

Geophysikalische Geländeübungen

SS 2018

Seismik

Messgebiet A59/1 (Riedheim)

Svenja Müller
mueller-svenja@gmx.net

und

Lea Stockmeier
lea.stockmeier@web.de

Betreuer: Valérie Krampe und Tilman Steinweg

21. Juni 2018

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Theoretische Grundlagen	2
2.1. Seismische Wellen und Seismik	2
2.2. Snelliussches Brechungsgesetz und refraktierte Welle	3
2.3. Laufzeitdiagramme	3
2.4. Auswertung bei zwei Schichten über dem Halbraum	3
2.5. Auswertung bei einer geneigten Schicht über dem Halbraum	5
2.6. Messinstrumente	7
3. Versuchsdurchführung	9
3.1. Profil S11-S12	9
3.1.1. Hammerschlag	10
3.1.2. Verpuffungsquelle S.I.S.Sy	10
3.2. Profile beim Basaltgang	10
3.2.1. Profil S21-S22	11
3.2.2. Profil S31-S32	11
4. Auswertung	12
4.1. Profil S21-S22	12
4.2. Profil S31-S32	13
4.3. Vergleich Profil S21-S22 und Profil S31-S32	14
4.4. Profil S11-S12	14
5. Fehlerbetrachtung	17
6. Zusammenfassung	18
Anhang	20
A. Messprotokoll	20
B. Seismogramme	21
C. Laufzeitdiagramme	21

Abbildungsverzeichnis

2.1.	Strahlengang und Laufzeitdiagramm für den Fall von zwei homogenen Schichten über einem homogenen Halbraum	4
2.2.	Laufzeitdiagramm für eine Schicht über einem Halbraum mit geneigtem Refraktor	6
2.3.	Strahlengang für eine Schicht über einem Halbraum mit geneigtem Refraktor	6
3.1.	Lage der Messgebiete der Seismik-Messungen	9
3.2.	Lage der 72 Geophone bei Profil S11-S12	10
3.3.	Lage der 24 Geophone bei Profil S21-S22 und S31-S32	11
3.4.	Lage der Profile S21-S22 und S31-S32	11
4.1.	Profil S21-S22 mit untergelegter Magnetik-Kartierung	12
4.2.	Laufzeit und gefittete Geraden der Messung mit S.I.S.Sy auf Profil S11-S12	15
A.1.	Messprotokoll Seismik	20

Tabellenverzeichnis

2.1.	Größen zur Berechnung bei einer geneigten Schichtgrenze	6
4.1.	Werte der Profilmessung S21-S22	13
4.2.	Werte der Profilmessung S31-S32	14
4.3.	Werte der Profilmessung S11-S12	16

1. Einleitung

Der Versuch Refraktionsseismik der geophysikalischen Geländeübung wurde am zweiten Tag der Messwoche, dem 23.05., durchgeführt.

Die Fragestellungen unterschieden sich dabei bei den drei verschiedenen Profilen, auf denen Messungen durchgeführt wurden.

Ein Profil längs des Basaltgangs soll die Frage beantworten, ob dieser mit der Refraktionsseismik lokalisiert werden kann. Wenn dies der Fall ist, ist sollte dadurch die Tiefe der Oberkante bestimmt werden. Ein Vergleichsprofil außerhalb des Einflussbereichs des Gangs soll eindeutig zeigen, ob der Gang einen Einfluss auf das Laufzeitdiagramm hat.

Ein anderes Profil wurde auf einer etwas abgelegenen Wiese ausgelegt. Es dient dazu, neben der Hammerschlagseismik auch noch eine Messung mit einer Verpuffungsquelle durchführen zu können. Die Fragestellungen dabei sind, ob Schichten unterschiedlicher seismischer Geschwindigkeiten gefunden werden können und in welcher Tiefe diese liegen.

2. Theoretische Grundlagen

2.1. Seismische Wellen und Seismik

Ausgelöst durch zum Beispiel Stöße auf die Erdoberfläche oder Erdbeben, kommt es auf der Erde zur Bewegung der Partikel in der Erdoberfläche. Diese Bewegung breitet sich vom Ursprungsort in alle Richtungen aus. Es wird von seismischen Wellen gesprochen. Abhängig von der Partikelbewegung im Untergrund, gibt es longitudinale und transversale Wellen.

Bei longitudinal polarisierten Wellen schwingen die Partikel parallel zur Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle. Sie werden auch P-Wellen oder Kompressionswellen genannt und haben in homogenen isotropen Medien eine Geschwindigkeit von

$$v_P = \sqrt{\frac{\kappa + \frac{4}{3}\mu}{\rho}}, \quad (2.1)$$

wobei κ das Volumenkompressionsmodul und ρ die Massendichte ist.

Bei senkrechter Partikelbewegung zur Ausbreitungsgeschwindigkeit ist die Welle transversal polarisiert. Sie wird auch S-Welle oder Scherwelle genannt und hat in homogenen isotropen Medien eine Ausbreitungsgeschwindigkeit von

$$v_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}. \quad (2.2)$$

Da in Flüssigkeiten $\mu = 0 \text{ Pa}$ gilt, können sich in diesen keine Scherwellen ausbreiten.

In der Seismik werden diese Wellen durch zum Beispiel einen Hammer (Hammerschlagseismik) künstlich ausgelöst. In verschiedenen Abständen zur Quelle wird mit Geophonen die Bodenbewegung gemessen und daraus kann dann auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen im Untergrund geschlossen werden. Es werden bei der Refraktionsseismik nur die Ersteinsätze betrachtet, es wird also nur die P-Wellengeschwindigkeit v_P analysiert, weil diese größer ist als die S-Wellengeschwindigkeit. Die Ersteinsätze erfolgen immer durch P-Wellen.

