

Durchführung und Auswertung von Trittschallmessungen

Diplomarbeit
von

Sven Heider

an der Fakultät für Physik
am
Geophysikalischen Institut

Referent: Prof. Dr. Thomas Bohlen
Korreferent: PD Dr. Joachim Ritter
Betreuer: Dr. Stefan Jetschny

Abgegeben am 18. November 2010

Bearbeitungszeit: 19. November 2009 – 18. November 2010

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln verfasst habe.

Karlsruhe, den 18. November 2010

Physics isn't the most important thing.
Love is.

- *RICHARD P. FEYNMAN* -

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Vorangegangene Arbeiten	3
2.1	Schrittdetektion mit einer Spektralanalyse	3
2.2	Schrittdetektion mit der Kurtosis und Schrittlokalisierung durch eine Peilung	5
3	Theorie und Beschreibung der seismischen Wellenausbreitung	7
4	Grundlagen der Auswertetechniken für seismische Daten	11
4.1	Frequenzspektrum und Fast Fourier Transformation	11
4.2	Frequenzfilter	12
4.3	Bestimmen von Laufzeitdifferenzen	13
4.3.1	Problematik der Laufzeit	13
4.3.2	sta/lta Picker	14
4.3.3	Kreuzkorrelation	17
4.3.4	Kombination von sta/lta Picker und Kreuzkorrelation	19
4.4	Lokalisierung mittels Grid Search	19
4.4.1	Graphische Darstellung des Residuums	21
4.4.2	Beispiel mit einer synthetischen Quelle	22
4.4.3	Mindestanzahl an benötigten Empfängern	23
4.4.4	Test der Geophonanordnung	27
4.4.5	Bestimmen der Oberflächenwellengeschwindigkeit	29
4.4.6	Schwellenwert zur Beurteilung der Lokalisierung	30
4.5	Unterschied zwischen Echtzeit- und Offlineauswertung	30
5	Beschreibung und Auswertung der Messungen	33
5.1	Überblick über die Messungen	33
5.2	Verwendete Messgeräte und Dateiformate	34
5.3	Messung Wiese	37
5.3.1	Standortbeschreibung, Geophongeometrie und Messungen	37
5.3.2	Auswertung der Daten	37
5.3.3	Ergebnisse der Messungen	39
5.3.4	Zusammenfassung	43
5.4	Messung Messe	44
5.4.1	Standortbeschreibung	44

5.4.2	Geophongeometrie und durchgeführte Messungen	46
5.4.3	Auswertung der Daten	46
5.4.3.1	Frequenzspektrum	47
5.4.3.2	Frequenzfilter	50
5.4.3.3	sta/lta Picker und Kreuzkorrelation	53
5.4.3.4	Grid Search	58
5.4.4	Ergebnisse der Messungen	65
5.4.5	Zusammenfassung und Diskussion	69
5.5	Messung GLS	72
5.5.1	Standortbeschreibung	72
5.5.2	Geophongeometrie und durchgeführte Messungen	72
5.5.3	Auswertung der Daten	73
5.5.4	Ergebnis der Messungen	79
5.5.5	Test einer Echtzeitauswertung	88
5.5.6	Zusammenfassung und Diskussion	90
5.6	Erneute Auswertung der Messung Wiese	92
6	Diskussion einer Praxisanwendung	95
7	Zusammenfassung und Ausblick	97
	Literaturverzeichnis	101
	Anhang	103
A	Programmbeschreibungen	103
B	Inhalt der CD-ROM	106
C	Bilder der Messgeräte	107

Abbildungsverzeichnis

2.1	Spektrogramm nach Houston	4
3.1	Seismogrammsektionen der Messungen „Messe“ und „GLS“	9
4.1	Grundlagen: Übertragungsfunktionen eines Bandpassfilters	13
4.2	Grundlagen: Prinzip des sta/lta Algorithmus	16
4.3	Grundlagen: Prinzip der Kreuzkorrelation zweier Zeitreihen	18
4.4	Grundlagen: Prinzip des Grid Search Algorithmus	22
4.5	Grundlagen: Flächenplot mit 300 x 300 Gitterpunkten	23
4.6	Grundlagen: Flächenplot mit synthetischer Quelle	24
4.7	Grundlagen: Geometrietest mit zwei Empfängern	25
4.8	Grundlagen: Laufzeithyperbeln für drei und vier Empfänger	26
4.9	Grundlagen: Geometrietest mit vier Empfängern	28
4.10	Grundlagen: Geometrietest mit vier Empfängern in einem Array	29
5.1	Querschnitt durch einen Topfmagneten mit Spule in einem Geophon	35
5.2	Wiese: Ausschnitt aus dem Campusplan der Westhochschule	38
5.3	Wiese: Seismogrammsektion der Messung Senkrecht_2	40
5.4	Wiese: Lokalisierungsergebnis der Messung Senkrecht_1	40
5.5	Wiese: Lokalisierungsergebnis der Messung Senkrecht_2	42
5.6	Wiese: Laufzeitdifferenzen der Messungen Senkrecht_1 und Senkrecht_2	43
5.7	Übersichtskarte der Messgebiete „Messe“ und „GLS“	45
5.8	Messe: Seismogrammsektion mit Untergrundmodell	45
5.9	Messe: Übersichtskarte	47
5.10	Messe: Vergleich von festen und leichten Tritten	48
5.11	Messe: Kontinuierliche Frequenzspektren der Messung Tritt 4	50
5.12	Messe: Aufsummierte Frequenzspektren der Messungen Tritt 4 und Tritt 6	51
5.13	Messe: Originale und gefilterte Zeitreihen der Messung Tritt 6	52
5.14	Messe: Gesamte Zeitreihe von Geophon 3 der Messung Tritt 6	53
5.15	Messe: Funktionsweise des sta/lta Picker für verschieden gefilterte Zeitreihen	55
5.16	Messe: Laufzeitdifferenzen von sechs Geophonpaaren	56
5.17	Messe: Zeitreihe von Geophon 2 der Messung Tritt 6 mit Picks	57
5.18	Messe: Kreuzkorrelation von Geophon 2 und Geophon 6	57
5.19	Messe: Geschwindigkeitstest mit $100 \frac{m}{s}$ bis $500 \frac{m}{s}$ für Messung Tritt 6	60
5.20	Messe: Geschwindigkeitstest mit $120 \frac{m}{s}$ bis $180 \frac{m}{s}$ für Messung Tritt 6	61

5.21	Messe: Kreuzkorrelationen mit ihrem effektiven Abstand zur Messung Tritt 6	62
5.22	Messe: Lokalisierungsergebnis der Messung Tritt 6 mit allen Geophonen . . .	63
5.23	Messe: Lokalisierungsergebnisse der M. Tritt 6 mit großen und kleinen Viereck	63
5.24	Messe: Wert des Minimums des Residuums der Messung Tritt 6	65
5.25	Messe: Lokalisierungsergebnisse verschiedener Schwellenwerte	66
5.26	Messe: Lokalisierungsergebnisse der Messungen Tritt	67
5.27	Messe: Lokalisierungsergebnisse der Messungen Pfad	70
5.28	GLS: Übersichtskarte	74
5.29	GLS: Geschwindigkeitstest mit $135 \frac{m}{s}$ bis $150 \frac{m}{s}$ für Messung Tritt 6	77
5.30	GLS: Geschwindigkeitstest mit $140 \frac{m}{s}$ und $145 \frac{m}{s}$ für Messung Tritt 5	78
5.31	GLS: Kreuzkorrelationen mit ihrem effektiven Abstand zur Messung Tritt 6	79
5.32	GLS: Lokalisierungsergebnis der Messung Tritt 1	80
5.33	GLS: Geschwindigkeitstest mit $135 \frac{m}{s}$ bis $150 \frac{m}{s}$ für Messung Tritt 1	81
5.34	GLS: Lokalisierungsergebnisse der Messungen Tritt 3 bis Tritt 6	83
5.35	GLS: Lokalisierungsergebnisse der Messung Tritt 5 mit 16, 8 und 4 Geophonen	84
5.36	GLS: Lokalisierungsergebnisse der M. Pfad 1_1, Pfad 2_1 und Pfad 3_1	85
5.37	GLS: Lokalisierungsergebnisse der Messungen Pfad 5_1 und Pfad 6_1	86
5.38	GLS: Lokalisierungsergebnisse der M. Pfad 6_1 mit 16, 8 und 4 Geophonen	87
5.39	GLS: Lokalisierungsergebnisse der Messungen Zickzack	88
5.40	GLS: Wert des Minimums des Residuums der Messung Tritt 5	89
5.41	GLS: Lokalisierungsergebnisse bei einer Echtzeitauswertung	90
5.42	Wiese Neu: Lokalisierungsergebnisse und Laufzeitdifferenzen der M. Senkrecht	93
C.1	Bilder der verwendeten Messgeräte	107

Tabellenverzeichnis

4.1	Vor- und Nachteile des sta/lta Picker und der Kreuzkorrelation	20
5.1	Messe: Mittelwerte und Standardabweichungen der Messungen Tritt	68
5.2	Messe: Mittelwert und Standardabweichung der Messung Tritt 4 für verschiedene Diskretisierungen	68
5.3	GLS: Mittelwerte und Standardabweichungen der Messungen Tritt 3 bis Tritt 6	82

1. Einleitung

Das Hauptanwendungsgebiet von seismischen Messungen ist die Bestimmung von Eigenschaften des Untergrundes. Durch eine Reflexions- oder Refraktionsseismik können beispielsweise Grundwasserspiegel ermittelt oder Kohlenwasserstofflagerstätten exploriert werden. In meiner Arbeit sind seismische Messungen für einen neuen, anderen Zweck eingesetzt worden, nämlich für die Messung von Trittschall. Das heißt, Bewegungsvorgänge werden anhand ihrer seismischen Aktivität lokalisiert.

Der Begriff Trittschall ist in der Fachsprache von Bauingenieuren, hauptsächlich in der Bauakustik zu finden und eine Sonderform des Luftschalls. Ein Bauingenieur versteht unter Trittschall den Schall, der z.B. durch einen sich bewegenden Menschen innerhalb eines Gebäudes erzeugt wird. Dieser wird als Körperschall durch Wände und Decken in andere Räume übertragen und an den Oberflächen zu hörbaren Luftschall umgewandelt und abgestrahlt (Zürcher, 1998).

Nach der Definition von Trittschall ist der Titel dieser Diplomarbeit (Durchführung und Auswertung von Trittschallmessungen) streng genommen nicht richtig gewählt. In dieser Arbeit wird kein Trittschall innerhalb eines Gebäudes, sondern seismische Wellen in freier Natur gemessen. So sind auch die Übertragungsmedien keine Wände oder Decken, sondern Wiesen und Felder. Einzig die Quelle von Trittschall und seismischen Wellen ist die Gleiche; ein menschlicher Schritt. Mit Geophonen können die, durch den Schritt angeregten seismischen Wellen, aufgezeichnet werden. Die Seismik wird, wenn man an ihr Hauptanwendungsgebiet denkt, zweckentfremdet, da sie nicht zur Bestimmung der Untergrundstruktur verwendet wird, sondern zur Detektion und Lokalisierung von Schritten.

Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit liegt auf der Lokalisierung der Quellen. Die Fragestellung, ob man menschliche Schritte lokalisieren kann, ist sehr anschaulich und praxisnah, aber nicht neu. Es ist spannend zu sehen, welche vielfältigen Möglichkeiten man mit seismischen Wellen hat. Es ist außergewöhnlich, dass als Quellen menschliche Schritte verwendet werden. In der Seismik gibt es oftmals nur ein Ereignis, z.B. einen Hammerschlag, von welchem die Daten aufgezeichnet und ausgewertet werden. Bei einer Abfolge von Schritten sind es viele Ereignisse in einer kurzen Zeitspanne, die alle ausgewertet werden wollen. Zur

Auswertung werden keine hochkomplexen, sondern in der Geophysik geläufige Methoden benutzt, sodass die Auswertung auch nachvollziehbar ist.

Die Intention der Arbeit, die Lokalisierung von menschlichen Schritten, sollte nicht Missverstanden werden. Die vorgestellte Methode könnte zur Grenzüberwachung und anderen Gebieten eingesetzt werden. Entsprechende Arbeiten (Houston und McGaffigan (2003) und Succi et al. (2000), (2001)), die Verfahren vorstellen um die Signale von menschlichen Schritten von anderen Quellen zu unterscheiden, sind bereits vorhanden. Bei den meisten dieser Arbeiten liegt der Fokus auf der Detektion der Schritte, wohingegen in meiner Arbeit die Lokalisierung im Vordergrund steht. All diese wenigen, bereits vorhandenen Arbeiten haben einen militärischen Hintergrund, von welchem ich mich ausdrücklich distanzieren. Der wissenschaftliche Aspekt steht für mich im Vordergrund. Dennoch können weitere Anwendungsgebiete genannt werden. Beispielsweise könnten Kunstobjekte oder Banktresore innerhalb eines Gebäudes oder für Menschen gefährliche Gebiete, wie ein Deich, der durch Hochwasser zu brechen droht überwacht werden. Der Vorteil einer möglichen Sicherheitsüberwachung ist, dass die Geophone eingegraben werden können und somit unsichtbar und gegen Manipulation oder Vandalismus geschützt sind. Am Ende der Arbeit werde ich eine mögliche Praxisanwendung diskutieren.

Die Lokalisierung wird ausschließlich mit Hilfe von Laufzeitdifferenzen berechnet. Die Laufzeitdifferenzen erhält man durch eine geschickte Kombination eines sta/lta Picker und der Kreuzkorrelation. Ein Grid Search Algorithmus berechnet zwischen theoretischen und gemessenen Laufzeitdifferenzen ein Residuum. Das Minimum des Residuums gibt die Position der Quelle an. Ein Schwellenwert soll kontrollieren, ob die Lokalisierung gut oder schlecht ist. Ist das Minimum des Residuums größer als der Schwellenwert, wird die Lokalisierung verworfen.

Neben der eigentlichen Lokalisierung der Schritte sind weitere Herausforderungen die Vereinfachung und die Automatisierung der Auswertung, damit eine Lokalisierung auch in Echtzeit durchgeführt werden kann.

Insgesamt sind drei Messungen selbstständig durchgeführt worden. Die erste Messung mit der Bezeichnung „Wiese“ war eine Testmessung um die Messapparatur besser kennenzulernen und erste Erfahrungen mit der Lokalisierung zu gewinnen. Der Schwerpunkt der Arbeit liegt auf der zweiten Messung, die Messung „Messe“ genannt wird. Mit dieser Messung ist auch das Datenprozessing entwickelt worden. Die dritte Messung „GLS“ sollte als Überprüfungsmessung dienen, welche die Ergebnisse der zweiten Messung „Messe“ bestätigen soll. Für die dritte Messung „GLS“ wurde außerdem eine Echtzeitauswertung getestet.

In Kapitel 2 wird ein Überblick über die bereits vorhandenen Arbeiten zu der Thematik Detektion und Lokalisierung von Schritten gegeben. In Kapitel 3 wird kurz auf die Theorie der seismischen Wellenausbreitung eingegangen. Die grundlegenden Schritte des Datenprozessings werden in Kapitel 4 erklärt. Dort werden die benutzten Techniken theoretisch beschrieben. Das Kapitel 5 beginnt mit einem Überblick über die drei durchgeführten Messungen und die verwendeten Geräte. Anschließend werden die Messungen einzeln ausgewertet und die Ergebnisse präsentiert. Ob die Methode für eine Praxisanwendung geeignet ist, wird im Kapitel 6 diskutiert. In Kapitel 7 ist der Inhalt der Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick wird gegeben.

2. Vorangegangene Arbeiten

Die Detektion von Signalen und die Lokalisierung von Quellen, welche die Signale erzeugt haben, ist in der Wissenschaft, die sich mit seismischen Wellen befasst, ein gängiges Problem. In der Seismologie ist die Lokalisierung des Epizentrums oder in der Seismik die Detektion von Wellen, die an einer Schichtgrenze reflektiert werden, eine sich wiederholende Aufgabe.

Einige wenige Arbeiten beschäftigen sich speziell mit dem Thema der Detektion und Lokalisierung von menschlichen Schritten. Im Vordergrund steht dabei die Detektion, also das Erkennen von seismischen Signal eines Schrittes, bevor man versucht die Schritte zu lokalisieren, also die Quellposition des Schrittes einer Raumposition zuzuordnen.

Im Folgenden werden drei Arbeiten vorgestellt (Houston und McGaffigan (2003) und Succi et al. (2000), (2001)), die mit verschiedenen Methoden versuchen Schritte zu detektieren und zu lokalisieren. In diesen Arbeiten hat die Detektion von Schritten einen militärischen Hintergrund. Es ist, z.B. in den Arbeiten von schwer gepanzerten Mannschaftstransportwagen oder leicht und schwer gepanzerten Infanteristen die Rede.

Durch den militärischen Charakter sind nur wenige Arbeiten zu diesem Thema veröffentlicht oder zugänglich.

2.1 Schrittdetektion mit einer Spektralanalyse

In Houston und McGaffigan (2003) wird eine neue und sichere Methode vorgestellt, um menschliche Schritte aus einem Mix von vielen anderen Signalen, wie beispielsweise Hintergrundrauschen, zu extrahieren. Die Grundlegende Idee dabei ist die Verwendung einer Fast Fourier Transformation (FFT) in Verbindung mit einer Zeitfensterung (Hanningfenster). Dabei beschränkt man sich nicht auf den Informationsgehalt eines Schrittes. Das Fenster, für das die FFT berechnet wird, wird so lange gewählt, dass mehrere periodische ankommenden Ereignisse, durch die natürliche Schrittfolge eines Menschen, in die Berechnung einbezogen werden. Es wird zwar nicht explizit beschrieben, man kann jedoch anhand der gezeigten Spektralanalysen darauf schließen, dass für die Auswertung Oberflächenwellen verwendet werden.

Die Daten werden mit einer Samplingrate von 1200 Hz aufgezeichnet. Da die meiste Energie in dem Frequenzband von 10 Hz bis 40 Hz liegt, werden die Daten mit diesen Eckfrequenzen gefiltert und anschließend der Betrag davon genommen. Nun wird die Fast Fourier Transformation (FFT) mit einer Zeitfensterung (Länge 26 Sekunden und 95% Überlappung) durchgeführt. Die Daten werden noch mit einem in der Spektralanalyse üblichen Split-Window 2-Pass Normalizer normiert. Ein typisches Ergebnis ist in der Abbildung 2.1 zu sehen.

