

Geophysikalische Geländeübungen 2016

Messgebiet: Rotenäcker

Refraktionsseismik

Lena Feld

E-Mail

Sabit M

E-Mail

Clara Bützler

clara.buetzler@student.kit.edu

Tutoren: Niklas Thiel und Theresa Panther

15. Juni 2016

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung und Fragestellungen der Untersuchungen	3
2	Theoretische Grundlagen der Refraktionsseismik	4
2.1	Seismik und seismische Wellentypen	4
2.2	Das Snelliussche Brechungsgesetz und Refraktierte Wellen	5
2.3	Auswertung von Laufzeitdiagrammen	5
2.4	Stapelung	8
2.5	Verwendete Geräte	9
3	Durchführung der Messungen	10
3.1	Profil S3S1 parallel zum Bach	10
3.2	Profil S4S2 senkrecht zum Bach	11
4	Messwerte	12
5	Auswertung der Messungen und physikalische Interpretation	12
5.1	Profil S3S1	12
5.1.1	Auswertung der Hammerschlagmessungen	12
5.1.2	Vergleich der Sissy-Messung mit der Hammerschlagmessung	17
5.2	Profil S4S2	18
5.3	Vergleich Profil S3S1 und Profil S4S2	22
6	Fehlerbetrachtung	25
6.1	Fehler während der Messungen	25
6.2	Fehler während der Auswertung	25
7	Geologische Interpretation	27
8	Zusammenfassung	29

1 Einführung und Fragestellungen der Untersuchungen

Mit refraktionsseismischen Messungen sollen in diesen Untersuchungen die geologischen Schichten des Messgebiets genauer untersucht werden. Auf Grund des Baches und der Fischteiche im Tal des Messgebiets wird außerdem Grundwasser in geringer Tiefe vermutet. Es soll mit den durchgeführten Messungen untersucht werden, ob die Tiefe des Grundwasserspiegels mit der Refraktionsseismik bestimmt werden kann. Denn Grundwasser führt zu einer Erhöhung der p-Wellen Geschwindigkeit. Falls dies möglich ist wird weiter untersucht, ob der Grundwasserspiegel geneigt ist. Dazu wurden Seimikprofile parallel zu Bach im Tal und senkrecht zum Bach, den Hang hinauf gelegt.

2 Theoretische Grundlagen der Refraktionsseismik

Zur Einarbeitung in die Theorie der Refraktionsseismik dient das Skript zur Geländeübung (Forbriger et al.)

2.1 Seismik und seismische Wellentypen

In der Seismik werden künstliche Schwingungen des Untergrundes erzeugt und in unterschiedlichen Abständen zur Quelle wird mit Hilfe von Geophonen die Bodenbewegung beobachtet. Daraus kann auf die Ausbreitungsgeschwindigkeiten von seismischen Wellen im Untergrund geschlossen werden. Dabei gibt es verschiedene Wellentypen. Die vier wichtigsten sind die p-Wellen, die s-Wellen, die Love-Wellen und die Rayleigh-Wellen. Sowohl p- also auch s-Wellen sind Raumwellen. Bei der p-Welle erfolgt die Partikelbewegung parallel zur Ausbreitungsrichtung, das heißt es handelt sich um eine Kompressionswelle. Die s-Welle ist eine Transversalwelle. Die Partikel bewegen sich senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. Love- und Rayleigh-Wellen sind Oberflächenwellen. Bei der Love-Welle handelt es sich um eine Transversalwelle, bei der Rayleigh-Welle führen die Partikel elliptische Bewegungen an der Erdoberfläche aus.

Da in der Refraktionsseismik nur die Ersteinsätze an den Geophonen betrachtet werden ist nur die p-Welle relevant, denn sie hat die größte Ausbreitungsgeschwindigkeit:

$$v_p = \sqrt{\frac{\kappa + \frac{4\mu}{3}}{\rho}} \quad (1)$$

wobei κ das Volumenkompressionsmodul, μ das Schermodul und ρ die Dichte des Mediums ist. Diese drei Größen sind die eigentlichen Materialeigenschaften, die in der Seismik untersucht werden. Da die Bestimmung dieser aber immer unterbestimmt ist, werden oft die Wellengeschwindigkeiten als Materialparameter angesehen.

2.2 Das Snelliussche Brechungsgesetz und Refraktierte Wellen

Trifft eine seismische Welle auf eine Grenzfläche so wird sie sowohl reflektiert als auch gebrochen. Die Brechung erfolgt nach dem snelliusschen Brechungsgesetz:

$$v_2 \sin(\theta_1) = v_1 \sin(\theta_2) \quad (2)$$

Dabei ist v_1 die Ausbreitungsgeschwindigkeit vor der Grenzfläche, θ_1 der Einfallswinkel gemessen zum Lot, v_2 die Ausbreitungsgeschwindigkeit nach der Grenzfläche und θ_2 der Ausfallswinkel gemessen zum Lot.

Falls $v_2 > v_1$ so ist auch $\theta_2 > \theta_1$. In diesem Fall kann θ_1 so lange vergrößert werden, bis $\theta_2 = 90^\circ$. Dann bezeichnet man θ_1 als kritischen Winkel θ_k . Mit 2 folgt:

$$\sin(\theta_k) = \frac{v_1}{v_2} \quad (3)$$

Tritt eine Welle im kritischen Winkel auf die Grenzfläche, so läuft diese mit Geschwindigkeit v_2 and der Grenzfläche entlang und strahlt ebenfalls im kritischen Winkel Wellen nach oben ab.

2.3 Auswertung von Laufzeitdiagrammen

In einem Laufzeitdiagramm wird für jedes Geophon der Zeitpunkt des Ersteinsatzes über seinem Offset, das heißt seiner Entfernung zur Quelle aufgetragen. Der Ersteinsatz ist der Zeitpunkt zu dem das Seismogramm des Geophons die Nulllage zum ersten Mal verlässt. An den ersten Geophonen wird der Ersteinsatz von der direkten Welle gebildet, das heißt von der die auf direktem Weg durch die oberste Schicht vom Quellpunkt zum Geophon läuft. Später wird diese von den refraktierten Wellen überholt. Wie die Laufzeitdiagramme genau aussehen und wie daraus Schichtmächtigkeiten und Schichtgeschwindigkeiten berechnet werden können wird im Folgenden für den Fall von drei Schichten über dem Halbraum erläutert.

Das Laufzeitdiagramm und die zugehörigen Wellenwege für drei Schichten über dem Halbraum sind in Abbildung 1 dargestellt. Das Laufzeitdiagramm besteht aus vier Geraden, die von der direkten Welle, der an der ersten Schichtgrenze refraktierten

