

Analyse von Frequenz und Energie  
zur Charakterisierung seismischer  
Explosionsquellen  
am Halvfarryggen, Antarktis

Bachelorarbeit  
von

Christopher Sanz

am

Geophysikalischen Institut der Fakultät Physik

und am

Alfred Wegener Institut für Polar- und Meeresforschung  
innerhalb der LIMPICS-Gruppe

Erstgutachter: Prof. Dr. Thomas Bohlen  
Betreuende Mitarbeiter: Anja Diez und PD Dr. Olaf Eisen

Bearbeitungszeit: 01. Februar 2012 – 14. August 2012



# Inhaltsverzeichnis

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. Einleitung</b>   | <b>1</b>  |
| <b>2. Physikalische Grundlagen</b>   | <b>3</b>  |
| 2.1. Schnee, Firn und Eis . . . . .  | 3         |
| 2.2. Seismik im Eis . . . . .  | 4         |
| 2.2.1. Dämpfung . . . . .  | 5         |
| 2.3. Fouriertransformation . . . . .   | 6         |
| 2.3.1. Fensterfunktion . . . . .   | 7         |
| <b>3. Messungen</b>  | <b>9</b>  |
| 3.1. Messgebiet . . . . .  | 9         |
| 3.2. Profilmessung und Sprengschnurauslage . . . . .                                     | 11        |
| 3.3. Weitwinkel-Messung . . . . .  | 12        |
| <b>4. Auswertung mit FOCUS</b>   | <b>15</b> |
| <b>5. Auswertung mit Matlab</b>  | <b>19</b> |
| 5.1. Sortieren und Darstellen der Seismogramme . . . . .                                 | 19        |
| 5.2. Ausschneiden der Analysefenster im Seismogramm . . . . .                            | 20        |
| 5.3. Bestimmen des Frequenzgehaltes . . . . .  | 22        |
| 5.4. Energievergleichswerte und die Vergleichsfrequenz . . . . .                         | 23        |
| <b>6. Vergleich der Schussparameter</b>  | <b>25</b> |
| 6.1. Erster und zweiter Schuss in einem Bohrloch im Vergleich . . . . .                  | 25        |
| 6.2. Sprengschnur an der Oberfläche im Vergleich zu Sprengladungen im Bohrloch . . . . . | 28        |
| 6.3. Weitere Vergleiche bei der Profilmessung . . . . .                                  | 32        |
| <b>7. Zusammenfassung und Ausblick</b>   | <b>35</b> |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Anhang</b>   | <b>41</b> |
| A. Eidesstattliche Erklärung . . . . .  | 41        |
| B. Compact Disc . . . . .   | 42        |
| C. Matlab Skripte . . . . .   | 43        |
| C.1. Masterskript “fromDATtoSPECTRUM.m”, zum aufrufen der Funk-<br>tionen . . . . . | 43        |
| C.2. Skript “seismoADD.m”, zum Sortieren der Spuren . . . . .                       | 47        |
| C.3. Skript “pickCS”, zum Picken der Fenster . . . . .                              | 50        |

# 1. Einleitung

Bei Seismikmessungen werden eine Vielzahl verschiedener künstlicher Impulsquellen eingesetzt. Diese Quellen unterscheiden sich je nach Zielsetzung und Ort, der Seismikmessung. Die einfachste Form einer seismischen Quelle, ist der von Hand geführte Vorschlaghammer. Dieses Verfahren stößt aufgrund der vergleichsweise geringen Energie die von ihm ausgeht schnell an seine Grenzen. Zur Steigerung der Energie können Fallgewichte, Vibratoren und auch Sprengstoff in verschiedenen Ausführungen eingesetzt werden. Auf Eisschilden und Gletschern werden häufig Explosionsquellen eingesetzt. Die Art und Weise wie diese eingesetzt werden beruht hauptsächlich auf Erfahrungen im Feld und bei der Auswertung. Um die Effizienz des Sprengstoffes zu verbessern, wird er häufig in Bohrlöchern gezündet, diese können unterschiedlich tief, mit Schnee und Firn verfüllt oder offen sein. In der Praxis werden viele dieser Parameter zur Optimierung des von der Quelle ausgehenden Signals verändert, ohne die Auswirkungen der Änderung auf den Frequenzgehalt und die Energie des Signals (Signalenergie) genau zu kennen. Bei Seismikmessungen auf eisfreiem Land und auf See, kann dabei auf einen breiten Erfahrungsschatz und auf Literatur, die die verschiedenen seismischen Quellen gegenüberstellt zurückgegriffen werden [MILLER et al., 1986; STAPLES et al., 1999]. Bei Messungen auf Eisschilden ist der Erfahrungsschatz kleiner und es gibt wenig derartige Literatur [SEN et al., 1998]. Da aber Seismikmessungen an den Eisschilden zum Verständnis der Vorgänge innerhalb der Eisschilde, im Zusammenhang mit der globalen Klimaerwärmung immer wichtiger werden, ist eine spezialisierte Betrachtung der seismischen Quellen im Eis wichtig.

Am Halvfarryggen wurden in der Saison 2009/2010 und 2010/2011 Seismikmessungen durchgeführt, bei denen verschiedenste Parameterkonstellationen für Explosionsquellen in Bohrlöchern verwendet wurden. Zusätzlich wurde auch eine Sprengschnurauslage verwen-



Abbildung 1.1.: Explosion einer Sprengschnurauflage

det, die mit deutlich geringerem Aufwand aufgebaut werden kann, als eine Sprengstoffquelle in einem Bohrloch. Das Ziel dieser Arbeit ist der Vergleich der verschiedenartigen seismischen Quellen und die Entwicklung der dazu nötigen Verfahren. Zum Vergleich der seismischen Quellen, bzw. des von ihnen ausgehenden Signals eignet sich neben dem bloßen Vergleich der Rohseismogramme, vor allem der Vergleich der Amplitudenspektren dieser Seismogramme. Mit den Amplitudenspektren können Vergleichswerte gewonnen werden, mit denen die Signalenergie, wie auch der Frequenzgehalt einer seismischen Quelle vergleichbar gemacht werden.

Zum Verständnis der angewandten Verfahren sind einige physikalische Grundlagen erforderlich, die in Kapitel 2 erläutert werden. Die Charakteristik des von den Quellen ausgehenden und durch Geophone gemessenen Signals hängt stark vom Messgebiet und der Vorgehensweise bei der Messung ab. Um die Ergebnisse nachzuvollziehen und gegebenenfalls auf andere Messgebiete und Vorgehensweisen zu übertragen zu können, ist eine genaue Kenntnis darüber, wie die Messwerte entstanden sind nötig. Dies wird in Kapitel 3 beschrieben. In den Kapiteln 4 und 5 gehe ich auf die Verfahren, zur Erstellung von Amplitudenspektren und Vergleichswerten ein. Diese werden dann in Kapitel 6 zum Vergleich der verschiedenartigen seismischen Quellen verwendet. Daraus können Schlüsse zur Verbesserung von Messungen gezogen werden. In Kapitel 7 werden die wichtigsten Erkenntnisse herausgestellt. Außerdem wird erläutert wie die gewonnenen Erkenntnisse und Vermutungen gefestigt und die Vergleiche fortgesetzt werden könnten.

## 2. Physikalische Grundlagen

Dieses Kapitel soll die physikalischen Grundlagen erklären, um ein grundlegendes Verständnis der Seismik im Eis zu vermitteln. Zusätzlich werden noch die Grundlagen der Spektralanalyse, bei digitalen Zeitreihen beschrieben.

### 2.1. Schnee, Firn und Eis

Das Messgebiet befindet sich in einem Akkumulationsgebiet, in dem sich die Schneemasen ansammeln. Der Schnee wird mit der Zeit zu Firn und dann zu Eis umgewandelt. Im Messgebiet ist ganzjährig kein Schmelzwasser vorhanden, es liegt in der sogenannten Rekristallisationszone. Die Verdichtung und Umwandlung zu Eis geschieht hier sehr langsam. Dabei werden die Schneeflocken zunächst abgerundet, indem sie durch mechanische Einwirkung an der Oberfläche, wie z. B. durch Windverwehung brechen. Als Firn wird üblicherweise Schnee bezeichnet, der mindestens ein Jahr alt ist. Die Abrundung der Eispartikel wird durch Sublimation und Resublimation fortgesetzt. Die Partikel werden so lange abgerundet, bis sie nahezu kugelförmig sind, da dies energetisch am günstigsten ist. Unter der Last von immer mehr Schnee lagern sich diese Eiskugeln zur dichtesten Kugelpackung, welche in der Praxis etwa 40% Porosität entspricht. Dieser Firn hat eine Dichte von etwa  $550 \text{ kg/m}^3$ . Mit steigendem Druck entstehen durch Sublimation, Resublimation, Rekristallisation und Deformation Verbindungen zwischen den Eispartikeln, bis nur noch schmale Kanäle, aus denen die Luft entweichen kann, übrig sind. Dieser Verdichtungsprozess läuft langsamer, als die vorherigen Verdichtungsprozesse ab. Wenn sich auch diese Kanäle schließen, wird aus Firn Eis, im Eis sind nur noch die verschlossenen Kanäle, in Form von Luftblasen vorhanden. Die Luftblasen machen einen Volumenanteil von etwa

10% aus. Dieser Übergang findet üblicherweise bei einer Dichte von etwa  $830 \text{ kg/m}^3$  statt. Die Luftblasen können durch steigenden Druck noch weiter komprimiert werden, bis zu einer Eisdichte von  $918 \text{ kg/m}^3$ . [PATERSON, 1994]

## 2.2. Seismik im Eis

Am Halvfarryggen wurden zwei Reflexionsseismikmessungen durchgeführt, eine Profilmessung (Abschnitt 3.2) und eine Weitwinkelmessung (Abschnitt 3.3). Bei der Reflexionsseismik werden oberflächennah, durch eine seismische Quelle Raumwellen erzeugt, die an Grenzschichten zwischen zwei Medien mit verschiedenen elastischen Eigenschaften reflektiert werden. Diese Reflexionen werden mittels einer Linie aus Geophonen als Zeitreihe aufgezeichnet. Der Abstand zwischen Quelle und Geophon wird als Offset bezeichnet.

Es gibt zwei Arten von Raumwellen, die Kompressionswelle, bei der die Partikel des Mediums in Ausbreitungsrichtung schwingen und die Scherwelle, bei der die Partikel des Mediums senkrecht zur Ausbreitungsrichtung schwingen. Da sich Kompressionswellen schneller als Scherwellen ausbreiten und sie zuerst an den Geophonen ankommen nennt man sie auch Primär- oder P-wellen und die Scherwellen Sekundär- oder S-Wellen. S-Wellen treten nur in Festkörpern auf, da Flüssigkeiten und Gase keine Scherkräfte aufnehmen können. Trifft eine P-Welle schräg auf eine Grenzschicht, so wird sie dort gebrochen und reflektiert, zusätzlich regt die P-Welle eine S-Welle an. Die Einfallswinkel, bzw. Austrittswinkel der Strahlengänge,  $i$  für die P-Welle und  $j$  für die S-Welle, ergeben sich aus dem Snelliusschen Gesetz [CARA, 1994]:

$$\frac{\sin(i_1)}{\alpha_1} = \frac{\sin(j_1)}{\beta_1} = \frac{\sin(i_2)}{\alpha_2} = \frac{\sin(j_2)}{\beta_2} \quad (2.1)$$

hier ist  $\alpha$  die Geschwindigkeit der P-Welle und  $\beta$  die der S-Welle. Die Indizes geben das Ausbreitungsmedium 1, vor der Grenzschicht und 2, nach der Grenzschicht an. Die Geschwindigkeiten sind materialabhängig, die Materialeigenschaften ändern sich bei Eis unter anderem mit der Dichte. Da im Firn der Dichtegradient sehr hoch ist und die Dichte mit der Tiefe stark ansteigt, werden die Wellen kontinuierlich gebrochen, dies verursacht einen halbkreisförmigen Strahlengang der direkten Wellen, sie werden deshalb auch Tauchwellen genannt.

Um Grenzschichten zu beobachten, werden die Laufzeiten von reflektierten Wellen gemessen. Je stärker sich die akustischen Impedanzen der Medien an der Grenzschicht unterscheiden (Impedanzkontrast), desto größer ist der Reflexionskoeffizient und damit auch der Anteil der dort reflektierten Wellen. Die akustische Impedanz ist das Produkt aus der

P-Wellengeschwindigkeit  $p$  und der Dichte  $\rho$  des Mediums. Der Reflexionskoeffizient ist zudem vom Einfallswinkel, auf die Grenzschicht abhängig. Um mehr Informationen über den Reflexionskoeffizienten zu bekommen, werden Weitwinkelmessungen durchgeführt. Bei der im Gegensatz zur Profilmessung der Offset immer weiter vergrößert wird. Mit dem Offset vergrößert sich auch der Einfallswinkel.

### 2.2.1. Dämpfung

Da es in der Realität keine vollkommen elastischen Materialien gibt, werden die Wellen entlang ihres Strahlenganges gedämpft. Für die von der Entfernung  $x$  abhängige Amplitude  $A(x)$  einer Sinusförmigen P-Welle gilt dieser Zusammenhang [CARA, 1994]:

$$A(x) = A_0 e^{-\pi f x / \alpha Q} \quad (2.2)$$

Mit der Anfangsamplitude  $A_0$  und der Frequenz  $f$ ,  $Q$  ist der Qualitätsfaktor (Q-Faktor), ein hoher Q-Faktor bedeutet eine geringe Dämpfung. Der Q-Faktor ist abhängig von einer Vielzahl der physikalischen Eigenschaften des Mediums. Nach PETERS et al. [2012] spielt vor allem die Temperatur und der Druck eine große Rolle bei der Dämpfung im Eis. Befindet sich das Eis nahe des Gefrierpunktes, nimmt der Q-Faktor stark ab, also die Dämpfung zu. In polaren Eisschildern sind die höchsten Eistemperaturen am Felsbett und die tiefsten etwa in 10 m Tiefe. Bei Gestein gilt der Zusammenhang, dass stark poröses und zerklüftetes Gestein einen geringeren Q-Faktor hat als unzerklüftetes und wenig poröses Gestein. Dieser Zusammenhang lässt sich auf Firn und Schnee übertragen, stark Poröser Firn und Schnee hat einen kleineren Q-Faktor, als dichtes Eis. Nimmt die Dichte des Firns mit der Tiefe zu, so ist ein größerer Q-Faktor zu erwarten. Mit steigender Tiefe steigt jedoch auch der Druck und die Temperatur, somit kommt das Eis dem Gefrierpunkt näher. Dies sorgt wiederum für einen kleineren Q-Faktor. Der durch den Dichteanstieg mit zunehmender Tiefe ansteigende Q-Faktor, überwiegt im Bereich des Schnee und Firns. Der in zunehmender Tiefe, durch Temperatur- und Druckerhöhung, abfallende Q-Faktor überwiegt im tieferen Bereich des Eisschildes.

An der Formel 2.2 ist zu erkennen, dass hohe Frequenzen stärker gedämpft werden als tiefe. Dies bedeutet auch, dass Wellen mit tiefer Frequenz eine größere Reichweite haben als Wellen mit hoher Frequenz. Zudem beeinflusst eine Änderungen des Q-Faktors tiefe Frequenzen stärker als hohe.