Um das erhaltene normierte Spektrogramm (Abbildung 2.1) auswerten zu können, wurde

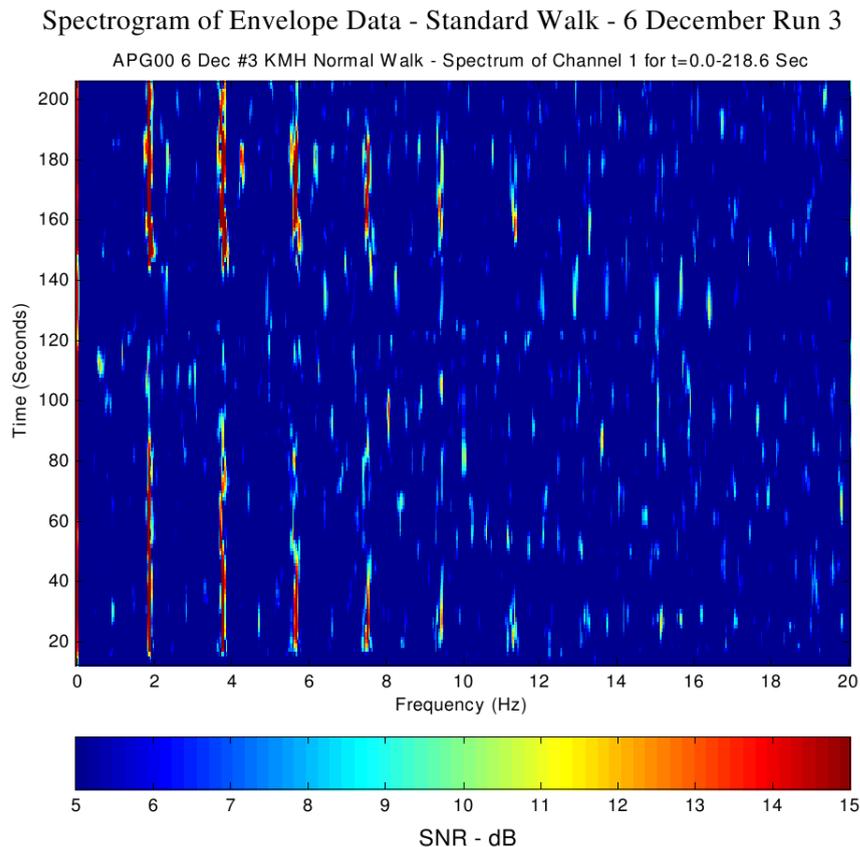


Abbildung 2.1: Ein Beispiel für ein normiertes Spektrogramm wie es in Houston und McGaffigan (2003) zu finden ist. Das Spektrogramm wurde aus einem realen Datensatz, der im Jahre 2000 in Aberdeen aufgenommen worden ist, berechnet.

eine Autodetektionsroutine entwickelt. Diese prüft nun jedes 26 Sekunden Fenster auf folgende drei Kriterien die „ad hoc“ eingeführt worden sind und in Zukunft noch verbessert werden können.

1. Die Grundfrequenz muss zwischen 0,5 Hz und 3,0 Hz liegen.
2. Die Grundfrequenz muss mindestens zwei Obertöne besitzen.
3. Die Grundfrequenz muss ein größeres Signal zu Rauschverhältnis (SNR) als 11 dB und der Oberton ein größeres SNR als 7 dB besitzen.

Houston und McGaffigan fassen zusammen, dass die neue Methode ein großes Potential besitzt, Tritte in einer natürlichen Umgebung zu detektieren. Dennoch kann man mit der

vorgestellten Methode schleichende oder kriechende Personen nur sehr schwer entdecken, da diese nur geringe seismische Signale abgeben. Es ist wichtig, dass nicht an nahen Straßen oder ähnlichen Störsignalquellen gemessen wird, da diese ein größeres Signal im selben Frequenzband in den Boden abstrahlen können.

Meine Herangehensweise ist anfangs ähnlich der von Houston. Jedoch werde ich eine Spektralanalyse lediglich dazu nutzen um einen passenden Filter zu finden und nicht um damit Schritte zu detektieren.

2.2 Schrittdetektion mit der Kurtosis und Schrittlokalisierung durch eine Peilung

Eine weitere Methode um menschliche Schritte zu detektieren, ist in der Arbeit von Succi et al. (2001) beschrieben. Sich bewegende Personen und Fahrzeuge geben eine definierte Abfolge von Stößen ab, die sich dann als seismische Welle von der Quelle wegbewegen. Dabei sind Schritte gut durch ihren stoßartigen Impuls von anderen seismischen Signalen zu unterscheiden. Als Detektionskriterium wird deshalb die Kurtosis gewählt um einen Schritt zu detektieren. Die Kurtosis ist eine stochastische Größe und gibt die Steilheit einer Verteilung an.

Für Daten mit N Datenpunkten berechnet sich die Kurtosis β_2 wie folgt:

$$\beta_2 = \frac{\frac{\sum_{i=1}^N (x(i)-\mu)^4}{N-1}}{\left(\frac{\sum_{i=1}^N (x(i)-\mu)^2}{N-1}\right)^2} \quad (2.1)$$

mit den Mittelwert μ von N Datenpunkten.

Dabei ist zu beachten, dass die Kurtosis nur von der Form des Signals und nicht von deren Amplitude abhängt. Um einen Eindruck von der Größe der Kurtosis zu bekommen, werden die Wert von circa Drei für normalverteiltes Rauschen und circa Zwei für eine Sinusschwingung angegeben. Dabei nehmen Störsignale wie Rauschen, das von Wind induziert wird oder auch Signale durch Fahrzeuge, einen niedrigen Wert an. Dagegen haben Schritte, die eher einem Impuls entsprechen, einen großen Wert. Die Überlegungen wird auf gemessene Daten angewendet. Dabei wird ein sich überlappendes vier Sekunden Zeitfenster verwendet. Die Kurtosis wird für Hintergrundrauschen und einen leichten und einen schwer gepanzerten Mannschaftstransportwagen berechnet. Für diese Daten erhält man eine Kurtosis von circa Drei. Wird die Methode auf gemessene Tritte angewendet, erhöht sie sich auf Sechs.

Die Methode reduziert die Daten auf nur einen Wert, der aussagt, ob in den Daten die Signale eines oder mehrerer Schritte enthalten sind oder nicht. Ein Vorteil an dieser Variante ist ihre Einfachheit. Die Berechnung ist sehr schnell und simpel. Instabil wird die Methode, wenn das Rauschen nicht normalverteilt ist, sondern auch einen Impulscharakter hat, wie z.B. ein Schlagloch in einer Straße. Dieses wird dann ebenfalls als ein Tritt detektiert.

Eine weitere Möglichkeit um Schritte zu detektieren, die in der Arbeit von Succi et al. vor-

geschlagen wird, ist das Messen der Zeit, die zwischen zwei Signalen vergeht. Ein Mensch macht circa zwei Schritte pro Sekunden, d.h. er läuft mit einer Frequenz von 2 Hz. Summiert man gleiche Zeitunterschiede zwischen zwei Signalen auf und plottet diese über ihre Anzahl, gibt es nur eine kleine Streuung um 2 Hz. Auch die Stabilität dieser Methode hängt von der Art des Hintergrundrauschens ab. Erzeugt das Rauschen impulsartige Einsätze, so erhält man eine breite Streuung und es wird sich kein Peak bei 2 Hz einstellen.

In der bisherigen Arbeit von Succi et al. (2001) ging es um eine Detektion der Schritte. Sie sollten von anderen seismischen Quellen unterschieden werden.

In Succi et al. (2000) wird eine Möglichkeit beschrieben um Schritte zu lokalisieren. Dafür müssen alle drei Komponenten, die Vertikal- und die zwei Horizontalkomponenten aufgezeichnet werden. Menschen oder Fahrzeuge, die sich auf dem Untergrund bewegen, sind Quellen seismischer Wellen. Es sollen die Eigenschaften der Oberflächenwellen genutzt werden um mit den drei aufgezeichneten Komponenten die Quelle anzupeilen. 70% der Energie die Schritte als seismische Wellen abgeben, steckt in den Oberflächenwellen und nur 30% in den Raumwellen. Ein Typ von Oberflächenwelle ist die Rayleighwelle. Die Teilchen bewegen sich elliptisch retrograd und parallel zur Ausbreitungsrichtung der Welle. Dadurch hat die Welle auf den beiden Horizontalkomponenten eine unterschiedlich große Amplitude. Dieser Effekt wird ausgenutzt um eine Peilung der Quelle durchzuführen.

Die Berechnungen werden mit einem sich überlappenden Zeitfenster angestellt. Zuerst wird die Hilberttransformierte der Vertikalkomponente berechnet um den Phasenunterschied zu entfernen. Genauer wird auf diesen Rechenschritt nicht eingegangen. Weiter wird die Kreuzkorrelationen zwischen der hilberttransformierten Vertikalkomponente und jeweils einer Horizontalkomponente berechnet. Als Ergebnis erhält man R_{xh} und R_{yh} . Den Peilungswinkel θ berechnet man wie folgt:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{R_{xh}}{R_{yh}} \right) \quad (2.2)$$

R_{xh} und R_{yh} sind die berechnete Kreuzkorrelationen und Vektoren. Wie man aus den Vektoren ein Verhältnis bilden kann und aus diesem einen Winkel errechnet, wird aus der Arbeit nicht ersichtlich.

In Succi et al. werden anschließend die Ergebnisse, die sie mit einem Panzer und einem Jogger als Quelle erhielten, beschrieben. Der Jogger lief in einem 50 Meter Radius um ein Geophon. Der Winkel variiert linear von 0° bis 360° . Die Peilung mit einem Panzer als Quelle, der in einer Entfernung von 100 Metern bis 600 Metern zum Geophon gefahren ist, war ebenfalls erfolgreich.

Die Methodik der Peilung scheint gute Ergebnisse zu liefern. Die genaue Berechnung die zu den Ergebnissen führt ist jedoch nicht nachvollziehbar.

Ich werde mich in dieser Arbeit hauptsächlich mit Lokalisierungen anhand von Laufzeitdifferenzen beschäftigen. Eine Einschätzung zu der Methodik der Peilung durch Erfahrungen von eigenen Messungen, werde ich am Ende der Arbeit diskutieren.

3. Theorie und Beschreibung der seismischen Wellenausbreitung

In der Seismik benutzt man elastische Wellen um Informationen über den Untergrund zu erhalten. Man bekommt Informationen von Bereichen des Untergrundes durch den die Wellen propagieren. Dafür werden verschiedene Eigenschaften des Wellenfeldes ausgenutzt. In dieser Arbeit geht es nicht primär um die Untersuchung des Untergrundes, so dass die Theorie hinter der elastische Wellenausbreitung hier nicht von großer Relevanz ist. Dennoch sollen einige Eigenschaften, wie Ausbreitungsgeschwindigkeit und Polarisierung elastischer Wellen erläutert werden. Das Kapitel orientiert sich an Kertz (1989) und Müller (1994).

Raumwellen

Die Grundlage der Bewegungsgleichungen für ein elastisches Kontinuum ist das Hookesche Gesetz. Dies sagt, dass die auftretende Spannung der Dehnung proportional ist. Die Dehnung kann wiederum durch die Verschiebung beschrieben werden. Setzt man diese Beziehung in die Bewegungsgleichung des elastischen Kontinuums ein, so ergibt dies die Bewegungsgleichung für ein homogenes, isotropes Medium.

Die nun erhaltene Differenzialgleichung lässt sich in einen quellfreien und einen rotationsfreien Anteil zerlegen. Die Lösungen der zerlegten Differenzialgleichung haben die Form einer Wellengleichung. Im Folgenden werden die beiden Lösungen einzeln erläutert.

Eine Lösung ist die Kompressionswelle oder P-Welle (Primärwellen), die den rotationsfreien Anteil beschreibt. Diese ist longitudinal polarisiert und breitet sich mit der Geschwindigkeit v_p aus.

$$v_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (3.1)$$

In Gleichung (3.1) ist λ die erste Lamé-Konstante, μ die zweite Lamé-Konstante bzw. der Schubmodul und ρ die Dichte des Materials in der sich die Welle ausbreitet.

Eine weitere Lösung, sie enthält den quellfreien Anteil, ist die Transversalwelle oder S-Wellen (Sekundärwelle). Diese ist transversal polarisiert und schwingt senkrecht zu ihrer

Ausbreitungsrichtung. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der S-Welle v_s ist langsamer als die der P-Welle v_p .

$$v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (3.2)$$

In einem homogenen Medium breiten sich die beiden Arten von Wellen entkoppelt voneinander im Raum aus und werden daher auch Raumwellen genannt. Als erste Näherung wird in der Wissenschaft für das v_p - v_s -Verhältnis

$$\frac{v_p}{v_s} = \sqrt{3} \quad (3.3)$$

angegeben. Dies ist für einen ideal elastischen Körper der Fall wenn gilt $\lambda = \mu$, wird aber auch oftmals für Gesteine verwendet. Diese Beziehung wird im Laufe der Arbeit genutzt.

Oberflächenwellen

Die größten Amplituden in einem Seismogramm stammen nicht von den bisher kennengelernten Raumwellen, sondern von Oberflächenwellen. Diese Wellen breiten sich entlang der Oberfläche aus. Oberflächenwellen sind Spezialfälle von Grenzflächenwellen. Diese können an Grenzen wie z.B. dem Übergang von festen Material zu Luft auftreten. Sie werden dabei, je nach Wellenlänge, von den darunterliegenden Schichten beeinflusst, dringen jedoch auch nur ein paar Wellenlängen tief ein. Die Energie der Oberflächenwellen muss sich nur, im Gegensatz zu Raumwellen, auf zwei Dimensionen verteilen, daher haben die Oberflächenwellen oftmals die größte Amplitude in Seismogrammen. Eine Eigenschaft von Oberflächenwellen ist, dass diese dispersiv sind. D.h. die Ausbreitungsgeschwindigkeit hängt von ihrer Frequenz ab.

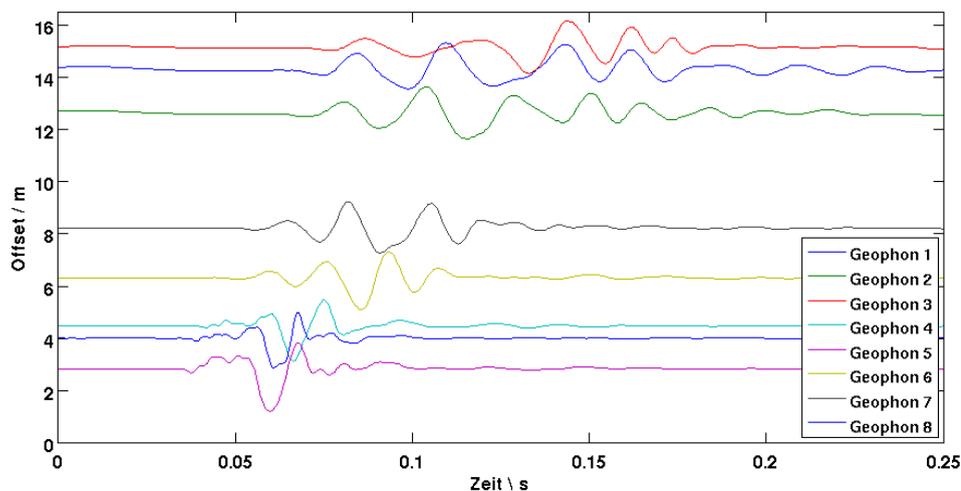
Es gibt zwei Arten von Oberflächenwellen, die Rayleigh- und die Lovewellen. Die Rayleighwelle ist vergleichbar mit einer Meereswelle. Ihre Polarisation ist elliptisch retrograd. Die Rayleighwelle ist eine Mischung aus Transversal- und Longitudinalwellen. Ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit v_R hängt von v_p und v_s ab. Gilt Gleichung (3.3), gilt auch

$$v_R \approx 0,92v_s \quad (3.4)$$

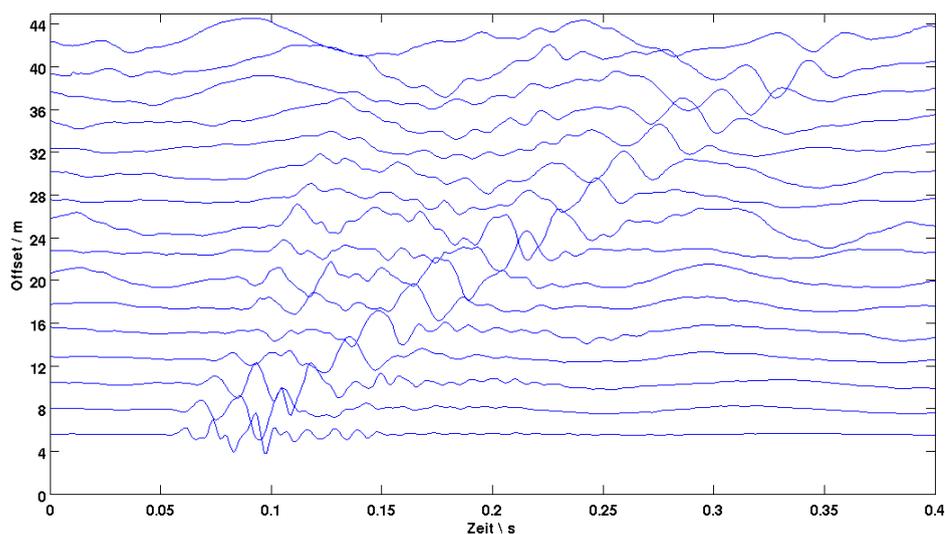
Die Lovewelle ähnelt der S-Welle sehr stark. Sie schwingt ebenfalls in horizontaler Richtung, senkrecht zu ihrer Ausbreitungsrichtung.

Es werden nun zwei Seismogrammsektionen aus zwei verschiedenen Messungen („Messe“ Kapitel 5.4, „GLS“ Kapitel 5.5), die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden, betrachtet (Abbildung 3.1). Die Signale sind durch einen festen Schritt angeregt worden. Ziel ist es, herauszufinden, welche Wellentypen ein Schritt anregt bzw. welche man in den Seismogrammsektionen identifizieren kann. Die Position des Schrittes war bekannt, so dass die Seismogrammspuren Offsetabhängig geplottet werden konnten. Die Amplitude ist normiert. In Abbildung 3.1(a) ist der Effekt der Dispersion bei acht Geophonen zu erkennen. Die Wellenzüge laufen bei zunehmenden Offset auseinander, da sich jede Frequenz mit einer anderen Geschwindigkeit ausbreitet.

In Abbildung 3.1(b) sind die Spuren von sechzehn Geophonen Offsetabhängig dargestellt.