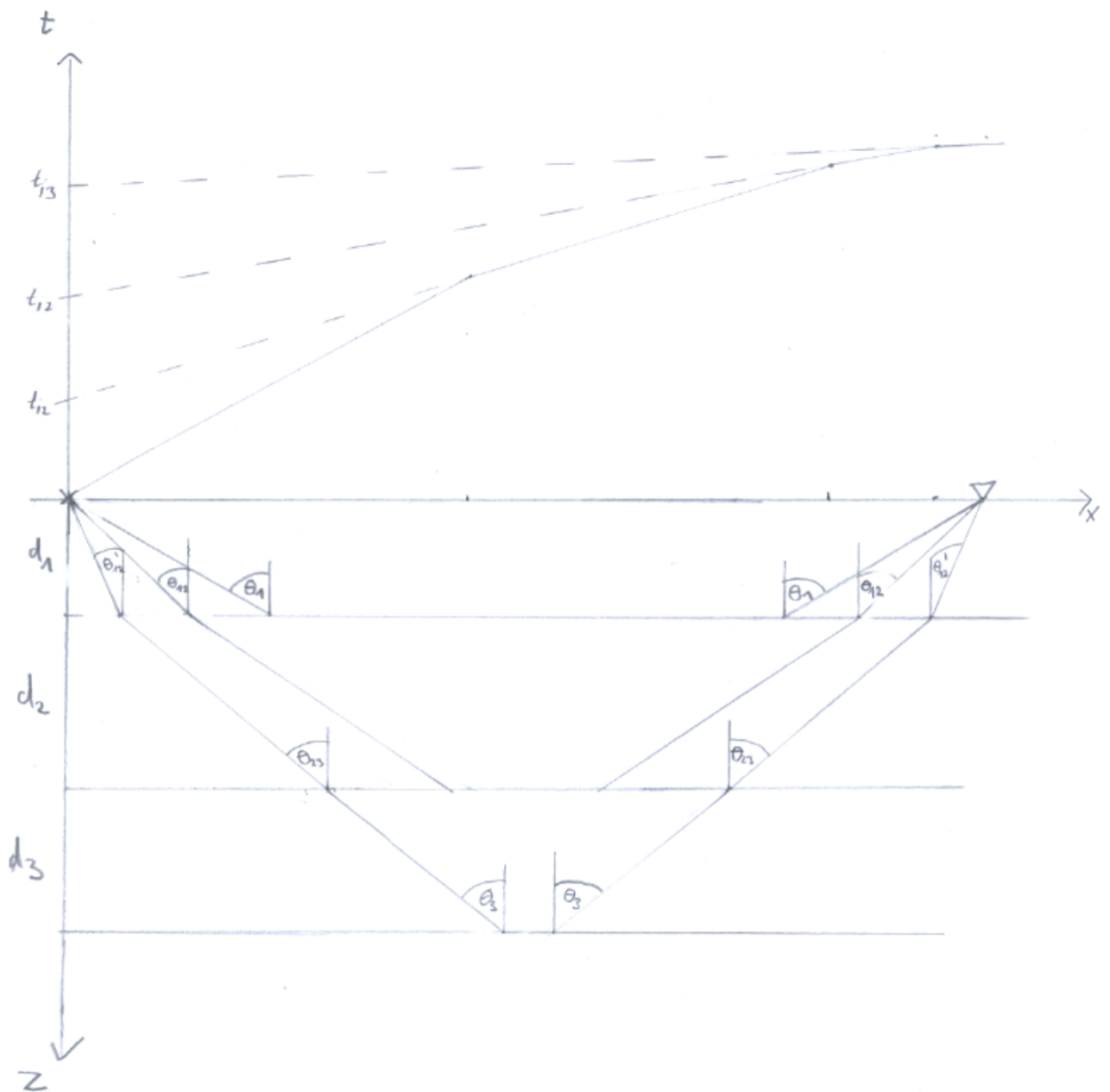


Abbildung 1: **3 Schichten über dem Halbraum.** Die Abbildung zeigt den Strahlenverlauf im Falle von 4 Schichten mit dem entsprechenden Laufzeitdiagramm.

Welle, der an der zweiten Schicht refraktierten Welle und der an der dritten Schichtgrenze refraktierten Welle erzeugt werden. Ihre Steigungen sind $\frac{1}{v_1}$, $\frac{1}{v_2}$, $\frac{1}{v_3}$ und $\frac{1}{v_4}$, wobei v_1 die Geschwindigkeit der ersten Schicht, v_2 die der zweiten Schicht, v_3 die der dritten Schicht und v_4 die Geschwindigkeit im Halbraum mit. Die Gerade der direkten Welle geht durch den Ursprung. Die Geraden der drei refraktierten Wellen haben die y-Achsenabschnitte t_{i2} , t_{i3} und t_{i4} , welche Interceptzeiten genannt werden. Sie hängen wie folgt mit den Schichtmächtigkeiten d_i zusammen:

$$t_{i2} = \frac{2d_1 \cos(\theta_1)}{v_1} \quad (4)$$

$$t_{i3} = \frac{2d_1 \cos(\theta_{12})}{v_1} + \frac{2d_2 \cos(\theta_2)}{v_2} \quad (5)$$

$$t_{i4} = \frac{2d_1 \cos(\theta_{12'})}{v_1} + \frac{2d_2 \cos(\theta_{23})}{v_2} + \frac{2d_3 \cos(\theta_3)}{v_3} \quad (6)$$

$$(7)$$

Die Winkel θ_1 , θ_{12} , θ_2 , $\theta_{12'}$, θ_{23} und θ_3 sind in Abbildung 1 eingetragen. θ_1 , θ_2 und θ_3 sind die kritischen Winkel daher gilt:

$$\sin(\theta_1) = \frac{v_1}{v_2} \quad (8)$$

$$\sin(\theta_2) = \frac{v_2}{v_3} \quad (9)$$

$$\sin(\theta_3) = \frac{v_3}{v_4} \quad (10)$$

$$(11)$$

θ_{12} , $\theta_{12'}$ und θ_{23} können durch Anwenden von Formel 2 ausgedrückt werden durch:

$$\sin(\theta_{12}) = \frac{v_1}{v_2} \sin(\theta_2) = \frac{v_1}{v_3} \quad (12)$$

$$\sin(\theta_{23}) = \frac{v_2}{v_3} \sin(\theta_3) = \frac{v_2}{v_4} \quad (13)$$

$$\sin(\theta_{12'}) = \frac{v_1}{v_2} \sin(\theta_2) = \frac{v_1}{v_3} \quad (14)$$

$$(15)$$

Auflösen der Formeln 4, 5 und 6 nach den Schichtmächtigkeiten ergibt:

$$d_1 = \frac{v_1 t_2}{2 \cos(\theta_1)} \quad (16)$$

$$d_2 = \frac{(v_1 t_3 - 2d_1 \cos(\theta_{12}))v_2}{2v_1 \cos(\theta_2)} \quad (17)$$

$$d_3 = \frac{(v_1 v_2 t_4 - 2v_2 d_1 \cos(\theta_{12'}) - 2v_1 d_2 \cos(\theta_{23}))v_3}{2v_1 v_2 \cos(\theta_3)} \quad (18)$$

Im Falle von zwei Schichten über dem Halbraum kann genauso vorgegangen werden. Es gibt dann nur 3 Geraden im Laufzeitdiagramm. v_1 , v_2 , v_3 , d_1 und d_2 berechnen sich wie oben.

Um zu Testen, ob es sich wirklich um eine ebene Schichtung handelt, werden immer ein Hin- und ein Rückschuss durchgeführt. Das heißt der Quellpunkt wird nacheinander an beide Enden des Profils gelegt. Im Falle von ebener Schichtung ist das Laufzeitdiagramm des Rückschusses, das gespiegelte Laufzeitdiagramm des Hinschusses. Ist dies nicht der Fall so muss von geneigten Schichten ausgegangen werden. Die Geraden einer refraktierten Welle haben dann in den Laufzeitdiagrammen des Hin- und des Rückschusses verschiedene Steigungen $\frac{1}{v_b^+}$ und $\frac{1}{v_b^-}$, da der Abstand zwischen Schichtgrenze und Oberfläche nicht mehr konstant ist. Die Neigung einer Schichtgrenze α kann dann berechnet werden mit

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{v_a}{v_b^-}\right) - \arcsin\left(\frac{v_a}{v_b^+}\right) \quad (19)$$

Dabei ist v_b die Geschwindigkeit in der über der Schichtgrenze liegenden Schicht.

2.4 Stapelung

Um das Signal-Rausch-Verhältnis zu verbessern wird in diesem Versuch Stapelung verwendet, wenn der Hammer als Quelle dient. Das bedeutet es wird mehrfach geschlagen und die Bodenbewegung durch die Geophone aufgezeichnet. Die einzelnen Seismogramme eines Geophons werden später addiert. So können Rauscheffekte raus gemittelt werden.

2.5 Verwendete Geräte

In diesem Versuch dienen ein Hammer und Sissy als Quellen. Sissy ist eine Verpuffungsquelle. Die Aufzeichnung der Bodenschwinggeschwindigkeit erfolgt durch Geophone. Diese Bestehen aus einer Spule und einem Magneten. Die Spule ist mit dem Gehäuse fest verbunden. Der Magnet kann sich relativ zum Gehäuse und zur Spule bewegen. Das Geophon steckt in der Erde. Bewegt sich der Boden so bewegt sich der Magnet relativ zur Spule und in der Spule wird eine Spannung erzeugt. Diese wird gemessen, sie ist proportional zur Bodenschwinggeschwindigkeit.