### 2.3. Fouriertransformation

Da die verschiedenen Quellen hauptsächlich durch ihre Amplitudenspektren verglichen werden, müssen die gemessenen Zeitreihen in den Frequenzbereich transformiert werden. Dies wird mathematisch mit Hilfe der Fouriertransformation durchgeführt, für die numerische Computerberechnung wurde der effiziente Algorithmus der Fast Fourier Transformation verwendet.

Da die gemessenen Zeitreihen  $x(t)$  im Zeitfenster  $0 \leq t \leq T$  nicht periodisch sind können sie durch die Formel

$$X(f) = \int_0^T x(t)e^{-i2\pi ft} dt \quad (2.3)$$

in den Frequenzbereich  $X(f)$  transformiert werden. Die Zeitreihen sind jedoch nicht kontinuierlich aufgezeichnet, sondern als diskrete Werte mit dem Abtastintervall  $\Delta t$ , deshalb muss die Zeitreihe mittels einer diskreten Fouriertransformation (DFT) in den Frequenzbereich transformiert werden. Dazu wird die Fouriertransformierte in der Formel 2.3 an  $N$  Abtastintervallen diskretisiert. Das Integral kann mit Hilfe der Trapezformel durch eine Summe ersetzt werden, so wird daraus [BUTTKUS, 1991]:

$$X(f) = \Delta t \sum_{j=0}^{N-1} x(j\Delta t)e^{-i2\pi fj\Delta t} \quad (2.4)$$

Die Frequenz lässt sich auch diskretisieren, mit  $f = n\Delta f$ . Da die Zeitreihe endlich ist, kann man für  $\Delta f = \frac{1}{T} = \frac{1}{N\Delta t}$  schreiben. Somit wird aus Formel 2.4:

$$X(n\Delta f) = \Delta t \sum_{j=0}^{N-1} x(j\Delta t)e^{-i2\pi \frac{nj}{N}} \quad (2.5)$$

Häufig wird diese Gleichung vereinfacht dargestellt:

$$X_n = \sum_{j=0}^{N-1} x_j e^{-i2\pi \frac{nj}{N}} \quad (2.6)$$

Damit jedoch die Dimensionen und die Skalierung des Spektrums, aus der vereinfachten Gleichung 2.6 stimmen, muss die rechte Seite mit  $\Delta t$  multipliziert werden[BUTTKUS, 1991]. Bei der Anwendung der DFT in dieser Arbeit entspricht  $\Delta t$  gerade dem Abtastintervall der Seismikmessung. Aus dem Zusammenhang  $\Delta f = \frac{1}{N\Delta t}$  geht hervor, dass die Frequenzauflösung des Amplitudenspektrums, durch eine höhere Anzahl  $N$  von Abtastintervallen gesteigert werden kann. Die höchste zuverlässig darstellbare Frequenz entspricht der Nyquistfrequenz  $\frac{1}{2\Delta t}$ .

In den Computerprogrammen Matlab und FOCUS mit denen die Amplitudenspektren berechnet wurden, wird intern der Algorithmus der Fast Fourier Transformation (FFT) eingesetzt. Die FFT berechnet die DFT nach der Formel 2.6. Sie spart aber durch mehrmaliges halbieren der Zeitreihe Rechenschritte ein. Die Anzahl der durchzuführenden komplexen Additionen und Multiplikationen die für die Berechnung der DFT nötig sind hängt von der Anzahl der Abtastintervalle ab und beträgt  $N^2$ . Halbiert man die Anzahl der Abtastintervalle, so reduziert sich die Anzahl der komplexen Additionen und Multiplikationen auf  $1/4$ . Es sind also weniger komplexe Additionen und Multiplikationen nötig, wenn eine Zeitreihe in zwei Hälften aufgeteilt wird und jede Hälfte einzeln transformiert wird. Wenn die Zeitreihe  $2^k$  Abtastintervalle lang ist, kann sie immer wieder halbiert werden, bis nur noch einzelne Abtastintervalle transformiert werden müssen. Damit beträgt dann die Anzahl der Additionen und Multiplikationen bei der FFT nur noch  $N \cdot \log(N)$  anstatt  $N^2$  [KAMMEYER, 2009]. Häufig werden Zeitreihen, die nicht  $2^k$  Abtastintervalle lang sind, mit dem Wert 0 aufgefüllt, bis sie  $2^k$  Abtastintervalle lang sind.

### 2.3.1. Fensterfunktion

Die zu transformierende Zeitreihen sind nicht unendlich lang, der Anfang und das Ende einer Zeitreihe entspricht einer Multiplikation mit 0. Anschaulicher wird dies, wenn man sich vorstellt, ein Fenster aus einer längeren Zeitreihe auszuschneiden. Mathematisch betrachtet wird beim Ausschneiden der Bereich innerhalb des Fensters  $0 \leq t \leq T$  mit 1 multipliziert, der Bereich außerhalb des Fensters mit 0. Dies entspricht dem Rechteckfenster mit der Funktion:

$$w_{\text{Rechteck}}(t) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t \leq T \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases} \quad (2.7)$$

Solch eine Multiplikation im Zeitbereich entspricht einer Faltung im Frequenzbereich [RITTER, 2010]. Dies führt zum sogenannten Leakage-Effekt, hierbei bilden sich Nebenmaxima im Amplitudenspektrum, die nicht auf real vorhandene Frequenzen in der Zeitreihe zurückzuführen sind. Um den Leakage-Effekt zu reduzieren werden häufig andere Fensterfunktionen verwendet, zum Beispiel das Hanningfenster:

$$w_{\text{Hanning}}(t) = \begin{cases} \frac{1}{2}(1 + \cos \frac{\pi t}{T}) & 0 \leq t \leq T \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases} \quad (2.8)$$

Durch die im Vergleich zum Rechteckfenster „weicheren“ Flanken, werden die Nebenmaxima bei solch einem Fenster auf Kosten der Auflösung reduziert. Durch vergrößern der

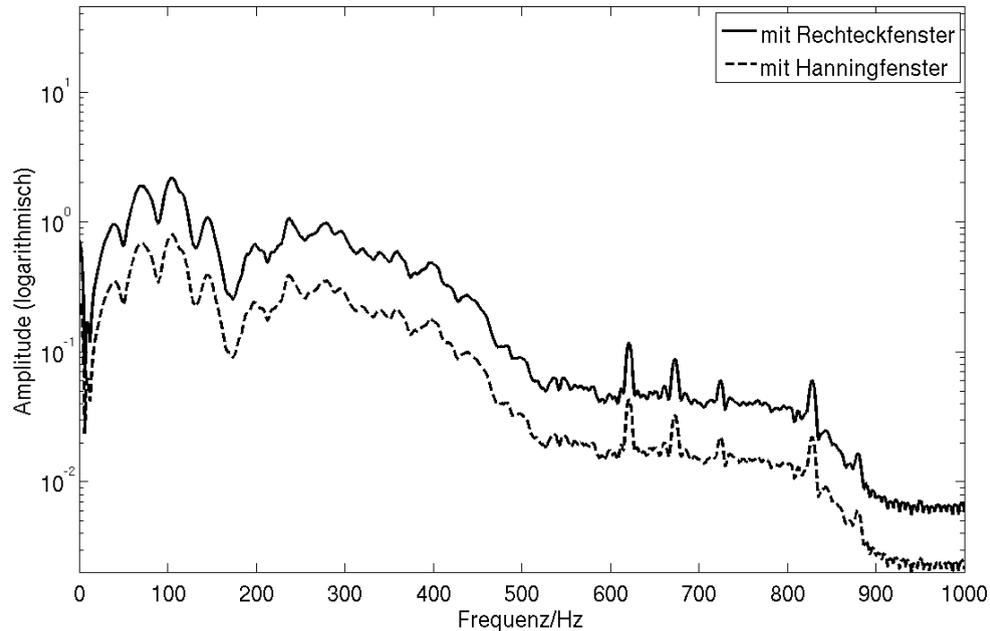


Abbildung 2.1.: Die Zeitreihe von Schuss 12 der Weitwinkelmessung wurde mit einem Rechteckfenster und auch mit einem Hanningfenster ausgeschnitten. Die durchgezogene Linie zeigt das Amplitudenspektrum des Rechteckfensters und die gestrichelte Linie die des Hanningfensters. Der Verlauf der beiden Amplitudenspektren ist bis auf den y-Achsenabschnitt beinahe deckungsgleich.

Fensterlänge, werden sowohl die Nebenmaxima reduziert, als auch die Auflösung erhöht. In dieser Arbeit sind selbst die kürzesten Fensterlängen, die verwendet wurden, lang genug um den Leakage-Effekt zu vernachlässigen. Beispielhaft dafür sind in der Abbildung 2.1 die Amplitudenspektren einer kurzen Zeitreihe (mit 150 ms und 250 Abtastintervallen), die einmal mittels Rechteckfenster und einmal mit einem Hanningfenster ausgeschnitten wurde, dargestellt. Man erkennt im Frequenzverlauf praktisch keinen Unterschied, lediglich bei der Amplitudengröße und damit der gesamten Signalenergie. Dies ist auch nicht weiter verwunderlich, da die Ausschläge der Zeitreihe mit einem Wert  $\leq 1$  multipliziert werden. Ein aufwändigeres Fenster, als ein Rechteckfenster, bietet hier also keinen Informationsgewinn. Zudem werden alle Spektren und daraus gewonnen Vergleichswerte nur relativ zueinander verglichen. Deshalb wurden die Zeitreihen stets mit einem Rechteckfenster ausgeschnitten.

## 3. Messungen

Die für diese Arbeit verwendeten Daten wurden im Rahmen des LIMPICS-Projekts in der Antarktis auf dem Halvfarryggen-Eisdom (Abschnitt 3.1) gemessen. Das Ziel der Expeditionen in der Saison 2009/2010 und 2010/2011, war die zweidimensionale Darstellung von internen seismischen Reflektoren im Eis und die Kartierung des darunter liegenden Felses. Dazu wurde unter anderem die von mir auf Frequenz- und Signalenergiegehalt ausgewertete Profilmessung (Abschnitt 3.2) und Weitwinkelmessung (Abschnitt 3.3) durchgeführt. Die internen Reflektoren im Eis entstehen durch Änderungen der seismischen Geschwindigkeit, welche höchstwahrscheinlich durch Änderungen im „Crystal Orientation Fabric“ (COF) verursacht werden [DIEZ, 2010]. Das COF stellt die räumliche Orientierung der Eiskristalle dar. Die internen seismischen Reflektoren sollten später mit Radarreflektierenden Schichten verglichen werden. [EISEN et al., 2010; EISEN und HOFSTEDÉ, 2010]

### 3.1. Messgebiet

Das Messgebiet auf dem Halvfarryggen-Eisdom (Abbildung 3.1) liegt im als Dronning-Maud-Land bezeichneten Teil von Antarktika etwa 120 km südlich der Neumayer III Station. Am Halvfarryggen treffen unter dem etwa 900 m dicken Eisschild drei Grate aufeinander. Im Bereich des Messgebietes gibt es eine 84 m tiefe, als DML94 bezeichnete Kernbohrung, von dieser stammen die Dichtewerte, die in der Abbildung 3.2 dargestellt sind. Die mit der Tiefe zunehmende Dichte verursacht die bei Seismik in Eisschilden und Gletschern typischen Tauchwellen (Abschnitt 2.2). Die geringe Dichte im oberflächennahen Bereich ist auf eine hohe Porosität zurückzuführen. Dies beeinflusst die Charakteristik von oberflächennahen Schüssen. Bei diesen wird im Bereich hoher Porosität eine starke Dämpfung, wegen des geringen Q-Faktors, erwartet (Abschnitt 2.2).

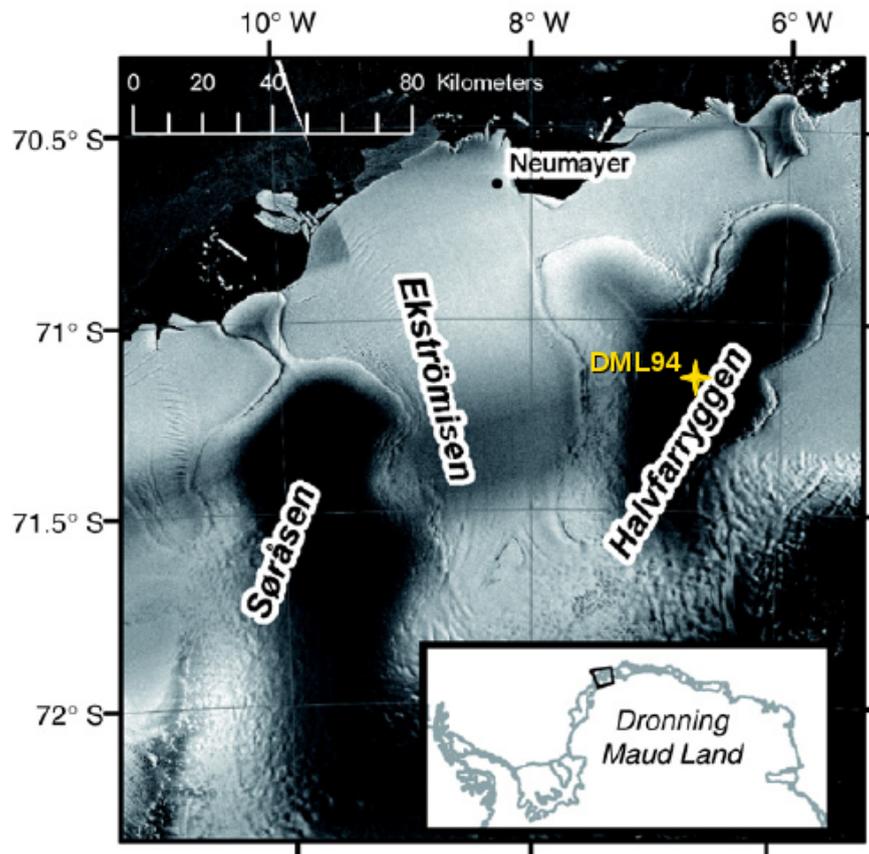


Abbildung 3.1.: Radarsatellitenbild [WESCHE et al., 2009] der Umgebung des Messgebietes, das sich bei der Kernbohrung DML94 befindet. Im schwarzen Kasten ist die Lage des Radarsatellitenbildes innerhalb des Dronning Maud Landes in der Antarktis abgebildet.

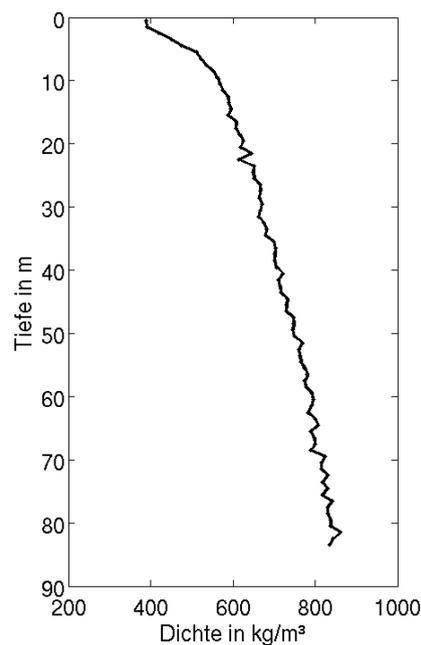


Abbildung 3.2.: Dichteprofil des Bohrkerns DML94 [pers. Kommunikation, Dr. Johannes Freitag]. Der Gradient der Dichtezunahme nimmt mit steigender Tiefe ab.