2.2. Snelliussches Brechungsgesetz und refraktierte Welle

Wenn die Wellenlänge der Welle sehr viel kleiner als der Abstand zwischen Quelle und Empfänger ist, können die Wellen als Strahl beschrieben werden. Trifft eine Welle auf eine Schichtgrenze (Grenze zwischen Materialien mit unterschiedlichen Ausbreitungsgeschwindigkeiten), wird sie sowohl reflektiert, als auch in das andere Medium gebrochen. Für die reflektierte Welle gilt das Snelliussche Brechungsgesetz

$$\frac{\sin(\alpha_1)}{\sin(\alpha_2)} = \frac{v_1}{v_2}. \quad (2.3)$$

α_1 ist dabei der Einfallswinkel zum Lot hin gemessen und v_1 die Geschwindigkeit im Medium, in dem der Strahl auf die Grenzfläche einfällt. α_2 ist der Ausfallswinkel zum Lot hin gemessen und v_2 die Geschwindigkeit im Medium, in das der Strahl hinein gebrochen wird.

Falls $v_2 > v_1$ gilt, ist auch $\alpha_2 > \alpha_1$. Sobald $\alpha_2 = 90^\circ$ gilt, kommt es statt zur Reflektion zur Refraktion. Dies passiert ab dem kritischen Winkel

$$\sin(\alpha_k) = \frac{v_1}{v_2}. \quad (2.4)$$

Eine Welle, die im kritischen Winkel auf die Grenzfläche auftritt, läuft mit der Geschwindigkeit v_2 an der Grenzfläche entlang und strahlt permanent ebenfalls unter dem kritischen Winkel Wellen nach oben ab, die dann wieder die Geschwindigkeit v_1 des oberen Mediums haben.

2.3. Laufzeitdiagramme

Im Seismogramm werden die Einsätze der Wellen abgelesen. Dann können die Laufzeiten t gegen die Geophondistanz x vom Schussort aufgetragen werden. Die erhaltene Kurve heißt Laufzeitdiagramm. Die weitere Auswertung erfolgt aus diesen Diagrammen, wobei nur die Ersteinsätze ausgewertet werden. Zuerst wird der Ersteinsatz durch die direkte Welle (Kompressionswelle, die an Erdoberfläche entlang läuft) gebildet und ab einer bestimmten Geophondistanz überholt die refraktierte Welle aufgrund der größeren Geschwindigkeit der zweiten Schicht die direkte Welle, so dass der Ersteinsatz nun durch diese erfolgt.

2.4. Auswertung bei zwei Schichten über dem Halbraum

Bei der Refraktionsseismik wird in der Auswertung von unendlich ausgedehnten, parallelen Schichten ausgegangen. Hier wird die Auswertung bei zwei Schichten und einem unendlich tiefen Halbraum darunter erläutert. Der Strahlengang und das Laufzeitdiagramm für diesen Fall sind in Abbildung 2.1 zu sehen.

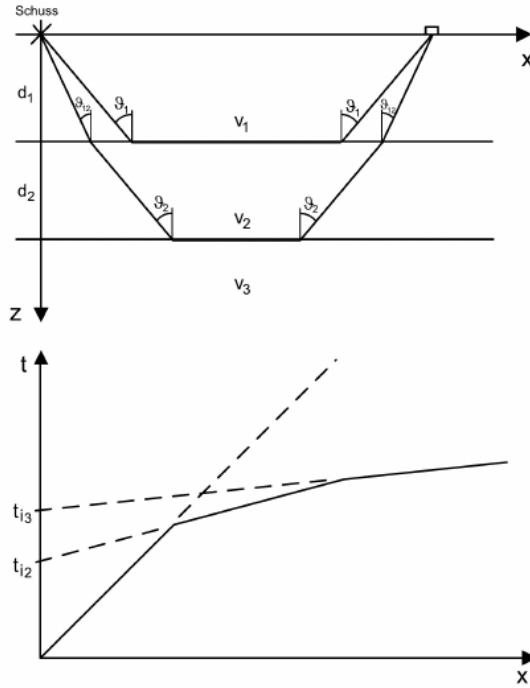


Abbildung 2.1.: Strahlengang und Laufzeitdiagramm für den Fall von zwei homogenen Schichten über einem homogenen Halbraum [FAG⁺18]

Bei den Formeln wird die Notation des Skripts [FAG⁺18] verwendet. Hin- und Rückschuss haben von ihrem Nullpunkt aus gesehen den gleichen Verlauf. Aus der ersten Geraden folgt die Laufzeit der direkten Welle

$$t_1 = \frac{x}{v_1}. \quad (2.5)$$

Aus der zweiten Gerade folgt die Laufzeit

$$t_2 = \frac{x}{v_2} + \frac{2d_1 \cos(\vartheta_1)}{v_1} = \frac{x}{v_2} + t_{i2} \quad (2.6)$$

der ersten refraktierten Welle. Die Intercept-Zeit

$$t_{i2} = \frac{2d_1 \cos(\vartheta_1)}{v_1} \quad (2.7)$$

ist die theoretische Ersteinsatz-Zeit der refraktierten Welle. Der dritte Abschnitt ist dann die Laufzeitgerade der am Halbraum refraktierten Welle

$$t_3 = \frac{x}{v_3} + \frac{2d_1}{v_1} \cos(\vartheta_{12}) + \frac{2d_2}{v_2} \cos(\vartheta_2) = \frac{x}{v_3} + t_{i3}. \quad (2.8)$$

Mit der Intercept-Zeit

$$t_{i3} = \frac{2d_1}{v_1} \cos(\vartheta_{12}) + \frac{2d_2}{v_2} \cos(\vartheta_2), \quad (2.9)$$

dem kritischen Winkel

$$\sin(\vartheta_2) = \frac{v_2}{v_3} \quad (2.10)$$

für die zweite Schichtgrenze und dem Ausfallswinkel

$$\sin(\vartheta_{12}) = \frac{v_1}{v_2} \sin(\vartheta_2) = \frac{v_1}{v_3} \quad (2.11)$$

an der ersten Schichtgrenze eines von unten nach oben laufenden Strahls, der die zweite Schichtgrenze unter dem Winkel ϑ_2 verlassen hat.