3 Durchführung der Messungen

Die Durchführung der Messungen fand in Zusammenarbeit mit Ramon ... und Jonas Müller statt.

3.1 Profil S3S1 parallel zum Bach

Das Profil parallel zum Hang hat eine Länge von 80 m. Die Anfangs- und Endpunkte S3 und S1 sind in der Karte eingezeichnet. Sie sollen später als Schusspunkte verwendet werden. Alle folgenden Ortsangaben beziehen sich auf die 0-Koordinate bei S4.

Geophone werden wie folgt gesteckt: Das erste Geophon steckt bei 0,5 m, es folgen Abstände von einem Meter. Ab dem Geophon bei 5 m werden die Abstände auf 1 m vergrößert. Ab dem Geophon bei 10 m bis zum Geophon bei 70 m betragen die Abstände 2 m. Danach bis zum Geophon bei 75 m sind die Abstände 1 m groß. Es folgen 0,5 m Abstände. Das letzte Geophons steckt bei 79,5 m. Diese Anordnung ist im Messprotokoll (Anlage ?) graphisch dargestellt. In der Nähe der Schusspunkte wurde der Geophonabstand geringer gewählt als in der Mitte, damit auch bei geringer Schichtdicke in Oberflächennähe jede an den Schichtgrenzen refraktierte Welle an mindestens zwei Geophonen den Ersteinsatz bildet. Dies muss auch und insbesondere für die direkte Welle gelten.

Über Kabel werden jeweils 24 Geophone an an eine Geode angeschlossen, diese wandeln die analogen Spannungssignale der Geophone in digitale Signale um. Die Geoden werden untereinander verbunden, eine wird als Basisstation benutzt und ist mit einem Computer verbunden. Auf diesem werden alle Seismogramme, die später aufgezeichnet werden gespeichert. Alle Geoden werden über Batterien mit Strom versorgt. Zunächst wird ein Vorschlaghammer als Quelle benutzt, an welchem ein Trigger montiert ist, der über ein Kabel mit einer Geode verbunden ist. Beim Schlag mit dem Hammer fangen so die Geoden an, die Signale der Geophone aufzuzeichnen. Der erste Schusspunkt liegt bei 0 m. Zur besseren Übertragung des Hammerschlags auf den Boden liegt am Schusspunkt eine Metallplatte. Sie soll verhindern, dass die Energie des Hammerschlags in Verformung des Bodens übergeht, anstatt Un-

tergrundwellen anzuregen. Es wird 10 mal geschlagen und jeweils die Signale der Geophone aufgezeichnet. Die 10 Seismogramme jedes Geophons werden gestapelt und später ausgewertet. Bei -2 m wird mit Sissy in 65 cm Tiefe eine Verpuffung ausgelöst. Wieder ist ein Trigger so angeschlossen, dass dieser ein Aufzeichnen der Geophon-Signale im Moment der Verpuffung auslöst. Die Rückschüsse werden durchgeführt. Dazu wird bei 80 m 10 mal mit dem Hammer geschlagen und bei 82 eine Verpuffung mit Sissy ausgeführt. Allerdings löst der Trigger bei dieser Verpuffung mit Sissy nicht aus und die Verpuffung wird nicht wiederholt. Somit sind keine Daten vom Rückschuss mit Sissy vorhanden.

3.2 Profil S4S2 senkrecht zum Bach

Das zweite Profil liegt senkrecht zum Bach und verläuft zwischen Punkt S4 und S2 (siehe Karte). Alle Ortsangaben beziehen sich auf die 0-Koordinate bei S4. Die Geophone werden wie folgt gesteckt: Das erste Geophon steckt bei 0,5 m, das letzte bei 39,5 m. Zwischen 05, m und 4 m und zwischen 36 m und 39,5 m sind die Abstände 0,5 m groß, ansonsten 1 m. Wie beim ersten Profil werden die Geophone an diesmal nur 2 Geoden angeschlossen, die Geoden miteinander verbunden, der Trigger des Hammers an eine Geode angeschlossen und eine Geode, die als Basisstation dient mit einem Computer verbunden. Zunächst wird bei 20 m 10-mal mit dem Hammer geschlagen. Der Rückschuss wird bei 0 m durchgeführt auch hier wird 10-mal mit dem Hammer geschlagen.

4 Messwerte

In Anhang? finden sich alle Seismogramme der Messungen und der Mitschrieb vom Messtag.

5 Auswertung der Messungen und physikalische Interpretation

Die Auswertung fand in Zusammenarbeit mit Ramon... und Jonas Müller statt.

Da nur für die Hammerschläge an den Profilen jeweils eine Hin- und eine Rückschussmessung vorliegen, können nur diese sinnvoll ausgewertet werden. Das Seismogramm vom Hinschuss mit Sissy auf dem Profil parallel zum Hang, wird nicht komplett ausgewertet sondern nur später mit dem Hinschuss des Hammerschlags auf dem gleichen Profil verglichen.

5.1 Profil S3S1

5.1.1 Auswertung der Hammerschlagmessungen

Zur Auswertung von Profil S3S1 werden in den Seismogrammen von Hin- und Rückschuss die Ersteinsätze gepickt und die Laufzeiten abgelesen. Die Ergebnisse sind in den Tabellen 4 und 2 zu finden.

Die Ergebnisse werden geplottet. In Abbildung 2 sind die Graphen zu sehen. Um zu entscheiden, ob es sich um ebene oder um geneigte Schichtung handelt werden in Abbildung 3 der Hinschuss und der gespiegelte Rückschuss zusammen dargestellt. Außerhalb des Bereiches zwischen 12 m und 15 m passen die Graphen sehr gut zusammen. Aber auch im Bereich zwischen 12 m und 15 m sind die Steigung der Graphen fast identisch, die Laufzeitkurve des Rückschusses ist nur im Vergleich zu der des Hinschusses nach oben verschoben. Dies kann nicht an einer Schichtneigung liegen, sondern ist auf Messfehler zurückzuführen, denn eine Neigung würde zu Veränderungen der Steigungen führen. Es wird also von ebener Schichtung ausgegangen. In der Laufzeitkurve des Rückschusses fällt es sehr schwer einzelne Geraden

Tabelle 1: **Ersteinsätze Profil S3S1 Hinschuss**. In der Tabellen sind die gepickten Ersteinsätze des Profils S3S1 vom Hinschuss zu sehen

Offset in m	Laufzeit in s	Offset in m	Laufzeit in s
0,50	0,0017	42,00	0,0330
1,00	0,0028	44,00	0,0341
1,50	0,0057	46,00	0,0358
2,00	0,0080	48,00	0,0369
2,50	0,0097	50,00	0,0386
3,00	0,0108	52,00	0,0386
3,50	0,0114	54,00	0,0386
4,00	0,0119	56,00	0,0389
4,50	0,0125	58,00	0,0386
5,00	0,0136	60,00	0,0392
6,00	0,0142	62,00	0,0398
7,00	0,0159	64,00	0,0403
8,00	0,0168	66,00	0,0412
9,00	0,0179	68,00	0,0420
10,00	0,0187	70,00	0,0423
12,00	0,0193	71,00	0,0426
14,00	0,0207	72,00	0,0435
16,00	0,0210	73,00	0,0443
18,00	0,0219	74,00	0,0443
20,00	0,0227	75,00	0,0446
22,00	0,0239	75,50	0,0449
24,00	0,0250	76,00	0,0446
26,00	0,0261	76,50	0,0446
28,00	0,0273	77,00	0,0449
30,00	0,0276	77,50	0,0449
32,00	0,0284	78,00	0,0449
34,00	0,0295	78,50	0,0455
36,00	0,0301	79,00	0,0455
38,00	0,0312	79,50	0,0457
40,00	0,0315		