Tabelle 3.1.: Schussparameter für die Profilmessung. Der Offset ist immer für das erste Geophon angegeben. Die Schüsse mit 25 m Offset sind jeweils die ersten Schüsse im Bohrloch, die mit 265 m die zweiten, außer bei Schuss 1 dort wurde zuvor schon zweimal geschossen.

| Schuss | Offset in m | Tiefe in m | Sprengladung in g | Besonderheiten                       |
|--------|-------------|------------|-------------------|--------------------------------------|
| 1      | 265         | 1,0        | 400               | 3 Schüsse                            |
| 2      | 25          | 10,0       | 400               | -                                    |
| 3      | 265         | 10,0       | 250               | verdämmt                             |
| 4      | 25          | 10,0       | 250               | Länge von 1 m verdämmt, Sprengschnur |
| 5      | 265         | 10,0       | 250               | verdämmt, Sprengschnur               |
| 6      | 25          | 8,2        | 250               | -                                    |
| 7      | 265         | 8,2        | 250               | Sprengschnur                         |
| 8      | 25          | 8,2        | 250               | -                                    |
| 9      | 265         | 8,2        | 250               | per Hand getriggert, Sprengschnur    |
| 10     | 25          | 8,0        | 250               | -                                    |

### 3.2. Profilmessung und Sprengschnurauslage

Die Profilmessung fand in der Saison 2009/2010 statt. Als seismische Quellen wurde in Bohrlöchern gezündeter Sprengstoff (Pentolit) und Sprengschnur verwendet. Die Masse der Pentolit-Sprengladungen (Booster) betrug 250 g oder 400 g pro Schuss. Gezündet wurde sie elektrisch, über eine Zündleitung, die an der Ladung im Bohrloch, oder an einer Sprengschnur außerhalb des Bohrloches befestigt war.

Die zwischen 1 m und 10 m tiefen Bohrlöcher wurden mit einem Firnkernbohrer gebohrt. Im Bohrloch für Schuss 1, wurde vor dem aufgezeichneten Schuss schon zweimal geschossen, in den restlichen Bohrlöchern immer zweimal. Dabei betrug der Offset zum ersten Geophon beim ersten Schuss 25 m und zum zweiten Schuss 265 m. Teilweise wurden die Bohrlöcher nach dem Einbringen des Sprengstoffes mit Firnkernstücken aus dem Bohrloch, mit Schnee oder mit beidem verfüllt. Die genannten Schussparameter sind für jeden Schuss einzeln in der Tabelle 3.1 aufgelistet. Die Geophonauslage bestand aus 24 SENSOR SM-4 Vertikalgeophonen mit einer Eigenfrequenz von 14 Hz, diese wurden etwa 20 cm tief gesteckt und mit Schnee bedeckt. Der Abstand zwischen den Geophonen betrug 10 m, somit ergab sich eine Auslagenlänge der Geophone von 230 m. Die Zeitreihen wurden im SEG2-Format, mit einem Abtastintervall von 0,5 ms für jeden Schuss 2 s lang aufgezeichnet. Mit Hilfe eines Abrisskabels, das beim Zünden der Sprengladung abriss und damit den Triggerstromkreis öffnete, wurde die Aufzeichnung gestartet (getriggert). Bei Schuss 9 wurde per Hand getriggert.

Neben den Schüssen im Bohrloch wurde auch eine Sprengschnurauslage an der Oberfläche als Quelle verwendet. Diese wurde so verlegt, dass sie auf einer Fläche von etwa 10 m · 10 m

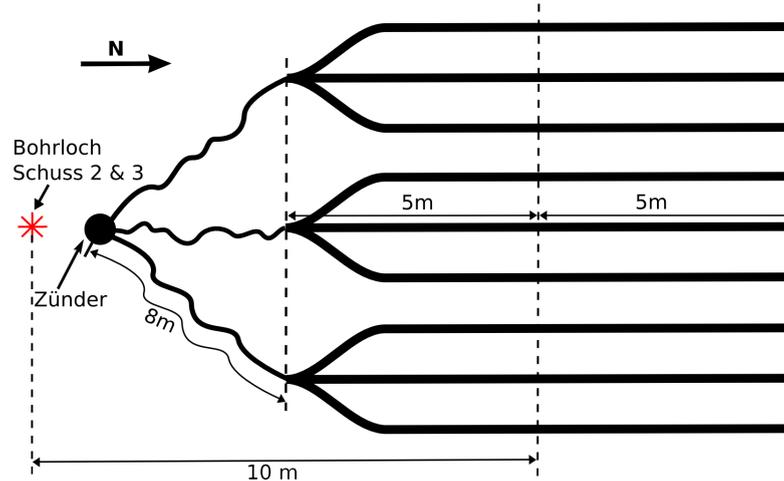


Abbildung 3.3.: Schema der Sprengschnurauslage. Die drei etwa 8 m langen Sprengschnurstücke hatten eine Masse von 6 g/m und die neun, etwa 10 m langen Sprengschnurstücke 10 g/m. Die locker verlegten 8 m-Sprengschnurstücke dienten hauptsächlich der gleichzeitigen Zündung der 10 m-Sprengschnurstücke. Das erste Geophon befand sich 25 m südlich des Bohrloches.

eine flächige Quelle bildet, um eine möglichst ebene Welle zu erzeugen. Ein Schema der Sprengschnurauslage ist in der Abbildung 3.3 zu sehen. Es wurden 90 m Sprengschnur mit einer Masse von 10 g/m und 24 m mit einer Masse von 6 g/m verwendet, die gesamte Sprengstoffmasse betrug also 1044 g. Getriggert wurde auch hier mit einem Abrisskabel. Die Geophone steckten noch an den gleichen Stellen wie für Schuss 2, der Zünder befand sich somit etwa 25 m vom ersten Geophon entfernt.

### 3.3. Weitwinkel-Messung

Die Weitwinkelmessung fand in der Saison 2010/2011 statt. Die gesamte Messlinie der Weitwinkelmessung hatte eine Länge von 6050 m und 9 Schusspunkte mit 18 Schüssen. Der Offset wurde in 750 m Schritten vergrößert, indem der Schusspunkt und die Geophone in entgegengesetzter Richtung um je 375 m versetzt wurden. Somit hatte jede Auslage den gleichen Mittelpunkt. Die Masse der Sprengladungen wurde dabei mit größer werdendem Offset erhöht, sie ist in Tabelle 3.2 aufgelistet.

Wie bei der Profilmessung (Abschnitt 3.2) wurde auch hier als seismische Quelle der Sprengstoff Pentolit in Bohrlöchern gezündet. Die Bohrlöcher blieben unverdämmt, sie waren etwa 15 m tief und bei größerem Offset etwas tiefer als bei kleinerem, genaueres zur Tiefe wurde im Feld nicht dokumentiert. Anstelle einzelner Geophone wurde ein 1500 m langer 60-Kanal-Schneestreamer mit einem Kanalabstand von 25 m eingesetzt. An jedem

Tabelle 3.2.: Schussparameter für die Weitwinkelmessung. Der Offset ist immer der zum ersten Geophon. Die ersten Schüsse in einem Bohrloch sind zur besseren Übersicht grau hinterlegt.

| Schusspunkt | Schuss | Offset<br>in m | Sprengladung<br>in g | Besonderheiten   |
|-------------|--------|----------------|----------------------|--|
| 1           | 1      | 50             | 400                  | -  |
| 1           | 2      | 50             | 400                  | -  |
| 2           | 3      | 800            | 650                  | -  |
| 2           | 4      | 800            | 650                  | -  |
| 3           | 5      | 1550           | 800                  | -  |
| 3           | 6      | 1550           | 1200                 | -  |
| 4           | 7      | 2300           | 1600                 | -  |
| 4           | 8      | 2300           | 1600                 | -  |
| 5           | 9      | 3050           | 2400                 | -  |
| 5           | 10     | 3050           | 2400                 | -  |
| 6           | 11     | 3800           | 3200                 | -  |
| 6           | 12     | 3800           | 3200                 | ab diesem Schuss wurde immer nur ein<br>Booster mit dem Zünder verbunden |
| 7           | 13     | 4550           | 4000                 | -  |
| 7           | 14     | 4550           | 4000                 | -  |
| 8           | 15     | 5300           | 4800                 | schwacher Schuss   |
| 8           | 16     | 5300           | 4800                 | starker Schuss   |
| 9           | 17     | 6050           | 5600                 | -  |
| 9           | 18     | 6050           | 5600                 | -  |

Kanal befinden sich mit einem Abstand von jeweils 3 m acht SM-4 Geophone mit einer Eigenfrequenz von 14 Hz. Um den Kanalabstand zu halbieren, wurde der Streamer, wie in Abbildung 3.4, zu einer Schlaufe gelegt. Durch Weiterziehen des Streamers um 6,25 m und durch einen zweiten Schuss in jedem Bohrloch konnte der Kanalabstand nochmals halbiert werden, so dass er 6,25 m betrug. Dies bedeutet, dass für jedes Bohrloch zwei Schüsse mit nur um 6,25 m abweichendem Offset geschossen wurden. Das ermöglicht im Abschnitt 6.1 einen Vergleich der Frequenzeigenschaften des 1. und 2. Schusses in einem Bohrloch. Die Zeitreihen wurde im SEG2-Format mit einem Abtastintervall von 0.5 ms, 11 s lang aufgezeichnet. Im Seismogramm (CD im Anhang) ist zu erkennen, dass Schuss 15 sehr schwach war, dafür der darauf folgende Schuss 16 im gleichen Bohrloch sehr stark. Vermutlich wurde bei Schuss 15 nicht die gesamte Ladung gezündet, der Rest detonierte dann mit Schuss 16.

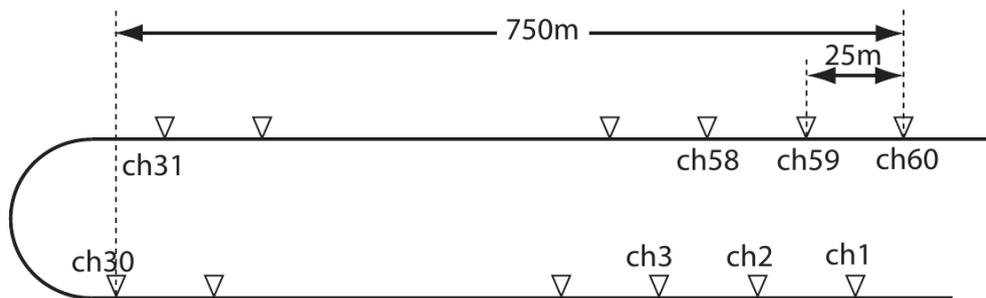


Abbildung 3.4.: Schema der Streamer-Auslage [EISEN et al., 2010]. Der 1500 m lange Streamer, wurde so zu einer Schlaufe gelegt, damit auf einer Strecke von 750 m der Kanalabstand 12,5 m betragen hat.

## 4. Auswertung mit FOCUS

FOCUS 5.4 ist eine kommerzielle Auswertungssoftware, sie besteht aus verschiedenen Modulen, welche zu Jobs zusammengefasst werden können und einem interaktiven Modus, zum direkten analysieren der Daten. Mit diesem interaktiven Modus von FOCUS erstellte ich für jeden Schuss Amplitudenspektren. Da sich herausstellte, dass die Auswertung mit FOCUS nur sehr oberflächlich möglich war, wird diese im Folgenden nur knapp beschrieben. Der Hauptteil der Auswertung wurde mit Matlab durchgeführt und ist in Kapitel 5 ausführlich beschrieben.

Mittels der „View Data Applikation“ innerhalb von FOCUS wurde die entsprechende Datei des jeweiligen Datensatzes geöffnet. Unter dem Menüpunkt „Analysis“ wurde die Option „Spectral Analysis“ verwendet. Dort können einzelne Bereiche des Seismogramms ausgewählt werden. Die zur Verfügung stehenden Auswahlwerkzeuge lassen eine spurweise Auswahl, oder die Auswahl eines bestimmten Bereiches zu (Abbildung 4.1). Mittels einer FFT wird nun ein Amplitudenspektrum aus dem ausgewählten Seismogrammbereich erstellt. Im „Global Parameters“-Menü gibt es die Möglichkeit zur Veränderung mehrerer Parameter für eine verbesserte Darstellung des Spektrums, wie in der Abbildung 4.2 zu sehen ist. Zunächst wurden die Amplitudenspektren für die einzelnen Schüsse berechnet, wobei jeweils alle Spuren, über die gesamte Aufnahmezeit verwendet wurden. Dies entspricht bei dem Profilmessungs-Datensatz einem Zeitraum von 2 s auf 24 Spuren. Bei dem Weitwinkel-Datensatz entspricht das 60 Spuren und einem Zeitfenster von 11 s.

Bei der Weitwinkelmessung wurden bis auf die Schüsse mit 50 m Offset alle von Frequenzen unter 10 Hz dominiert. Bei der Profilmessung war diese Dominanz nur bei Schuss 1 und 5 zu erkennen, diese haben beide einen Offset zum ersten Geophon von 265 m. Bei den Schüssen mit 25 m Offset zum ersten Geophon trat dieses Phänomen nicht auf. Da

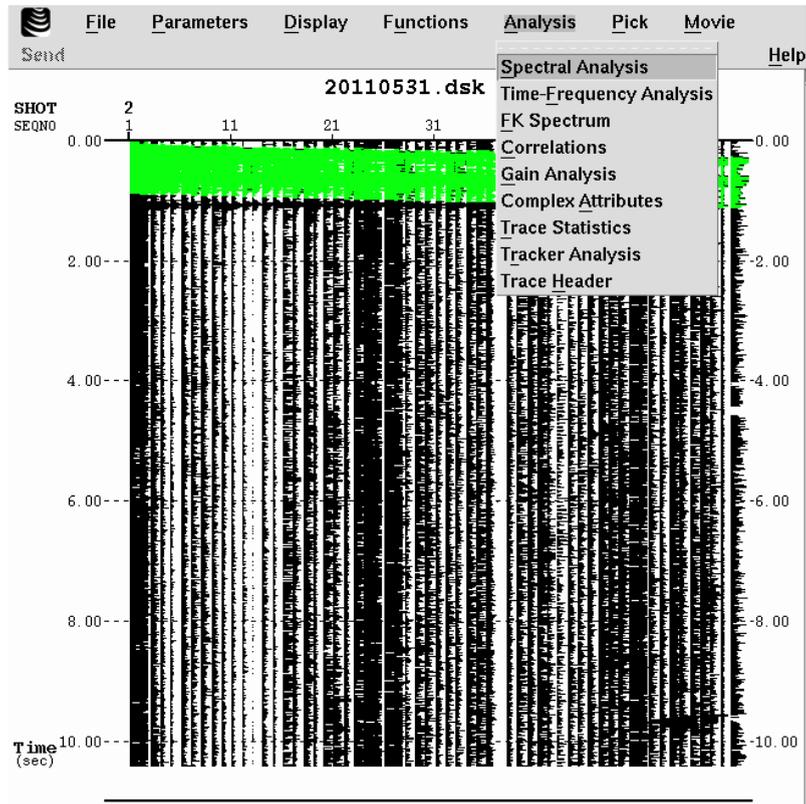


Abbildung 4.1.: „View Data Applikation“ von FOCUS mit einem ausgewählten Bereich (grün) innerhalb eines Seismogramms und dem interaktiven „Analysis“-Menü. Das Seismogramm ist von Schuss 2 der Weitwinkelmessung.