(a) Seismogrammsection für acht Geophone der Messung „Messe“



(b) Seismogrammsection für sechzehn Geophone der Messung „GLS“

Abbildung 3.1: Seismogrammsectionen der Messungen „Messe“ und „GLS“. In (a) sind acht Seismogramme Offsetabhängig mit dem Signal eines festen Schrittes dargestellt. Der Effekt der Dispersion lässt sich gut erkennen. In (b) sind sechzehn Seismogramme Offsetabhängig ebenfalls mit dem Signal eines festen Schrittes dargestellt. Auch hier hat die Dispersion einen großen Effekt auf die Form der Wellenzüge. Diese laufen bei zunehmenden Offset auseinander, da sich jede Frequenz mit einer anderen Geschwindigkeit ausbreitet. Vor den Oberflächenwellen ist auch der Einsatz der P-Welle zu sehen.

Der Effekt der Dispersion ist bei den Signalen mit den größten Amplituden klar zu sehen und konnten daher als Oberflächenwellen identifiziert werden. Auch der Einsatz der P-Welle vor der Oberflächenwelle ist gut zu erkennen. Folglich kann ein Schritt mindestens P- und Oberflächenwellen anregen.

Die Signale der Oberflächenwellen werden auch genutzt um eine Lokalisierung der Quelle durchzuführen. Durch die großen Amplituden der Signale, können diese gut in den Daten gefunden werden. Das notwendige Datenprozessing um eine Lokalisierung durchzuführen, ist im nächsten Kapitel beschrieben.

4. Grundlagen der Auswertetechniken für seismische Daten

Nachdem Messdaten, z.B. mit Geophonen (Kapitel 5.2), aufgezeichnet wurden, müssen diese entsprechend prozessiert werden. Die Theorie hinter den einzelnen Prozessingschritten wird in diesem Kapitel erörtert.

Um den Frequenzgehalt von Daten zu erhalten, wird als erstes eine Spektralanalyse durchgeführt. Als nächstes wird die Funktionsweise eines Filters erklärt, der ungewollte Frequenzen aus den Daten entfernt. Ein *sta/lta* Picker und die Kreuzkorrelation werden dazu verwendet um Laufzeitdifferenzen zu berechnen. Die Arbeitsweise der beiden Methoden wird anschließend beschrieben. Zum Schluss wird das Prinzip eines Grid Search Algorithmus ausgeführt.

4.1 Frequenzspektrum und Fast Fourier Transformation

Der aufgezeichnete Frequenzbereich wird von der Samplingrate $f_{Sampling}$ und von dem verwendeten Messgerät limitiert. Die richtige Wahl des Messgerätes ist ebenso entscheidend, wie die richtige Wahl der Samplingrate. Diese muss so gewählt werden, dass der Frequenzgehalt des Signals vollständig aufgezeichnet wird. Die Daten können keine Frequenzen enthalten, die größer als die sogenannte Nyquistfrequenz $f_{Nyquist}$ sind (Buttkus, 1991).

$$f_{Nyquist} = \frac{1}{2} f_{Sampling} \quad (4.1)$$

Nach dem Nyquist-Shannon-Abtasttheorem muss die Samplingrate mindestens zweimal so groß wie die maximal zu erwartende Frequenz sein. Dies erkennt man leicht aus Gleichung (4.1). Wird das Nyquist-Shannon-Abtasttheorem verletzt, so können Aliasing-Effekte auftreten.

Um die Frequenzen, die in einem Datensatz enthalten sind, zu bestimmen und daraus einen Filter zu entwerfen, wird die Fouriertransformierte der Zeitreihe berechnet. Dies geht am schnellsten und effektivsten mit der Fast Fourier Transformation. Eine Fourieranalyse zerlegt eine periodische, kontinuierliche Funktion, die eine Überlagerung von verschiedensten

Frequenzen ist, in ihre einzelnen Frequenzen. Die ursprüngliche Funktion lässt sich aus vielen Sinussignalen mit unterschiedlichen Frequenzen, Amplituden und Phasen wieder berechnen (Lang, 1998).

Bei realen, digitalen Messungen erhält man Messwerte nicht kontinuierlich, sondern nur an diskreten Stellen. Aus diesem Grund benutzt man eine abgeänderte Variante der Fourieranalyse die sehr viel Ähnlichkeit mit einer Fouriertransformation hat und deshalb Fast Fourier Transformation (FFT) genannt wird. Eine FFT transformiert eine Zeitreihe $f(x)$ vom Zeitbereich in den Frequenzbereich (Lang, 1998).

$$g(f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x)e^{-ixf} dx \quad (4.2)$$

$g(f)$ ist die Fouriertransformierte von $f(x)$. Die Funktion $g(f)$ enthält Informationen welche Frequenzen in der Zeitreihe $f(x)$ enthalten sind.

4.2 Frequenzfilter

Um das Frequenzband der Daten zu verkleinern, ist es in der Geophysik üblich Filter einzusetzen. Dabei unterscheidet man zwischen einem Tiefpassfilter (d.h. sperren von hohen Frequenzen ab einer Grenzfrequenz f_{max}), Hochpassfilter (d.h. sperren von tiefen Frequenzen ab einer Grenzfrequenz f_{min}), Bandpass- und Bandsperrefilter (d.h. passieren oder sperren eines Frequenzbandes zwischen den Eckfrequenzen f_{min} und f_{max}). Oftmals werden Daten gefiltert um Rauschen zu unterdrücken und so Signale hervorzuheben oder Aliasingeffekte zu vermeiden.

Es wird eine Übertragungsfunktion $H(f)$ im Frequenzraum definiert. Für ungewollte Frequenzen, die aus den Daten entfernt werden sollen, hat die Funktion den Wert Null, für Frequenzen, die in den Daten bleiben sollen, den Wert Eins. Beispielsweise sieht die Übertragungsfunktion $H_B(f)$ für einen Bandpassfilter, der ein bestimmtes Frequenzband mit den Eckfrequenzen f_{min} und f_{max} in den Daten belassen soll, folgendermaßen aus (Buttkus, 1991):

$$H_B(f) = \begin{cases} 1 & \text{für } f_{min} \leq |f| \leq f_{max} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (4.3)$$

Eine Filterung kann entweder im Zeitbereich mit einer Faltung oder im Frequenzbereich mit einer Multiplikation durchgeführt werden. Im Frequenzbereich kann die Filterung allgemein wie folgt dargestellt werden:

$$Y(f) = H(f)X(f) \quad (4.4)$$

Dabei ist $X(f)$ die Fouriertransformierte vom Eingangssignal $x(t)$, $Y(f)$ die Fouriertransformierte vom Ausgangssignal $y(t)$ und $H(f)$ die Filterübertragungsfunktion.

Sieht man sich einen realen Filter an, so wird dieser an den Eckfrequenzen nicht von Null auf Eins springen. Dies wäre eine Unstetigkeit in der Übertragungsfunktion. Vielmehr gibt es einen Übergangsbereich in Form einer Flanke, die sich vom Wert Null auf Eins stetig erhöht. Je steiler die Flanke werden soll, desto größer muss man die Ordnung des Filters

wählen. Ist die Flanke zu steil, verursacht das Verschmierungen und Nebenmaxima in der Übertragungsfunktion. Ein Beispiel für die Übertragungsfunktion eines Bandpassfilters ist in Abbildung 4.1 dargestellt. In (a) wurde eine zu große Ordnung gewählt. Dadurch werden Überschwinger erzeugt, die auch Gibbs-Phänomen genannt werden. In (b) ist eine moderate und in (c) eine geringe Ordnung gewählt worden. Die Überschwinger werden kleiner,

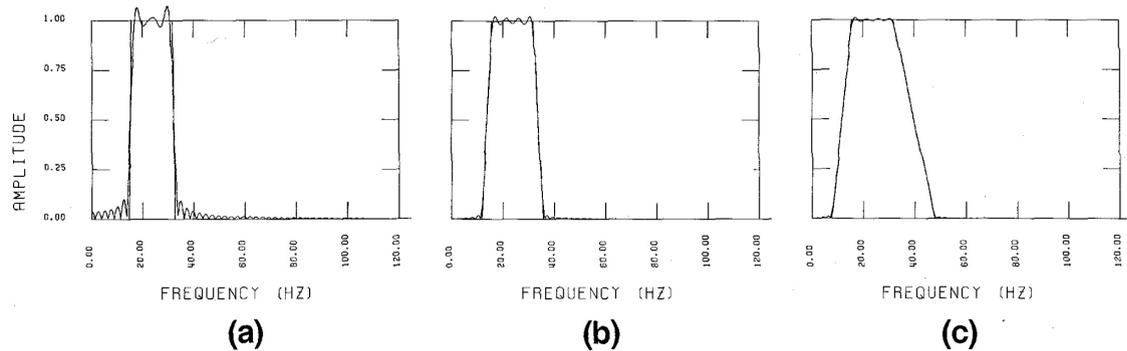


Abbildung 4.1: Übertragungsfunktionen mit verschiedenen Ordnungen eines Bandpassfilters. Die Übertragungsfunktion in (a) hat sehr steile Flanken bedingt durch eine hohe Ordnung des Filters. Dadurch kommen Überschwinger in der Amplitude zustande. Diesen Effekt nennt man Gibbsphänomen. In (b) und (c) ist eine kleinere Ordnung gewählt worden. Dadurch vermindern sich die Überschwinger, jedoch werden die Flanken der Übertragungsfunktionen flacher. Quelle (Yilmaz, 1987)

jedoch auch die Flanken flacher.

Dies führt auf ein zentrales Problem beim Entwerfen eines Filters. Einerseits sollen die Flanken möglichst steil sein um ungewollte Frequenzen auch wirklich nur in diesem Bereich aus den Daten zu entfernen, andererseits sollte ein Filter möglichst keine Einflüsse auf das resultierende Nutzsignal durch z.B. das Gibbsphänomen haben (Ritter, 2009).

Welche Art von Filter, welche Eckfrequenzen und welche Ordnung für meine Zwecke am besten geeignet sind, wird im Kapitel 5.4.3.2 erarbeitet.

4.3 Bestimmen von Laufzeitdifferenzen

Nach dem Filtern der Daten, sind sie nun soweit aufbereitet um aus ihnen Einsatzzeiten bzw. Laufzeitdifferenzen zu bestimmen. Die dafür verwendeten Methoden, ein sta/lta Picker und die Kreuzkorrelation, werden im Kapitel 4.3.2 und 4.3.3 beschrieben. Welche Vor- und Nachteile die Methoden haben und wie man diese am besten kombiniert, wird in Kapitel 4.3.4 ausgeführt. Die Zeitproblematik und warum ich nur mit Laufzeitdifferenzen und nicht mit Laufzeiten von der Quelle bis zum Empfänger arbeiten kann, wird im folgenden Kapitel beschrieben.

4.3.1 Problematik der Laufzeit

In der Seismik und Seismologie spielt die Zeit eine wichtige Rolle während der Datenaufzeichnung. Jeder aufgezeichneter Datenpunkt (im folgenden Sample genannt) muss sich in eine zeitliche Relation zu den anderen Samples setzen lassen. Ohne diesen „Zeitstempel“

wären die Daten nutzlos. Die Seismologie nimmt sich die fortschreitende Technologie zur Hilfe und bedient sich des GPS Signals um einen genauen Zeitstempel für die aufgezeichneten Seismogramme zu erhalten. Verliert ein Seismometer das GPS Signal, so läuft eine interne Uhr weiter, die mit einer ausreichenden Genauigkeit die Zeit misst.

In der Seismik ist es üblich und auch zwingend notwendig ein Auslösesignal zu haben, sobald die Messung beginnt. Nach dem Auslösen des Signals startet die Messapparatur die Messung. Dies geschieht üblicherweise durch das Schließen eines Stromkreises oder mit Hilfe eines Beschleunigungssensors. Dadurch ist der Zeitpunkt, an dem die Quelle ihre Energie abgegeben hat, definiert.

Bei einer Quelle wie ich sie in meiner Diplomarbeit benutze, einen Schritt, ist ein Auslösen der Messung nicht realisierbar. Es kann nicht jedes Mal wenn ein Schritt den Boden berührt, eine Messung gestartet werden. Durch den fehlenden Auslösezeitpunkt ist es nicht möglich Laufzeiten von der Quelle bis zum Empfänger, wie bei einer Hammerschlagseismik, zu messen.

Aus diesem Grund ist es nur möglich mit sogenannten Laufzeitdifferenzen zu arbeiten. Unter einer Laufzeitdifferenz ist der Zeitunterschied zu verstehen, an dem das Signal an zwei Empfängern ankommt. Einfach gesagt, wie viel später kommt das Signal bei Empfänger B als bei Empfänger A an.

4.3.2 *sta/lta* Picker

Der Begriff „Picken“ oder das passende Verb dazu „etwas picken“ ist sowohl im Deutschen wie auch im Englischen bekannt. Man kann es mit den Begriffen „etwas aussuchen“ umschreiben. In der Seismik und der Seismologie ist dies auch so der Fall. Man sucht in einer Zeitreihe einen Zeitpunkt aus, von dem man meint, dass dieser ausgezeichnet ist. In der Seismologie pickt man vor allem verschiedene Phasen von einfallenden Wellen, z.B. P- und PP-Phase um die Epizentraldistanz vom Beben zum Empfänger zu berechnen. In der Seismik werden oftmals Ersteinsätze (direkte P-Welle) oder Reflektionen an Diskontinuitäten (reflektierte P-Welle) gepickt, um so die Eigenschaften des Untergrundes zu bestimmen.

Mein Ziel ist es, den Ersteinsatz eines Signals in einer Zeitreihe zu bestimmen um daraus, wie im Kapitel 4.3.1 beschrieben, Laufzeitdifferenzen zu erhalten. Dies funktioniert entweder per Hand mit einem Blick auf die Zeitreihen oder man formuliert einen mathematischen Algorithmus, der den langwierigen manuellen Prozess automatisiert. Im Folgenden wird solch ein Algorithmus beschrieben.

Mit einem sogenannten *sta/lta* Picker (short term average / long term average) kann man sich Signale aus einer Zeitreihe picken lassen. Die Vorgehensweise wird z.B. in einer Veröffentlichung von Allen (1978) beschrieben. Ich werde diesen Algorithmus in einer leicht abgewandelten Version nutzen. Das Grundprinzip ist jedoch das Gleiche. Von einem kurzen *sta* Fenster mit der Länge M und einem langen *lta* Fenster mit der Länge N , wird der absolute Mittelwert der in den Fenstern enthaltenen Daten berechnet.

$$sta = \frac{\sum_{i=1}^M |x_i|}{M} \qquad lta = \frac{\sum_{j=1}^N |x_j|}{N} \qquad (4.5)$$

x_i und x_j sind jeweils die in den Fenstern enthaltenen Datenpunkte.

Nun bildet man den Quotienten aus den beiden Mittelwerten (sta/lta). Die Fenster werden anschließend immer um ein Sample weiter verschoben, bis das Ende der Zeitreihe erreicht ist. Des Weiteren definiert man zwei Werte, den sogenannten Triggerwert und den Enttriggerwert. Die beiden Werte steuern, wann eine Triggerung startet und endet. Überschreitet der Quotient von sta/lta den Triggerwert, startet die Triggerung und der Algorithmus merkt sich den Zeitpunkt. Unterschreitet der Quotient von sta/lta den Enttriggerwert, so endet die Triggerung, und der Algorithmus merkt sich auch diesen Zeitpunkt. Eine neue Triggerung kann erst wieder stattfinden, nachdem enttriggert wurde. Dies verhindert, dass in eigentlich einem Signal mehrere Triggerungen ausgelöst werden. Der Algorithmus gibt die getriggerten und enttriggerten Zeitpunkte aus.

Zusammengefasst sind diese vier Parameter einzustellen:

1. Länge des sta Fensters
2. Länge des lta Fensters
3. Verhältnis vom sta zu lta welches triggert
4. Verhältnis vom sta zu lta welches enttriggert

Ein Beispiel, in dem ein Ausschnitt einer Zeitreihe, der sta und lta Mittelwert, das Verhältnis von sta/lta und die Zeitreihe mit gepickten Punkten dargestellt ist, ist in Abbildung 4.2 zu sehen. Die normierte, ungefilterte Zeitreihe oben ist ein Ausschnitt von 6000 Samples einer Messung, die im Kapitel 5.4 beschrieben wird. In dieser Messung sind vier Signale (Schritte) zu erkennen, die sich in ihrer Amplitude deutlich vom Hintergrundrauschen abheben. Circa bei Sample 2800 ist ein weiteres, hochfrequentes Signal enthalten. Dessen Amplitude hebt sich jedoch nicht vom Rauschen ab. In der zweiten Abbildung von oben sind nach den Formeln (4.5) die Mittelwerte für das kurze Fenster mit einer Länge von 20 Samples und dem langen Fenster mit einer Länge von 200 Samples berechnet worden. Auf der x-Achse ist die Fensternummer aufgetragen. Die grüne Kurve, die den sta Mittelwert darstellt, weist an Stellen, an denen auch die Zeitreihe eine erhöhte Amplitude hat, ebenfalls Peaks auf. Die magentafarbene Kurve, die den lta Mittelwert darstellt, hat diese Peaks nicht. Eine große Amplitude in der Zeitreihe schlägt sich erst leicht verzögert in einem nur geringen Anstieg des Mittelwertes nieder.

In der dritten Abbildung von oben ist der Quotient sta zu lta in schwarz und das gewählte Triggerlevel in rot eingezeichnet. Das Triggerlevel wird durch verschiedene Tests festgelegt. In diesem Fall bietet sich ein Wert von vier an. Überschreitet der Quotient das Triggerlevel, merkt sich der Algorithmus diesen Zeitpunkt. In diesem Beispiel ist dies viermal der Fall. In der untersten Abbildung ist nochmals die Zeitreihe mit den nun gepickten Punkten (rote Sterne) dargestellt. Die vier gepickten Punkte stimmen mit den Einsatzzeiten der Signale aus der Zeitreihe gut überein. Das Signal mit geringer Amplitude bei Sample 2800 ist nicht detektiert worden, da der Algorithmus nicht auf Frequenzen, sondern nur auf Amplituden sensitiv ist.