Tabelle 2: **Ersteinsätze Profil S3S1 Rückschuss.** In der Tabellen sind die gepickten Ersteinsätze des Profils S3S1 vom Rückschuss zu sehen

Offset in m	Laufzeit in s	Offset in m	Laufzeit in s
0,50	0,0452	42,00	0,0338
1,00	0,0452	44,00	0,0335
1,50	0,0452	46,00	0,0330
2,00	0,0452	48,00	0,0324
2,50	0,0452	50,00	0,0307
3,00	0,0452	52,00	0,0295
3,50	0,0452	54,00	0,0284
4,00	0,0452	56,00	0,0276
4,50	0,0449	58,00	0,0267
5,00	0,0446	60,00	0,0256
6,00	0,0440	62,00	0,0244
7,00	0,0437	64,00	0,0233
8,00	0,0432	66,00	0,0222
9,00	0,0423	68,00	0,0207
10,00	0,0420	70,00	0,0187
12,00	0,0415	71,00	0,0176
14,00	0,0418	72,00	0,0162
16,00	0,0406	73,00	0,0148
18,00	0,0398	74,00	0,0125
20,00	0,0392	75,00	0,0116
22,00	0,0386	75,50	0,0114
24,00	0,0386	76,00	0,0108
26,00	0,0384	76,50	0,0097
28,00	0,0378	77,00	0,0091
30,00	0,0372	77,50	0,0077
32,00	0,0369	78,00	0,0063
34,00	0,0361	78,50	0,0048
36,00	0,0358	79,00	0,0031
38,00	0,0349	79,50	0,0017
40,00	0,0344		

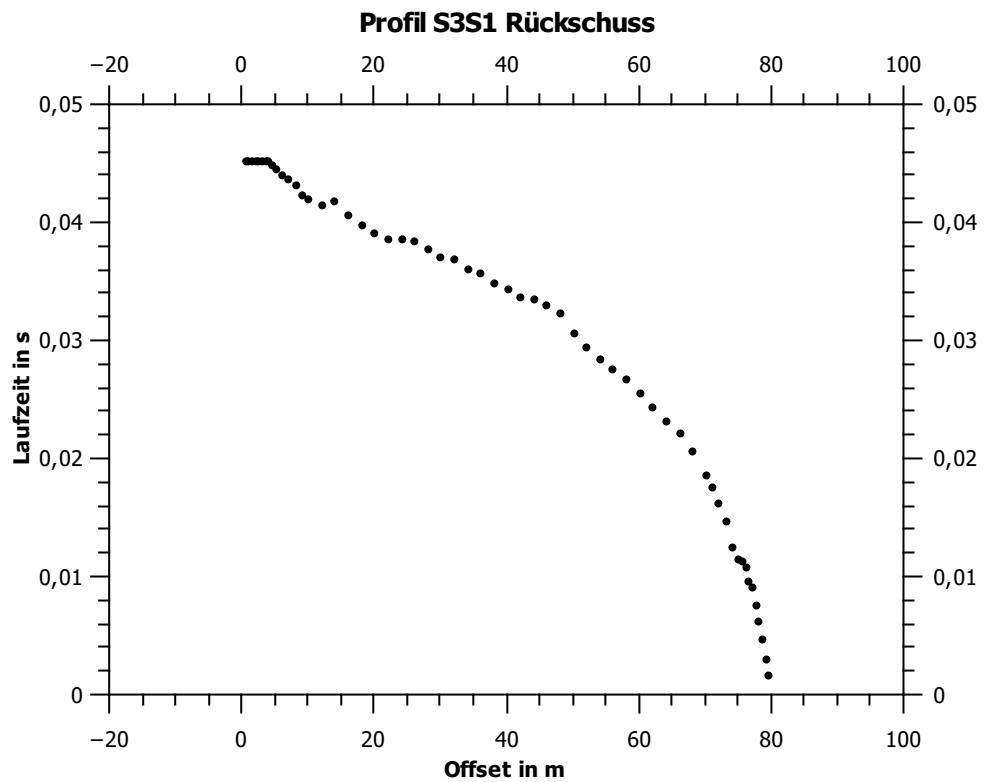
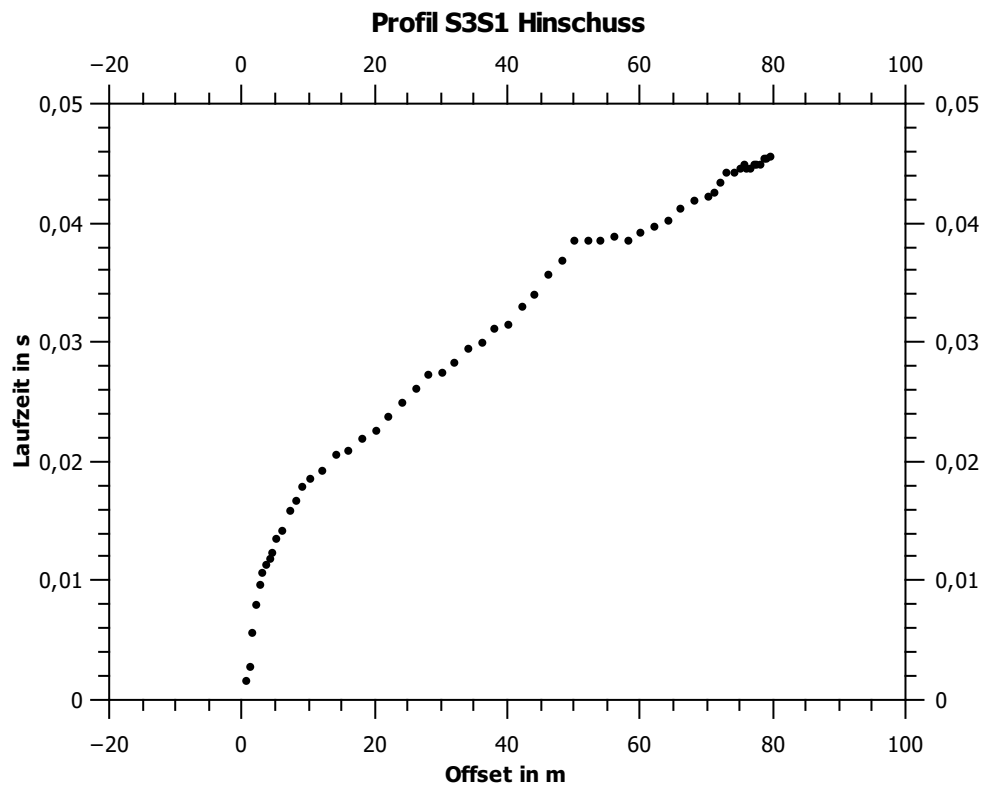


Abbildung 2: **Profil1**. Die Abbildung zeigt die Laufzeitdiagramme von Profil S3S1 für Hin-und Rückschuss.