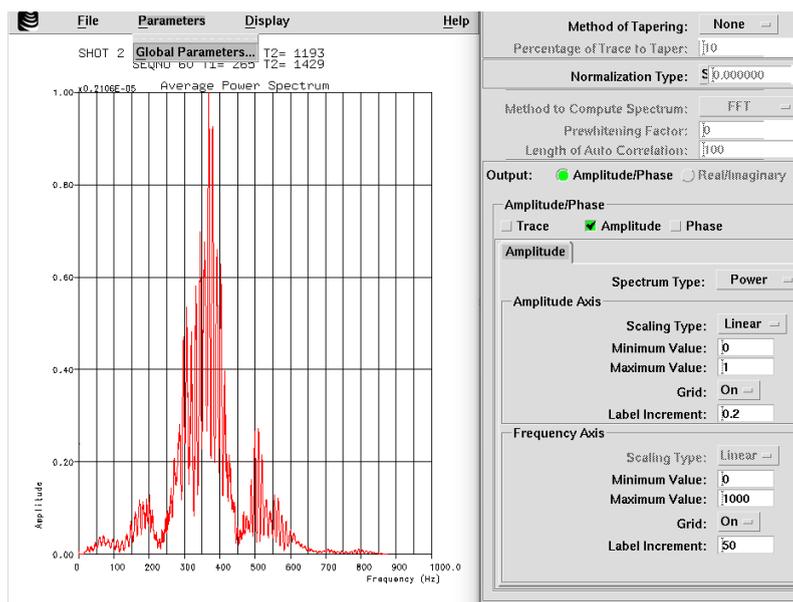


Abbildung 4.2.: Amplitudenspektrum des Bereichs aus Abbildung 4.1 mit geöffnetem „Global Parameters“-Menü, zur Einstellung verschiedener Parameter wie z. B. Achsenkalierung und Beschriftung.

---

die 14 Hz Geophone im Bereich 0 bis 14 Hz verzerrt aufzeichnen, ist dort ein nur schwer verwertbares Signal zu erwarten. Um die Amplitudenspektren anschaulicher darstellen zu können, wurde ein Hochpassfilter der keine Frequenzen unter 10 Hz durchlässt verwendet. Aus den gefilterten Daten wurden erneut Amplitudenspektren erstellt. Die daraus gewonnen Amplitudenspektren wurden zum Teil von starken Singularitäten einzelner Frequenzen überlagert, beispielhaft dafür ist die Abbildung 4.3.

Wurde das Amplitudenspektrum nur aus dem Bereich zwischen dem Ersteinsatz der Tauchwelle und der ersten Multiplen der Bettreflexion (Abbildung 5.1) berechnet, verschwanden die Singularitäten. Bei der Berücksichtigung nur dieses Bereiches verschwand auch die Dominanz der Frequenzen unterhalb von 10 Hz, so dass eine Filterung nicht mehr notwendig war. Bei der gesamten Aufnahmezeit wurde zur Berechnung des Amplitudenspektrums ein großer Anteil Rauschen mit verwendet. Das bedeutet, dass sowohl die Singularitäten, wie auch die große Signalenergie unter 10 Hz, die das Amplitudenspektrum dominierte, auf das Rauschen zurück geführt werden können.

Beim interaktiven Auswählen, der zu untersuchenden Bereiche, verdeutlichte sich schnell ein Nachteil dieser Methode: Da die Auswahl der Bereiche wie oben beschrieben immer von Hand erfolgte, war es schwer möglich immer Bereiche mit gleicher Länge auszuwählen. Da aber durch die Länge des transformierten Zeitfensters Unterschiede im Amplitudenspektrum verursacht, war dies der Vergleichbarkeit der Amplitudenspektren abträglich. Auch die Auswahl vieler Parameter, wie zum Beispiel die Darstellung der y-Achse musste von Hand immer wieder neu eingestellt werden. Das Testen, welche Auswirkungen die Änderung von Parametern auf verschiedene Schüsse haben, ist dadurch sehr aufwändig. Die Amplitudenspektren konnten nur grafisch per Screenshot gespeichert werden, somit war eine nachträgliche Änderung der Darstellung nicht möglich. Die Suche nach einer Funktion von FOCUS, mit der feste Längen für die Zeitfenster gewählt werden können und fest eingestellte Parameter auf mehrere Schüsse anwendbar sind, blieb erfolglos. Mit der Funktion „SPECTRM“ sollte dies funktionieren, jedoch waren nicht alle benötigten Programmkomponenten vorhanden und konnten auch nicht nachinstalliert werden. Zusätzlich konnte die Signalenergie nicht quantitativ verglichen werden. Wegen diesen Schwierigkeiten und von FOCUS nicht erfüllten Anforderungen, wurde zur weiteren Auswertung Matlab eingesetzt.

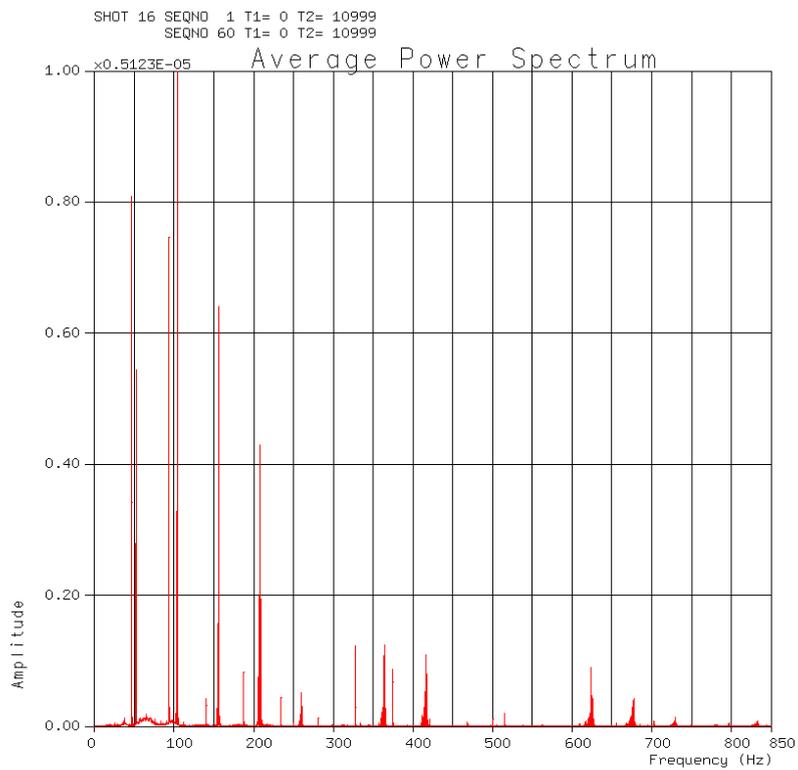


Abbildung 4.3.: Amplitudenspektrum von Schuss 16 der Weitwinkelmessung. Es sind starke Singularitäten einzelner Frequenzen zu erkennen. Zur Berechnung wurde das gesamte Seismogramm über 11 s verwendet.

## 5. Auswertung mit Matlab

Nachdem die Auswertung mit FOCUS nicht zielführend war, setzte ich die Auswertung mit Matlab fort. Zuerst wurden im SEG2-Format vorliegenden Daten in Matlab eingelesen und die Spuren nach Offset sortiert (Abschnitt 5.1). Die sortierten Seismogramme waren die Grundlage zur Auswahl der Seismogrammbereiche, die zur Berechnung der Amplitudenspektren verwendet wurden. Das Verfahren zur Auswahl dieser Bereiche ist in Abschnitt 5.2 beschrieben. Anschließend konnten mittels einer FFT die Amplitudenspektren berechnet werden. Um die Signalenergie quantitativ vergleichen zu können, wurde aus den Flächen unter den Amplitudenspektren der Signalenergiegehalt eines jeden Schusses bestimmt (Abschnitt 5.4). Diese Auswertungsschritte können automatisiert, mit dem Skript „fromDATtoSPECTRUM.m“ (Anhang C.1) aufgerufen und geplottet werden, dort können alle Seismogrammspezifischen Parameter, wie z. B. Schwellenwert für den Picker, Dateinamen und Spurabstand eingestellt werden.

### 5.1. Sortieren und Darstellen der Seismogramme

Die Originaldaten waren im SEG2-Format gespeichert. Mittels der Einlesefunktion „seg22matlab.m“ von KOZOLA [2011] wurden die Daten in Matlab eingelesen. Da zur Weitwinkelmessung der Streamer in einer Schlaufe gelegt war, um den Geophonabstand zu halbieren (Abschnitt 3.3), waren die Spuren nicht nach dem Offset sortiert. Zum Auswählen (Picken) des Fensters, das zur Spektralanalyse verwendet werden sollte, war eine Sortierung nach Offset wichtig. Somit mussten die Spuren zuerst neu sortiert werden. Dies geschah mit Hilfe des Skriptes „seismoADD.m“, das im Anhang C.2 zu sehen ist. Im weiteren Verlauf der Beschreibungen gehen wir nun davon aus, dass alle Spuren innerhalb

eines Seismogramms nach Offset sortiert sind, beginnend mit dem kleinsten Offset bei Spur 1, bis hin zur größten Spurnummer, 24 für die Profilmessung und 60 für die Weitwinkelmessung.

Das beim Plotten der Spuren als Seismogramm, nicht alle Spuren übereinander liegen, wird im gleichen Skript zu jeder Spur ein Wert  $D = N \cdot d$  addiert. Dabei ist  $N$  die Spurnummer und  $d$  der Abstand zwischen den Spuren. Für den Abstand galt die Faustregel, dass  $d$  bei großen Amplituden größer gewählt werden muss und bei kleinen kleiner, damit die Spuren weder ineinander laufen, noch zu flach erscheinen. Um eine gute Vergleichbarkeit zu gewährleisten wurden für  $d$ , nur Zehnerpotenzen von  $10^2$  bis  $10^4$  verwendet und innerhalb eines Seismogramms nicht geändert. Dies war eine Hilfe für die Darstellung der Seismogramme und hatte keinen Einfluss auf die Berechnung der Amplitudenspektren.

## 5.2. Ausschneiden der Analysefenster im Seismogramm

Um den Anteil des Rauschens bei der Spektralanalyse gering zu halten, sollte nicht das gesamte aufgezeichnete Seismogramm verwendet werden. Deshalb war es nötig bestimmte Bereiche des Seismogramms (Fenster) auszuschneiden. Hierfür wurden bei jedem Seismogramm zwei Fenster ausgeschnitten, einmal die Bettreflexion (Abbildung 5.2b), und einmal, der im Folgenden als Nutzsignal bezeichnete Bereich (Abbildung 5.2c). Die Bettreflexion (Abbildung 5.1) entsteht durch die Reflexion an der Grenzschicht Eis - Fels. Das Nutzsignal soll den Bereich enthalten, in dem von der Quelle erzeugtes Signal gegenüber dem Rauschen überwiegt. Der obere Rand des Nutzsignalfensters beginnt mit dem Ersteinsatz der Tauchwelle (Abbildung 5.1). Der untere Rand wurde so gesetzt, dass aus den Seismogrammen, bei denen die Amplitudenspektren verglichen werden sollten, immer ein gleich großes Fenster ausgeschnitten wurde. Damit sollte die Fensterlänge als Auslöser von verschiedenartigen Amplitudenspektren ausgeschlossen werden. Es war dabei wichtig, dass weder zu viel Rauschen innerhalb des Fensters lag, noch das Signal, das eigentlich mit im Fenster liegen sollte, außerhalb liegt. Ich habe die Fensterlänge so gewählt, dass die Bettreflexion bei jedem Seismogramm noch vollständig innerhalb des Fensters lag. Die Fensterlängen für die einzelnen Messungen und Signalarten sind in der Tabelle 5.1 eingetragen.

Die Ersteinsätze wurden automatisch über einen Schwellenwert der Amplitude innerhalb des Skripts „pickCS.m“ (Anhang C.3) gepickt. Beim Überschreiten des Schwellenwertes wird an dieser Stelle die obere Grenze des Fensters gesetzt, das geschieht Spurweise, beginnend mit Spur 1. Wir wissen, dass aufgrund des steigenden Offsets der Ersteinsatz auf der nächst höheren Spur ( $n+1$ ) zu späterer Zeit einsetzen muss, als auf der Spur davor ( $n$ ).

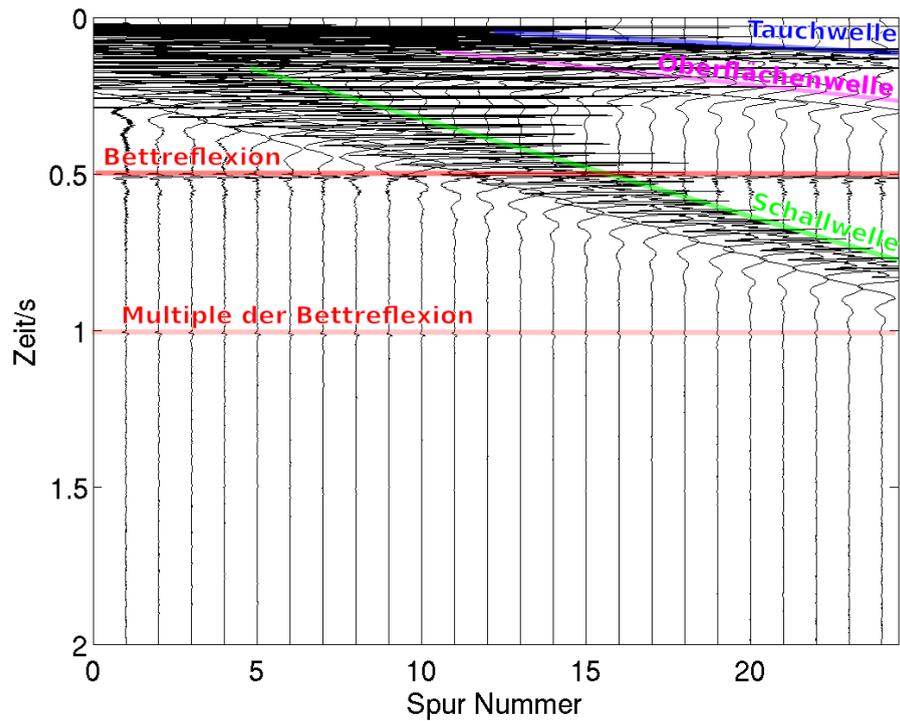


Abbildung 5.1.: Seismogramm der Sprengschnurmessung mit markierten Welleneinsätzen der Tauchwelle (blau), Oberflächenwelle (pink), Schallwelle (grün), Bettreflexion (rot) und der Multiplen der Bettreflexion (rot).