Die Ersteinsatz-Laufzeitkurven können dann folgendermaßen ausgewertet werden: Die Geschwindigkeiten v_1 , v_2 und v_3 werden aus den Steigungen der drei geraden Abschnitte der Laufzeitkurven bestimmt. Sie entsprechen dem Kehrwert der Steigungen. Die Intercept-Zeiten sind die t -Achsenabschnitte der zweiten bzw. dritten Geraden. Sie können aus dem Laufzeitdiagramm abgelesen werden. Die relevanten Winkel

$$\vartheta_1 = \arcsin\left(\frac{v_1}{v_2}\right) \quad (2.12)$$

$$\vartheta_2 = \arcsin\left(\frac{v_2}{v_3}\right) \quad (2.13)$$

$$\vartheta_{12} = \arcsin\left(\frac{v_1}{v_3}\right) \quad (2.14)$$

werden aus den Geschwindigkeiten berechnet. Die Schichtmächtigkeiten d_i werden dann letztlich durch Umstellen der Gleichungen (2.7) und (2.9) zu

$$d_1 = \frac{t_{i2} v_1}{2 \cos(\vartheta_1)} \quad (2.15)$$

$$d_2 = \frac{v_2}{2 \cos(\vartheta_2)} \left(t_{i3} - \frac{2d_1}{v_1} \cos(\vartheta_{12}) \right) \quad (2.16)$$

berechnet.

2.5. Auswertung bei einer geneigten Schicht über dem Halbraum

Handelt es sich um eine Schicht über einem homogenen Halbraum bei der die Grenze zu diesem bezüglich des Erdbodens geneigt ist, sieht das Laufzeitdiagramm wie in Abbildung 2.2 aus. Es muss immer ein Hin- und ein Rückschuss gemacht werden, weil nur so eine Neigung erkannt werden kann. Die Schicht ist geneigt, wenn die Laufzeitkurven der beiden Schüsse andere Steigungen aufweisen. Die unterschiedlichen Steigungen kommen daher, dass die refraktierten Wellen je nach Schichtmächtigkeit am Aufstiegspunkt unterschiedlich lang benötigen, um wieder die Erdoberfläche zu erreichen. Deutlich wird dies am Strahlengang (siehe Abbildung 2.3) für diesen

Fall des Untergrunds. Für die Berechnungen werden die in Tabelle 2.1 erklärten Größen benötigt. Diese Bezeichnungen sind die gleichen wie die im Skript [FAG⁺18] verwendeten.

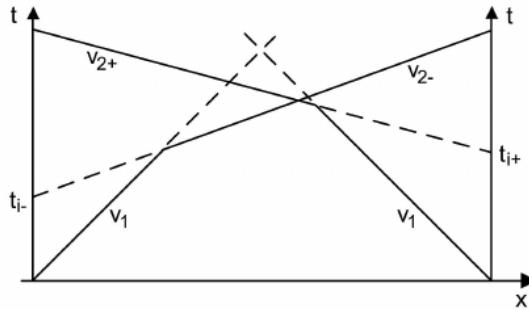


Abbildung 2.2.: Laufzeitdiagramm für eine Schicht über einem Halbraum mit geneigtem Refraktor [FAG⁺18]

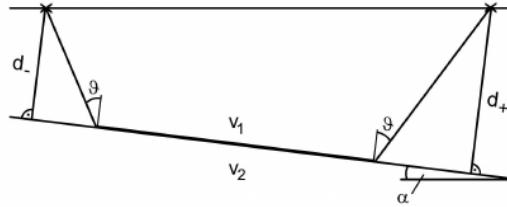


Abbildung 2.3.: Strahlengang für eine Schicht über einem Halbraum mit geneigtem Refraktor [FAG⁺18]

Tabelle 2.1.: Größen zur Berechnung bei einer geneigten Schichtgrenze

Formelzeichen	Erklärung
v_1	Geschwindigkeit der direkten Welle
v_{2+}	Scheingeschwindigkeit der die untere Schicht hinauflaufende Welle
v_{2-}	Scheingeschwindigkeit der die untere Schicht hinablaufende Welle
v_2	Tatsächliche Geschwindigkeit des Halbraums
ϑ	Kritischer Winkel
α	Neigung der Schichtgrenze
d	Tiefe der Schichtgrenze unter dem jeweiligen Schusspunkt
t_i	Intercept-Zeit
s	Abstand der Schusspunkte
Index +	Beobachtung ins Steigen der Grenzfläche
Index -	Beobachtung ins Fallen der Grenzfläche

Ob die vom Hin- oder Rückschuss ausgesendete Welle die Schichtgrenze hinab oder hinauf läuft, lässt sich an den Intercept-Zeiten ablesen. Es gilt $t_{i+} > t_{i-}$. Die Geschwindigkeiten v_1 , v_{2+} und v_{2-} werden aus den reziproken Geradensteigungen im