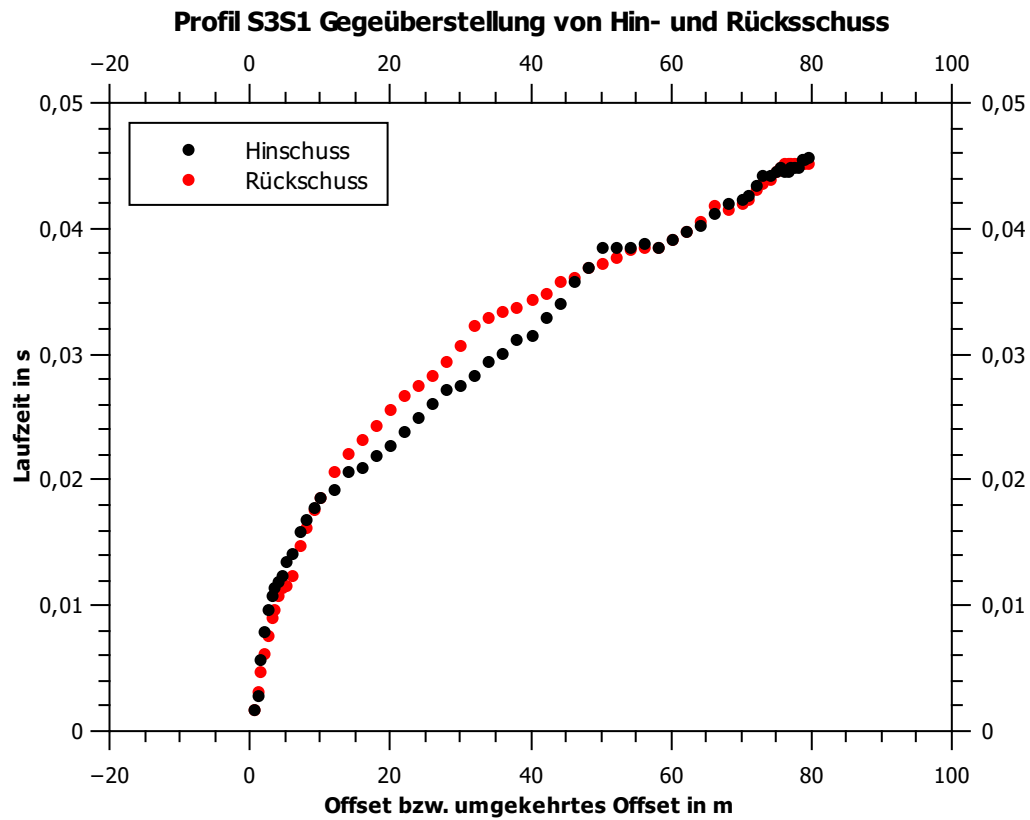


Abbildung 3: **Vergleich von Hin- und Rücksschuss Profil S3S1.** In der Abbildung sind die Laufzeitkurven der Hin- und Rücksschusses von Profil S3S1 übereinandergelegt, um zu entscheiden, ob es sich um ebene oder geneigte Schichtung handelt. Dafür wurde der Rücksschuss gespiegelt.

Tabelle 3: **Auswertung Profil S3S1.** Die Tabelle zeigt abgelesene Schichtgeschwindigkeiten v , abgelesene Interceptzeiten t_i und daraus berechnete Winkel $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_{12}, \theta_{12'}, \theta_{23}$ und die Schichtmächtigkeiten d .

Schicht	v in $\frac{m}{s}$	t_i in s	d in m	θ_1	θ_2	θ_{12}	θ_3	$\theta_{12'}$	θ_{23}
1	241	0,00000	0,97	0,319	0,402	0,123	0,498	0,059	0,188
2	769	0,00767	2,22						
3	1966	0,01333	12,97						
4	4114	0,02533							

auszumachen, da diese eher wie eine gekrümmte Kurve aussieht, was auf Messungenauigkeiten zurückzuführen ist. Da für ein Modell ebener Schichtung die Steigungen und Interceptzeiten für Hin- und Rückschuss identisch sein sollten, werden daher diese nur für den Hinschuss bestimmt. Das Legen der Geraden erfolgt auf Millimeterpapier und ist in Anhang ? zu sehen. Abgelesene Kehrwerte der Steigungen, also die Schichtgeschwindigkeiten, und die abgelesenen Interceptzeiten sind in Tabelle 3 dargestellt. Dort werden auch $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_{12}, \theta_{12'}, \theta_{23}$ mit Formeln und daraus die Schichtmächtigkeiten d_i mit Formeln bestimmt.

Durch sinnvolles Runden im Rahmen der in Abschnitt 6 diskutierten Fehler ergibt sich also folgendes Model von 3 Schichten über dem Halbraum mit den p-Wellengeschwindigkeiten $240 \frac{m}{s}$ in Schicht 1, $780 \frac{m}{s}$ in Schicht 2, $1970 \frac{m}{s}$ ins Schicht 3 und $4110 \frac{m}{s}$ im Halbraum. Die Schichtmächtigkeiten betragen 1,0 m für Schicht 1, 2,2 m für Schicht 2 und 13,0 m für Schicht 3.

5.1.2 Vergleich der Sissy-Messung mit der Hammerschlagmessung

Wie beschrieben, kann die Sissy-Messung nicht sinnvoll ausgewertet werden, da kein Rückschuss vorhanden ist. Es werden daher hier auf Profil S3S1 das Seismogramm des Hinschusses mit Hammerschlag mit dem der Messung mit Sissy verglichen. Es fällt auf, dass sich die Seismogramme ab dem fünften Geophon nahezu gleichen. An den ersten vier Geophonen sind die Ersteinsätze des Hammerschlags früher als die

mit Sissy. Auch ist es für die Messung mit Sissy nicht möglich, die erste Gerade durch den Nullpunkt zu legen. Das liegt daran, dass die Quelle in der Messung mit Sissy nicht an der Erdoberfläche liegt und die direkte Welle somit nicht zum Zeitpunkt $t = 0$ am Offset 0 ankommt. Da die Steigung einer Ausgleichsgeraden durch die Ersteinsätze von Sissy von Anfang an nahezu die Steigung der ersten Refraktierten der Hammerschlagmessung entspricht, kann davon ausgegangen werden, dass mit Sissy keine direkte Welle gemessen wird. Mit Sissy werden keine tieferen Schichtgrenzen gesehen als mit dem Hammerschlag.

5.2 Profil S4S2

Die Ersteinsätze für Hin- und Rückschuss werden gepickt. Beim Rückschuss ist der Ersteinsatz bei 0,5 m sehr uneindeutig und wird daher nicht gepickt.

Die Ersteinsätze werden über dem Offset geplottet, die Graphen sind in Abbildung 4 zu sehen. In beiden Profilen können die Laufzeitkurven gut durch drei Ausgleichsgeraden beschrieben werden.

Die Steigungen und die y-Achsenabschnitte der Geraden werden mit dem Programm Qti-Plott ermittelt. Für den Hinschuss entsprechen die Steigungen direkt den inversen Geschwindigkeiten $\frac{1}{v}$ und y-Achsenabschnitte den Interceptzeiten t_i . Für den Rückschuss sind die Steigungen die negativen inversen Geschwindigkeiten $-\frac{1}{v}$ und die Interceptzeiten lassen sich mit der Geradengleichung

$$t(x) = -\frac{1}{v} \cdot x + b \quad (20)$$

berechnen, wenn für x 40 m eingesetzt werden. Die bestimmten Geschwindigkeiten und Interceptzeiten sind in Tabelle 6 dargestellt.

Der große Geschwindigkeitsunterschied zwischen Hin- und Rückschuss in der dritten Schicht könnte einen Hinweis darauf geben, dass die Schichtgrenze zwischen der zweiten und der dritten Schicht geneigt ist. Der sich ergebende Neigungswinkel wird

Tabelle 4: **Ersteinsätze Profil S4S2 Hinschuss.** In der Tabellen sind die gepickten Ersteinsätze des Profils S4S2 vom Hinschuss zu sehen.

Offset in m	Laufzeit in s	Offset in m	Laufzeit in s
0,50	0,0000	21,00	0,0280
1,00	0,0013	22,00	0,0285
1,50	0,0027	23,00	0,0291
2,00	0,0070	24,00	0,0291
2,50	0,0092	25,00	0,0296
3,00	0,0110	26,00	0,0304
3,50	0,0129	27,00	0,0310
4,00	0,0143	28,00	0,0312
5,00	0,0148	29,00	0,0320
6,00	0,0170	30,00	0,0328
7,00	0,0175	31,00	0,0334
8,00	0,0205	32,00	0,0337
9,00	0,0234	33,00	0,0342
10,00	0,0245	34,00	0,0350
11,00	0,0248	35,00	0,0358
12,00	0,0256	36,00	0,0366
13,00	0,0258	36,50	0,0366
14,00	0,0258	37,00	0,0369
15,00	0,0264	37,50	0,0372
16,00	0,0264	38,00	0,0366
17,00	0,0267	38,50	0,0372
18,00	0,0272	39,00	0,0374
19,00	0,0272	39,50	0,0377
20,00	0,0275		

Tabelle 5: **Ersteinsätze Profil S4S2 Rückschuss.** In der Tabellen sind die gepickten Ersteinsätze des Profils S4S2 vom Rückschuss zu sehen.