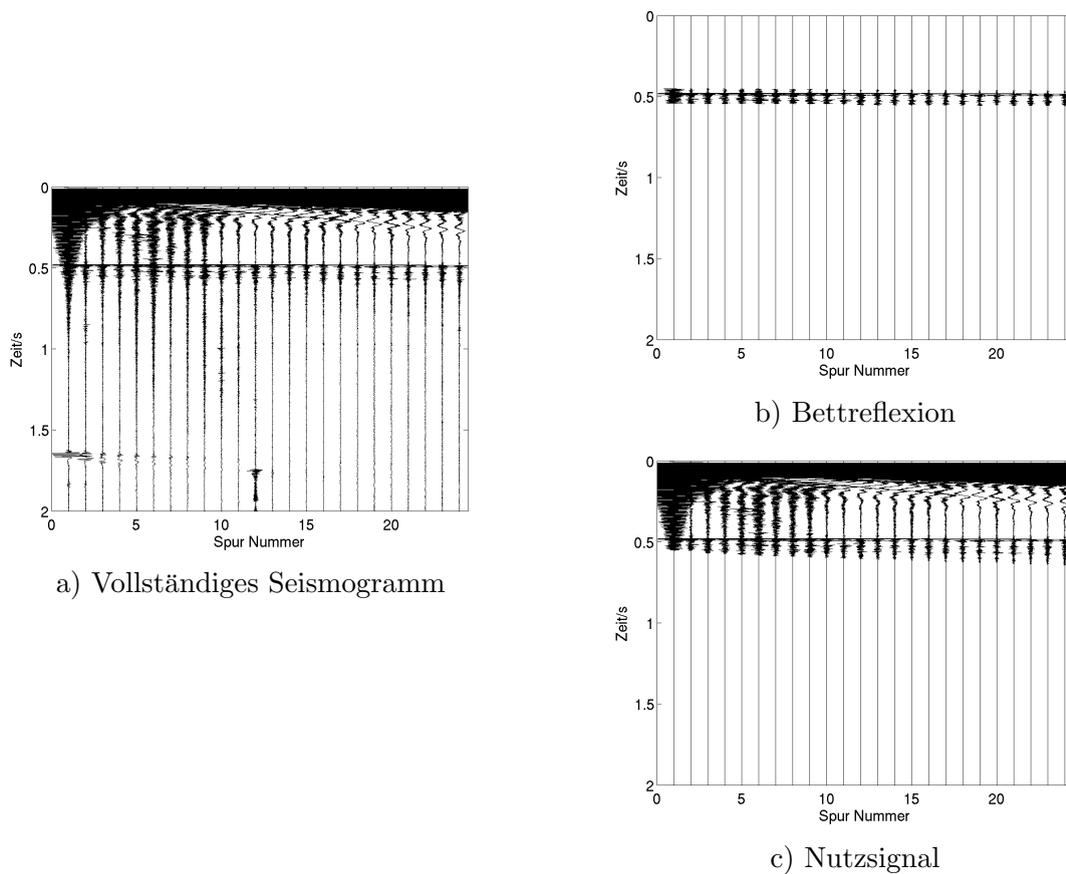


Abbildung 5.2.: Seismogramme von Schuss 6 der Profilmessung. Bei der Bettreflexion und dem Nutzsignal wurden die Ausschläge außerhalb des gepickten Fensters auf 0 gesetzt.

Tabelle 5.1.: Übersicht der Fensterlängen

| Messung             | Signalart     | Fensterlänge |                      |
|---------------------|---------------|--------------|----------------------|
|                     |               | in ms        | in Abtastintervallen |
| Weitwinkel          | Nutzsignal    | 750          | 1500                 |
| Profil              | Nutzsignal    | 550          | 1100                 |
| Weitwinkel          | Bettreflexion | 150          | 300                  |
| Profil              | Bettreflexion | 125          | 250                  |
| Sprengschnurauslage | Schallwelle   | 100          | 200                  |

Falls der Schwellenwert früher überschritten wird, ist der Auslöser dafür logischerweise starkes Rauschen. Dieses zu frühe Überschreiten des Schwellenwertes wird ignoriert. Statt der zu früh gepickten Zeit, wird die Zeit der Spur  $n$ , auch für die Spur  $n+1$  verwendet. Dieses Verfahren erfordert ein korrektes Picken der ersten Spur. Wenn diese nämlich zu spät gepickt wurde, werden die nachfolgenden, richtig gepickten Spuren ignoriert, da sie dann den Schwellenwert früher als die erste Spur überschreiten.

Um auch Einsätze picken zu können, die zu einer späteren Zeit wie der Ersteinsatz der Tauchwelle erfolgen, besteht die Möglichkeit eine Zeit festzulegen, bis zu der die Ausschläge aller Spuren auf 0 gesetzt werden. Dieses Verfahren wurde zum picken der Bettreflexion eingesetzt. Bei der Sprengschnurauslage wurde auch die Schallwelle gesondert gepickt. Dies wird ermöglicht, indem nach jeder Spur die Zeit bis zu der die Ausschläge aller Spuren auf 0 gesetzt werden, um einen Festen Wert erhöht wird. Dieser Wert betrug bei der Schallwelle 65 Abtastintervalle (0,0325 s) pro Spur.

### 5.3. Bestimmen des Frequenzgehaltes

Mit der Funktion „spektrum.m“ [GROOS, 2009], werden reelle Amplitudenspektren berechnet. Zunächst wird hier das komplexe Spektrum mit der „fft“-Funktion von Matlab berechnet. Diese entspricht der vereinfachten Formel der DFT (Gleichung 2.6), zur korrekten Skalierung des Spektrums, wird dieses mit dem Abtastintervall  $\Delta t$  multipliziert. Das reelle Amplitudenspektrum wird berechnet, indem vom komplexen Amplitudenspektrum der Betrag gebildet und der zum negativen Frequenzbereich gehörende Teil des Amplitudenspektrums abgeschnitten wird.

Die Spektren werden bis zu einer Frequenz von 1000 Hz dargestellt, da dies der Nyquistfrequenz der untersuchten Daten, aufgrund des Abtastintervalls von 0,0005 s entspricht. Mit der Funktion spektrum.m wird das Amplitudenspektrum immer von einer Spur berechnet. Da ein Amplitudenspektrum für alle Spuren eines Schusses gewünscht ist, wurde aus den

einzelnen Amplitudenspektren von jeder Spur ein mittleres Amplitudenspektrum aller Spuren eines Seismogramms erstellt. Das bedeutet, es wurde das arithmetische Mittel der Amplitudenwerte aller Spuren eines Schusses, für jede Frequenz einzeln berechnet. Bei der Profilmessung fand immer die erste Spur und bei der Weitwinkelmessung immer die letzte Spur keine Verwendung. Diese Spuren sind mit zu starkem Störsignal behaftet.

## 5.4. Energievergleichswerte und die Vergleichsfrequenz

Zum Vergleich verschiedener Quellen ist es hilfreich Aussagen über die Signalenergie treffen zu können. Nach dem Parsevalschen Theorem ist die Signalenergie im Zeitbereich gleich der im Frequenzbereich. So ist die Fläche unter den Amplitudenspektren ein Maß für die von der Quelle abgegebene Energie. Sie wird im Folgenden als Energievergleichswert bezeichnet. Diese Fläche wurde bestimmt, indem die einzelnen spektralen Amplitudenwerte summiert wurden. Die Einheit dieser Signalenergie ist nicht weiter definiert und daher beliebig. Da die Werte nur untereinander verglichen werden, ist auch keine Einheit nötig. Die Energievergleichswerte für das Nutzsignal der Weitwinkelmessung sind in Abbildung 6.1 dargestellt, die der Profilmessung in Tabelle 6.1.

Um die Frequenzverteilung der einzelnen Schüsse in einem Zahlenwert fassen zu können, wurde eine „Vergleichsfrequenz“ berechnet. Dazu wurden die diskreten, spektralen Amplitudenwerte eines Schusses in aufsteigender Reihenfolge (beginnend bei 0 Hz) aufsummiert, bis 50% der Gesamtenergie erreicht waren. Die Frequenz, bei der 50% erreicht wurden ist die Vergleichsfrequenz. Dies bedeutet, dass bei einer hohen Vergleichsfrequenz ein höherer Anteil der Signalenergie bei hohen Frequenzen liegt, als bei einer niedrigen Vergleichsfrequenz. Die Vergleichsfrequenzen der Weitwinkelmessung sind in Abbildung 6.2 abgebildet und die der Profilmessung in der Tabelle 6.1 eingetragen.



## 6. Vergleich der Schussparameter

Die in dieser Arbeit untersuchte Schüsse unterscheiden sich in einer Vielzahl von Parametern. Diese sind in den Tabellen 3.2 und 3.1 zu sehen. Vergleiche zwischen dem 1. Schuss in einem Bohrloch und dem 2. Schuss in einem Bohrloch, lassen sich sehr gut anhand der Daten der Weitwinkelmessung durchführen. Da hier in jedem Bohrloch, bei ansonsten fast unveränderten Parametern zwei Sprengladungen gezündet wurden, eine genaue Betrachtung dieses Vergleichs erfolgt im Abschnitt 6.1.

In einem Vergleich wird in Abschnitt 6.2 der Schuss, der mit der Sprengschnur durchgeführt wurde Schüssen, die ähnliche Parameter haben, gegenübergestellt. Der Vergleich der Parameter, die in der Profilmessung geändert wurden ist schwierig. Wie in der Tabelle 3.1 zu sehen ist, werden bei den Schüssen der Profilmessung immer mehrere Parameter gleichzeitig verändert, so dass nicht eindeutig hervor geht, welche Veränderungen im Amplitudenspektrum auf welche Änderung der Schussparameter zurück zu führen sind. Dennoch können einige vorsichtige Aussagen getroffen werden, welche in Abschnitt 6.3 diskutiert werden.

### 6.1. Erster und zweiter Schuss in einem Bohrloch im Vergleich

Für diesen Vergleich verwendete ich die Schüsse der Weitwinkelmessung, da hier immer zwei Schüsse in einem Bohrloch geschossen wurden und beim zweiten Schuss lediglich der Offset um 6,25 m vergrößert wurde. Die Streamerauslage hatte eine Länge von 750 m. Damit ist alleine die Streamerauslage 120 mal länger als die Offsetvariation zwischen dem ersten und dem zweiten Schuss. Zudem betrug der Offset zum ersten Geophon, bei Schuss

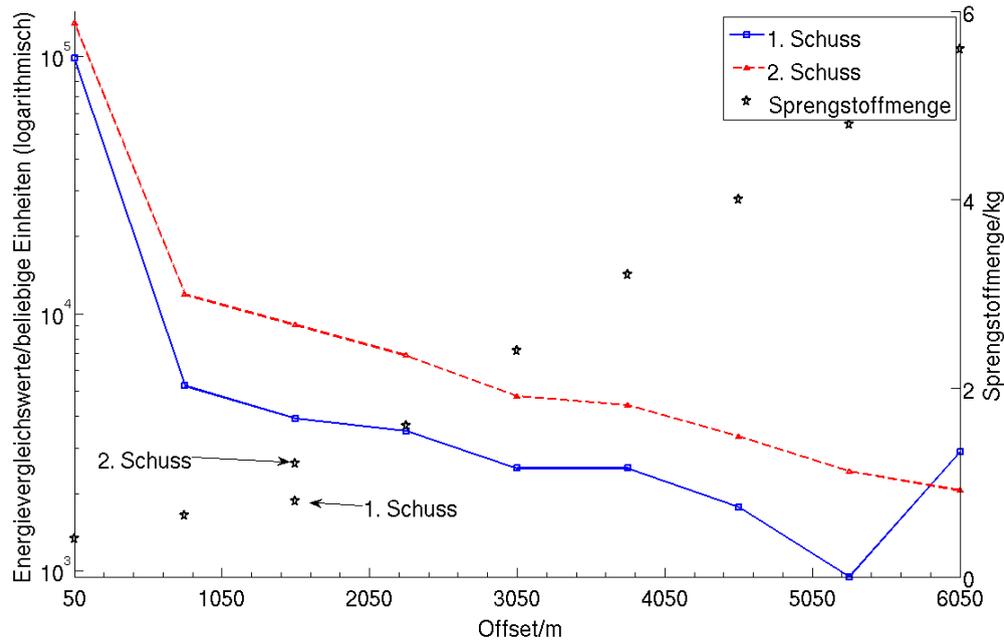


Abbildung 6.1.: Plot der Energievergleichswerte aus dem Nutzsignal und die Sprengstoffmenge über den Offset. Nur bei Schusspunkt 3 unterschied sich die Sprengstoffmenge zwischen dem ersten und dem zweiten Schuss in diesem Bohrloch. Beim Schusspunkt 9 kam es beim ersten Schuss zu einem Fehler bei der Datenaufzeichnung, der die Signalenergie höher erscheinen lässt. Die Energievergleichswerte der zweiten Schüsse ist, mit der Ausnahme bei Schusspunkt 9, immer höher. Bis auf die Ausnahme bei Schusspunkt 9 ist auch bei der Bettreflexion der Energievergleichswert beim zweiten Schuss stets höher, als die des ersten Schusses.

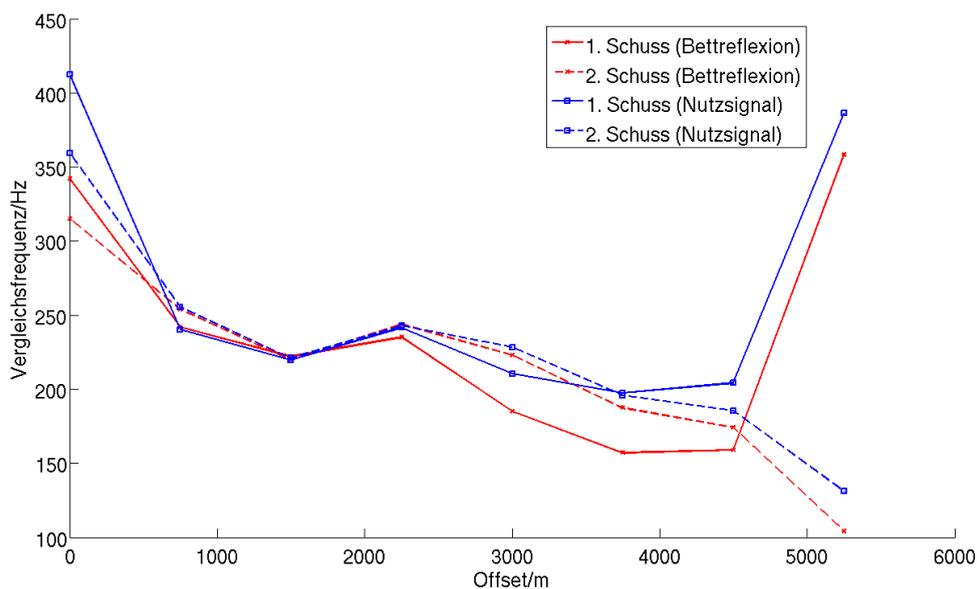


Abbildung 6.2.: Vergleichsfrequenzen über Offset, der Schusspunkte 1 bis 8 der Weitwinkelmessung. Schusspunkt 9 wurde aufgrund der fehlerhaften Aufzeichnung des ersten Schusses nicht dargestellt.

3 bereits 800 m. Somit sollte sich die Offsetvariation kaum auf die Charakteristik der Schüsse auswirken. Wie die Schüsse im einzelnen geschossen wurden ist im Abschnitt 3.3 beschrieben.