Je nachdem in welchem Gebiet der Algorithmus zum Einsatz kommt, müssen verschiedene Parameter korrekt gewählt werden. Wie breit man die Fenster und die Werte des Triggerlevels bzw. des Enttriggerlevel wählt, ist stark davon abhängig welche Art von Signal man

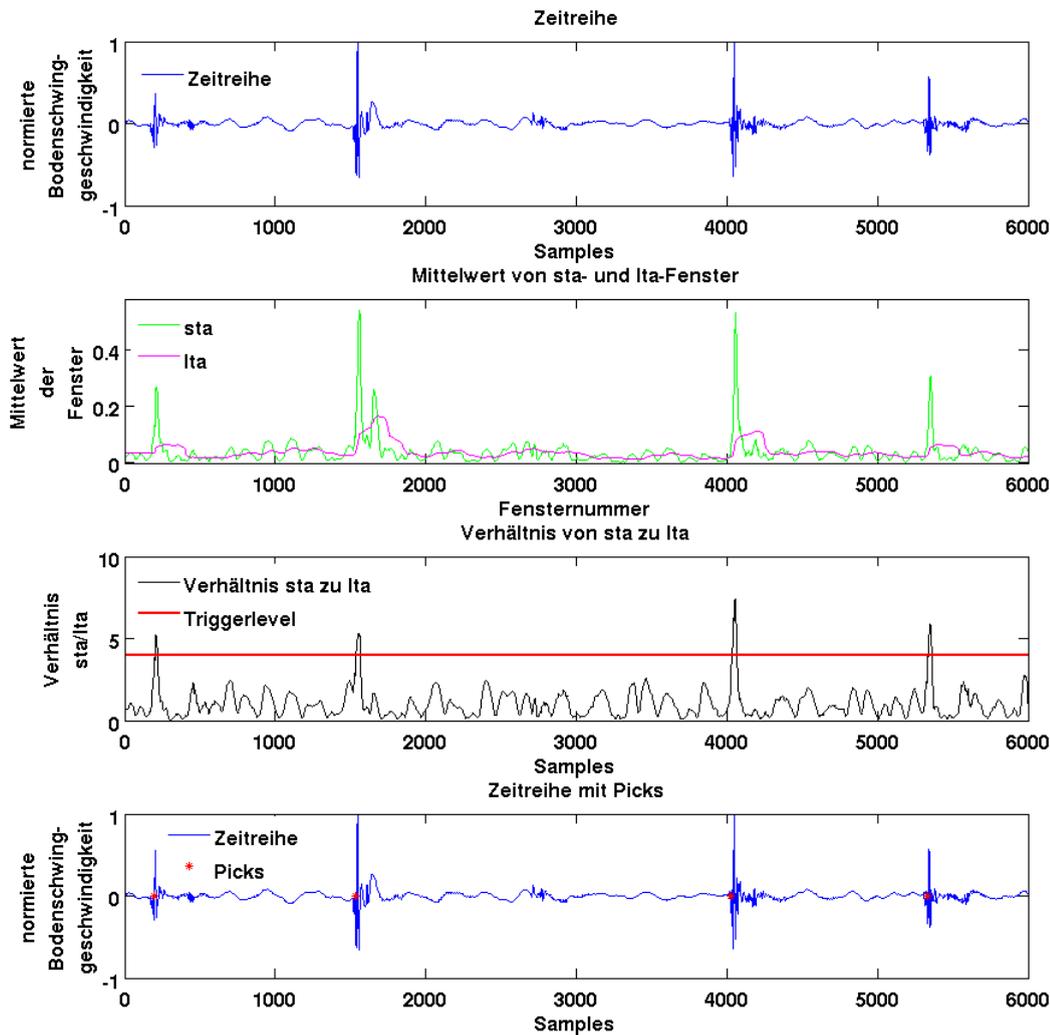


Abbildung 4.2: Prinzip des *sta/Ita* Algorithmus: Oben: Ein normierter, ungefilterter Zeitreihenausschnitt aus der Messung „Messe“ (Kapitel 5.4). Es sind vier Signale, in meinem Fall Schritte, mit deutlich erhöhter Amplitude zu erkennen. Zweite Abbildung von oben: Hier sind die Mittelwerte in grün für das *sta* Fenster mit einer Fensterlänge von 20 Samples und in magenta für das *Ita* Fensters mit einer Fensterlänge von 200 Samples dargestellt. Dritte Abbildung von oben: In dieser Abbildung ist der Quotient von *sta* zu *Ita* mit einem Wert für das Triggerlevel von vier eingezeichnet. Überschreitet das Verhältnis das Triggerlevel, so merkt sich der Trigger diesen Zeitpunkt. Unten: Die roten Sterne sind die gepickten Zeitpunkte. Man erkennt, dass die Punkte mit dem Signal in der Zeitreihe gut übereinstimmen.

erwartet. In meinem Fall gehe ich eher von impulsartigen Signalen aus, so dass sich ein sehr kurzes und ein relative langes Zeitfenster als zuverlässig herausgestellt haben. In dem oben genannten Beispiel entspricht dies für das kleine Fenster einer Länge von 0,01 Sekunden bzw. 20 Samples und für das große Fenster von 0,1 Sekunden bzw. 200 Samples (die Samplingfrequenz war 2000 Hz).

Um nun Laufzeitdifferenzen zu berechnen, lässt man den Pickeralgorithmus über mehrere,

gleichzeitig aufgezeichnete Zeitreihen unterschiedlicher Empfängerpositionen (Geophone) laufen und berechnet mit Hilfe der gesetzten Picks die Laufzeitdifferenzen von Signalen.

4.3.3 Kreuzkorrelation

Neben dem sta/lta Picker gibt es noch eine weitere Möglichkeit Laufzeitdifferenzen von Signalen in Zeitreihen zu bestimmen. Dazu benutzt man das mathematische Konstrukt der Kreuzkorrelation. Thome (2005) schreibt, dass die Kreuzkorrelationsfunktion (KKF) angibt, „wie stark der (korrelative) Zusammenhang zwischen zwei Zeitreihen ist“. Wichtig hierbei ist der Begriff „korrelativ“. Damit die Kreuzkorrelation erfolgreich ist, müssen die aufgezeichneten Signale kohärent sein. Das bedeutet, dass die Form der zu vergleichenden Signale sich ähneln muss. Dies ist die Grundvoraussetzung, damit die KKF ein für meine Zwecke nutzbares Ergebnis liefert. Die Kreuzkorrelation ist nach Bendat und Piersol (1986) folgendermaßen definiert:

$$R(\tau)_{xy} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t + \tau) \cdot y(t) dt \quad (4.6)$$

Dabei ist R_{xy} die Kreuzkorrelationsfunktion bei einer Zeitverschiebung von τ . x und y sind kontinuierliche Funktionen. Anschaulich wird die Funktion x (Signal 1) mit einer Zeitverschiebung τ (auch „Lag“ genannt) über die Funktion y (Signal 2) geschoben, dabei werden die Funktionen miteinander multipliziert und anschließend integriert. Für ein positives τ ergibt sich der sogenannte kausale Lag, für ein negatives τ der sogenannte akausale Lag. An der Stelle τ , an der die KKF nun ihren größten Wert hat, ähneln sich die beiden Funktionen am meisten. Dieses τ entspricht gleichzeitig der gesuchten Laufzeitdifferenz. Die Kreuzkorrelationsfunktion ist nicht kommutativ, das bedeutet tauscht man x und y , so ist auch der kausale und akausale Lag vertauscht.

Um die analytische Beschreibung (Formel (4.6)) überhaupt nutzen zu können, formulieren wir die Formel für diskrete und endliche Zeitreihen um. Man geht von zwei digitalen Zeitreihen x und y aus, die mit N Samples und mit einer konstanten Samplingrate aufgezeichnet wurden. Für einen Lag von Null können wir die Formel (4.6) umschreiben:

$$R_{xy}(0) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n \cdot y_n \quad (4.7)$$

Für den nun diskreten Lag, führen wir die Variable r ein, die von

$$1 - N < r < N - 1 \quad (4.8)$$

läuft. Die Vorgehensweise ist dieselbe wie bei einem kontinuierlichen Signal. Die Zeitreihe x wird Sample für Sample an der Zeitreihe y vorbei geschoben.

$$R_{xy}(r) = \frac{1}{N - |r|} \sum_{n=1}^{N-|r|} x_{n+r} \cdot y_n \quad (4.9)$$

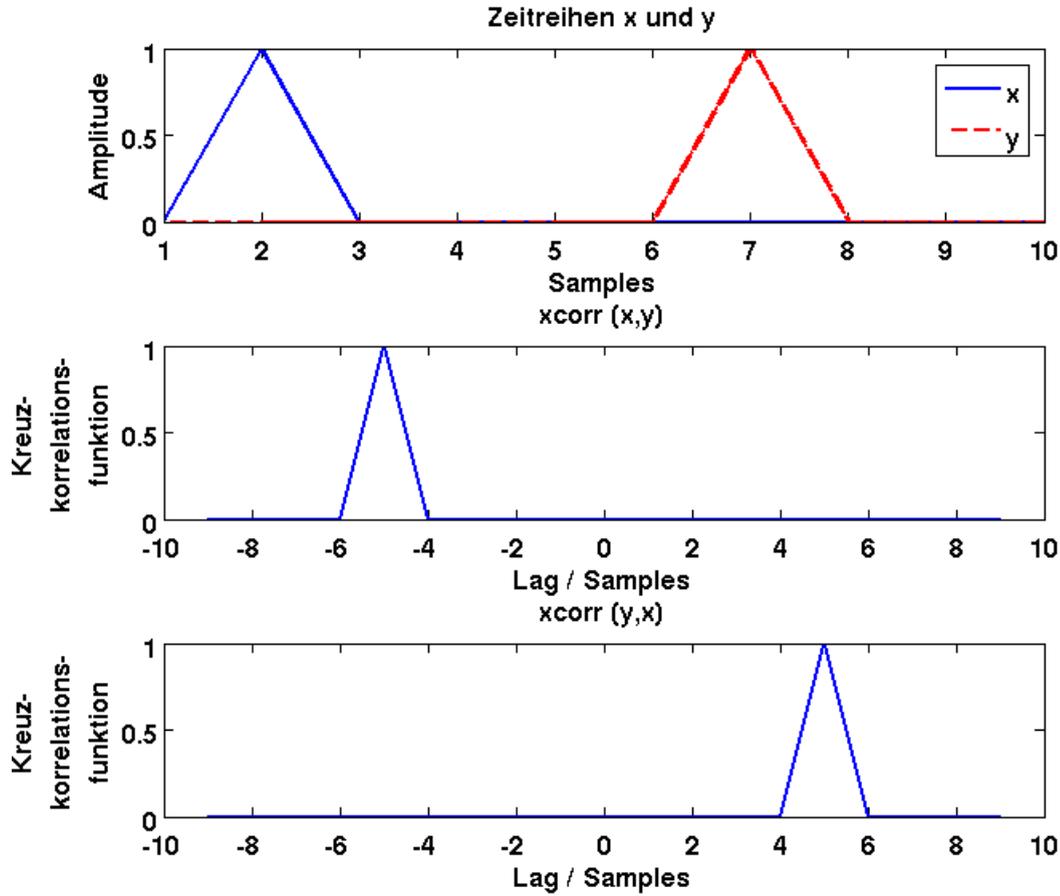


Abbildung 4.3: Kreuzkorrelation zweier Zeitreihen. Oben: Zwei einfache gleichlange Signale x und y , die den Wert Eins bei Sample zwei für x und Sample sieben für y haben. Das Signal ist somit um fünf Samples verschoben. Mitte: Kreuzkorrelationsfunktion für die Funktion `xcorr(x,y)` in MATLAB. Das Lag ist minus Fünf Samples groß, da es dort den Wert Eins hat. Unten: Kreuzkorrelationsfunktion für die Funktion `xcorr(y,x)`. Hier hat das Lag die Größe Fünf

Aus Gleichung (4.8) werden die beiden Grenzen von r ersichtlich. Die Variable n ist eine Hilfsvariable und läuft für jeden Wert r unterschiedlich lange bis sie die obere Grenze der Summe erreicht hat (Gleichung (4.9)). Für den Fall $r = 0$ wird Gleichung (4.9) zu Gleichung (4.7). Diese Art der Kreuzkorrelation nennt man auch direkte oder lineare Kreuzkorrelation (Bendat und Piersol, 1986). Des Weiteren gibt es noch die indirekte bzw. zirkulare Kreuzkorrelation. Die Funktion `xcorr` in MATLAB, mit der die Berechnungen durchgeführt werden, verwendet jedoch die lineare Kreuzkorrelation, so dass nicht weiter auf die Eigenschaften und Unterschiede der beiden Varianten eingegangen wird.

Es soll anhand eines kleinen Beispiels die Anwendung der Kreuzkorrelation demonstriert werden. In Abbildung 4.3 sind oben zwei gleichlange Zeitreihen x und y mit jeweils zehn Samples dargestellt. Die Zeitreihe x hat den Wert Eins bei Sample zwei, y hat den Wert Eins bei Sample sieben und Null sonst. Das bedeutet der Wert Eins ist um fünf Samples in den Zeitreihen verschoben. In der Mitte ist das Ergebnis der MATLAB Funktion `xcorr`

geplottet, wenn x mit y kreuzkorreliert worden ist. Es gibt, wie bereits weiter oben im Kapitel erwähnt, einen negativen und einen positiven Lag. Das Lag hat den Wert minus Fünf Samples, da es dort den Wert Eins hat. Unten ist x und y bei der Berechnung von x_{coor} vertauscht worden. Hier ist das Lag Fünf Samples groß. Wie man sieht, kann die Kreuzkorrelation den Versatz des Signals (hier des Wertes Eins) berechnen. Wie wir im Kapitel 4.4 sehen werden, spielt es keine Rolle welche Zeitreihe mit welcher korreliert wird, da nur mit den Beträgen der Laufzeitdifferenzen gerechnet wird.

4.3.4 Kombination von sta/lta Picker und Kreuzkorrelation

In den beiden vorherigen Abschnitten wurde gezeigt, wie man mit zwei verschiedenen Methoden Laufzeitdifferenzen ermitteln kann. Nun werden die Vor- und Nachteile beider Methoden in Tabelle 4.1 abgewägt und beschrieben wie diese im Datenprocessing eingesetzt werden. Wie man aus Tabelle 4.1 sehen kann, überwiegen die Vorteile der Kreuzkorrelation. Das Hauptargument gegen einen reinen Einsatz des sta/lta Picker ist die sehr schwierige Zuordnung der Picks mehrerer Zeitreihen zu einem Signal. Ein großes Problem ist es, eine Bedingung zu finden, die herausfindet, welche Picks zum gleichen Signal gehören.

In der Auswertung ab der Messung „Messe“ (Kapitel 5.4) wird eine Mischung aus beiden Methoden benutzt um auch den Vorteil des Pickers zu nutzen. Es wird als erstes auf alle Zeitreihen der sta/lta Picker angewendet. Es wird anschließend die Zeitreihe mit den meisten Picks herausgesucht. Dieses Gephon wird Triggergeophon genannt. Um jeden Pick des Triggergeophons wird eine Fensterung bei allen Zeitreihen durchgeführt. Die Fenster werden dann mit den entsprechenden Zeitbereichen der Zeitreihen der übrigen Geophone kreuzkorreliert. Hier nutzt man die Vorteile der Kreuzkorrelation aus. Dadurch, dass nicht die gesamte Zeitreihe, sondern nur Ausschnitte (Fenster) aus dieser verwendet werden, ist die Rechenzeit der Kreuzkorrelation gering. Dies stellte sich als eine optimale Symbiose aus sta/lta Picker und Kreuzkorrelation heraus.

4.4 Lokalisierung mittels Grid Search

Im vorherigen Kapitel 4.3 wurde beschrieben, wie man Laufzeitdifferenzen zwischen verschiedenen Empfängern, die das gleiche Signal aufgezeichnet haben, ermitteln kann. Dafür verwende ich einen sogenannten sta/lta Picker (Kapitel 4.3.2) und die Kreuzkorrelation (Kapitel 4.3.3).

In diesem Kapitel geht es nun darum, aus den Laufzeitdifferenzen den Ort der Quelle zu berechnen. Es wird praktisch eine Lokalisierung durchgeführt. Für einen Seismologen ist eine Lokalisierung des Epizentrums eines Erdbebens eine sich stetig wiederholende Aufgabe. Bekannte Methoden dafür sind zum Beispiel das Geigerverfahren (Geiger, 1910) oder die Double-Difference Lokalisierung (Waldhauser und Ellsworth, 2000), auf die jedoch im Einzelnen nicht näher eingegangen wird, da ich mich für eine andere Methode entschieden habe.

In Sambridge und Kennett wurde im Jahre 1986 eine neue Methode, der sogenannten Grid Search vorgestellt. Dieses Konzept werde ich in abgeänderter Form für die Lokalisierung der seismischen Quelle benutzen.

	Vorteile	Nachteile
sta/lta Picker	<ul style="list-style-type: none"> • Schneller Algorithmus: Es müssen nur wenige Berechnungen durchgeführt werden 	<ul style="list-style-type: none"> • Zuordnung der Picks in den verschiedenen Zeitreihen sehr schwierig • Doppelt gesetzte Picks in einem Signal möglich • Einige Parameter, z.B. die Fensterlänge, die man richtig einstellen muss • Abhängig vom Rauschen: Signal-Rausch-Verhältnis muss gut sein • Es ist nicht klar, welcher Wellentyp gepickt wird
Kreuz- korrelation	<ul style="list-style-type: none"> • Erkennt kohärente Signale, auch wenn das Rauschen größer als das Signal ist • Keine Parameter zum Einstellen, somit sehr robust • Es gibt bereits eine fertige Funktion in MATLAB • Echtzeiteinsatz möglich 	<ul style="list-style-type: none"> • Kohärentes Signal notwendig • Rechenintensiver wie Picker

Tabelle 4.1: Vor- und Nachteile des sta/lta Picker und der Kreuzkorrelation

Die genaue Vorgehensweise und was man unter einem Grid Search versteht wird im Folgenden detailliert beschrieben.

1. Man legt über eine Fläche ein Gitter mit einer geeigneten Gitterkonstante (Die Gitterkonstante entspricht dem Abstand zwischen zwei benachbarten Gitterpunkten). Dies nennt man Diskretisierung. Die Anzahl und der Abstand der Knotenpunkte des Gitters sollte so gewählt werden, dass man eine hinreichende Genauigkeit erzielt. Auch sollte die Rechenzeit berücksichtigt werden. Je mehr Knotenpunkte das Gitter besitzt, desto länger benötigt die Rechnung.
2. Von jedem Knotenpunkt aus berechnet man die Laufzeit zu einer bestimmten Anzahl von Empfängern, die ebenfalls auf beliebigen Knotenpunkten sitzen. Schematisch ist dies in Abbildung 4.4 dargestellt. Um Laufzeiten von Knotenpunkt zu Knotenpunkt berechnen zu können, benötigt man die Gitterkonstante und eine konstante Geschwin-

digkeit, mit der sich das Signal im gesamten Gitter ausbreitet. Wie man die Untergrundgeschwindigkeit am besten bestimmte, darauf wird im Kapitel 4.4.5 eingegangen. Im Zweidimensionalen erhält man für jeden Empfänger eine Matrix, in der die Laufzeiten von jedem Knotenpunkt bis zum Empfänger eingetragen sind (im 3D-Fall würde man einen Tensor erhalten). Diese Matrix hat dieselbe Größe wie das Gitter. An der Stelle des Empfängers, hat die Matrix den Wert Null.