Offset in m	Laufzeit in s	Offset in m	Laufzeit in s
1,00	0,0388	21,00	0,0275
1,50	0,0385	22,00	0,0275
2,00	0,0382	23,00	0,0267
2,50	0,0380	24,00	0,0258
3,00	0,0380	25,00	0,0250
3,50	0,0377	26,00	0,0248
4,00	0,0374	27,00	0,0240
5,00	0,0366	28,00	0,0234
6,00	0,0361	29,00	0,0226
7,00	0,0358	30,00	0,0215
8,00	0,0350	31,00	0,0199
9,00	0,0345	32,00	0,0180
10,00	0,0339	33,00	0,0162
11,00	0,0337	34,00	0,0151
12,00	0,0334	35,00	0,0127
13,00	0,0320	36,00	0,0110
14,00	0,0315	36,50	0,0100
15,00	0,0307	37,00	0,0089
16,00	0,0304	37,50	0,0073
17,00	0,0302	38,00	0,0054
18,00	0,0291	38,50	0,0038
19,00	0,0283	39,00	0,0022
20,00	0,0275	39,50	0,0008

Tabelle 6: **Profil S4S2: Geschwindigkeiten und Interceptzeiten.** Die Tabelle zeigt ermittelten inversen Geschwindigkeiten $\frac{1}{v}$ und Interceptzeiten t_i für Hin- und Rückschuss. Daraus werden die Geschwindigkeiten v berechnet. Für den Rückschuss wird die Interceptzeit aus dem y-Achsenabschnitt b bestimmt.

Hinschuss				Rückschuss				
Schicht	$\frac{1}{v}$	v	t_i	Schicht	$\frac{1}{v}$	v	b	t_i
	in $\frac{s}{m}$	in $\frac{m}{s}$	in s		in $\frac{s}{m}$	in $\frac{m}{s}$	in s	in s
1	0,003446	290		1	0,003277	305		
2	0,001797	557	0,0063	2	0,001844	542	0,0771	0,0034
3	0,000469	2134	0,0189	3	0,000576	1737	0,0396	0,0166

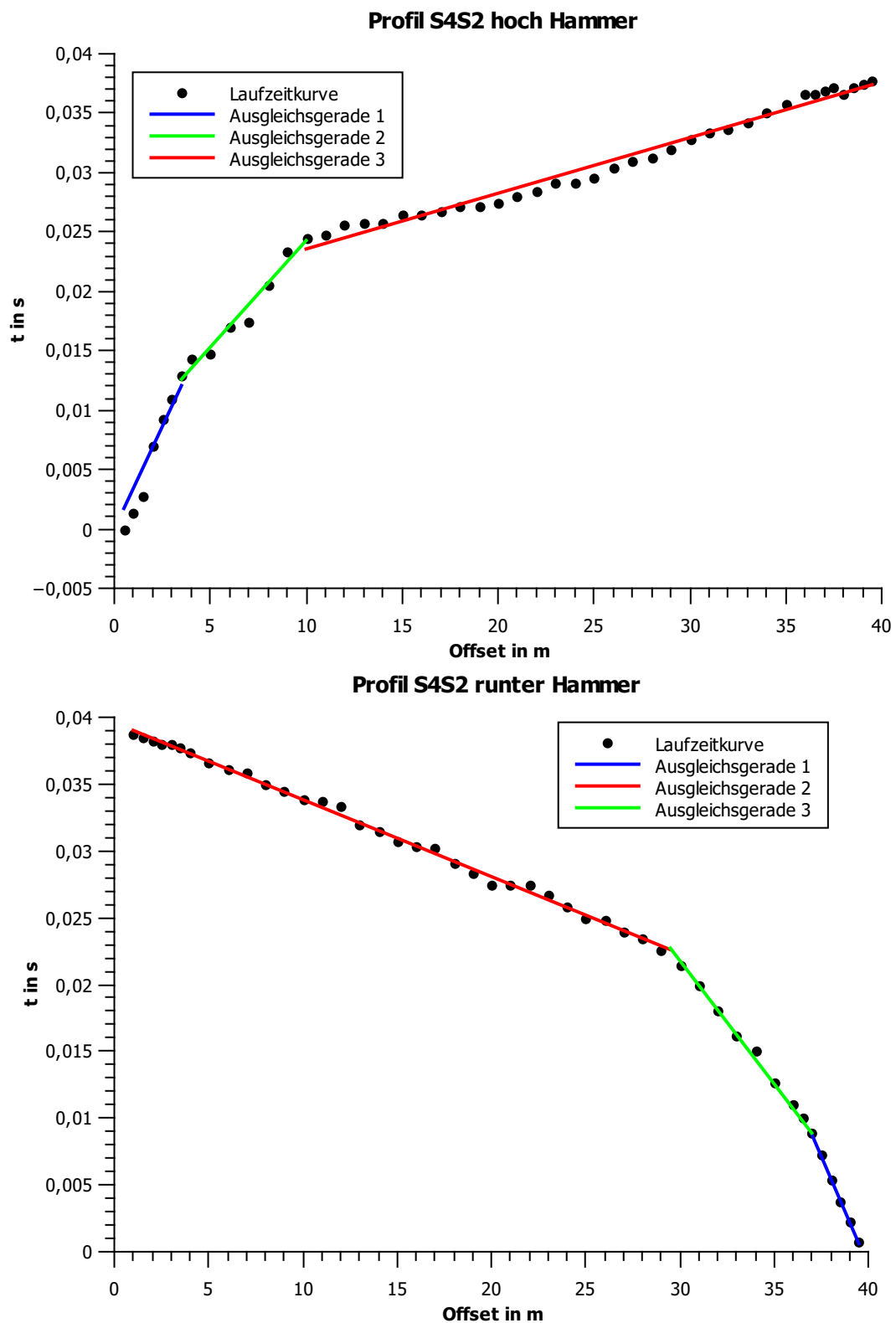


Abbildung 4: **Profil S4S2**. Die Abbildung zeigt die Laufzeitdiagramme von Profil S4S2 für Hin-und Rückschuss.

mit Formel 19 berechnet:

$$\begin{aligned}
\alpha &= \frac{1}{2} \left(\arcsin \left(\frac{v_2}{v_3^-} \right) - \arcsin \left(\frac{v_2}{v_3^+} \right) \right) \\
&= \frac{1}{2} \left(\arcsin \left(\frac{550 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{1737 \frac{\text{m}}{\text{s}}} \right) - \arcsin \left(\frac{550 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{2134 \frac{\text{m}}{\text{s}}} \right) \right) \\
&= 1,8^\circ
\end{aligned}$$

Dies ist keine signifikante Neigung im Bezug auf die Messungenauigkeiten. Daher ist der Schluss auf Schichtneigung falsch. Es kann von ebener Schichtung ausgegangen werden.

Aus den Geschwindigkeiten v und den Intercepzeiten t_i werden für Hin- und Rückschuss jeweils die Winkel θ_1 , θ_2 , θ_{12} und die Schichtmächtigkeiten d berechnet. Dies ist Tabelle 7 dargestellt.

Zuletzt werden die Geschwindigkeiten und Schichtmächtigkeiten für Hin- und Rückschuss gemittelt und im Rahmen der in Abschnitt 6 diskutierten Messungenauigkeiten gemittelt. Es ergibt sich folgendes Modell mit 2 Schichten über dem Halbraum: Die p-Wellen-Geschwindigkeiten betragen $300 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ in der ersten Schicht, $500 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ in der zweiten Schicht und $1940 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ im Halbraum. Die erste Schicht hat eine Mächtigkeit von 0,9 m, die zweite eine von 3,5 m.

