

# Geophysikalisches Praktikum: Modellseismik

## Refraktionsverfahren bei geneigter Grenzfläche

Institut für Geophysik  
Universität Hamburg

### 1 Einleitung

An einem modellseismischen Versuchsaufbau soll die Wellenausbreitung untersucht werden. Eine idealisierte und verkleinerte geologische Situation mit einer geneigten Grenzfläche soll dazu mit der Methode der Refraktionsseismik vermessen werden. An der Modelloberkante werden dazu hochfrequente seismische Wellen erzeugt, die in verschiedenen Entfernungen zu registrieren sind. Die Laufzeiten der seismischen Wellen zwischen Geber und Empfänger dienen dazu, die Ausbreitungsgeschwindigkeiten der Kompressionswellen in beiden Medien und die Lage der Grenzfläche zu ermitteln.

### 2 Aufgaben

Folgende Größen (siehe Abb. 1) sind zu bestimmen:

1. P-Wellen-Geschwindigkeit  $a_1$  im Hangenden (Plexiglas)
2. P-Wellen-Geschwindigkeit  $a_2$  im Liegenden (Aluminium)
3. Neigungswinkel  $\gamma$  der Grenzfläche zwischen Hangendem und Liegendem
4. Tiefen  $T$  und  $T'$

Außerdem soll mittels Durchschallung in Längsrichtung die P-Wellengeschwindigkeit

1. eines Salz-Bohrkernes
2. eines Messingstabes

bestimmt werden. Beim Salz-Bohrkern bietet sich auch eine Durchschallung quer zur Längsrichtung an (kommen dabei unterschiedliche Geschwindigkeiten heraus?).

Die Bestimmung der Ersteinsetz-Laufzeiten der P-Welle soll durch Ablesung mittels Fadenkreuz am PC-Bildschirm durchgeführt werden (Maßstab beachten, Umrechnung durchführen). Später sollen auch die gespeicherten Seismogramme dargestellt und ausgewertet werden.

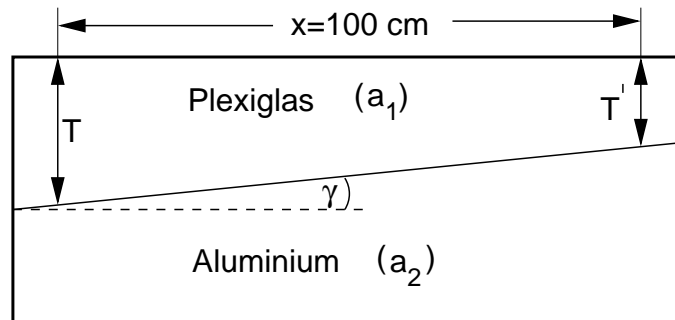


Abbildung 1: Skizze des Modells

### 3 Messverfahren und Apparatur

Die Messungen werden an einem vereinfachten Modell des Untergrundes aus Plexiglas und Aluminium, das die geologische Situation zweier Schichten mit einer geneigten Grenzfläche darstellt, durchgeführt. Das Modell stellt dabei eine verkleinerte Version der geologischen Situation dar. Maßstäbliche Verkleinerung erfordert, dass das Verhältnis von Profillänge ( $l$ ) oder Schichtmächtigkeit zur dominierenden Wellenlänge der seismischen Signale in der Natur und im Modell gleich groß sind. Es gilt:

$$\frac{l_{Natur}}{\lambda_{Natur}} = \frac{l_{Modell}}{\lambda_{Modell}}$$

Der Maßstabsfaktor ist dann

$$M = \frac{\lambda_{Modell}}{\lambda_{Natur}}.$$

Der Maßstabsfaktor sei z.B. 1000. Daraus folgt, dass für die Messung am verkleinerten Modell bei vergleichbaren Geschwindigkeiten eine um den Faktor 1000 kleinere Wellenlänge als beispielsweise in der Sprengseismik erforderlich ist. Entsprechend muss die Anregungsfrequenz um diesen Faktor größer sein. Die in der Modellseismik verwendeten Anregungsfrequenzen liegen zwischen 1 kHz und 1 MHz.

Für die Erzeugung derart hochfrequenter elastischer Wellen wird in diesem Versuch als Geberkristall ein scheibenförmiger piezoelektrischer Wandler (Dickenschwinger) aus Bleimetaniobat verwendet. Der Aufnehmerkristall dient dazu, die elektrischen Schwingungen am Messort in elektrische Signale zu wandeln.