Beim Vergleich der unbearbeiteten Seismogramme (CD im Anhang), lässt sich bereits mit dem bloßen Auge erkennen, dass die Amplituden in den Seismogrammen der zweiten Schüsse größer sind. Wie in den Abschnitten 5.4 und 5.3 beschrieben, habe ich aus den Seismogrammen Amplitudenspektren und daraus einen Vergleichswert für die Signalenergie berechnet. Die Abbildungen 6.1 bestätigt, dass fast immer beim zweiten Schuss in einem Bohrloch mehr Energie an den Geophonen ankommt als beim ersten.

Eine Ausnahme stellt der Schusspunkt 9 dar, dort hat der erste Schuss einen höheren Vergleichswert für die Signalenergie als der zweite. Betrachtet man das Seismogramm zu diesem Schuss (CD im Anhang), so sehen die Amplituden des zweiten Schusses auch hier größer aus. Stellt man aber nur das zur Berechnung des Spektrums ausgeschnittene Fenster dar, so fällt auf, dass sich die Amplituden der Spuren nicht um 0, sondern um einen höheren Wert bewegen, etwa um 100. Jedoch ist das nicht für jede Spur gleich. Dieser Verlauf deutet auf einen Fehler bei der Datenaufzeichnung hin, er verursacht erhöhte Amplitudenwerte und damit erscheint die Signalenergie fälschlicherweise größer als beim ersten Schuss in diesem Bohrloch. Da die Erhöhung nicht bei jeder Spur den gleichen Wert hat, wäre eine Korrektur schwierig, zudem sind die Daten der restlichen Schüsse eindeutig, deswegen wird der erste Schuss in Schusspunkt 9 (Schuss 17) nicht für den Energievergleich verwendet. Trotz mit dem Offset größer werdender Sprengladungen, nimmt der Energievergleichswert und damit die Signalenergie mit dem Offset ab (Abbildung 6.1).

Die Vergleichsfrequenzen sind ein Maß für den Frequenzgehalt eines ganzen Amplitudenspektrums (Abschnitt 5.4). Aus der Abbildung 6.2 wird klar, dass die Vergleichsfrequenz mit steigendem Offset niedriger wird. Eine Ausnahme bildet dabei der erste Schuss des letzten dargestellten Schusspunktes (Schusspunkt 8, Schuss 15), dieser hat mit 386 Hz eine ungewöhnlich hohe Vergleichsfrequenz. Dieser Schuss war sehr schwach, da bei ihm vermutlich nicht die gesamte Sprengladung detoniert ist (Abschnitt 3.3). Aufgrund der Schwäche des Schusses, ist das Signal-Rausch-Verhältnis schlecht, so dass das Amplitudenspektrum, fast nur ein Amplitudenspektrum des sehr breitbandigen Rauschens ist. Zum Vergleich wurde hier auch das Amplitudenspektrum des gesamten Bereichs vor dem Einsatz des Nutzsignals, der nur Rauschen enthält, berechnet. Das Amplitudenspektrum dieses Rauschens hat eine Vergleichsfrequenz von 410 Hz. Auch die durchschnittliche Vergleichsfrequenz der Bettreflexion, die ein besseres Signal-Rausch-Verhältnis als das Nutzsignal hat, ist mit 245 Hz höher als die des Nutzsignals mit 226 Hz. Der zweite Schuss,

am Schusspunkt 8 (Schuss 16) war sehr stark, bei ihm ist vermutlich die vom ersten Schuss (Schuss 15) übrige Sprengladung zusätzlich detoniert. Bei diesem starken Schuss ist die Vergleichsfrequenz sehr niedrig (Abbildung 6.2).

Bei den Schusspunkten 2 bis einschließlich 7 (800 bis 4550 m Offset), ist die Vergleichsfrequenz der Bettreflexion beim zweiten Schuss immer höher als beim ersten Schuss. Für diesen Vergleich wurde die Bettreflexion verwendet, da sie einen geringeren Rauschanteil als das Nutzsignal hat, das Nutzsignal zeigt aber ein ähnliches Verhalten. Beim Schusspunkt 1 sind im Gegensatz, zu allen anderen Schusspunkten, die Vergleichsfrequenzen der zweiten Schüsse nicht höher, als die der ersten Schüsse. Um auszuschließen, dass dieses abweichende Verhalten durch den sich um 6,25 m unterscheidenden Offset ausgelöst wird, wurde auch die Vergleichsfrequenz nur für die Spuren 20 bis 59 berechnet. Aber auch bei diesen Spuren ist die Vergleichsfrequenz des ersten Schusses größer, als die des zweiten Schusses.

Anhand der Energievergleichswerte kann deutlich gezeigt werden, dass der 2. Schuss in einem Bohrloch mehr Signalenergie verursacht als der erste. Dies ist auf eine durch den ersten Schuss erfolgte Verdichtung des Firns um das Bohrloch zurückzuführen. Für diese Verdichtung wird beim ersten Schuss Energie aufgewandt, die beim zweiten Schuss hierfür nicht mehr aufgewandt werden muss. Des Weiteren hat poröser Firn mit geringer Dichte, einen niedrigeren Q-Faktor, als Firn mit größerer Dichte. Ein geringer Q-Faktor wirkt sich auf hohe Frequenzen stärker aus, als auf tiefe (Abschnitt 2.2.1). Dies kann die höhere Vergleichsfrequenz fast aller zweiten Schüsse erklären. Es kann gezeigt werden, dass durch ein schlechtes Signal-Rausch-Verhältnis die Vergleichsfrequenz erhöht wird. Dadurch kann die erhöhte Vergleichsfrequenz des schwachen Schuss 15 erklärt werden. Eine naheliegende Vermutung, dass größere Sprengladungen höhere Vergleichsfrequenzen des tatsächlichen Signals verursachen, kann hier nicht bestätigt werden.

## **6.2. Sprengschnur an der Oberfläche im Vergleich zu Sprengladungen im Bohrloch**

Die Sprengschnurauslage lässt sich wegen der ähnlichen Quell-Geophon-Geometrie mit den Bohrlochschüssen der Profilmessung, deren erstes Geophon einen Offset von 25 m hat, vergleichen. Vergleicht man nur die Seismogramme (CD im Anhang), der Sprengschnurauslage mit den Schüssen in den Bohrlöchern, fällt die stark ausgeprägte Schallwelle der Sprengschnurauslage auf. Die Amplitudenspektren der Sprengschnurauslage zeichnen sich durch

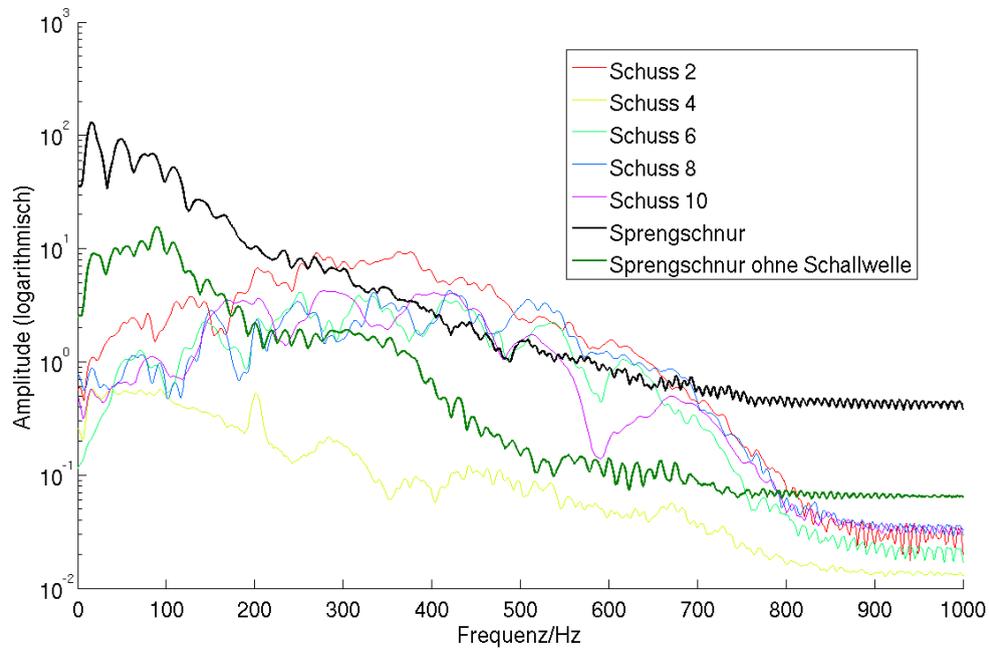


Abbildung 6.3.: Amplitudenspektren der Schüsse mit 25 m Offset zum ersten Geophon, aus der Profilmessung und der Sprengschnurauslage, erstellt aus den Bettreflexionen. Das Amplitudenspektrum der Sprengschnurauslage wurde einmal mit und einmal ohne die von der Schallwelle dominierten Spuren 11 bis 16 dargestellt.

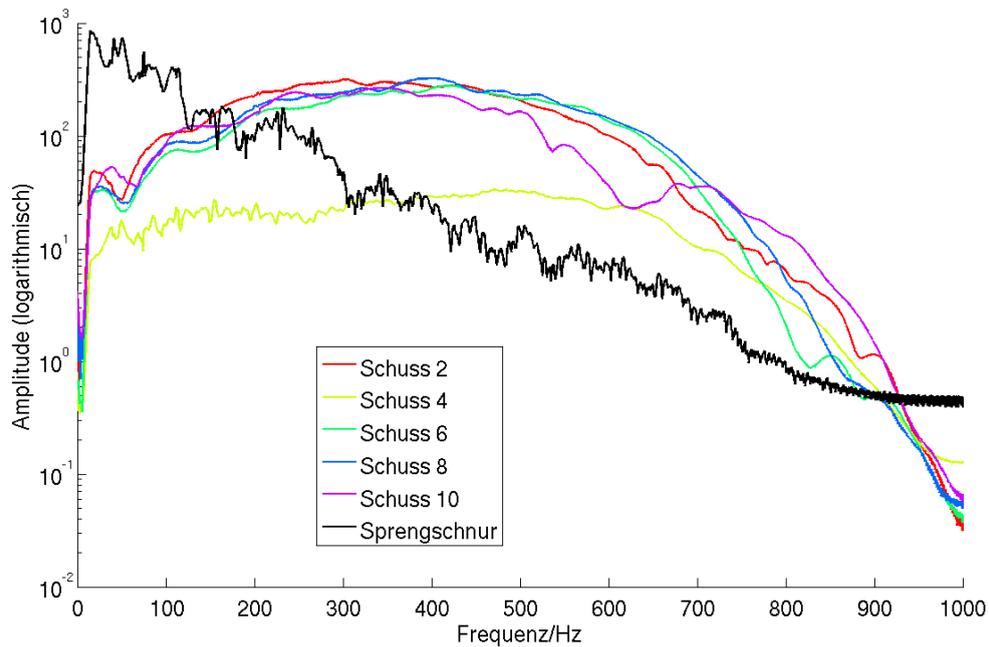


Abbildung 6.4.: Amplitudenspektren der Schüsse mit 25 m Offset zum ersten Geophon, aus der Profilmessung und der Sprengschnurauslage, erstellt aus den Nutzsigenalen.

tiefe Frequenzen mit hoher Amplitude aus (Abbildung 6.3 u. 6.4) Das Amplitudenmaximum liegt bei 16 Hz und fällt im Mittel kontinuierlich mit höher werdender Frequenz ab. Die Amplitudenwerte der Sprengschnurauslage übertreffen die der Bohrlochschüsse beim Nutzsignal nur im Bereich  $<170$  Hz, bei den Bettreflexionen nur im Bereich  $<250$  Hz, danach sind sie deutlich geringer. Die in den Amplitudenspektren (Abbildungen 6.3 und 6.4) groß erscheinenden Amplitudenwerte im Bereich von 800 Hz bis 1000 Hz sehen nur aufgrund der logarithmisch dargestellte y-Achse so groß aus. Tatsächlich sind dort die Amplituden bereits so gering, dass sie kaum noch im messbaren Bereich liegen und möglicherweise auf Fenstereffekte bei der FFT zurückzuführen sind (Abschnitt 2.3). Relativ zu den Energievergleichswerten der Bohrlochschüsse, sind die Energievergleichswerte der Sprengschnurauslage, bei der Bettreflexion größer, als beim Nutzsignal. Die Bohrlochschüsse haben das Amplitudenmaximum im Bereich von 260 Hz bis 440 Hz. Eine Ausnahme ist der Schuss 4, der im Amplitudenspektrum der Bettreflexion (Abbildung 6.3) im Frequenzverlauf mehr der Sprengschnurauslage, als den übrigen Bohrlochschüssen ähnelt. Im Seismogramm zu Schuss 4 ist auch eine stärkere Schallwelle, als in den übrigen Bohrlochschüssen zu erkennen, hervorgerufen durch die Zündung der Bohrlochladung mit einer Sprengschnur, deren Ende außerhalb des Bohrloches gezündet wurde. Das Amplitudenspektrum (Abbildung 6.3) der Bettreflexion, wurde auch ohne die von der Schallwelle dominierten Spuren 11 bis 16 berechnet (Abbildung 5.1). Trotz dem Fehlen von 5 Spuren, übersteigen die spektralen Amplitudenwerte im Bereich von 0 bis 180 Hz noch die der Bohrlochschüsse, im höherfrequenten Bereich sinken die spektralen Amplitudenwerte jedoch schnell unter das Niveau der Bohrlochschüsse.

In der Abbildung 6.5 ist das Amplitudenspektrum des Nutzsignals und der Schallwelle abgebildet. Das Fenster des Nutzsignals wurde auf 2000 Abtastintervalle (1 s) vergrößert, damit es die gesamte Schallwelle beinhaltet. Die Schallwelle wurde mit einem 200 Abtastintervalle (0,1 s) langem Fenster ausgeschnitten. Beim Vergleich dieser beiden Amplitudenspektren wird deutlich, dass der größte Teil der Signalenergie aus der Sprengschnurauslage von der Schallwelle stammt. Dies wird auch beim Energievergleichswert deutlich, der für die Schallwelle 122 044 und für das Nutzsignal 159 193 beträgt. Der Frequenzverlauf der Schallwelle ist dem des Nutzsignals ähnlich, somit ist auch der Unterschied zwischen der Vergleichsfrequenz mit 84 Hz für das Nutzsignal und 88 Hz für die Schallwelle gering.