3. Aus den jetzt bekannten Laufzeiten von allen Knotenpunkten zu allen Empfängern, werden nun für jeden einzelnen Empfänger die theoretischen Laufzeitdifferenzen zu allen anderen Empfängern für jeden Knotenpunkt berechnen. Diese theoretischen Laufzeitdifferenzen sind die Basis für die weiteren Berechnungen.

Als Beispiel gehen wir nun von einer Quelle aus, die auf dem Knotenpunkt 1 sitzt (Abbildung 4.4). Sendet diese ihre Energie zu einem beliebigen Zeitpunkt aus, so kommt das Signal mit einer Laufzeit von t_{1_A} bei Empfänger A und mit t_{1_B} bei Empfänger B an. Somit ergibt sich eine absolute Laufzeitdifferenz $\Delta t_{1_{AB}}$ zwischen den Empfängern A und B von

$$\Delta t_{1_{AB}} = |t_{1_A} - t_{1_B}| \quad (4.10)$$

Ändert man die Position der Quelle auf Knotenpunkt 2, ändert sich auch die absolute Laufzeitdifferenz für die Empfänger A und B. Es gilt:

$$\Delta t_{2_{AB}} \neq \Delta t_{1_{AB}} \quad (4.11)$$

Nun werden die Laufzeitdifferenzen für alle Knotenpunkte und alle möglichen Empfängerpaare berechnet.

4. Man bildet für einen Gitterpunkt i das Residuum Res_i aus den theoretisch berechneten Laufzeitdifferenzen $\Delta t_{k_{theoretisch}}$ und den, aus den realen Daten ermittelten, Laufzeitdifferenzen $\Delta t_{k_{real}}$ für jedes Empfängerpaar k und summiert die Differenz für alle Empfängerpaare auf.

$$Res_i = \sum_{k=1}^{AnzahlEmpfängerpaare} |\Delta t_{k_{theoretisch}} - \Delta t_{k_{real}}| \quad (4.12)$$

Man sucht nun den Gitterpunkt i , bei dem das Residuum ein Minimum aufweist. Dies ist der Punkt, an dem sich die Quelle befinden sollte. Wir werden im Kapitel 4.4.2 sehen, dass der Wert des Minimums des Residuums analytisch gesehen Null sein muss.

4.4.1 Graphische Darstellung des Residuums

Da sich die Lokalisierung auf zwei Dimensionen erstreckt, kann man die Größe des Residuums Res_i in einem Flächenplot darstellen. Auf der Ordinate und Abszisse ist die Anzahl der Gitterpunkte aufgetragen. Diese lassen sich jedoch mit der Kenntnis der Gitterkonstanten auch als Raumkoordinaten interpretieren und umrechnen. Die Farbskala gibt die Größe des Residuums an, mit der Einheit Sekunden. Die Quelle des Signals sollte an der Stelle sein, an der das Residuum sein Minimum besitzt. Ein Beispiel eines Flächenplots für ein reales Datenbeispiel, welches im Kapitel 5.4 beschrieben wird, ist in der Abbildung

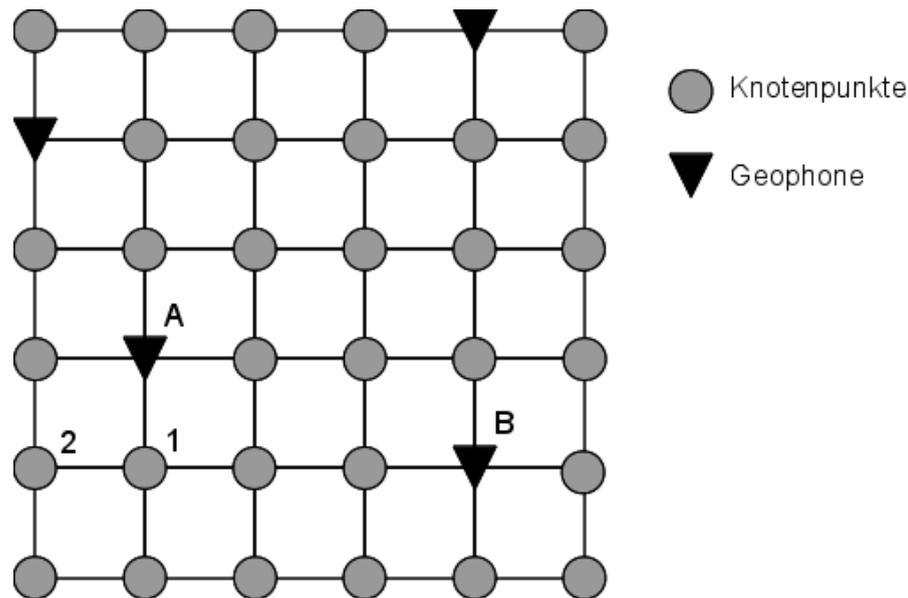


Abbildung 4.4: 6 x 6 Gitter mit 36 Knotenpunkten: Die hellgrauen Kreise stellen die Quellknotenpunkte, die schwarzen Dreiecke die Empfänger dar, die auf einem Knotenpunkt sitzen. Mit A und B sind beispielhaft zwei Empfänger (Geophone), mit 1 und 2 zwei beliebige Knotenpunkte gekennzeichnet.

4.5 zu sehen. Die diskreten Werte des Residuums für jeden Gitterpunkt sind interpoliert, sodass ein durchgängig farbiger Plot entsteht.

4.4.2 Beispiel mit einer synthetischen Quelle

Um den selbstgeschriebenen Grid Search Algorithmus zu testen, wurden die Laufzeitdifferenzen für eine konstante Geschwindigkeit für alle Empfängerpaare für eine synthetische Quelle berechnet. Dafür wurden drei Empfänger auf ein Gitter der Größe 100 x 100 Gitterpunkte gesetzt: Empfänger A auf Gitterpunkt 30 / 20, Empfänger B auf Gitterpunkt 80 / 60 und Empfänger C auf Gitterpunkt 50 / 90. Die Quelle liegt auf dem Gitterpunkt 70 / 45. Als erstes wird die x- und als zweites die y-Koordinate genannt. Somit gibt es drei Empfängerpaare: A-B, A-C und B-C. Für die drei Empfängerpaare $k = 1, 2, 3$ wurde für die vorgegebene Quellposition die Laufzeitdifferenzen $t_{k_{real}}$ berechnet. Diese wurden in den Grid Search Algorithmus eingespeist. In der Abbildung 4.6 sind die Werte der Residuen für jeden Gitterpunkt dargestellt (Kapitel 4.4.1). Das Minimum des Residuums liegt auf dem Gitterpunkt, auf dem auch die Quelle platziert wurde (Abbildung 4.6(a) „dunkelblauer Bereich“ Gitterpunkt 70 / 45). Der Test des Algorithmus war erfolgreich und er kann für die weiteren Berechnungen genutzt werden.

Man erkennt jedoch, dass sich am linken Bildrand ein weiteres Minimum befindet. Nach einer Erweiterung des Gitters nach links und nach unten um 200 Gitterpunkte (das neue Gitter hat nun 300 x 300 Gitterpunkte) ist dieser Bereich jetzt in der Berechnung enthalten. Ein zweites, lang gestrecktes Minimum bildet sich links neben den Empfängern aus (Abbildung 4.6(b)). Dies hat mich veranlasst eine Testreihe zu starten, welche die benötigte Anzahl an Empfängern ermitteln soll (Kapitel 4.4.3), so dass es keine Mehrdeutigkeiten mehr gibt und die Quelle eindeutig bestimmt werden kann.

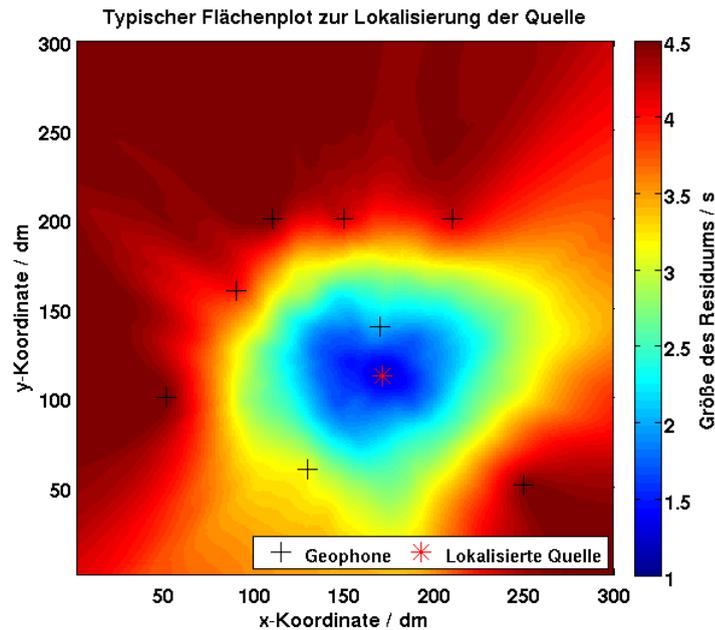


Abbildung 4.5: Flächenplot aus realen Daten mit 300 x 300 Gitterpunkten. Die Gitterkonstante ist 10 cm pro Gitterpunkt. Es wurden acht Geophone (schwarze Kreuze) benutzt. Die lokalisierte Quelle ist als roter Stern dargestellt. Die Farbskala rechts gibt die Größe des Residuums an, die Einheit ist Sekunden. Das Minimum des Residuums ist sehr schön ausgeprägt (blauer Bereich). Welches Datenprocessing dem Ergebnis voraus ging, ist im Kapitel 5.4 nachzulesen.

4.4.3 Mindestanzahl an benötigten Empfängern

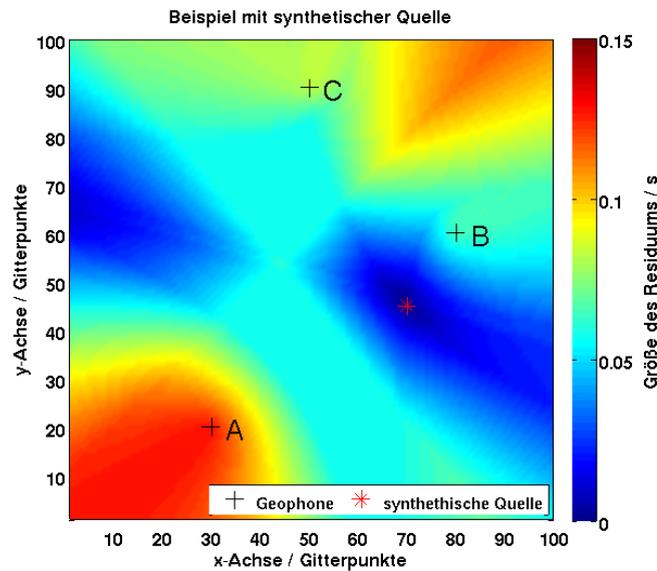
Nachdem im Kapitel 4.4.2 an einem synthetischen Datenbeispiel gezeigt wurde, dass drei Empfänger, entgegen der Intuition, nicht ausreichen um ein eindeutiges Ergebnis zu erhalten, werden in diesem Kapitel Tests durchgeführt um die minimale Anzahl an Empfängern zu bestimmen.

In Abbildung 4.7 ist eine Geometrie mit zwei Empfängern A und B auf einem 100 x 100 großen Gitter dargestellt, die auf den Gitterpunkten 50 / 20 und 50 / 80 liegen. Die Quelle befindet sich auf Gitterpunkt 70 / 25.

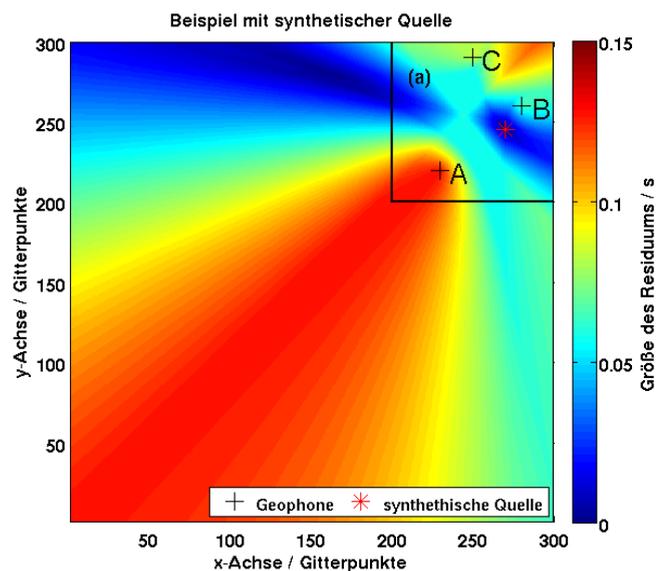
Der mögliche Bereich in dem sich die Quelle befinden könnte (dunkelblau), hat eine hyperbolische Form und ist symmetrisch zur Mittelsenkrechten der beiden Empfänger. Mathematisch gesehen hat ausschließlich der Gitterpunkt, auf dem sich die Quelle auch wirklich befindet den Wert Null. Jedoch sind die Werte für den dunkelblauen Bereich ebenfalls sehr nahe bei Null und sind optisch nicht von Null zu unterscheiden.

Die hyperbolische Form und die Symmetrie zur Mittelsenkrechten lassen sich leicht erklären. Da zur Lokalisierung nur absolute Laufzeitdifferenzen ausgewertet werden, spricht das Vorzeichen nicht beachtet wird, gibt es eine Symmetrie zur Mittelsenkrechten. Die Information bei welchem Empfänger das Signal als Erstes ankommt, wird nicht genutzt.

Eine Hyperbel ist laut Marzinger (2004) folgendermaßen definiert: „Eine Hyperbel ist die Menge aller Punkte, für die die Differenz der Abstände von zwei festen Punkten (Brenn-



(a) 100 x 100 Gitter



(b) 300 x 300 Gitter

Abbildung 4.6: Flächenplot mit einer synthetischen Quelle und drei Empfängern A, B und C (Geophone, schwarze Kreuze). Die Farbskala rechts gibt die Größe des Residuums an. (a) 100 x 100 Gitterpunkte: Die synthetische Quelle (roter Stern) befindet sich auf Gitterpunkt 70 / 45. Das Minimum des Residuums und die Position der Quelle stimmen exakt überein. Das Minimum hat den erwarteten Wert Null. Es deutet sich jedoch ein weiteres Minimum am linken Bildrand an. (b) 300 x 300 Gitterpunkte: Das Gitter wurde nach unten und nach links um 200 Gitterpunkte vergrößert. Es existiert noch ein Nebenminimum (breiter, verschmierter blauer Streifen) links von den Empfängern.

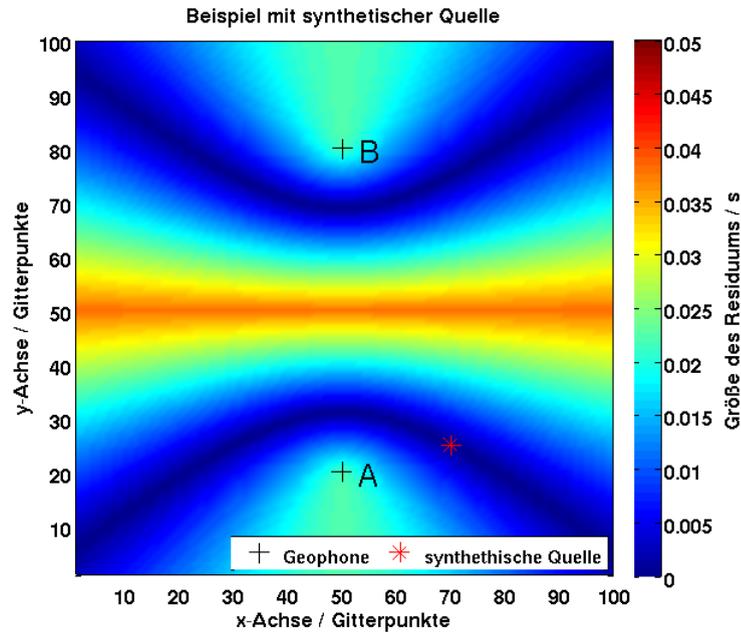


Abbildung 4.7: Geometrietest mit zwei Empfängern A auf Gitterpunkt 50 / 20 und B auf Gitterpunkt 50 / 80. Das Minimum des Residuums hat eine hyperbolische Form und ist symmetrisch zur Mittelsenkrechten der beiden Empfänger. Alle dunkelblauen Bereiche sind theoretisch mögliche Positionen, auf denen sich die Quelle befinden kann.

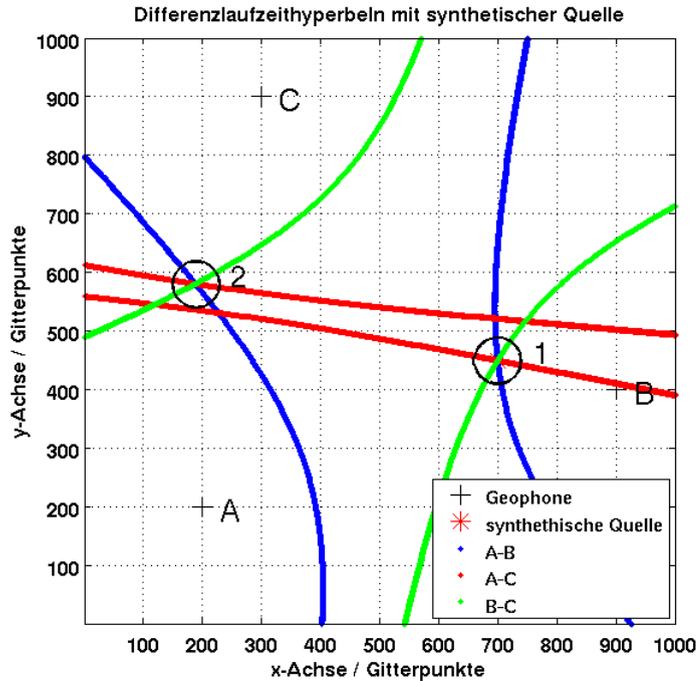
punkten (...)) konstant (...) ist“. Die Brennpunkte sind in unserem Fall die zwei Gitterpunkte, auf welchen die beiden Empfänger sitzen. Die Formel (4.10) kann man unter Annahme einer konstanten Geschwindigkeit v auch umschreiben. Es gilt:

$$\Delta t_{AB} = t_A - t_B = v(s_A - s_B) \quad (4.13)$$

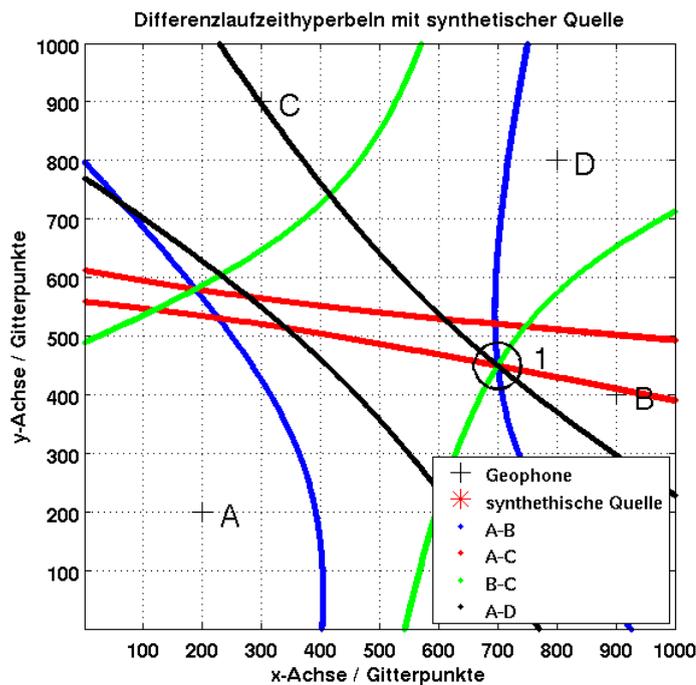
s_A und s_B beschreiben die Länge des Weges von einem Empfänger bis zu einem beliebigen Gitterpunkt. Man konnte Gleichung (4.10) so umstellen, dass die Gleichung der Definition einer Hyperbel entspricht. Ist die Differenz von $s_A - s_B$ konstant, so liegen die Punkte auf einer Hyperbel.