Zur Messung wird ein PC unter Window XP verwendet. Der PC steuert die Pulserzeugung und registriert mittels AD-Wandler-Karte die am Empfängerkristall auftretenden elektrischen Spannungen. Die vom Impulsgenerator ausgehenden Spannungsimpulse (max ca. 800 Volt) regen den Geberkristall zu elastischen Schwingungen an (Folgeperiode etwa 130 ms). Die so erzeugten elastischen Wellen breiten sich in dem Modell mit einer bestimmten Geschwindigkeit aus und erreichen den Aufnehmer nach einer den unterschiedlichen Wellenwegen entsprechenden Zeit. Die vom Aufnehmer abgegebenen elektrischen Signale werden auf ein für den AD-Wandler geeignetes Spannungsniveau verstärkt.

Im PC wird jedes Ereignis in einem separaten ASCII-File mit fortlaufender Numerierung abgespeichert und auf dem Bildschirm dargestellt. Die Steuerung der Impulse durch den PC erlaubt es, die Registrierungen mehrerer Anregungen zu summieren (Stapelung). Dadurch können zufällige Störungen unterdrückt werden, sodass die Einsatzzeit sicherer bestimmt werden kann.

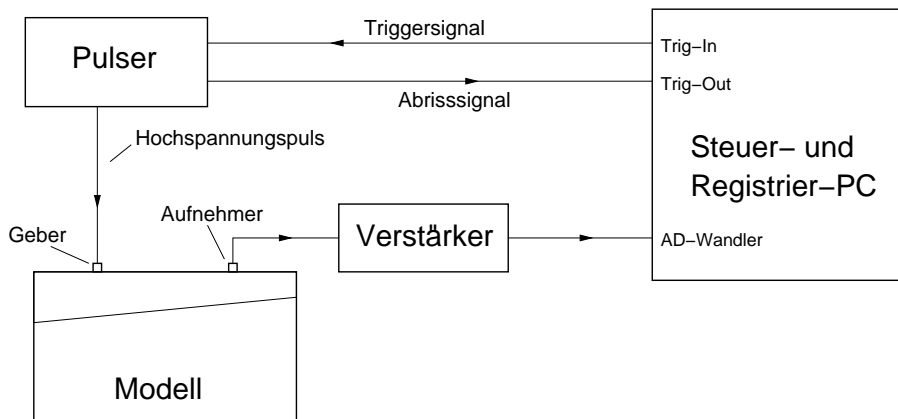


Abbildung 2: Blockschaltbild der Modellseismikapparatur

## 4 Fragen

1. Welche Arten von elastischen Wellen kennen Sie?
2. Worin unterscheiden sich diese verschiedenen Wellen?
3. Wie groß ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Kompressionswelle in
  - a) Luft,
  - b) Wasser,
  - c) Verwitterungsboden,
  - d) Ton,
  - e) Granit und anderen Tiefengesteinen?
4. Wie lauten für elastische Wellen
  - a) das Reflexionsgesetz,
  - b) das Brechungsgesetz?
5. Was ist
  - a) eine Wellenfront,
  - b) ein Wellenstrahl?
6. Was versteht man unter
  - a) dem kritischen Brechungswinkel,
  - b) der kritischen Entfernung?
7. Was ist eine Laufzeitkurve?
8. Wodurch ist die Form der Laufzeitkurve im Falle einer söhlichen Grenzfläche von
  - a) direkter Welle,
  - b) reflektierter Welle,
  - c) geführter Welle mathematisch beschrieben?
9. Wie lautet der mathematische Zusammenhang zwischen Wellenlänge  $\lambda$ , der Frequenz  $f$  und der Ausbreitungsgeschwindigkeit  $a$  einer seismischen Welle?
10. Was ist unter der 'dominierenden Wellenlänge eines seismischen Signals' zu verstehen?
11. Was für seismische Quellen kennen Sie?
12. Wie ist ein Geophon im Prinzip aufgebaut?
13. Was stellen Sie sich unter der Richtcharakteristik einer Schallquelle oder eines Schallempfängers vor?
14. Welche Gründe kann es geben, seismische Signale zu filtern?
15. Was bewirken folgende Filter?
  - a) Tiefpass
  - b) Hochpass
  - c) Bandpass
  - d) Notch-Filter

(Die meisten Fragen können nach Studium der entsprechenden Kapitel der 'Einführung in die Geophysik' und 'Praxis der seismischen Feldmessung' beantwortet werden.)