Um die Schallwelle als einzige Ursache für die große Signalenergie im tiefen Frequenzbereich auszumachen, müsste die Signalenergie der Schallwelle nur in diesem Bereich nahezu so groß wie das Nutzsignal sein. Die Schallwelle ist aber im gesamten Frequenzbereich dem Nutzsignal ähnlich (Abbildung 6.5). Dies zeigt, dass die großen Amplituden im tiefen

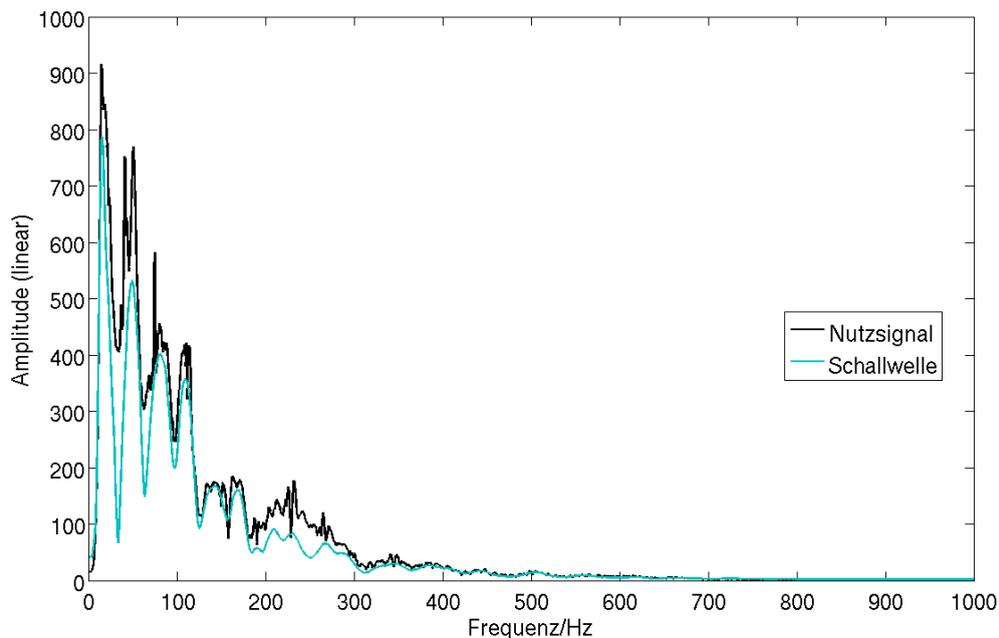


Abbildung 6.5.: Amplitudenspektrum des Nutzsymbols und der Schallwelle der Sprengschnurauslage im Vergleich. Stellen an denen die Amplitudenwerte der Schallwelle größer als die der Sprengschnurauslage sind können auf Fenstereffekte zurückgeführt werden. Tatsächlich sind die Amplitudenwerte des Nutzsymbols immer größer, als die der Schallwelle, da die gesamte Schallwelle auch im Nutzsymbols liegt.

Frequenzbereich nicht allein auf die Schallwelle zurückzuführen sind, sondern charakteristisch für das gesamte von der Sprengschnurauslage ausgehende Signal sind. Um den Frequenzbereich in dem die Signalenergie der seismischen Wellen liegt besser eingrenzen zu können, wurde in Abbildung 6.6 die Differenz der Amplitudenspektren der Schallwelle und des Nutzsymbols gebildet und in Prozent des Nutzsymbols aufgetragen. In rot ist die mittels eines Moving-Average-Filters geglättete Kurve aufgetragen, in schwarz die ungeglättete Kurve. In 6.6 ist zu erkennen, dass die Signalenergie der seismischen Wellen bei der Sprengschnurauslage hauptsächlich im Bereich von etwa 20 bis 80 Hz und 190 bis 380 Hz liegt.

Verursacht wird der gut ausgeprägte tiefe Frequenzbereich und der im Vergleich zu den Bohrlochschnüssen schwach ausgeprägter hohe Frequenzbereich durch die Dämpfung der hohen Frequenzen im oberflächennahen Firn, der eine große Porosität aufweist (Abschnitt 2.2). Wellen mit tiefer Frequenz werden weniger stark gedämpft, als Wellen hoher Frequenz. Betrachtet man nur die Bettreflexion (Abbildung 6.3), so ist die Signalenergie im tiefen Frequenzbereich höher und im hohen Frequenzbereich zumindest in der gleichen Größenordnung, wie die Signalenergie der Bohrlochschnüsse. Hierbei muss berücksichtigt

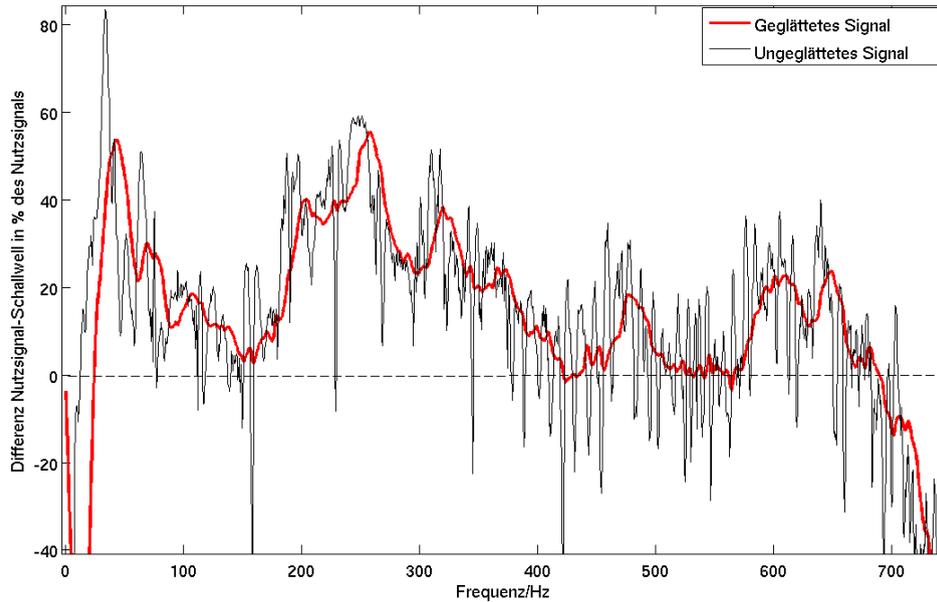


Abbildung 6.6.: Differenz der Amplitudenspektren der Schallwelle und des Nutzsignals in Prozent des Nutzsignals. Die Bereiche  $<0\%$  werden durch die Stellen an denen die Schallwelle größere Amplitudenwerte als das Nutzsiegel hat verursacht. Da diese nur durch Fenstereffekte verursacht werden, sind sie uninteressant. Da im Bereich über 750 Hz die Werte nur  $<0\%$  sind wurde dieser Bereich nicht geplottet.

werden, dass eine Sprengschnurauslage zwar mit weniger Aufwand, als ein Bohrlochschuss aufgebaut werden kann, da das aufwändige Bohren weg fällt, sie hatte aber bei dieser Messung die vierfache Sprengstoffmasse.

### 6.3. Weitere Vergleiche bei der Profilmessung

Bei der Profilmessung wurden mit jedem Schuss mehrere Parameter geändert, deshalb ist es schwer nachzuvollziehen, welche Änderung des Amplitudenspektrums auf welche Parameteränderung zurückzuführen ist. Es wurde versucht so viele Parameter wie möglich isoliert zu betrachten, die Schlüsse die daraus gezogen werden sind teilweise nur Indizien für ein bestimmtes Verhalten. Diese Indizien müssten durch Wiederholungsmessungen noch bekräftigt werden.

- Die Ladungsmasse bei Schuss 2 betrug 400 g die Ladungsmasse bei den anderen Schüssen mit 25 m Offset nur 250 g. Dies spiegelt sich auch im Energievergleichswert (Tabelle 6.1) wieder, der höher als alle anderen der Profilmessung ist.
- Schuss 1 wurde nur in 1 m Tiefe gezündet. Trotz einer Ladungsmasse von 400 g ist

Tabelle 6.1.: Vergleichsfrequenzen und Energievergleichswerte der Profilmessung. Die Schüsse mit 25 m Offset zum ersten Geophon sind grau hinterlegt.

| Schuss | Vergleichsfrequenz in Hz |            | Energievergleichswert |            |
|--------|--------------------------|------------|-----------------------|------------|
|        | Bettreflexion            | Nutzsignal | Bettreflexion         | Nutzsignal |
| 1      | 51                       | 38         | 1271                  | 3294       |
| 2      | 328                      | 350        | 5521                  | 254460     |
| 3      | 388                      | 379        | 4553                  | 35345      |
| 4      | 149                      | 414        | 329                   | 33545      |
| 5      | 245                      | 264        | 145                   | 1340       |
| 6      | 338                      | 397        | 2406                  | 220680     |
| 7      | 376                      | 355        | 3837                  | 35510      |
| 8      | 378                      | 390        | 2682                  | 248350     |
| 9      | 348                      | 372        | 3094                  | 29421      |
| 10     | 319                      | 340        | 2656                  | 197190     |

der Energievergleichswert wesentlich geringer, als die der anderen Schüsse mit 265 m Offset. Am Amplitudenspektrum (Abbildung 6.7) ist zudem zu erkennen, dass der Frequenzverlauf ähnlich zu dem der Sprengschnurauslage ist. Dies ist ein Hinweis darauf, dass dieser Frequenzverlauf nicht nur für Sprengschnurauslagen charakteristisch ist, sondern generell für oberflächennahe Quellen. Hier muss aber berücksichtigt werden, dass sich der Offset deutlich von der Messung mit der Sprengschnurauslage unterscheidet. Als Ursache für den Frequenzverlauf kommt auch hier die Dämpfung im porösen Firn an der Oberfläche in Frage, die sich stärker auf hohe, als auf tiefe Frequenzen auswirkt (Abschnitt 2.2).

- Bei Schuss 4 wurde das Bohrloch nur wenig, auf der Länge von etwa einem Meter verfüllt. Diese Füllung wurde beim Schuss teilweise aus dem Bohrloch herausgedrückt. Schuss 4 hat eine außergewöhnlich geringen Energievergleichswert, ebenso Schuss 5. Ein Erklärungsversuch hierfür ist, dass beim Bewegen der Füllung bei Schuss 4 viel Energie verloren ging. Schuss 5 wurde im gleichen Bohrloch geschossen, es könnte sein das Schuss 4 das Bohrloch so beschädigt hat, dass die Ankopplung nicht mehr gewährleistet war.
- Schuss 7 und 9 haben, bis auf die Triggerung, identische Schussparameter. Die Triggerung sollte bei den gewählten Fenstern keine Auswirkungen zeigen. Schuss 3 unterscheidet sich von Schuss 7 und 9 durch die Verdämmung, das 1,8 m tiefere Bohrloch und die Zündung ohne Sprengschnur. Die Vergleichsfrequenzen sowie die Energievergleichswerte von Schuss 3 sind höher, als die Werte von Schuss 9. Dies ist ein Indiz dafür, dass mehr Energie durch das Verdämmen und/oder das tiefere Bohrloch übertragen wird als durch die zusätzliche Sprengschnur. Diese Aussage muss jedoch

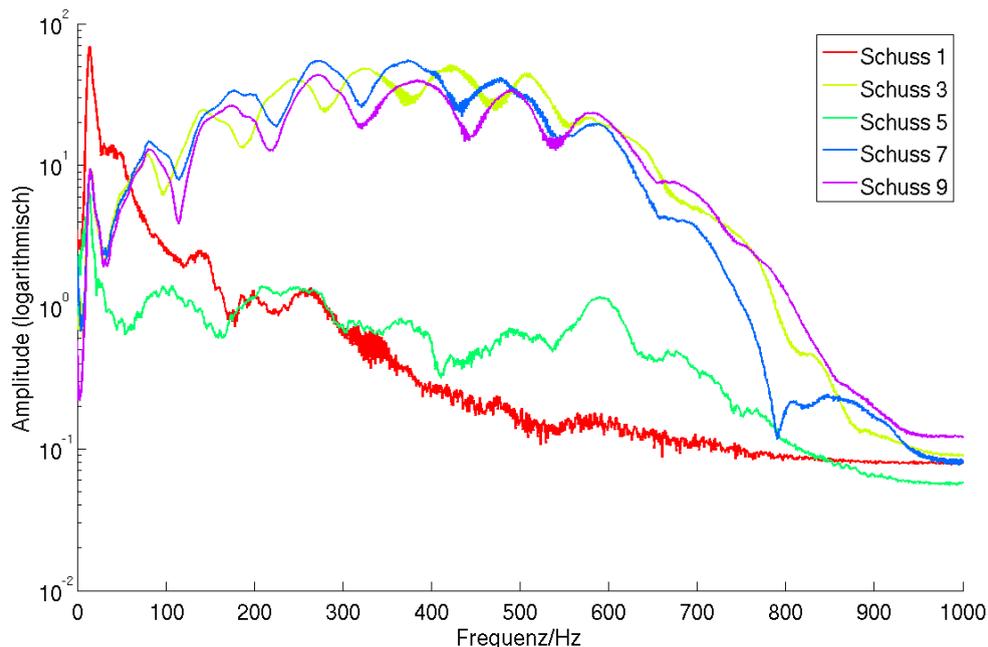


Abbildung 6.7.: Amplitudenspektren der 265 m Schüsse aus der Profilmessung und der Sprengschnurauslage, erstellt aus dem Nutzsignal.

mit Vorsicht betrachtet werden, da sich die Vergleichswerte nur gering unterscheiden. Im Dichteprofil (Abbildung 3.2) ist zu erkennen, dass ab einer Tiefe von etwa 8,5 m, die Dichte und damit der Q-Faktor (Abschnitt 2.2), weniger schnell zunehmen als bei geringerer Tiefe. Das ist bei der Dichte von  $550 \text{ kg/m}^3$ , bei der der Firn in der dichtesten Kugelpackung gelagert ist, ab dort geschieht die Verdichtung des Firns langsamer (Abschnitt 2.1). Aufgrund des geringen Unterschiedes in den Amplitudenspektren, der 8,2 m tiefen Schüsse, im Vergleich zu den 10 m tiefen Schüssen, kann der Mehraufwand für die Verdämmung und die 1,8 m tiefere Bohrung in Frage gestellt werden.

## 7. Zusammenfassung und Ausblick

Zum Vergleich verschiedener seismischer Explosionsquellen im Eis wurden die Seismogramme zweier Messreihen mit insgesamt 29 Schüssen ausgewertet. Bei diesen Schüssen wurde Sprengstoff in Bohrlöchern und Sprengschnur an der Oberfläche als seismische Quellen eingesetzt. Zunächst wurden mit FOCUS Amplitudenspektren berechnet. Diese konnten aber nur für einen ersten Überblick der Quelleigenschaften verwendet werden. Es hat sich gezeigt, dass mit FOCUS ein systematischer Vergleich von Amplitudenspektren nur schwer möglich ist. Die Auswahl von Fenstern ist nur durch ein ungenaues grafisches Werkzeug möglich, somit ist die Auswahl mit gleichbleibenden Fensterlängen nahezu unmöglich. Der Funktionsumfang von FOCUS reicht nicht aus, um damit Energievergleichswerte und Frequenz der einzelnen Schüsse zu berechnen. Deshalb wurden eigens für den Vergleich verschiedener seismischer Quellen, Verfahrensweisen und Skripte für Matlab entwickelt, sowie vorhandene kombiniert. Das Ergebnis sind gut vergleichbare Amplitudenspektren und Vergleichswerte, mit deren Hilfe Eigenschaften der seismischen Quellen herausgearbeitet werden konnten.

Beim Vergleich der untersuchten Amplitudenspektren können folgende Erkenntnisse hervorgehoben werden:

- Der zweite Schuss in einem Bohrloch überträgt mehr Energie, häufig mit höherem Anteil hoher Frequenzen. Dies kann damit erklärt werden, dass der erste Schuss in einem Bohrloch den Firn in dessen Umgebung verdichtet. Für die Verdichtung muss beim ersten Schuss Energie aufgewandt werden, die dann nichtmehr als Signalenergie zur Verfügung steht. Firn mit hoher Dichte hat einen größeren Q-Faktor und damit geringere Dämpfung, als Firn mit geringer Dichte, dies beeinflusst hohe Frequenzen

stärker als tiefe.