Das eigentliche Problem ist jedoch die Anzahl der Empfänger, die man benötigt um eine Quelle eindeutig zu lokalisieren. In Abbildung 4.8 ist oben (Abbildung 4.8(a)) der Fall mit drei Empfängern und unten (Abbildung 4.8(b)) der Fall mit vier Empfängern auf einem 1000 x 1000 Gitter dargestellt. Das Gitter wurde aufgrund einer besseren Darstellung vergrößert. Im Gegensatz zur Abbildung 4.5 ist nicht mehr das aufsummierte Residuum, sondern das Minimum der Residuen der einzelnen Empfängerpaare dargestellt. Es ergibt sich, wie weiter oben im Kapitel beschrieben, für jedes Empfängerpaar die typisch hyperbolische Gestalt für das Minimum des Residuums.

In Abbildung 4.8(a) sieht man, dass es zwei Punkte gibt, gekennzeichnet mit 1 und 2, in denen sich alle drei Hyperbeln schneiden. Diese Mehrdeutigkeit kommt aufgrund der verlorenen Information zustande, an welcher Station das Signal als Erstes angekommen



(a) Drei Empfänger



(b) Vier Empfänger

Abbildung 4.8: Differenzlaufzeithyperbeln für drei und vier Empfänger. (a) Für drei Empfänger gibt es zwei Schnittpunkte 1 und 2 der Differenzlaufzeithyperbeln. Die Mehrdeutigkeit kommt durch die nicht genutzte Information an welchem Empfänger das Signal als Erstes angekommen ist zustande. (b) Durch das Hinzufügen eines weiteren Empfängers D kann die Mehrdeutigkeit schon durch ein weiteres Stationspaar (hier A-D, schwarze Hyperbeln) eindeutig gemacht werden (Schnittpunkt 1). Auf diesem Gitterpunkt befand sich die synthetische Quelle.

ist. Mit nur zwei Empfängerpaaren gäbe es vier Schnittpunkte. Die dritte Hyperbel ist notwendig, um die vier Schnittpunkte auf die beiden gekennzeichneten Schnittpunkte 1 und 2 zu reduzieren. Aus den Laufzeitdifferenzen von zwei Empfängerpaaren kann auf die dritte geschlossen werden. Dies kann man auch mathematisch zeigen.

$$\Delta t_{AB} = t_A - t_B \quad \Delta t_{AC} = t_A - t_C \quad \Delta t_{BC} = t_B - t_C \quad (4.14)$$

Die Gleichungen (4.14) berechnen die Laufzeitdifferenzen Δt der drei Empfängerpaare A-B, A-C und B-C aus den einzelnen Laufzeiten t_A , t_B und t_C . Setzt man die ersten beiden Gleichungen in die Letzte ein, so erhält man:

$$\Delta t_{BC} = \Delta t_{AC} - \Delta t_{AB} \quad (4.15)$$

Die drei Gleichungen (4.14) sind also abhängig voneinander.

Um eine eindeutige Lokalisierung zu bekommen, benötigt es mindestens vier Empfänger. Dies ist in Abbildung 4.8(b) dargestellt. Es ist ausreichend ein weiteres Stationspaar zu berechnen, hier A-D, die schwarzen Hyperbeln, damit die Lokalisierung eindeutig wird. Die schwarze Hyperbel schneidet nur den Punkt 1, an welchem sich auch die Quelle befand. Gleichzeitig benötigt man die Information von Geophonpaar B-C nicht mehr. Trotzdem hätte man noch eine eindeutige Lokalisierung.

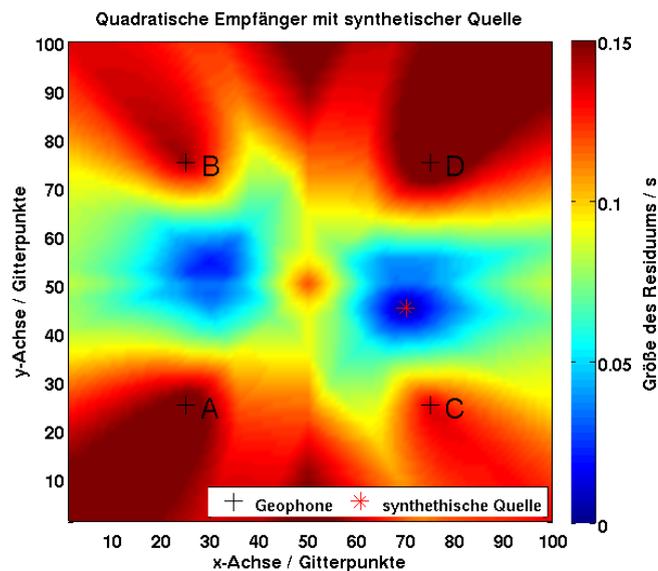
In meiner Arbeit benutzte ich die Information, an welcher Station das Signal als Erstes ankommt, nicht. Deshalb benötige ich für eine eindeutige Bestimmung mindestens vier Empfänger. Wie diese Empfänger am günstigsten angeordnet sind, wird im folgenden Kapitel 4.4.4 erarbeitet.

4.4.4 Test der Geophonanordnung

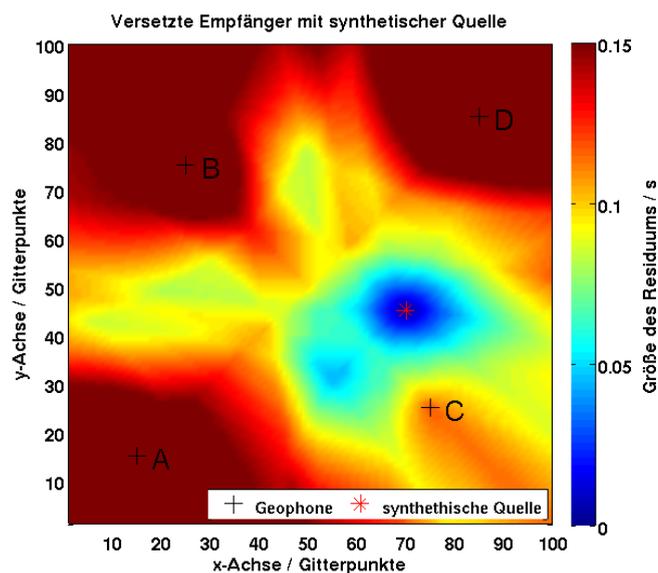
Wie man im Kapitel 4.4.3 gesehen hat, sind mindestens vier Empfänger notwendig um mit der benutzten Methode eine eindeutige Lokalisierung durchführen zu können. In diesem Kapitel soll diskutiert werden, welche Anordnung der Geophone günstig ist und welche dazu neigt Nebenminimas zu erzeugen. Als Erstes teste ich eine Geometrie mit vier Empfängern, die an den Ecken eines Quadrates sitzen (Abbildung 4.9(a)).

Durch die stark symmetrische Anordnung der Empfänger entsteht ein Nebenminimum. Dies entspricht einer Punktspiegelung am Gitterpunkt 50 / 50. Allgemein sieht man sehr gut die Punktsymmetrie zum vorher genannten Gitterpunkt. Man kann vermuten, dass eine nicht symmetrische Anordnung eine bessere Wahl ist. In Abbildung 4.9(b) ist lediglich der Empfänger A um zehn Gitterpunkte nach links und unten und der Empfänger D um zehn Gitterpunkte nach rechts und oben gerutscht. Es entsteht ein schiefes Viereck. Wie man deutlich erkennen kann, hat bereits eine kleine Änderung in der Geometrie eine große Auswirkung auf die Eindeutigkeit des Ergebnisses. Das zweite Minimum ist verschwunden.

Weiter wurden einige Empfängergeometrien getestet: So z.B. Empfänger entlang eines Profils über zufällige Empfängerpositionen bis hin zu Empfängerarrays. Alle Tests spiegeln dasselbe Ergebnis wieder: Je weniger Symmetrieachsen oder -punkte eine Anordnung hat, desto eindeutiger ist das Minimum des Residuums.



(a) Vier Empfänger an den Ecken eines Quadrates.



(b) Vier Empfänger, davon A und D versetzt.

Abbildung 4.9: Geometrietest mit vier Empfängern. (a) Die Empfänger sitzen an den Ecken eines Quadrates, die synthetische Quelle ist bei Gitterpunkt 70 / 45. Die Geometrie der Empfänger ist sehr stark symmetrisch. Man erkennt eine Punktsymmetrie zum Gitterpunkt 50 / 50. Es bildet sich gespiegelt am Spiegelpunkt ein weiteres Minimum aus. (b) Der Empfänger A wurde jeweils um zehn Gitterpunkte nach unten und links, der Empfänger D jeweils um zehn Gitterpunkte nach oben und rechts verschoben. Das zweite Minimum aus Abbildung 4.9(a) ist verschwunden. Schon kleine Änderungen in der Anordnung der Empfänger haben einen großen Einfluss auf die Mehrdeutigkeit.

Bisher lag die Quelle immer innerhalb der Empfängergeometrie. Davon kann in der Realität nicht ausgegangen werden. Es wird daher noch ein Test angestellt, in dem die Quelle außerhalb der Empfängergeometrie liegt. In Abbildung 4.10 ist solch eine Situation dargestellt. Die Empfänger befinden sich alle im linken unteren Teil des Gitters, die synthetische Quelle ist wieder bei Gitterpunkt 70 / 45. Die Quelle wurde zwar auch in diesem Beispiel gefunden, jedoch ist das Minimum sehr lang gestreckt. Daraus schließt man, dass sich eine Fokussierung des Minimums nur dann erreichen lässt, wenn eine optimale Empfänger-Quell-Geometrie vorhanden ist. Dies ist der Fall, wenn die Quelle innerhalb der Empfängeranordnung liegt (Abbildung 4.5).

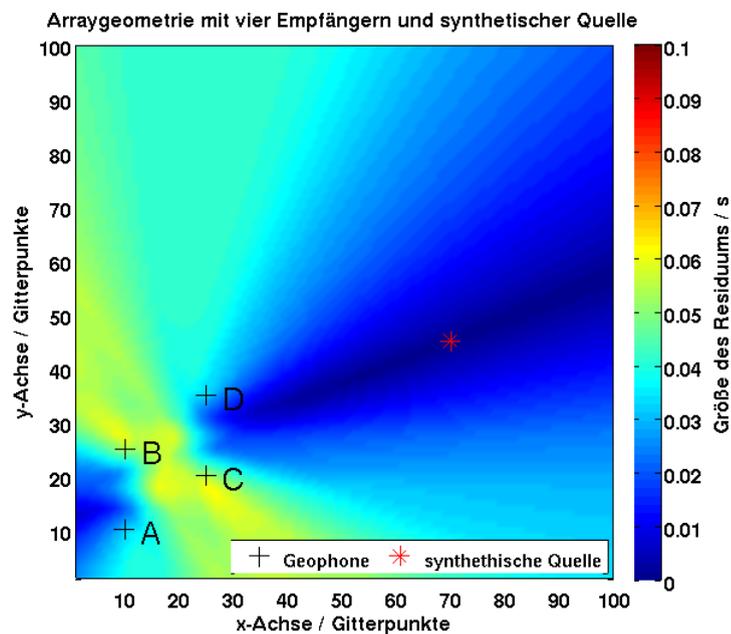


Abbildung 4.10: Geometrietest mit vier Empfängern in einem Array. Die Empfänger sind alle im linken unteren Teil des Gitters. Die Quelle ist richtig auf Gitterpunkt 70 / 45 lokalisiert worden. Allerdings ist in der graphischen Darstellung das Minimum des Residuums sehr lang gestreckt. Eine Fokussierung ist mit einem Arrayaufbau nicht möglich.

4.4.5 Bestimmen der Oberflächenwellengeschwindigkeit

Der Grid Search Algorithmus kann nur dann funktionieren, wenn die Untergrundgeschwindigkeit bekannt ist. Wie in Kapitel 3 beschrieben, gibt es nicht nur einen Typ von Wellen. Für jeden Wellentyp besitzt der Untergrund eine Ausbreitungsgeschwindigkeit, die aus den elastischen Modulen berechenbar ist. Der Grid Search Algorithmus rechnet mit einem homogenen Vollraum, in dem es eine konstante Ausbreitungsgeschwindigkeit für alle Wellentypen gibt. Da die Kreuzkorrelation durch die Fensterung mit dem gesamten ankommenden Signal berechnet wird und der dominanteste Wellentyp in einem Signal die Oberflächenwelle ist, ist davon auszugehen, dass man mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit für die Oberflächenwellen die beste Lokalisierung bekommt. Im Folgenden ist mit der

Bezeichnung Untergrundgeschwindigkeit die Ausbreitungsgeschwindigkeit für die Oberflächenwellen gemeint.

Es gibt drei Möglichkeiten, die hier kurz theoretisch vorgestellt werden, um die Untergrundgeschwindigkeit zu ermitteln. Praktisch werden diese für die Messung „Messe“ (Kapitel 5.4) und „GLS“ (Kapitel 5.5) durchgeführt.

1. Mit Hilfe einer Refraktionsseismik, kann man ein Geschwindigkeits- und Tiefenmodell aus den Ersteinsätzen der P-Welle berechnen. Mit Hilfe der P-Wellengeschwindigkeit ist es möglich die Oberflächenwellengeschwindigkeit abzuschätzen (Kapitel 3).
2. Die Untergrundgeschwindigkeit wird im Grid Search Algorithmus so lange angepasst, bis die lokalisierte Position mit der eingemessenen Position übereinstimmt. Dabei stellt sich heraus, dass der Wert des Minimums des Residuums umso kleiner wird, je besser die beiden Positionen übereinstimmen.
3. Man bestimmt den Zeitpunkt der Maxima der Kreuzkorrelationfunktionen aller Geophonpaare. Den Zeitpunkt trägt man dann mit ihrem effektiven Abstand über den Lag auf (Der effektive Abstand ist der radiale Abstand der Geophonpaare zueinander, wenn man davon ausgeht, dass die Quelle Kugelwellen abstrahlt). Man berechnet nun eine lineare Regression der Maxima. Die Steigung gibt den Wert der Untergrundgeschwindigkeit an.

Bei der ersten Messung „Wiese“ konnte keine der drei Möglichkeiten eingesetzt werden, da dort die Position der Schritte noch nicht eingemessen und notiert wurde. Bei der zweiten Messung „Messe“ kamen alle drei Methoden zum Einsatz. Bei der dritten Messung „GLS“ wurde keine Refraktionsseismik durchgeführt. Deshalb konnte dort nur die letzten beiden Methoden angewendet werden.

4.4.6 Schwellenwert zur Beurteilung der Lokalisierung

Um ein Maß dafür zu erhalten ob eine Lokalisierung gut oder schlecht ist, wird ein sogenannter Schwellenwert eingeführt. Wird ein Pick an einer falschen Stelle gesetzt indem eigentlich kein kohärentes Signal sondern nur Rauschen enthalten ist und das daraus erhaltene Zeitfenster kreuzkorreliert, werden in sich nicht schlüssige Laufzeitdifferenzen berechnet, die zu einem hohen Wert für das Minimum des Residuums führen. Diese hohen Werte sind oftmals als Ausreißern in der Lokalisierung zu finden. Sobald das Minimum des Residuums größer als der Schwellenwert ist, wird eine Lokalisierung verworfen. Der Schwellenwert entscheidet also ob die Lokalisierung gut oder schlecht ist.

Wie groß dieser Schwellenwert sein muss, hängt maßgeblich von der Anzahl der Geophonpaare, von der Geometrie der Geophone sowie von der Untergrundgeschwindigkeit ab. Daher muss für jede Messung bzw. jeden Standort dieser Wert neu festgelegt werden. In den Messungen „Messe“ (Kapitel 5.4) und „GLS“ (Kapitel 5.5) wird der Schwellenwert eingeführt und angepasst.

4.5 Unterschied zwischen Echtzeit- und Offlineauswertung

Die Auswertetechnik und das Prozessing wie es in diesem Kapitel beschrieben ist, sind für eine Offlineauswertung konzipiert. Die Daten in dieser Arbeit wurden ausschließlich so

bearbeitet. Das bedeutet, man nimmt die Daten im Messgebiet auf, speichert diese ab und wertet sie erst später aus. In diesem Kapitel wird darauf eingegangen, welche Unterschiede das Processing bei einer Echtzeitauswertung haben muss. Wichtig bei einer Echtzeitauswertung ist, dass die Rechenzeit, die zur Lokalisierung notwendig ist, kürzer ist als die Aufzeichnungslänge der Daten. Die Daten werden insitu ausgewertet!