## 5 Anleitung

Für den Modellseismik-Versuch sollen zwei Messreihen durchgeführt werden, wobei der Schussort jeweils in der Nähe der einer der beiden Modellränder liegt (Schuss und Gegenschuss). Die Laufzeitkurven werden punktweise aufgenommen, d.h. bei festem Quellort wird sukzessive der Aufnehmerabstand in Abständen von 5 cm erhöht. Für jeden Aufnehmerort wird am Oszilloskop die Laufzeit des Ersteinsatzes abgelesen. Die Ablesungen sollen in eine Liste eingetragen werden und die Zeit gegen die Schuss-Empfänger-Entfernung sofort in einem Diagramm aufgetragen werden. Dies stellt sicher, dass 'Ausreisser' sofort erkannt werden.

Es muss sichergestellt sein, dass die Gegenzeiten gleich sind. Anderenfalls ist u.U. die falsche Phase des Signals zur Ersteinsatzbestimmung herangezogen worden. Für die Auswertung sind jeweils nur die Ersteinsätze der direkten und der refraktierten Welle von Interesse. Da die Messwerte zwangsläufig fehlerbehaftet sind, soll zur Bestimmung der Geschwindigkeiten bzw. der Scheingeschwindigkeiten lineare Regression verwendet werden. In die Auswertung gehören auch Angaben zur Standardabweichung!

Die nachfolgenden Formeln entstammen dem Lehrbuch von Haalck.

### 5.1 Direkte Welle

Für kleine Geber-Aufnehmer-Abstände  $x$  repräsentiert der erste Einsatz des Seismogramms die Laufzeit der direkten Welle. Ihre Laufzeitkurve, die durch

$$t_0 = x/a_1 \quad (1)$$

gegeben ist, stellt eine durch den Ursprung des  $(x-t)$ -Koordinatensystems gehende Gerade dar. Die P-Wellen-Geschwindigkeit im Hangenden ergibt sich aus dem Kehrwert ihrer Steigung.

### 5.2 Mintrop-Welle

Die Mintrop-Welle wird ab der 'Knickpunkt-' oder 'Überholentfernung'  $x_k$  als Ersteinsatz beobachtet. Diese ist nicht mit der 'kritischen' Entfernung zu verwechseln! Der Strahlengang der Mintrop-Welle mit Schuss- und Empfängerort in  $S$  bzw.  $S'$  ist beim 'Bergauf-Schiessen' (siehe Abb. 3)  $SPP'S'$ .

Die Laufzeitkurve ergibt sich entsprechend der Abbildung zu:

$$t_+ = \frac{SP}{a_1} + \frac{PP'}{a_2} + \frac{P'S'}{a_1}. \quad (2)$$

Aus der Abbildung können die weiteren folgenden Beziehung abgeleitet werden:

$$SP = h / \cos i = T \frac{\cos \gamma}{\cos i}, \quad S'P' = h' / \cos i = T' \frac{\cos \gamma}{\cos i}, \quad T' = T - x \cdot \tan \gamma \quad (3)$$

$$SQ = T \frac{\cos \gamma}{\cos i} \sin(i + \gamma), \quad S'Q' = T' \frac{\cos \gamma}{\cos i} \sin(i - \gamma) \quad (4)$$

$$PP' = \frac{QQ'}{\cos \gamma} = \frac{1}{\cos \gamma} \left[ x - T \frac{\cos \gamma}{\cos i} \sin(i + \gamma) - T' \frac{\cos \gamma}{\cos i} \sin(i - \gamma) \right] \quad (5)$$

$$PP' = \frac{1}{\cos \gamma} \left[ x \left( 1 + \frac{\sin \gamma}{\cos i} \sin(i - \gamma) \right) - T \frac{\cos \gamma}{\cos i} (\sin(i + \gamma) + \sin(i - \gamma)) \right]. \quad (6)$$

