reale Randbedingungen und Geschichte
Extreme Zustände möglich	nur bedingte Belastungen realisierbar
Messtechnisch gut zugänglich	nur ausgewählte Punkte und Größen messbar

~> die Verfahren sollen sich ergänzen.

- [KN22] Dominik Kern und Thomas Nagel. „An experimental numerics approach to the terrestrial brachistochrone“. In: *GAMM Archive for Students* 4.1 (Juli 2022). DOI: 10.14464/gammas.v4i1.512. URL: <https://www.bibliothek.tu-chemnitz.de/ojs/index.php/GAMMAS/article/view/512>.
- [Sch17] Hans-Henning Schmidt. *Grundlagen der Geotechnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017, Online-Ressource. ISBN: 978-3-658-14930-7. DOI: 10.1007/978-3-658-14931-4.
- [Vre17] Christos Vrettos. „Bodendynamik“. In: *Grundbau-Taschenbuch*. Wiley, Apr. 2017, S. 573–631. DOI: 10.1002/9783433607275.ch9.