Laufzeitdiagramm bestimmt. Für die beiden Winkel gelten die Zusammenhänge

$$\sin(\vartheta - \alpha) = \frac{v_1}{v_{2+}} \quad (2.17)$$

$$\sin(\vartheta + \alpha) = \frac{v_1}{v_{2-}}. \quad (2.18)$$

Sie können also durch die Formeln

$$\vartheta = \frac{1}{2} \left(\arcsin \left(\frac{v_1}{v_{2+}} \right) + \arcsin \left(\frac{v_1}{v_{2-}} \right) \right) \quad (2.19)$$

$$\alpha = \arcsin \left(\frac{v_1}{v_{2-}} \right) - \vartheta \quad (2.20)$$

aus den Geschwindigkeiten berechnet werden. Für die tatsächliche Geschwindigkeit des Halbraums gilt der Zusammenhang

$$v_2 = \frac{v_1}{\sin(\vartheta)}. \quad (2.21)$$

Schließlich können die Mächtigkeiten unter den Schusspunkten

$$d_+ = \frac{t_{i+} v_1}{2 \cos(\vartheta)} \quad (2.22)$$

$$d_- = \frac{t_{i-} v_1}{2 \cos(\vartheta)} \quad (2.23)$$

bestimmt werden. Um die Rechnung zu kontrollieren, kann Gleichung

$$d_- = d_+ - s \sin(\alpha) \quad (2.24)$$

überprüft werden. Sie sollte für richtige Ergebnisse gelten.

2.6. Messinstrumente

Als Signalquelle dient ein Vorschlaghammer (Hammerschlagseismik) oder eine Verpuffung (schwache Explosion), die die seismischen Wellen anregt. Die Bodenbewegung wird mit Geophonen gemessen. Diese bestehen aus einem Magneten, der fest mit deren Gehäuse verbunden ist und um den eine Spule frei schwingen kann. Eine Bodenbewegung versetzt die Spule und den Magneten in Relativbewegung zueinander, wodurch eine elektrische Spannung in der Spule induziert wird. Diese Spannung ist proportional zur Bodenschwinggeschwindigkeit und wird vom Digitalisierer (in diesem Versuch wird eine Geode genutzt) abgetastet, gepuffert und dann an das Laptop weitergeleitet, welches die Messwerte ausgibt und aufzeichnet. Die Signale werden im seismische Dateiformat SEG-Y-Format auf der Festplatte abgespeichert.

Der Trigger gibt der Software auf dem Laptop das Startsignal zur Aufzeichnung der Messung. Dies geschieht genau dann, wenn die Quelle ausgelöst wird. Er ist an der Quelle angebracht und an einer Diode angeschlossen, die das Triggersignal an andere Geoden und die Software weiterleitet.

Wird die Hammerschlagseismik verwendet, werden pro Schusspunkt oft mehrere Schläge durchgeführt und die Seismogramme danach aufsummiert. Die Signale werden dadurch deutlicher, weil sich die Nutzsignale konstruktiv addieren, was jedoch für die Störsignale (Rauschen) nicht der Fall ist. Dieses Prinzip wird Stapelung genannt. Bei längeren Messprofilen wird die Verpuffungsquelle S.I.S.Sy verwendet, weil sie eine höherer Energie als der Hammerschlag aufweist und so ein Schuss ausreicht.

3. Versuchsdurchführung

Als Gruppe wollten wir sehr gerne die Oberkante des Basaltgangs mit der Refraktionsseismik detektieren. Von den Betreuern Eva und Fabian wussten wir aber, dass Gruppen in den Vorjahren Schwierigkeiten damit hatten. Wir entschieden uns also, zunächst auf einer anderen Wiese (Messgebiet 2 in Abbildung 3.1) ein langes Profil anzulegen. Erst danach führten wir die Messung beim Basaltgang durch, der sich unter Messgebiet 1 aus Abbildung 3.1 befindet, was aus der Magnetik-Kartierung bekannt war. Das Messprotokoll befindet sich in Abbildung A.1 im Anhang.



Abbildung 3.1.: Lage der Messgebiete der Seismik-Messungen. Die Grafik wurde von Rebekka Kirchgässner und Luisa Rank übernommen.

3.1. Profil S11-S12

Dies ist das Profil im Messgebiet 2. Bei der Refraktionsseismik wird die Annahme getroffen, dass ebene, homogene Schichten im Untergrund vorliegen. Bei geradem Boden ist die Wahrscheinlichkeit größer, dass dies näherungsweise der Fall ist. Wir versuchten also eine möglichst flache Stelle zu finden, was sich aufgrund der ausgeprägten Topographie jedoch als sehr schwierig herausstellte. Man konnte wegen

eines Hügels vom einen Ende des Profils das andere Ende nicht sehen. Es wurden 72 Geophone verwendet. In Abbildung 3.2 ist die Lage der Geophone eingezeichnet. Da für S.I.S.Sy ein Loch gebohrt werden musste, ist dieses Profil ein Meter länger als das Hammerschlag-Profil.

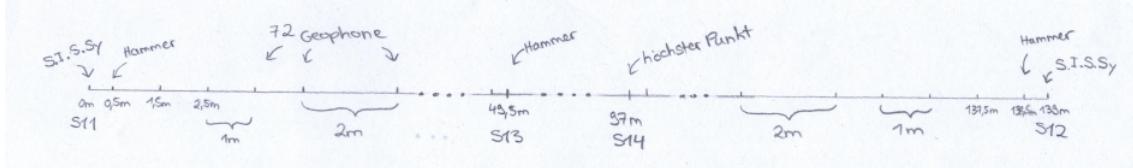


Abbildung 3.2.: Lage der 72 Geophone bei Profil S11-S12

3.1.1. Hammerschlag

Von den Betreuern wurde uns empfohlen, beim Hammerschlag einen Hin-, Rück- und Mittelschuss durchzuführen, weil die Gesamtlänge von 138 m durch Hammerschläge vermutlich nicht erreicht werden kann. Außerdem stapelten wir bei der Messung mit Hammerschlag jeweils 5 Messungen, um ein besseres Signal-Rausch-Verhältnis zu erreichen. Der Punkt des Mittelschuss wurde S13 genannt und befindet sich 49 m vom Punkt des Hinschusses S11 entfernt, wie in Abbildung 3.2 eingezeichnet.