Der Einsatz eines sta/lta Picker ist erst zeitlich verzögert möglich, nachdem die Daten schon aufgezeichnet wurden. Die sta und lta Fenster laufen, je nach Länge der Fenster, verspätet über die Daten und picken die Zeitpunkte, in denen das Verhältnis der Fenster den Triggerwert übersteigt. Das Konzept des Triggergeophons muss leicht verändert werden. Bei der Offlineauswertung wird das Geophon benutzt, welches die meisten Picks besitzt. Bei einer Echtzeitauswertung definiert man ein Geophon von vornherein als Triggergeophon. Die Kreuzkorrelation kann wie gewohnt eine Fensterung um diesen Pick bei allen Geophonen durchführen und darin die Laufzeitdifferenzen für jedes Geophonpaar berechnen. Eine andere Herangehensweise, ohne sta/lta Picker, ist die Kreuzkorrelation kontinuierlich berechnen zu lassen. Dafür könnte ein Fenster über die Daten geschoben werden, welches ständig Laufzeitdifferenzen berechnet. Beim Konzept des Grid Search Algorithmus muss bei beiden Methoden die Geschwindigkeit und der Schwellenwert definiert werden. Für die Geschwindigkeit müssen die Methoden eingesetzt werden, die im Kapitel 4.4.5 beschrieben werden. Diese sind sowohl in Echtzeit als auch bei der Offlineauswertung gleich. Auch die Art und Weise wie der Schwellenwert definiert wird ändert sich nicht. Der Schwellenwert spielt bei der Variante, in der die Kreuzkorrelation kontinuierlich berechnet wird, eine große Rolle. Es wird bei einer Korrelation von lediglich diffusem Rauschen ein hoher Wert für das Minimum des Residuums nach dem Grid Search erwartet. Der Schwellenwert wird so eingestellt, dass er den hohen Wert erkennt und das Ergebnis verwirft.

In Kapitel 5.5.5 wird dies an einer Messung getestet. Der Datensatz ist bereits aufgezeichnet. Es wird dennoch so getestet, als ob dieser erst nach und nach zur Verfügung stehen würde. In Kapitel 6, Praxisanwendung, wird das Ergebnis diskutiert. Es wird dort vor allem auf andere Parameter wie die Diskretisierung, die Geometrie und Anzahl der Geophone und die benötigte Rechenkapazität eingegangen um eine Echtzeitauswertung durchführen zu können um sie in der Praxis anzuwenden.

5. Beschreibung und Auswertung der Messungen

Dieses Kapitel beginnt mit einem Überblick über die drei durchgeführten Messungen (Kapitel 5.1) und die dafür verwendeten Messgeräte und Dateiformate (Kapitel 5.2). Anschließend werden die Messungen einzeln ausgewertet und die Ergebnisse präsentiert (Kapitel 5.3 bis 5.6).

5.1 Überblick über die Messungen

Innerhalb des Zeitraums der Diplomarbeit wurden drei Messungen durchgeführt, die in diesem Kapitel beschrieben und ausgewertet werden. Die erste Messung mit der Bezeichnung „Wiese“ (Kapitel 5.3) wurde auf dem Gelände der Westhochschule des KIT in Karlsruhe durchgeführt. Die Messung war eine Testmessung, um die Messapparatur kennenzulernen und einen Datensatz mit Signalen von Schritten zu gewinnen, mit dem man die benutzten Programme testen konnte.

Für die zweite und dritte Messung wurden Messgebiete südöstlich von Karlsruhe im Gebiet der Karlsruher Messe ausgesucht. Dort standen einem größere, ebene Flächen mit sehr geringen anthropogenen Störeinflüssen zur Verfügung.

Die zweite Messung mit dem Namen „Messe“ (Kapitel 5.4) fand auf einer Start- und Landebahn eines Segelflugplatzes statt. Die dritte Messung „GLS“ (Kapitel 5.5) fand auf einer Wiese nahe des Segelflugplatzes statt und sollte die guten Ergebnisse aus der zweiten Messung bestätigen. Außerdem wurde eine Messgeometrie getestet, die unkompliziert aufzubauen und für einen möglichen Praxiseinsatz geeignet ist.

In den folgenden Kapiteln werden die Standorte, die Messgeometrie und die eigentlichen Messungen genauer beschrieben. Die Daten werden bis auf die erste Messung „Wiese“, wie in den Grundlagen beschrieben, prozessiert und ausgewertet. Die Lokalisierungsergebnisse vieler Messungen werden anschließend präsentiert und diskutiert. Die erste Messung „Wiese“ wird am Ende des Kapitels nochmals mit den neuesten Datenprozessring ausgewertet. Die gesamten Daten wurden mit dem Programm MATLAB[®] von The MathWorks[™] in

der Version 7.8.0.347 (R2009a) ausgewertet. Alle benötigten Programme und Funktionen sind im Anhang A genannt und beschrieben. Im Anhang B ist der Inhalt der beigefügten CD-ROM aufgelistet und beschrieben. Auf dieser sind sowohl die Programme als auch die aufgezeichneten Dateien der drei Messungen mit allen notwendigen Zusatzinformationen zu finden.

Die Funktionsweise der Geophone und einer Geode, welche bei den Messungen eingesetzt wurden, sind im folgenden Kapitel beschrieben.

5.2 Verwendete Messgeräte und Dateiformate

Die drei Messungen, die in den folgenden Kapiteln beschrieben werden, sind mit der Flachseismikapparatur des Geophysikalischen Instituts des KIT durchgeführt worden. Nach der ersten Messung im November 2009, sind im Januar 2010 neue Geophone angeschafft und die Zahl der Geoden aufgestockt worden. Im Folgenden soll kurz die Funktionsweise eines Geophons, die verwendeten Geophone, die Geode sowie zwei verschiedene Dateiformate vorgestellt werden.

Funktionsweise eines Geophons

Ein Geophon ist im Gegensatz zu einem Seismometer, ein kleines, robustes und billiges Gerät um Bodenbewegungen zu messen. Das Prinzip hinter der Messtechnik ist die Trägheit der Masse und das Induktionsgesetz.

Das Geophon selbst besteht aus einem stabilen Gehäuse, einem Spieß der in die Erde gesteckt wird und einem Kabel mit zwei Anschlüssen. In inneren des Gehäuses befindet sich ein Topfmagnet, der am Gehäuse festgeschraubt ist und eine Tauchspule, die an einer Blattfeder befestigt ist. In Abbildung 5.1 ist ein Querschnitt des Topfmagneten zu sehen, indem eine Tauchspule eintaucht. Die magnetischen Feldlinien laufen radial von der äußeren Wand (Nordpol) zur inneren (Südpol), sind sehr homogen und ändern nur in radialer Richtung ihre Stärke. Die Tauchspule befindet sich, wie man in Abbildung 5.1 sehen kann, genau im magnetischen Feld zwischen den Polen. Sie ist nur in Richtung der Zylinderachse beweglich.

Bewegt sich nun der Boden, indem das Geophon mit seinem Spieß steckt, bewegt sich auch der Topfmagnet, da dieser mit dem Gehäuse fest verbunden ist. Die Spule, die an einer Blattfeder aufgehängt ist, spürt diese Bewegung erstmal nicht und bleibt durch ihre Trägheit in Ruhe. Durch die Bewegung zwischen Spule und Magnet wird eine Spannung induziert, die man messen kann und gleichzeitig ein Maß für die Bodenbewegung ist.

Geophone

Am Geophysikalischen Institut des KIT sind verschiedene Arten von Geophone vorhanden. Die erste Messung „Wiese“ wurde mit 24 gelben Vertikalgeophonen des Typs SM-4 der Firma Input/Output Netherlands (ION) durchgeführt.

Für die zweite und dritte Messung „Messe“ und „GLS“ wurden neue 3C-Geophone mit der Bezeichnung GS-One 3-C Conventional von OYO Geospace Houston, Texas genutzt. Diese wurden im Januar 2010 angeschafft. Die Geophone haben drei Spieße auf der Unterseite

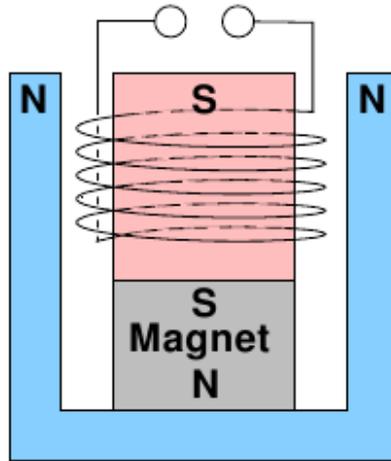


Abbildung 5.1: Querschnitt durch einen Topfmagneten mit Spule wie sie in einem Geophon verbaut sind. Der Topfmagnet ist mit dem Gehäuse des Geophons fest verbunden, die Tauchspule ist an einer Blattfeder frei beweglich zwischen den beiden Polen des Topfmagneten aufgehängt. Quelle: Forbriger (2007)

und eine Libelle auf der Oberseite. An seinem Kabelschwanz sind drei Ausgänge für jeweils eine Komponente die mit VERT (Vertikalkomponente), HORZ 1 (Horizontalkomponente 1) und HORZ 2 (Horizontalkomponente 2) gekennzeichnet sind. Bei Stecken der Geophone ist darauf zu achten, dass erstens die Libelle eingespielt ist, so dass die Komponenten nicht verkippt sind und zweitens, dass alle Geophone in einer einheitlichen Richtung gesteckt sind. Ist dies nicht der Fall so ist die Orientierung der Horizontalkomponenten nicht einheitlich.

Jeweils ein Bild der beiden Geophontypen ist im Anhang C zu finden.

Geoden, Datenerfassung und Dateiformate

Die Geode ist vom Prinzip nichts anderes als ein Analog-Digital-Wandler (A/D Wandler). Sie digitalisiert das vom Geophon kommende kontinuierliche Spannungssignal. Am Institut standen bis Ende 2009 eine, ab Januar 2010 drei Geoden der Firma Geometrics zur Verfügung. Im Anhang C ist ein Bild einer Geode zu sehen.

Eine Geode kann bis zu 24 Kanäle digitalisieren. Durch eine Reihenschaltung der drei Geoden ist es möglich gleichzeitig bis zu 72 Kanäle aufzuzeichnen. Die Abtastfrequenz (auch Samplingrate genannt) des kontinuierlichen Spannungssignals vom Geophon kann zwischen 62,5 Hz und 50000 Hz in bestimmten Schritten eingestellt werden. Für die Messungen wurden Samplingraten von 1000 Hz bzw. 2000 Hz gewählt. Laut der Gleichung (4.1) können damit Frequenzen von bis zu 500 Hz bzw. 1000 Hz aufgezeichnet werden. Die Aufzeichnungsdauer war zwischen 8 Sekunden und 60 Sekunden lang. Je nach Art der Messung wurde die Länge angepasst.

Die Geode wird über ein Thoughtbook von Panasonic mit der mitgelieferten Software von Geometrics gesteuert. Die Software heißt Geometrics Multiple Geode OS Controller und war in der Version 9.30.0.0 verfügbar. In der Software konnte ein Dateiformat gewählt werden, mit welchem die Daten abgespeichert werden. Für die erste Messung „Wiese“ wurde,

nach Nachfrage welches Dateiformat üblich ist, SEG-Y gewählt. Das Einlesen in MATLAB war über die Toolbox SegyMAT möglich (Anhang A). Für die zweite und dritte Messung wurde das Dateiformat auf SEG-2 umgestellt. Der Vorteil daran war, dass das Einlesen in MATLAB eine einfache Funktion übernahm und keine Toolbox mehr notwendig war.

5.3 Messung Wiese

Die erste Messung fand am Freitag, den 06.11.2009 statt. Neben einer Refraktionsseismik, wurden auch Testmessungen für meine Diplomarbeit durchgeführt um die Messapparatur besser kennenzulernen und erste Erfahrungen mit der Lokalisation zu gewinnen. In den folgenden Kapiteln werden die Messbedingungen sowie die Auswertung der Daten beschrieben.

5.3.1 Standortbeschreibung, Geophoneometrie und Messungen

Das Messgebiet der Messung „Wiese“ liegt auf dem Gelände der Westhochschule des KIT in Karlsruhe (Abbildung 5.2).

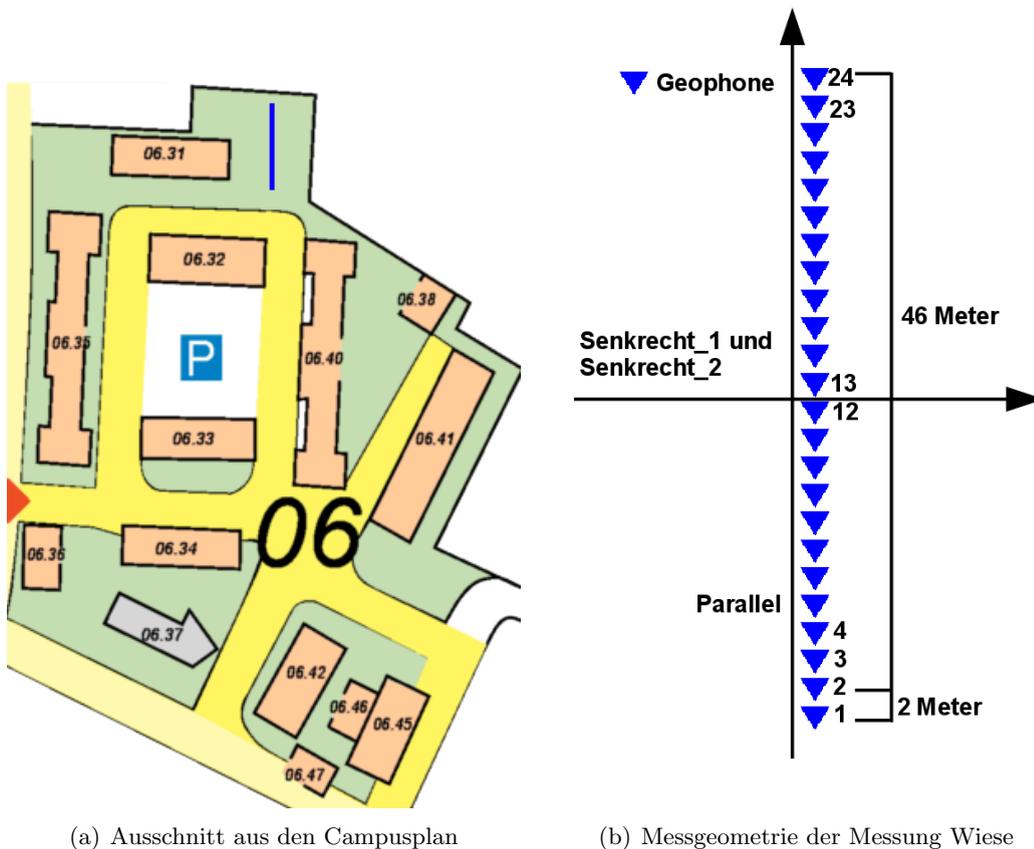
Die Messung war als eine frühe Testmessung ohne die Berücksichtigung von Symmetrien oder Überlegungen zu einer speziellen Geometrie gedacht. 24 Vertikalgeophone wurden zu einem Profil in einem Abstand von zwei Metern gesteckt (Abbildung 5.2). Die Geophone als Profil zu stecken ist in der Seismik üblich.

Die Aufzeichnungsdauer wurde bei einer Samplingrate von 2000 Hz auf 8 Sekunden festgelegt. Das verwendete Dateiformat war SEG-Y. Als Messungen wurde 3x parallel zum Profil (Parallel_1 bis _3) und 2x entlang der Mittelsenkrechten zum Profil (Senkrecht_1 und Senkrecht_2) ein Weg abgelaufen. Die Messungen Senkrecht_1 und Senkrecht_2 wurden mit sehr festen Schritten bzw. stampfend abgescritten. Bei den Messungen Parallel wurde entlang des Profils gerannt. Der genaue Start- bzw. Endpunkt der Messungen wurden nicht eingemessen. Dies wäre für einen Geschwindigkeitstest (Kapitel 4.4.5) notwendig gewesen.

Im folgenden Kapitel 5.3.2 werde ich die Daten so wie ich sie ursprünglich ausgewertet habe, präsentieren. In Kapitel 5.6 werden die Daten neu ausgewertet. Sie werden die Prozessschritte durchlaufen, die durch die spätere Messung „Messe“ (Kapitel 5.4) entstanden sind.

5.3.2 Auswertung der Daten

Das Prinzip der Auswertung wird am Beispiel der Messung Senkrecht_2 dargestellt. Die Messung war ein abgeschrittener Weg entlang der Mittelsenkrechten. In Abbildung 5.3 ist eine Seismogrammsektion der 24 Geophone dargestellt. Die Zeitreihen sind jeweils auf den Extremwert jedes Geophons normiert. Die Größe der Amplituden sind Offsetabhängig. Da senkrecht zur Profilmittte gelaufen wurde, sind die Geophone 12 und 13 immer die, an denen die Signale die größte Amplitude haben. Je weiter man an die Enden des Profils gelangt, desto kleiner werden die Amplituden. So ist bei Geophon 1 oder 24 das Rauschen zwischen den Signalen noch sehr gut, hingegen bei den mittleren Geophonen nicht mehr zu erkennen. Allgemein haben die Signale jedes Schrittes eine große Amplitude. Das kommt durch die, wie schon weiter oben beschriebenen, sehr starken Schritte zustande. In den späteren Messungen „Messe“ (Kapitel 5.4) und „GLS“ (Kapitel 5.5) wurden Messungen mit einer normalen Schrittstärke aufgezeichnet. Dort haben die Signale eine wesentlich kleinere Amplitude. Die Einsätze der Signale werden hin zu den Geophonen 1 und 24 immer später. Zwischen vier Sekunden und fünf Sekunden wurde das Profil zwischen Geophon 12



(a) Ausschnitt aus den Campusplan

(b) Messgeometrie der Messung Wiese

Abbildung 5.2: (a) Ausschnitt aus dem Campusplan der Westhochschule des Campus Süd des KIT in Karlsruhe. Die Karte ist genordet. Der blaue Strich im Norden skizziert grob die Lage des Profils der 24 Geophone. (b) Vergrößerte Geometrie des Profils. Die Messungen Senkrecht und Parallel sind ebenfalls eingezeichnet. Senkrecht_1 und Senkrecht_2 liefen entlang der Mittelsenkrechten zwischen Geophon 12 und 13. Die Messungen Parallel verliefen parallel zum Profil.

und 13 überquert. Dort treten die größten Amplituden in den Zeitreihen auf. Durch die Normierung ist dies in Abbildung 5.3 daran zu erkennen, dass die Amplituden der Signale zu Beginn und am Ende der Zeitreihe sehr klein sind. Bei der Messung Senkrecht_2 wurden insgesamt 16 Schritte abgegeben, dessen Signale in der Seismogrammsektion auch gut zu erkennen sind.