- Schüsse an der Oberfläche (Sprengschnurauslage) und in 1 m Tiefe übertragen, bei gleicher Masse der Sprengladung, weniger Energie, insbesondere im Bereich hoher Frequenzen, als Schüsse in 8 bis 10 m tiefen Bohrlöchern. Die Erklärung hierfür ist ähnlich wie die des vorherigen Punktes: Im Firn steigt mit der Tiefe auch die Dichte, und damit der Q-Faktor, was zu weniger Dämpfung führt.
- Eine Sprengschnurauslage unmittelbar an der Oberfläche verursacht eine starke Schallwelle, die für einen Großteil der Signalenergie verantwortlich ist.
- Die untersuchte Sprengschnurauslage an der Oberfläche konnte im Tiefen bis mittleren Frequenzbereich (von 0 Hz bis in den Bereich von 170 bis 180 Hz) mehr Energie als ein Bohrlochschuss übertragen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Gesamtmasse des Sprengstoffes in der Sprengschnurauslage etwa der vierfachen Masse der Sprengladung des Bohrlochschusses entsprach.
- Die Rentabilität der Verfüllung von Bohrlöchern kann in Frage gestellt werden, da dies einen Mehraufwand und eine zusätzliche Fehlerquelle darstellt. Die Signalenergie konnte bei den untersuchten Schüssen nur wenig, oder sogar garnicht gesteigert werden.
- Das Bohren von Löchern, tiefer als zu dem Punkt, an dem die Firndichte  $550 \text{ kg/m}^3$  beträgt kann in Frage gestellt werden. Theoretisch sollte der Punkt, an dem die Umgebung des Sprengstoffes den höchsten Q-Faktor aufweist der Ort sein an dem die Explosion am meisten Energie in Form von seismischen Wellen überträgt. Ab einer Firndichte von  $550 \text{ kg/m}^3$  steigt die Firndichte mit der Tiefe aber nur noch langsam, zudem gewinnt mit zunehmender Tiefe die Abnahme des Q-Faktors durch Temperaturerhöhung an Bedeutung.

Die Matlabskripte können auch auf andere seismische Quellen als die, die im Rahmen dieser Arbeit untersucht wurden angewandt werden. Gerade der Vergleich von Explosionsquellen mit Vibroseisquellen wäre für eine Fortsetzung dieser Arbeit interessant. Zudem könnten noch mehr Schüsse, bei denen systematisch immer nur ein Parameter geändert wird ausgewertet werden, um die Aussagen statistisch zu untermauern. Außerdem sind noch zusätzliche Vergleichswerkzeuge wie z. B. Spektrogramme, auf deren y-Achse die Frequenz aufgetragen wird und die Frequenzamplituden als Farbcode. Die x-Achse könnte Zeitabhängig oder auch offsetabhängig aufgetragen werden. Hier bietet Matlab aufgrund der hohen Flexibilität viele weitere Möglichkeiten, denkbar wäre z. B. auch ein komplexerer

Picker, um die Amplitudenspektren bestimmter schwacher und kleinräumiger Reflexionen, wie die der internen Eisreflektoren zu untersuchen.



# Literaturverzeichnis

- BUTTKUS, BURKHARD (1991). *Spektralanalyse und Filtertheorie in der angewandten Geophysik*. Springer, Berlin.
- CARA, MICHEL (1994). *Geophysik*. Springer, Berlin. Deutsche Übersetzung.
- DIEZ, ANJA (2010). *Ice properties derived from reflection seismics at a cold alpine saddle and a local antarctic dome*. Diplomarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- EISEN, OLAF und C. HOFSTEDE (2010). *Expedition planning information LIMPICS ANT 2010/11 Halfvarryggen Dronning Maud Land Antarctica*.
- EISEN, OLAF, C. HOFSTEDE und R. DREWS (2010). *Final Expedition Report LIMPICS ANT 2009/10 Ekströmisen & Halfvarryggen Dronning Maud Land Antarctica*.
- GROOS, JOERN (2009). *spektrum.m*. Matlabskript zum Erstellen von Spektren.
- KAMMEYER, KARL-DIRK ; KROSCHER, KRISTIAN (2009). *Digitale Signalverarbeitung: Filterung und Spektralanalyse; mit MATLAB-Übungen; mit 33 Tabellen*. Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 7., erw. u. korr. Aufl.
- KOZOLA, STUART (2011). *Large Data in MATLAB: A Seismic Data Processing Case Study*. Es wurde nur die Einleseroutine `seg22matlab.m` verwendet; online verfügbar auf: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/30585-large-data-in-matlab-a-seismic-data-processing-case-study>; besucht am 26.06.2012 11.06 Uhr.
- MILLER, R. D., S. E. PULLAN, J. S. WALDNER und F. P. HAENI (1986). *Field comparison of shallow seismic sources*. *Geophysics*, 51(11):2067–2092.
- PATERSON, WILLIAM S. B. (1994). *The physics of glaciers*. Pergamon, Oxford [u.a.], 3. ed. Aufl. Previous ed.: 1981.
- PETERS, L. E., S. ANANDAKRISHNAN, R. B. ALLEY und D. E. VOIGT (2012). *Seismic attenuation in glacial ice: A proxy for englacial temperature*. *Journal of Geophysical Research, Earth Surface*, 117.

- RITTER, JOACHIM (2010). *Digitale seismologische Signalverarbeitung und Zeitreihenanalyse*. Skript zur Vorlesung.
- SEN, V., P. STOFFA, I. DALZIEL, D. BLANKENSHIP, A. SMITH und S. ANANDAKRISHNAN (1998). *Seismic Surveys in Central West Antarctica: Data and Processing Examples from the ANTALITH Field Tests(1994-1995)*. Terra Antarctica, 5(4):761–772.
- STAPLES, R.K., R. HOBBS und R. WHITE (1999). *A comparison between airguns and explosives as wide-angle seismic sources*. Geophysical Prospecting, 47:313–339.
- WESCHE, C., S. RIEDEL und D. STEINHAGE (2009). *Precise surface topography of the grounded ice ridges at the Ekströmisen, Antarctica, based on several geophysical data sets*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 64(4):381 – 386.

# Anhang

## A. Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbstständig und ohne unerlaubte Hilfsmittel angefertigt, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form oder auszugsweise noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

Karlsruhe, den 13. August 2012

(Christopher Sanz)

## B. Compact Disc

- vollständige Seismogramme
- Seismogramme der ausgeschnittenen Fenster
- alle Amplitudenspektren in logarithmischer Darstellung
- alle Amplitudenspektren in linearer Darstellung

## C. Matlab Skripte

### C.1. Masterskript “fromDATtoSPECTRUM.m”, zum aufrufen der Funktionen

```

clear all
close all

%for it=22:28;

global x
global abst
global fact

it=25; % file number
filen='_TEST_';
%filen='Nutz '
abst=100; %distance between traces
x=50; % force zeros in seismogram up to xth sample
fact=1;
y=45; % range of y-axis in plot
treshold=50; % treshold for picker
tick= [0:10:60];

[shot13,headerC]=seg22matlab(['data/531_',num2str(it),'.DAT']); %
    read data

figure(1) %full seismogram
set(gcf,'Name','whole_sorted_data_set')
[shotSort,shotSeismo]=seismoADD(shot13,22000,0.0005,60); %sort
    traces
set(gca,'ylim',[0 4],'xlim',[0 abst*60.5],'XTickLabel',tick,'
    FontSize',15)
set(gcf,'position',[0,660,600,500])
xlabel('Spur_Nummer')
ylabel('Zeit/s')

```

```

print ('-dpng', ['Spektren/wholeSortet', file_n ,num2str(it)])
saveas(gcf,['Spektren/wholeSortet', file_n ,num2str(it)],'fig');

```

```

figure(2)           %picked seismogram
set(gcf, 'Name', 'picked_sorted_data_set')
[shotSpek, shotSeismoT, time]=pickCS_Nutzsignal(shotSort
        ,60,22000,0.0005,1500, threshold); %pick windows
set(gca, 'ylim', [0 4], 'xlim', [0 abst*60.5], 'XTickLabel', tick, '
        FontSize', 15)
set(gcf, 'position', [550,660,600,500])
xlabel('Spur_Nummer')
ylabel('Zeit/s')
print ('-dpng', ['Spektren/pickedSortet', file_n ,num2str(it)])
saveas(gcf,['Spektren/pickedSortet', file_n , num2str(it)],'fig')

```

```

[specnew, frequencies]=specTraceXtoZ(shotSpek,32,59,0.0005); %
        calculate spectrum

```

```

figure(3)           %plot linear spectrum
set(gcf, 'Name', 'spectrum')
plot(frequencies, specnew, 'DisplayName', 'specnew_vs._frequencies',
        'XDataSource', 'frequencies', 'YDataSource', 'specnew', 'lineWidth
        ',2); figure(gcf)
ylim([0 y]);
ylabel('Amplitude_(linear)', 'FontSize',15)
xlabel('Frequenz/Hz', 'FontSize',15)
set(gcf, 'position', [1100,660,600,500])
set(gca, 'FontSize',15)
set(gcf, 'PaperSize', [20 20])
print ('-dpng', ['Spektren/', file_n , num2str(it)]);
saveas(gcf,['Spektren/', file_n ,num2str(it)],'fig')

```

```

figure(4)           %plot log spectrum

```

```

semilogy( frequencies ,specnew , 'DisplayName' , 'specnew_vs_
    frequencies' , 'linewidth' , 2); figure( gcf)
ylim([0 y]);
ylabel('Amplitude_(logarithmisch)' , 'FontSize' ,15)
xlabel('Frequenz/Hz' , 'FontSize' ,15)
set( gcf , 'position' , [1500 ,660 ,600 ,500])
set( gca , 'FontSize' ,15)
set( gcf , 'PaperSize' , [20 20])
print ('-dpng' , ['Spektren/' , filen , num2str(it) , 'log' ]);
saveas( gcf , ['Spektren/' , filen , num2str(it) , 'log' ] , 'fig')

energ1 = 0;      %calculate full energy
for m=1:11001;
    energ1 = specnew(m)+energ1;
end

Vergleichsfrequenz = 0;      %calculate Vergleichsfrequenz
energ1VGL = 0;
for m=1:11001
    if energ1VGL < 0.5*energ1;
        energ1VGL = specnew(m)+energ1VGL;
    else Vergleichsfrequenz = frequencies(m);
        break;
    end
end

energ10 = 0;      %calculate energy from 10th channel
for m=10:11001;
    energ10 = specnew(m)+energ10;
end

%save(['Spektren/variables' , filen , num2str(it)])
%end
savefile=fullfile(['Spektren/variables' , filen , num2str(it)])

```

```
%save files
save (savefile)

unix ( [ 'cp_fromDATtoSPECTRUM_Nutzsignal.m_/
fromDATtoSPECTRUM_Skripte_&&_mv_fromDATtoSPECTRUM_Skripte/
fromDATtoSPECTRUM_Nutzsignal.m_fromDATtoSPECTRUM_Skripte/
fromDATtoSPECTRUM', file_n , num2str( it ) , '.m' ] , '-echo' )
```

Listing 7.1: Masterskript "fromDATtoSPECTRUM.m", zum aufrufen der Funktionen

## C.2. Skript “seismoADD.m”, zum Sortieren der Spuren

```

function [shotSort ,shotSeismo]=seismoADD(shot , samples , delta ,
      nTraces)
global abst

%this script sorts the traces of a seismic data set recordet with
      a foldet streamer
%The streamer is foldet to get a smaller channel distance , so the
      channel
%in the middle of the streamer is the channel with the smallest
      offset. The
%output is the sortet seismic data "shotSort". Additional output
      is a easy
%to plot seismic data set

%Christopher Sanz 2012, KIT

%Uncomment the following 4 lines and comment the first line if
      you want to
%use this function as a static script.

% shot = shot13; %seismic data set
% samples = 22000; %number of samples
% delta = 0.0005; %sampling rate
% nTraces = 60; % number of traces

%

%%% Sort the traces %%%
k=nTraces/2+1;
for m=2:2:nTraces
      for n=1:samples;
          shotSort(n,m) = shot(n,k);

```

```

        end
        k=k+1;
    end

k=nTraces/2;
for m=1:2:nTraces-1
    for n=1:samples;
        shotSort(n,m) = shot(n,k);
    end
    k=k-1;
end

%%% Plotting %%%

%add to every trace 100, to get some space between the traces
for m=1:nTraces;
    for n=1:samples;
        shotSeismo(n,m) = shotSort(n,m)+m*abst; %abst is the space
            between
        %if you havent set the distance variable overwrite it with for
            example
        %the value 100
    end
end

%create time axis
time = zeros(samples,1);
for n=1:samples-1;
    time(n+1) = time(n)+delta;
end

%plot

```

```
plot(shotSeismo ,time)
set(gca, 'YDir', 'reverse');
set(0, 'DefaultAxesColorOrder', [0 0 0]);
end
```

Listing 7.2: Skript seismoADD.m, zum Sortieren der Spuren

### C.3. Skript “pickCS”, zum Picken der Fenster

```

function [shotSpek ,shotSeismoT ,time]=pickCS (shotSort , traces ,
        samples , delta , length , threshold )
global abst

% traces=60; %number of traces
% samples=22000; %number of samples
% length=1000; %length of window in samples
% threshold=40; %threshold
% delta=0.0005; %samplingrate
%

%%%%force zeros up to xth sample
global x
for t=1:x
shotSort = shotSort ;
shotSort (t ,:)=0;
end

shotSpek = zeros(samples , traces) ;
    beforeValue=0;
for m=1:traces; %loop over all traces
    z=0;%cut switch
for n=1:samples; %loop over all samples
    if (shotSort (n,m)>threshold)&(z==0); %if the peak bigger than
        the threshold it cuts the window at this position
        if (n>beforeValue); %cutting the window at a new
            position is just allowed when the new position is at
            later time than the position of the trace before
            i=1;
        for k=n:n+length;
            shotSpek (k-100,m) = shotSort (k-100,m); %cut the

```

```

        window 100 samples before the threshold value
        i=i+1;
    end
    beforeValue = n;
else
    %is the new position at earlier
    time than the position of the sample before it uses
    the position of the sample before
    i=1;
    for k=beforeValue:beforeValue+length;
        shotSpek(k-100,m) = shotSort(k-100,m);
        i=i+1;
    end
end
end

z=1; %cut the window just one time

end

end

if (z==0); %fallback if the whole trace is smaller than the
threshold
    i=1;
    for k=beforeValue:beforeValue+length;
        shotSpek(k-100,m) = shotSort(k-100,m);
        i=i+1;
    end
end

end

end

%%%plot the window%%%

%add to every trace 100, to get some space between the traces

```

```

for m=1:traces;
for n=1:samples;
    shotSeismoT(n,m) = shotSpek(n,m)+m*abst;%abst is the space
        between
    %if you havent set the distance variable overwrite it with for
        example
    %the value 100
end
end

%create time axis
time = zeros(samples,1);
for n=1:samples-1;
    time(n+1) = time(n)+delta;
end

%plot
plot(shotSeismoT,time)
set(gca, 'YDir', 'reverse');
set(0, 'DefaultAxesColorOrder', [0 0 0]);

```

Listing 7.3: Skript pickCS, zum Picken der Fenster