3.1.2. Verpuffungsquelle S.I.S.Sy

Bei der Messung mit der Verpuffungsquelle S.I.S.Sy als Signalquelle musste nur ein Hin- und ein Rückschuss durchgeführt werden, da sie eine höhere Energie als ein Hammerschlag aufweist. Die Löcher wurden genau an den Ende des Profils gebohrt, was zu einer Gesamtlänge dieser Auslage von 139 m ergab. Beim Bohren ergab sich die Schwierigkeit, dass wir das erste Loch mit einem Knick bohrten und so S.I.S.Sy nicht hineinpasste. Außerdem stießen wir in einer Tiefe von ca. 60 cm auf eine Schicht mit sehr vielen Steinen.

3.2. Profile beim Basaltgang

Nun untersuchten wir noch den Basaltgang mit der Refraktionsseismik. Dazu legten wir ein Profil über dem Basaltgang und eines weit neben ihm an. Das zweite Profil soll zum Vergleich dienen, um zu sehen, ob der Gang mit der Seismik überhaupt detektiert werden kann. Bei beiden Profilen wurden 24 Geophone auf einer Länge von 42 m verwendet (Siehe Abbildung 3.3). Wegen der geringen Länge wurden nur Hin- und Rückschüsse mit Hammerschlag durchgeführt. Es wurden wieder 5 Seismogramme gestapelt.

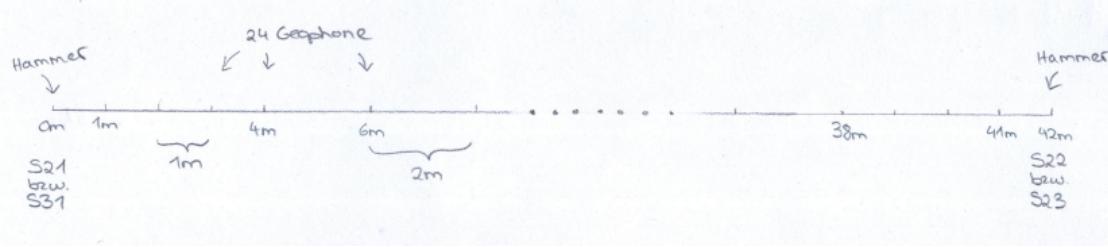


Abbildung 3.3.: Lage der 24 Geophone bei Profil S21-S22 und S31-S32

3.2.1. Profil S21-S22

Dieses Profil legten wir so an, dass es möglichst parallel zum und genau über dem Basaltgang war. Dazu nutzten wir unser Wissen über die Lage des Basaltgangs aus der Magnetik-Kartierung vom Vortag.

3.2.2. Profil S31-S32

Per Augenmaß parallel zu Profil S21-S22 legten wir dieses Profil an, das möglichst weit weg vom Basaltgang sein sollte, um ausschließen zu können, dass er noch einen Einfluss auf die Messergebnisse hat. Die Lage beider Profile ist in Abbildung 3.4 eingezeichnet.



Abbildung 3.4.: Lage der Profile S21-S22 und S31-S32. Die ungefähr in Nord-Süd-Richtung verlaufenden Profile sind die Profile S21-S22 und S31-S32. Auf dem Quadrat wurde die Magnetik-Kartierung durchgeführt. Die Grafik wurde von Katharina Adrion und Niels Gieseles übernommen.

4. Auswertung

Am Abend nach dem Versuch erhielten wir ausgedruckt alle Seismogramme, die mit Hammerschlag aufgenommenen direkt gestapelt. Daraus pickten wir die Ersteinsätze. Die gepickten Seismogramme sind dem Protokoll im Anhang angehängt. Die Seismogramme des Profils S11-S12 mit Hammerschlag wurden nicht gepickt, da diese Messung in diesem Protokoll nicht weiter ausgewertet wird.

4.1. Profil S21-S22

Dieses Profil liegt über dem Basaltgang, was in Abbildung 4.1 mit der unterlegten Magnetik-Kartierung zu sehen ist. Das zugehörige Laufzeitdiagramm ist im Anhang beigefügt. Da unsere Fragestellung ist, ob sich diese Messmethode überhaupt für das Vermessen des Basaltgangs eignet, betrachten wir zunächst nur den Hinschuss.



Abbildung 4.1.: Profil S21-S22 mit untergelegter Magnetik-Kartierung. Das Profil verläuft genau über dem Basaltgang. Die Grafik wurde von Katharina Adrión und Niels Gieseler übernommen.

Wie in Kapitel 2.4 beschrieben wurde, werden für den Hinschuss die seismischen Geschwindigkeiten, die relevanten Winkel und die Schichtmächtigkeiten bestimmt. Die

Rechnungen wurden mit Python durchgeführt und die Ergebnisse sind in Tabelle 4.1 aufgeführt. Die Schichtmächtigkeit der ersten Schicht ist $d_1 = 0,95 \text{ m}$ und für die Schichtmächtigkeit der zweiten Schicht ergibt sich $d_2 = 2,50 \text{ m}$.

Für die Fehlerbetrachtung haben wir neue, etwas abweichende, aber plausible, Ausgleichsgeraden durch die Messpunkte gelegt. Mit den neuen Werten wird die Berechnung wiederholt. Die Differenz der neuen Größen und zuvor berechneten optimalen Größen ist der Fehler auf die Werte. In Tabelle 4.1 werden die Werte, die bereits berechnet wurden, als Optimalwerte bezeichnet. Als Toleranzwerte bezeichnen wir die Werte, die aus den weniger passenden Fitgeraden berechnet wurden. Der Fehler ist die Differenz zwischen diesen beiden Messungen.