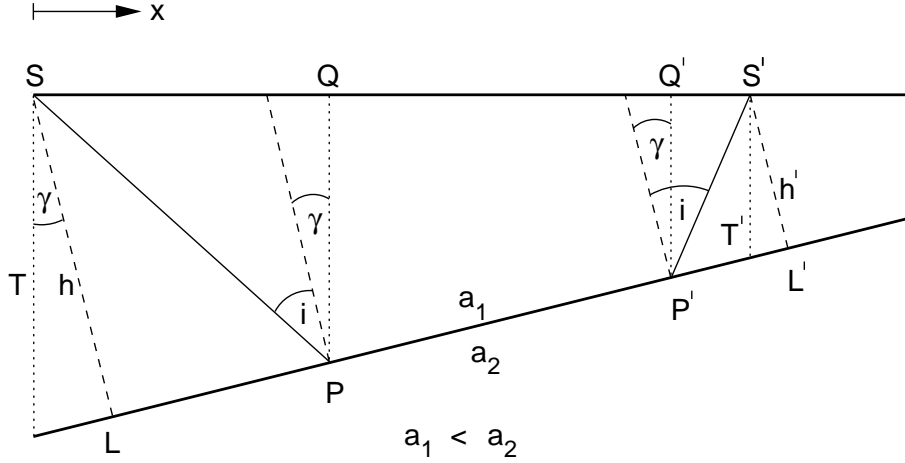


Abbildung 3: Refraktionsseismisches Zwei-Schichten-Problem (nach Haalck)

Damit erhält man für  $t_+$ :

$$t_+ = \frac{2T}{a_1} \cdot \frac{\cos \gamma}{\cos i} - \frac{x}{a_1} \cdot \frac{\sin \gamma}{\cos i} + \frac{x}{a_2} \cdot \frac{\cos(i - \gamma)}{\cos i} - \frac{2T}{a_2} \cos \gamma \cdot \tan i \quad (7)$$

oder

$$t_+ = \frac{x}{a_1} \sin(i - \gamma) + \frac{2T}{a_1} \cos \gamma \cdot \cos i. \quad (8)$$

Die Scheingeschwindigkeit der Welle ist:

$$a_+ = \frac{a_1}{\sin(i - \gamma)} = a_2 \frac{\sin i}{\sin(i - \gamma)}. \quad (9)$$

Beim 'Bergab-Schiessen' muss in den beiden letzten Beziehungen  $\gamma$  durch  $-\gamma$  und  $T$  durch  $T'$  ersetzt werden. Damit ergibt sich:

$$t_- = \frac{x}{a_1} \sin(i + \gamma) + \frac{2T'}{a_1} \cos \gamma \cdot \cos i. \quad (10)$$

und

$$a_- = \frac{a_1}{\sin(i + \gamma)} = a_2 \frac{\sin i}{\sin(i + \gamma)}. \quad (11)$$

Aus den Geschwindigkeiten  $a_1$ ,  $a_+$  und  $a_-$ , die aus den abgelesenen Laufzeiten berechnet wurden, können mit Hilfe der Formeln (9) und (11) der Einfallswinkel  $i$  und die Neigung der Schichtgrenze  $\gamma$  berechnet werden. Die wahre P-Wellen-Geschwindigkeit im Liegenden kann dann mit der Beziehung (Brechungsgesetz bei kritisch einfallendem Strahl)

$$\sin i = a_1/a_2 \quad (12)$$

berechnet werden.

### 5.3 Schichtmächtigkeit

Verlängert man die beiden Laufzeitgeraden der Mintrop-Welle bis zu den Zeitachsen ( $x = 0$ , Orte der Quellen), so erhält man aus den Formeln (8) und (10):

$$t_+^{\circ} = \frac{2T}{a_1} \cos \gamma \cdot \cos i \quad (13)$$

und

$$t_-^{\circ} = \frac{2T'}{a_1} \cos \gamma \cdot \cos i. \quad (14)$$

$t_+^{\circ}$  bzw.  $t_-^{\circ}$  nennt man auch Intercept-Zeiten. Aus den Formeln (13) und (14) können die Tiefen  $T$  und  $T'$  der Schichtgrenze bestimmt werden. Diese sollen mit den am Modell gemessenen verglichen werden und Abweichung zu den im Versuch bestimmten Werten diskutiert werden.

## Literatur

Dahm, T. (2005). *Einführung in die Geophysik I+II*. Institut für Geophysik.

Haalck, H. (1958). *Lehrbuch der angewandten Geophysik*. Gebr. Bornträger.

Meissner, R. and Stegena, L. (1977). *Praxis der seismischen Feldmessung und Auswertung*. Gebr. Bornträger.

Oliver, J., Press, F., and Ewing, M. (1954). Two-dimensional Model Seismology. *Geophysics*, 19(2):202–209.

Telford, W., Geldart, L., and Sheriff, R. (1990). *Applied Geophysics*. Cambridge University Press.