5.3 Vergleich Profil S3S1 und Profil S4S2

Da in beiden Profilen die Auswertung eine ebene Schichtung ergibt und beide Profile durch den Schnittpunkt der beiden gehen, sollten die Modelle gleiche Tiefen für die ersten beiden Schichtgrenzen und gleichen Geschwindigkeiten für die ersten drei Schichten ergeben. Das dies nur mit einer Genauigkeit von ungefähr 1 m für die Tiefe und fast $300 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ für die Geschwindigkeiten der Fall ist, liegt an den in Abschnitt 6 diskutierten Fehlerquellen von Messung und Auswertung. Für ein abschließendes Modell für den Untergrund unter beiden Messprofilen werden die Werte daher noch einmal gemittelt. Es ergeben sich für die p-Wellen-Geschwindigkeiten $270 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ in der ersten Schicht, $640 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ in der zweiten Schicht und $1950 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ in der dritten Schicht. Für

Tabelle 7: **Auswertung Profil S4S2.** Die Tabelle zeigt ermittelten Geschwindigkeiten v und Interceptzeiten t_i . Daraus werden die Winkel θ_1 , θ_2 , θ_{12} und die Schichtmächtigkeiten d berechnet.

Hinschuss

Schicht	v in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$	t_i in s	d in m	θ_1	θ_2	θ_{12}
1	290		1,07	0,544	0,266	0,137
2	557	0,0063	3,36			
3	2134	0,0189				

Rückschuss

Schicht	v in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$	t_i in s	d in m	θ_1	θ_2	θ_{12}
1	305		0,63	0,598	0,317	0,177
2	542	0,0034	3,58			
3	1737	0,0166				

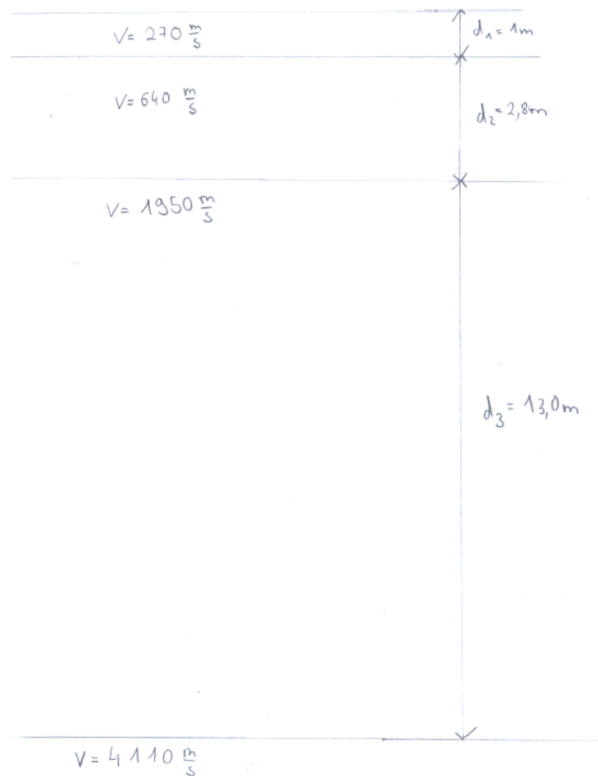


Abbildung 5: **phsikalisches Modell**. Die Abbildung zeigt das physikalische Schichtmodell .

die Mächtigkeiten sind die gemittelten Werte 1 m für die erste Schicht und 2,80 m für die zweite Schicht. Schichtmächtigkeit der dritten Schicht von 13 m und die Geschwindigkeit von $4110\frac{\text{m}}{\text{s}}$ im Halbraum wurden nur mit Profil S4S2 bestimmt und können somit nicht verglichen werden. Das abschließende Modell ist in Abbildung 5 zu sehen. Dieses gilt für beide Profile. Dabei ist zu beachten, dass für Profil S4S2 die Oberkante geneigt ist und die ersten beiden Schichtgrenzen parallel zur Oberfläche verlaufen. Über die Lage der dritten Schicht ist auf diesem Profil nur bekannt, dass s bei Profilkordinate 20 m in 16,8 m liegt.

6 Fehlerbetrachtung

In diesem Abschnitt sollen die Fehler diskutiert werden, die während der Messungen und beim Auswerten gemacht wurden.

6.1 Fehler während der Messungen

Der Fehler während der Messungen mit dem größten Einfluss auf das Endergebnis sind ungenaue Offsetwerte. Sie werden verursacht durch ungenaues Stecken der Geophone und ungenaue Quellposition. Das Maßband nicht immer genau gerade und mit dem 0-Punkt auf S3 beziehungsweise S4 und teilweise befindet sich dort, wo das Geophon gesteckt werden müsste ein Stein, dann wird das Geophon verschoben. Um den zweiten dieser Fehler zu minimieren, wird das Geophon dann senkrecht zum Profil versetzt. Der Hammerschlag trifft nicht genau den theoretischen Quellpunkt. Insgesamt wird die Ungenauigkeit des Offsets auf 5 cm für jedes Geophon geschätzt. Ein weiterer Fehler entsteht, wenn der Trigger nicht genau in dem Moment auslöst in dem der Hammerschlag erfolgt. Die Größe dieses Fehlers ist nicht bekannt. Außerdem können Störquellen im Gelände Rauschen in den Seismogrammen verursachen. Bäume im Messgebiet werden durch Wind in Schwingung versetzt und übertragen diese auf den Boden. Auch eine Autobahn und eine Baustelle, welche sich in der Nähe des Messgebietes befinden können Störquellen bilden. Die Einflüsse dieser werden durch Stapelung minimiert. So ist das Signal-Rauschverhältnis groß genug, um die Ersteinsätze erkennen zu können.

6.2 Fehler während der Auswertung

Die Ersteinsätze können in den Seismogrammen auf 2 mm genau abgelesen werden. Das entspricht 1 ms.

Der größte Fehler entsteht beim Legen der Ausgleichsgeraden. Um diesen abzuschätzen werden für den Hinschuss von Profil S3S1 zwei weitere mögliche Ausgleichsgeraden für die dritte Schicht auf Millimeterpapier gezeichnet (Anlage?). Die Geschwindigkeit der steilsten Gerade liegt bei $1947 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, die der flachste bei $2139 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Der Fehler auf

die Geschwindigkeiten liegt also bei ungefähr $100 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Die Interceptzeit der steilsten Gerade ist 0,0121 s und die der flachsten 0,0142. Der Fehler auf die Interceptzeit liegt damit bei 0,002 s. Das Legen der Geraden verursacht wesentlich größere Fehler als, die genannten Ungenauigkeiten des Offsets und der bestimmten Ersteinsätze. Auch wenn einige Punkte um 0,05 m im Offset oder 0,001 s im Ersteinsatz verschoben werden, kann noch eine der drei Beispiel-Geraden durch die Punkte gelegt werden. Es könnte nun mit Größtfehlerabschätzung der Fehler auf die Mächtigkeitsberechnungen abgeschätzt werden:

$$\delta d = \sum_i \left\| \frac{\partial d}{\partial x_i} \right\| \cdot \delta x_i \quad (21)$$

Dabei sind x_i die fehlerbehafteten Messgrößen und δx_i deren Fehler. Die zu berechnenden Ableitungen werden dabei recht kompliziert, da die Formel für die Mächtigkeiten nicht linear sind und von mindestens drei Messgrößen abhängen. Daher wird dies hier nicht gemacht. Um dennoch eine Größenordnung für die Fehler der Mächtigkeitsberechnungen zu erhalten, wird betrachtet, dass sich Strecken s in der Seismik im Allgemeinen durch

$$s = v \cdot t \quad (22)$$

berechnen. Wird darauf Formel 21 angewandt, so ergibt sich

$$\delta s = \delta v \cdot t + \delta t \cdot v \quad (23)$$

Ausgehend von Geschwindigkeiten im Bereich von $1000 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ mit Fehlern im Bereich von $100 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ und Zeiten in der Größenordnung von 0,01 s und Fehlern in Bereich 0,001 s, liegt der Fehler auf Strecken also im Meter-Bereich. Es ist davon auszugehen, dass die Mächtigkeiten der oberen Schichten genauer bestimmt sind, als die die unteren Schichten. Genauigkeiten von 40 cm für die erste Schicht, 80 cm für die zweite Schicht und 2 m für die dritte Schicht werden angenommen.