Tabelle 4.1.: Werte der Profilmessung S21-S22

Größe	Optimalwert	Toleranzwert	Fehler
v_1 in m/s	181.82	214.29	32.47
v_2 in m/s	615.38	754.72	139.34
v_3 in m/s	1818.18	1858.41	40.23
ϑ_1 in rad	0.2999	0.2879	0.0100
ϑ_2 in rad	0.3453	0.4182	0.0732
ϑ_{12} in rad	0.1002	0.1156	0.0154
d_1 in m	0.95	1.15	0.20
d_2 in m	2.50	2.64	0.14

Die Schichtgrenze in $(0,95 \pm 0,20) \text{ m}$ Tiefe deutet darauf hin, dass hier der Basaltgang anfängt. Allerdings haben wir in $(2,50 \pm 0,14) \text{ m}$ Tiefe schon die nächste Schichtgrenze. Die berechneten Geschwindigkeiten passen nicht zu den seismischen Geschwindigkeiten von Basalt. Die seismische Geschwindigkeit von Basalt ist 4000 m/s und unsere höchste gemessene Geschwindigkeit ist $(1818,18 \pm 40,23) \text{ m/s}$. Die Refraktionsseismik eignet sich wie vermutet wahrscheinlich einfach nicht zum bestimmen der Tiefe des Basaltgangs.

4.2. Profil S31-S32

Das Laufzeitdiagramm (siehe Anhang) mit eingetragenem Hin- und Rückschuss dieses Profils ist achsensymmetrisch um $x = 20 \text{ m}$. Daraus lässt sich schließen, dass keine geneigten Schichtgrenzen vorliegen. Die Messung wurde durchgeführt, um einen Vergleich zum Profil S21-S22 zu haben. Wie bereits für das Profil S21-S22 wurden die in Tabelle 4.2 eingetragenen Werte berechnet. Als Fehler ist die Differenz des Toleranzwertes und des Optimalwertes eingetragen.

Die Fehler sind teilweise sehr hoch, was aber daran liegt, dass das Laufzeitdiagramm sehr viel Spielraum für die Lage der Geraden ließ. Wir können hier aber zwei

Tabelle 4.2.: Werte der Profilmessung S31-S32

Größe	Optimalwert	Toleranzwert	Fehler
v_1 in m/s	114.29	240.00	125.71
v_2 in m/s	824.74	1030.93	206.19
v_3 in m/s	2210.53	2270.27	59.26
ϑ_1 in rad	0.139	0.235	0.096
ϑ_2 in rad	0.382	0.471	0.089
ϑ_{12} in rad	0.052	0.106	0.054
d_1 in m	0.49	1.05	0.56
d_2 in m	3.08	3.93	0.85

Schichtgrenzen bestimmen, die bei Berücksichtigung der Fehler in der gleichen Tiefe liegen wie die Schichtgrenzen des Profils S21-S22. Es handelt sich also vermutlich um die gleichen gemessenen Schichten.

4.3. Vergleich Profil S21-S22 und Profil S31-S32

Aus der Magnetik und Geoelektrik wissen wir, dass unter dem Profil S31-S32 kein Basaltgang sind. Daher können wir nun mit großer Sicherheit sagen, dass die berechneten Schichtengrenzen nicht die Obergrenze des Basalts ist. Somit eignet sich die Refraktionsseismik eindeutig nicht zur Bestimmung der Lage und Tiefe des Basaltgangs. Vergleicht man das Diagramm der Messung über und neben dem Basaltgang, stellt man fest, dass es im Laufzeitdiagramm des Profils S21-S22 einige kleine Ausreißer der Werte nach oben und unten gibt. Die Messwerte des Profils S31-S32 liegen im Laufzeitdiagramm relativ schön auf einer Kurve. Wir gehen davon aus, dass die Ausreißer durch den Basaltgang verursacht werden. Somit ist der Basaltgang wahrscheinlich indirekt in den Messwerten sichtbar.

4.4. Profil S11-S12

Das Laufzeitdiagramm der Messung am Profil S11-S12 mit S.I.S.Sy befindet sich in Abbildung 4.2. Sowohl beim Hin- als auch beim Rückschuss sind zwei gerade Abschnitte zu erkennen. Beim Rückschuss weichen die gemessenen Werte im Bereich der Profilkordinate 50 m bis 95 m relativ stark von der Geradenform ab. Dies könnte an der oberflächlich in diesem Bereich stark ausgeprägten Topographie liegen. Beim Hinschuss ist dies jedoch nicht so deutlich im Laufzeitdiagramm zu sehen.

Zunächst wurden für die Auswertung die Schichtdicke für Hin- und Rückschuss mit der Annahme nicht geneigter Schichtgrenzen berechnet. Da diese Werte 1,3 m Differenz aufwiesen, wurde eine geneigte Schicht über dem homogenen Halbraum angenommen.

Die Berechnung der in Tabelle 4.3 aufgeführten Werte wurde wie in Kapitel 2.5 beschrieben durchgeführt. Da die Intercept-Zeit des Hinschusses größer als die des

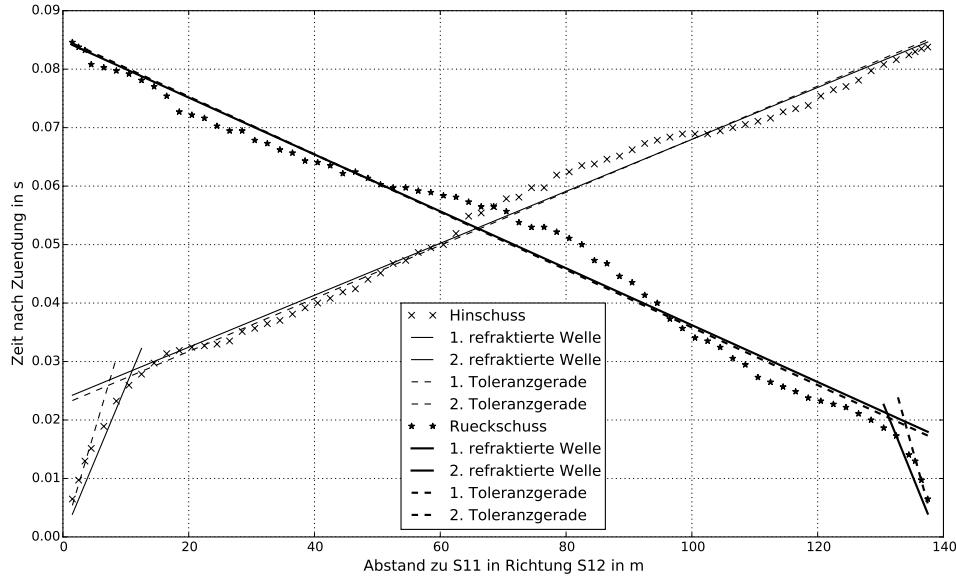


Abbildung 4.2.: Laufzeit und gefittete Geraden der Messung mit S.I.S.Sy auf Profil S11-S12

Rückschusses ist, beziehen sich die Werte mit Index + auf den Hinschuss und die mit Index - auf den Rückschuss. Als Toleranzwerte werden wieder diejenigen Werte bezeichnet, die mit einer anderen Wahl der Geraden berechnet wurden und dennoch im optischen Toleranzbereich liegen. Die Differenz dieses Werts und des Werts der per Augenmaß am besten passenden Geraden ergibt dann den Fehler der jeweiligen Größe. Da beim Hin- und Rückschuss nicht genau dieselbe Geschwindigkeit der direkten Welle bestimmt wurde, wird der Mittelwert v_1 dieser beiden Geschwindigkeiten für die weiteren Berechnungen verwendet. Vergleicht man die Werte für d_- und $d_+ - s \sin(\alpha)$, weichen sie 0,08 m voneinander ab. Sie stimmen nicht genau überein, weil die Geschwindigkeit v_1 der direkten Welle aus den Werten von Hin- und Rückschuss gemittelt wurde. Die Richtigkeit Rechnung kann dadurch aber bestätigt werden.

Es konnte also auf diesem Profil eine Schicht gefunden werden, die unter dem Punkt des Hinschusses S11 die Dicke $d_- = (3,35 \pm 1,09)$ m hat und unter dem Punkt des Rückschusses S12 eine Dicke von $d_+ = (4,57 \pm 1,50)$ m aufweist. Die Neigung der Schichtgrenze ist dabei $\alpha = (0,47 \pm 0,16)^\circ$. Allein aus der Seismik die Plausibilität nicht zu überprüfen. In Kapitel 6 Zusammenfassung wird deswegen noch mit der Geoelektrik verglichen, mit der entlang des gleichen Profils eine Schlumberger-Sondierung durchgeführt wurde.

Tabelle 4.3.: Werte der Profilmessung S11-S12

Größe	Einheit	Optimalwert	Toleranzwert	Fehler
t_{i+}	s	0.02357	0.02265	0.00092
t_{i-}	s	0.01725	0.01659	0.00066
$v_1 \text{ hin}$	m/s	387.68	277.84	109.85
$v_1 \text{ rueck}$	m/s	375.92	261.14	114.78
v_1	m/s	381.80	269.49	112.31
v_{2+}	m/s	2251.38	2204.01	47.37
v_{2-}	m/s	2055.70	2027.08	28.61
v_2	m/s	2149.02	2111.82	37.20
ϑ	°	10.23	7.33	2.90
α	°	0.47	0.31	0.16
d_+	m	4.57	3.08	1.50
d_-	m	3.35	2.25	1.09
$d_+ - s \sin(\alpha)$	m	3.43	2.33	-
s	m	139	-	-

5. Fehlerbetrachtung

Bei der Berechnung der Fehler in der Auswertung wird nur der Fehler berücksichtigt, der beim Legen der Ausgleichsgeraden gemacht wird. Aber auch während der Messung gibt es viele Ungenauigkeiten, die zu Fehlern führen können.

Eine Fehlerquelle ist das Auslegen der Geophone. Diese werden in einem bestimmten Abstand entlang eines Maßbands gesteckt. Da das Band nicht gerade auf dem Boden aufliegt, sondern durch Gras geht, sind schon hier die Abstandsangaben ungenau. Dadurch ist auch der Fehler auf die Skala des Maßbands zu vernachlässigen. Des weiteren können wegen des Untergrunds die Geophone auch nicht immer an dem richtigen Ort am Maßband gesteckt werden. Die Geophone müssen, um optimale Werte zu bekommen, horizontal zum Boden gesteckt sein. Auch dies ist oft nicht möglich.

Wenn sich Personen neben den Geophonen bewegen, kann das registriert werden. Daher haben sicher auch vorbeifahrende Autos usw. einen großen Einfluss. Wir achteten jedoch darauf, dass kein Auto in der Nähe der Messung war. Auch die Bewegung der Bäume durch Wind kann zu Änderungen der Messwerte führen. Das sind Fehler auf die man wenig bis keinen Einfluss hat.

Bei der Hammerschlag-Methode können veränderte Werte entstehen, wenn man mit dem Hammer nicht die Mitte der Schlagplatte trifft oder unterschiedliche Personen schlagen.