Eine weitere Fehlerquelle sind falsche Modellannahmen. Bei der gesamten Auswertung wird angenommen, dass es sich um homogene Schichten mit gradlinigen Schichtgrenzen handelt. Dass ist genau so in der Natur nie erfüllt. Auch in den einzelnen Schichten kommt es zu Inhomogenitäten in der Ausbreitungsgeschwindigkeit und die Schichtgrenzen sind nie exakt gradlinig.

7 Geologische Interpretation

Es soll hier interpretiert werden, um welche Gestein es sich bei den Schichten des physikalischen Modell handelt.

Die erste Schicht ist Vierwitterungsboden, denn dieser wird an der Oberfläche der Messprofile angetroffen. Der Literaturwert für die p-Wellen-Geschwindigkeit in der Vierwitterungszone liegt bei $100 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ bis $500 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ (Knödel et al. 1997). Die die bestimmten Geschwindigkeiten passen gut dazu.

Bereits beim Graben des ungefähr 70 cm tiefen Loches für die Messung mit Sissy wurden Bruchstücke von Juranagelfluh gefunden, daher wird vermutet, dass es sich bei der zweiten Schicht, welche in 1 m Tiefe beginnt um Jurannagelfluh handelt. Dieser ist außerdem auf der geologischen Karte (Anhang ?) im Bereich der Messprofile als Deckschicht eingetragen. Die p-Wellen-Geschwindigkeit kann nicht mit Standardwerten für die p-Wellen-Geschwindigkeit verglichen werden, denn diese gibt es auf Grund der Inhomogenität von Juranagelfluh nicht.

Bei der Schichtgrenze in einer Tiefe von 3,80 m handelt es sich mit großer Wahrscheinlichkeit um den Grundwasserspiegel. Für wassergesättigte Materialien, in diesem Falle Juranagelfluh liegt der Literaturwert der p-Wellen-Geschwindigkeit zwischen $1300 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ und $2000 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ (Knödel et al. 1997). Dies stimmt also gut mit den $1950 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ des Models überein. Schreiner et al. (1997) beschreiben den Juranagelfluh zwischen Mauenheim und Barga als Kalkschluff mit Geröllen. Dabei handelt es sich nicht um ein kompaktes Gestein. Somit ist der Jurannagelfluh als Grundwasserführer geeignet. Zur Frage der Neigung des Grundwasserspiegels lässt sich sagen, dass der Grundwasserspiegel unter dem Berg ansteigt und damit parallel zur Erdoberfläche verläuft.

Es wird vermutet, dass im Halbraum des Models Bankkalke sind. Für diese gibt Berckhemer(1997) eine p-Wellengeschwindigkeit von $3500 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ bis $5500 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ an. Die Geschwindigkeit des Models passt damit mit $4110 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ gut zusammen. Die geologische Karte (Anhang ?) zeigt liegende Bankkalke auf der Hügelkuppe des Messgebiets, außerhalb der Seismikprofile als Deckschicht an, dies ist auch ein Indiz, dass die Kalke unter den Messprofilen zu finden sind. Die Bankkalke bilden den Grundwas-

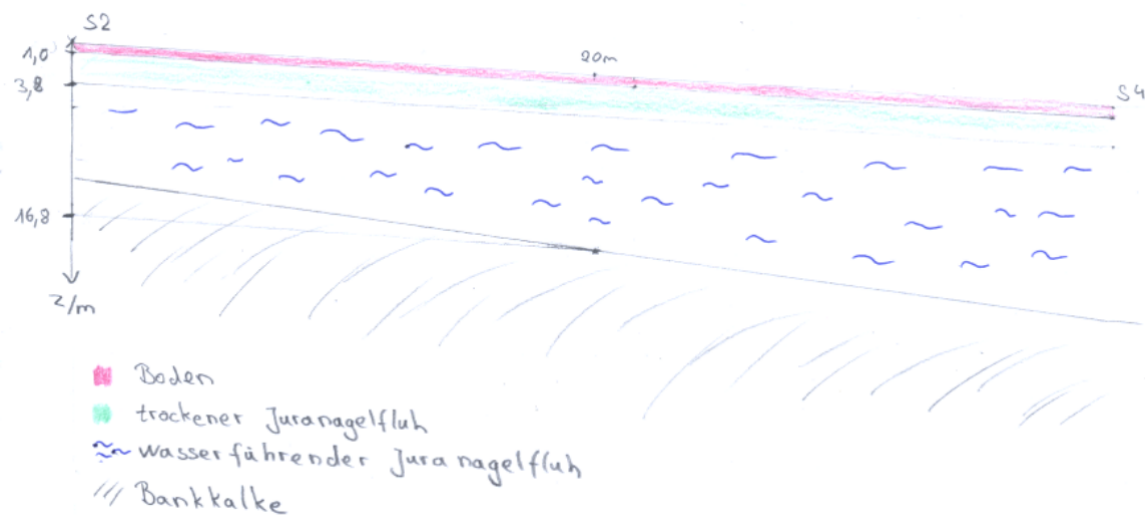


Abbildung 6: **Geologisches Model für Profil S4S2.**

serstauer. In Abbildung 6 ist dieses Model zwischen S4 und S2 skizziert. Die dort eingezeichnete Neigung der Schichtgrenze zwischen wasserführendem Juranagelfluh und den Kalken ist nicht aus den Seismikmessungen bekannt. Sie ist qualitativ nicht quantitativ eingezeichnet. Denn auf Grundlage dessen, dass die Kalke in der geologischen Karte weiter oben am Hügel als Deckschicht eingezeichnet sind, und auf Grundlage der geoelektrischen und der gravimetrischen Messungen ist bekannt, dass diese Grenze steiler sein sollte als der Berg.

8 Zusammenfassung

Unter Profil S3S1 werden 3 Schichten über dem Halbraum gefunden. Diese haben die Mächtigkeiten $(1,0 \pm 0,4)$ m, $(2,8 \pm 0,8)$ m und $(13,0 \pm 2,0)$ m und die p-Wellen-Geschwindigkeiten $(270 \pm 100) \frac{\text{m}}{\text{s}}$, $(640 \pm 100) \frac{\text{m}}{\text{s}}$ und $(19500 \pm 100) \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Die Geschwindigkeit im Halbraum beträgt $(4110 \pm 100) \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Unter Profil S4S2 werden zwei Schichten über dem Halbraum gefunden. Diese haben gleiche Mächtigkeiten und Geschwindigkeiten wie unter Profil S3S1. Die erste Schicht wird als Boden, die zweite als trocknender Juranagelfluh, die dritte als Grundwasser führender Juranagelfluh und die vierte als Bankkalke interpretiert. Hangaufwärts verlaufen die Schichtgrenze zwischen Boden und trockenem Juranagelfluh und der Grundwasserspiegel parallel zur Steigung des Berges. Über die Neigung Grenze zwischen wasserführendem Juranagelfluh und Bankkalke kann hangaufwärts keine Aussage getroffen werden. Senkrecht dazu sind alle Schichtgrenzen eben.

Literatur

Berckhemer, H. 1997, *Grundlagen der Geophysik*, Frankfurt: Johann Wolfgang Goethe Universität, Seite 101

Forbriger, F., J. Altmann, E. Gottschämmer, S. Heider, U. Kastner, A. Kurzmann, M. Mayer, A. Reiß, K. Seitz, B. Wawerzinek, M. Westerhaus, R. Widmer, W. Zürn, 2016, *Skriptum zu den Geophysikalischen Geländeübungen 2016*, Karlsruhe: Geophysikalisches Institut der Karlsruher Institutes für Technologie, Kapitel 5

Knödel

Schreiner, A., E. Buck, F. Wacker, 1997, *Erläuterungen zum Blatt 8118 Engen der Geologischen Karte von Baden-Württemberg*, Freiburg: Geologisches Landesamt Baden-Württemberg, Seiten 28-29