Das Picken der Ersteinsätze in den Seismogrammen ist eine weitere Fehlerquelle, die aber erst in der Auswertung geschieht. Dabei kann sowohl manchmal ein gut erkennbarer Ersteinsatz etwas abweichend zu den anderen gepickt worden sein oder der Ersteinsatz ist nicht klar vom Rauschen zu trennen. Die Zeiten werden dann mit Geodreieck abgelesen werden, was zu weiteren Ungenauigkeiten führen kann, wenn dieses nicht genau angelegt wird oder einen Skalenfehler hat.

Wir bemühten uns bei der Messung, diese Fehlerquellen gering zu halten. Aber einen nicht genau berechenbaren Einfluss haben sie trotzdem.

6. Zusammenfassung

Die Messung auf dem Profil S11-S12, die mit S.I.S.Sy durchgeführt wurde, liefert sehr gute Ergebnisse. Unsere Fragestellung war in erster Linie der Vergleich dieser Messmethode mit der Geoelektrik. In der Geoelektrik hat man viel Interpretationsfreiraum, was die Anzahl und die Tiefe von Schichten angeht. Die Seismik liefert eindeutigere Ergebnisse. So sind wir uns sehr sicher, dass wir genau eine Schichtgrenze in einer Tiefe von $d_+ = (4,57 \pm 1,50)$ m bzw. $d_- = (3,35 \pm 1,09)$ m haben. Die Schicht ist geneigt, weshalb es auch zwei Schichttiefen gibt. Eine am Punkt des Hinschusses und eine am Punkt des Rückschusses. In der Geoelektrik wurde in einem der berechneten Modelle ebenfalls eine Schichtgrenze in etwa dieser Tiefe gefunden. Ändern sich die seismischen und geoelektrischen Eigenschaften gleichzeitig, kann es sich um die gleiche Schicht handeln.

Optimal wäre es für die Messung gewesen, wenn wir ein ebenes Profil verwendet hätten. Wir haben deswegen ein Profil mit möglichst wenig Topographie gesucht. Eine kleinere Erhebung haben wir aber leider trotzdem auf dem Messprofil. Dieser Hügel ist vermutlich als Kurve im Laufzeitdiagramm zu erkennen. Trotzdem können wir sagen, dass sich die Seismik gut zum Untersuchen des Untergrunds auf Profil S11-S12 eignet.

Anders verhält es sich beim Versuch, den Basaltgang mit der Hammerschlag-Methode nachzuweisen. Eine Messung wurde auf Profil S21-S22 direkt über dem Basaltgang durchgeführt. Die Vergleichsmessung (Profil S31-S32) parallel dazu und weit genug weg vom Basaltgang diente dazu, den Einfluss des Basalts besser deuten zu können. Für beide Messungen wurden Schichtgrenzen in etwa den gleichen Tiefen bestimmt. Dies bedeutet, dass wir den Basaltgang mit der Messung nicht nachweisen konnten. Die berechneten Schichtgrenzen sind wohl die des Untergrunds um den Basaltgang.

Einen Unterschied gibt es jedoch zwischen den beiden Laufzeitdiagrammen. Die Messwerte der Vergleichsmessung bilden eine relativ schöne, gleichmäßige Kurve. Im Laufzeitdiagramm der Messung über dem Basaltgang gibt es viele kleine Ausreißer der Messwerte nach oben oder unten. Dies lässt sich vermutlich damit erklären, dass die seismischen Wellen teilweise an der Oberkante des Basaltgangs unregelmäßig gestreut und reflektiert wurden.

Der Basaltgang konnte mit der Seismik also nicht lokalisiert werden. Von allen Messmethoden lieferte sie dadurch die schlechtesten Ergebnisse über dem Basaltgang.

Anhang

A. Messprotokoll

Dienstag - Seismik

I Messung ca. 300 m neben Basaltgang (Hammer/Sissy)

- 1) Suchen eines Messprofils das möglichst gerade ist (wenig Tomographie)
- 2) Bohren zweier Löcher (1m) für Sissydräte Enden der Messlinie
- 3) auslegen der Geophone und Verkabeln

4) Messung mit Sissy am Anfang und Ende der Messlinie

5) 10. Hammerschlag-Skopelung mit 5 Messungen
- Hirschschuss, Reckschuss, Mittelschuss
(nur mit Hammer)

Messweg S21 - S22 / S31 - S32

II Messung parallel zum Basaltgang:
nur mit Hammerschlag, 24 geophone

III Messung auf Basaltgang
nur Hammerschlag 24 geophone

Abbildung A.1.: Messprotokoll Seismik

B. Seismogramme

In dieser Reihenfolge:

- Hinschuss Profil S21-S22
- Rückschuss Profil S21-S22
- Hinschuss Profil S31-S32
- Rückschuss Profil S31-S32
- Hinschuss Profil S11-S12 mit S.I.S.Sy
- Rückschuss Profil S11-S12 mit S.I.S.Sy
- Hinschuss Profil S11-S12 mit Hammerschlag
- Rückschuss Profil S11-S12 mit Hammerschlag
- Mittelschuss Profil S11-S12 mit Hammerschlag

C. Laufzeitdiagramme

In dieser Reihenfolge:

- Profil S21-S22
- Profil S31-S32

Literaturverzeichnis

[FAG⁺18] Forbriger, T., J. Altmann, E. Gottschämmer, S. Heider, U. Kästner, A. Kurzmann, M. Mayer, A. Reiß, K. Seitz, N. Thiel, B. Wawerzinek, M. Westerhaus, R. Widmer und W. Zürn: *Skriptum zu den Geophysikalischen Geländeübungen 2018.* 2018.