Das Prinzip die Lokalisierungen mit Hilfe von Laufzeitdifferenzen zu berechnen, wurde bei dieser Messung erstmals angewendet. Um Laufzeitdifferenzen zu erhalten, wurden bei dieser Messung die Zeitpunkte bestimmt, an der ein Signal seinen Extremwert erreicht hat. Da die komplette Länge des Signal betrachtet wird, handelt es sich bei der größten Amplitude um eine Oberflächenwelle. Bei den Messungen Senkrecht_1 und Senkrecht_2 sollte es durch die festen Schritte, die ein Signal erzeugten, welches bei allen Geophonen ankam, kein Problem sein, die bestimmten Zeitpunkte untereinander zuzuordnen. Später wird man sehen, dass dies bei den Messungen Parallel nicht der Fall war. Danach wurden für alle möglichen Geophonpaare die Beträge der Laufzeitdifferenzen berechnet. Es konnte mit Beträgen gerechnet werden, da mehr als drei Geophone zur Verfügung standen und

die Information, an welchen Geophon das Signal als erstes ankam, nicht vonnöten war (Kapitel 4.4.3).

Mit Hilfe des Grid Search Algorithmus, wurde eine Lokalisierung anhand der Laufzeitdifferenzen durchgeführt (Kapitel 4.4).

Die Auswertung wird trotz allem nicht so wie in der Theorie beschrieben durchgeführt, da zu diesem Zeitpunkt ein Teil der Grundlagen noch nicht entwickelt war. So wurde z.B. kein Geschwindigkeitstest durchgeführt, da nicht genau protokolliert worden ist, wo exakt die Schritte waren bzw. es noch unklar war, welchen Einfluss die Geschwindigkeit auf die Lokalisierung hat. Der Schwellenwert, ab wann eine Lokalisierung verworfen werden soll, wird ebenfalls nicht verwendet.

Es werden nur die beiden Messungen die senkrecht zum Profil abgelaufen wurden ausgewertet. Für die Messungen parallel zum Profil, konnte die Auswertestrategie nicht angewendet werden. Bei Geophonen mit einem großen Offset kommen nur sehr schwache Signale an, so dass dort kein Maximum bestimmt werden kann. Eine automatisierte Routine die überprüft, an welchem Geophon Signale angekommen sind bzw. die bestimmten Maxima untereinander richtig zuordnet, wurde nicht entwickelt. So konnten für die Messungen Parallel keine Lokalisierungen durchgeführt werden.

Wie im Kapitel 4.4.4 beschrieben, ist die Anordnung der Geophone entlang eines Profils ungünstig. Der Algorithmus wird immer, solange man sich nicht direkt auf der Profillinie befindet, ein spiegelsymmetrisches Ergebnis liefern.

Im folgenden Kapitel 5.3.3 werden die Ergebnisse des Grid Search Algorithmus erläutert. Es wurde eine Oberflächenwellengeschwindigkeit für den Untergrund von $150 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ verwendet. Wie man sehen wird, liefert diese Geschwindigkeit zufriedenstellende Ergebnisse und ist mit den zukünftigen Geschwindigkeiten der späteren Messungen vergleichbar. Ein Geschwindigkeitstest, so wie er in Kapitel 4.4.5 beschrieben ist, konnte aufgrund der unbekanntenen Position der Schritte nicht durchgeführt werden. Die berechnete Fläche war 50×50 Meter bzw. bei einer Diskretisierung von 10 cm pro Gitterpunkt 500×500 Gitterpunkte groß. Das Profil wurde genau in die Mitte gelegt. Das Geophon 1 hat die Position $25 \text{ m} / 2 \text{ m}$ und Geophon 24 die Position $25 \text{ m} / 48 \text{ m}$.

5.3.3 Ergebnisse der Messungen

Im vorherigen Kapitel ist beschrieben worden, wie man auf einfach Art und Weise Laufzeitdifferenzen bestimmen kann, um dann mit Hilfe des Grid Search Algorithmus eine Lokalisierung durchzuführen. In diesem Kapitel werden die erwarteten Ergebnisse erläutert und anschließend die Lokalisierungsergebnisse präsentiert.

Bei den Messungen Senkrecht_1 und Senkrecht_2 wurde ein Weg entlang der Mittelsenkrechten des Profils abgelaufen und dabei das Profil zwischen Geophon 12 und 13 überquert. Man erwartet also, dass die ersten Schritte mit einem gewissen Abstand vom Profil lokalisiert werden, die Lokalisierungen sich dann dem Profil nähern und sich schließlich wieder auf der anderen Seite entfernen. In der Abbildung 5.4 sind die Residuen von zwei Schritte farblich dargestellt. Bei den Abbildungen ist darauf zu achten, dass die Farbskala nicht einheitlich ist. Die 24 Geophone sind als blaue Dreiecke eingezeichnet. Die Minima des Residuums liegen an den beiden Enden des Profils. Für Schritt 6 kann man einen bläulichen

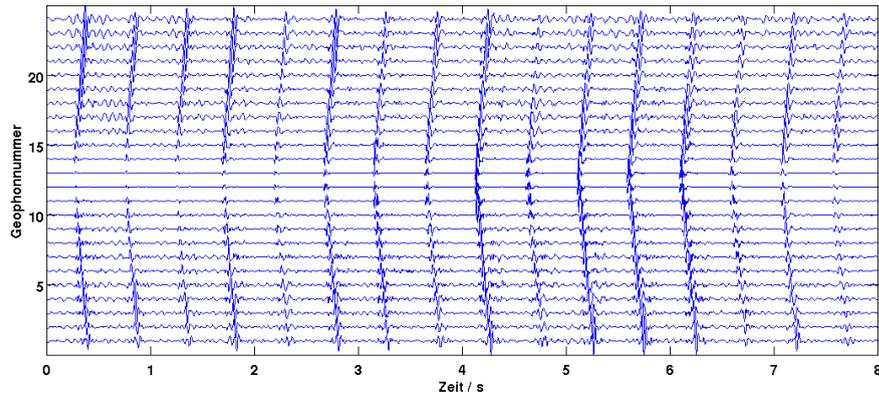


Abbildung 5.3: Seismogrammsection der Messung Senkrecht_2. Die Amplituden der 24 Geophone sind jeweils auf ihren Extrempunkt normiert. Der Abstand zwischen den Geophonen betrug zwei Meter. Die Messung Senkrecht_2 ging über die Mittelsenkrechte des Profils, d.h. der Weg ging zwischen Geophon 12 und 13 hindurch. Es sind insgesamt 16 feste Schritte abgegeben worden.

Bereich in der Mitte des Profils erkennen. Erwartet hättet man die blauen Bereiche in der

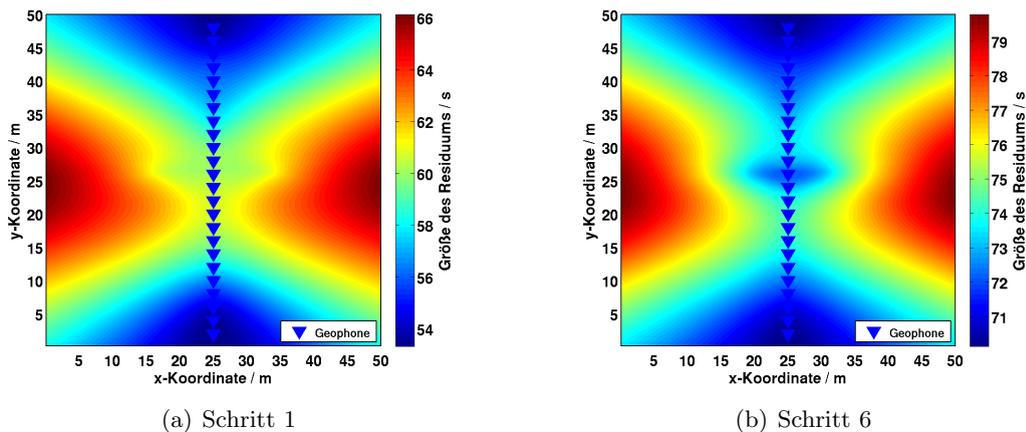


Abbildung 5.4: Lokalisierungsergebnis der Messung Senkrecht_1 von zwei Schritten. Die Geophone sind mit einem blauen Dreieck gekennzeichnet. Die Messung Senkrecht_1 ging entlang der Mittelsenkrechten des Profils. Die Minima der Lokalisierungen (blauer Bereich) liegen an beiden Enden der Profile und nicht wie erwartet in der Mitte. Bei Schritt 6 deutet sich ein Minimum in der Mitte des Profils an. Die Werte der Minima der Residuen liegen bei 54 Sekunden bzw. 71 Sekunden.

Mitte des Profils, für Schritt 1 etwas von Profil entfernt, für Schritt 6 näher am Profil. Die Lokalisierungsergebnisse stimmen nicht mit den erwarteten Ergebnissen überein.

Es werden nun die Lokalisierungsergebnisse für Senkrecht_2 betrachtet. Die Daten werden auf die gleiche Weise wie Senkrecht_1 prozessiert. Für die Messung wurde dieselbe Strecke wie bei der Messung Senkrecht_1 mit sehr festen Schritten abgelaufen. Die Seismogrammsection ist in Abbildung 5.3 zu sehen. Es sind für alle Schritte deutliche Signale mit großer Amplitude zu sehen. Die Signale haben an den beiden Enden des Profil (Geophon 1 und 24) eine spätere Einsatzzeit als bei den Geophonen in der Profilmitte.

In der Abbildung 5.5 sind vier Residuen der insgesamt sechzehn aufgezeichneten Schritte dargestellt. Wie erwartet, erhält man ein spiegelsymmetrisches Ergebnis zur Profillinie. Mit einer Geophonanordnung als Profil ist nicht erkennbar, auf welcher Seite sich der Schritt befunden hat. In Abbildung 5.5(a) ist das Residuum von Schritt 1 dargestellt. Die beiden Minima rechts und links vom Profil sind in ihrer x-Richtung verschmiert. Um dies zu zeigen, ist auch die x-Koordinate 50 Meter lang. Die Minima von Schritt 1 sind voneinander unterscheidbar. In Abbildung 5.5(b) und 5.5(c) ist dies nicht mehr der Fall. Bei Schritt 5 ist das Minimum noch ausgedehnt, bei Schritt 9 nicht mehr so stark. Hier lag die Schrittposition genau auf dem Geophonprofil zwischen Geophon 13 und 14. Das Profil wurde, nach den Lokalisierungsergebnissen, nicht mittig überquert. Für Schritt 13 in Abbildung 5.5(d) sollte eigentlich wieder, ähnlich wie bei Schritt 1, zwei Minima zu erkennen sein, da die Quelle sich wieder vom Profil entfernte. Dies ist nicht der Fall. Den groben Verlauf des abgescrittenen Weges kann man trotzdem rekonstruieren.

Betrachtet man den Wert des Minimums, so liegt diese bei Schritt 5, 9 und 13 bei circa 25 Sekunden. Für Schritt 1 fällt der Wert auf acht Sekunden. Ein kleinerer Wert deutet auf eine stabilere Lokalisierung hin. Für Kapitel 5.6, in dem die Auswertung nochmal mit den später entwickelten Prozessingschritten wiederholt wird, dient der Wert des Minimums als Vergleichswert.

Es soll nun analysiert werden, warum die Lokalisierungsergebnisse von Messung Senkrecht_1 falsch sind. Dafür werden die Laufzeitdifferenzen für den Schritt 1 bei beiden Messungen Senkrecht_1 und _2 explizit betrachten. Erwartet werden große Laufzeitdifferenzen für Geophonpaare mit einem großem Abstand, und kleine Laufzeitdifferenzen für Geophonpaare mit einem kleinem Abstand zueinander. Dadurch sollte sich ein spiegelsymmetrisches Bild zu den beiden Diagonalen ergeben.

In Abbildung 5.6 sind die Beträge der Laufzeitdifferenzen für jedes Geophonpaar farblich codiert dargestellt. Die Farbskala gibt die Größe der Laufzeitdifferenzen an. Diese ist für beide Abbildungen einheitlich auf 0,4 Sekunden begrenzt. Alle größeren Laufzeitdifferenzen sind dunkelrot codiert. In Abbildung 5.6(b) sind die Laufzeitdifferenzen von Senkrecht_2 Schritt 1 dargestellt. Das Lokalisierungsergebnis dafür ist in Abbildung 5.5(a) zu sehen. Der Schritt wurde richtig lokalisiert. Das Ergebnis ist spiegelsymmetrisch zur Winkelhalbierenden durch den Ursprung. Die Geophonpaare 1-1, 2-2 usw. haben die Laufzeitdifferenz Null Sekunden. Betrachtet man das Geophonpaar 1-13, so besitzt dies die größte Laufzeitdifferenz. Für das Paar 1-24 erwarten wir wieder eine kleine Laufzeitdifferenz, da dort das Signal gleichzeitig ankommen sollte. Dies ist auch der Fall. Die Weg wurde nicht mittig zwischen Geophon 12 und 13 überquert, sondern zwischen Geophon 13 und 14. Einzig Geophon 2 sticht aus dieser Abbildung hervor. Offensichtlich wurde dort der Extremwert falsch bestimmt, so dass dies zu falschen Laufzeitdifferenzen führt. Dennoch liefert die Lokalisierung ein richtiges Ergebnis.

In Abbildung 5.6(a) ist das Gleiche für die Messung Senkrecht_1 für Schritt 1 dargestellt. Wie man in Abbildung 5.4(a) sehen kann, führen diese Laufzeitdifferenzen zu einem falschen Lokalisierungsergebnis. Hier haben fünf Geophone (16 bis 20 und 24) eine größere Laufzeitdifferenz als 0,4 Sekunden. Offensichtlich konnten die Einsatzzeiten nicht immer den gleichen Signalen zugeordnet werden. Drei weitere Geophone (2, 3 und 5) haben eben-

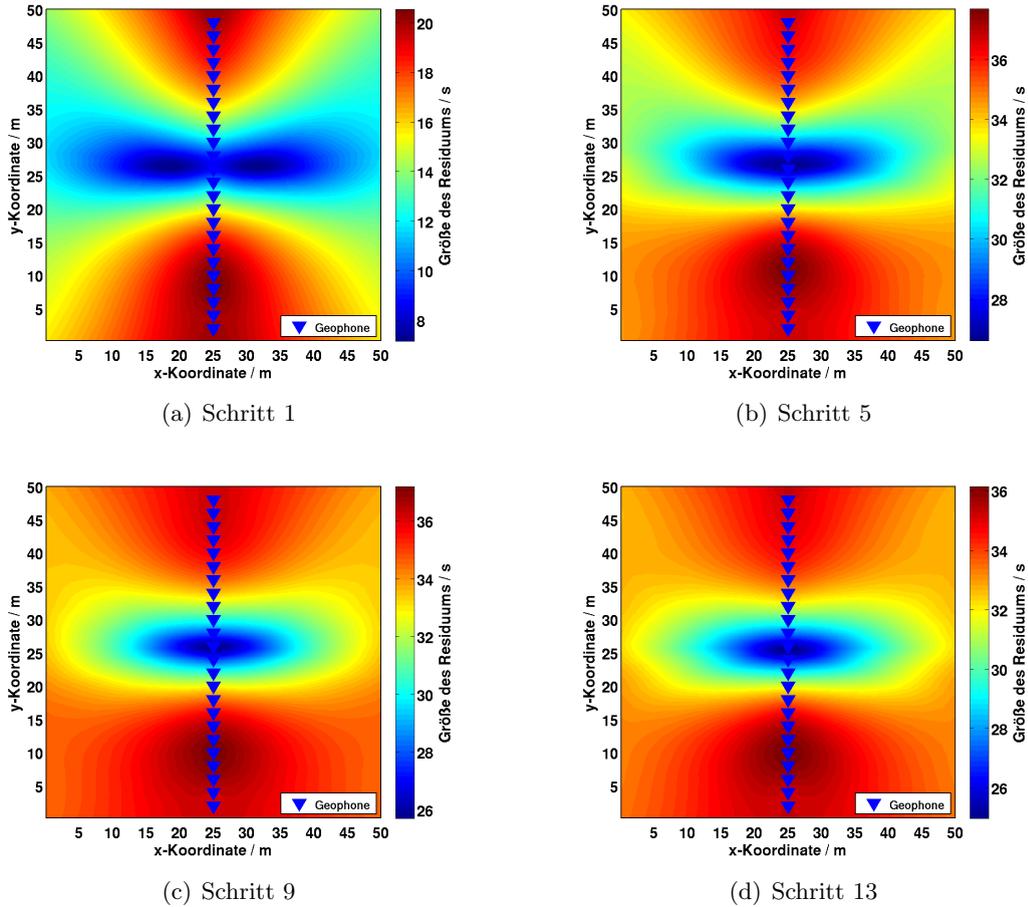
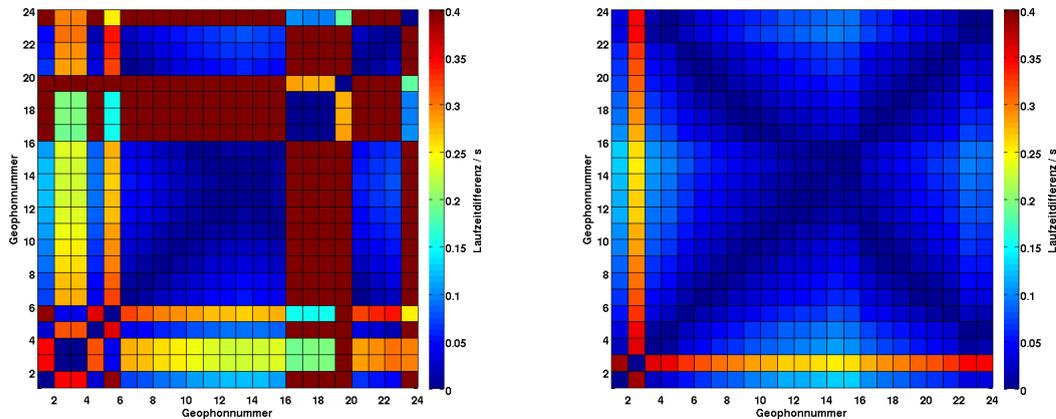


Abbildung 5.5: Lokalisierungsergebnisse für die Messung Senkrecht_2 von vier der sechzehn Schritten. Bei der Messung Senkrecht_2 wurde die Mittelsenkrechte des Profils mit festen Schritten abgelaufen. Die Daten wurden wie die der Messung Senkrecht_1 prozessiert, lieferten diesmal jedoch ein besseres Ergebnis. Aufgrund der Anordnung der Geophone zu einem Profil, sind die Lokalisierungsergebnisse dazu symmetrisch. In (a) gibt es zwei getrennte Minima. Dies war ein Schritt der einen gewissen Abstand zum Profil hatte. In (b) bei Schritt 9 wurde das Profil gerade überquert. Die Minima verschmelzen. In (d) bei Schritt 13 hätte man eigentlich wieder zwei getrennte Minima erwartet, da dort das Profil schon überquert wurde.

falls leicht erhöhte Laufzeitdifferenzen. Damit liefern acht der vierundzwanzig Geophone falsche Laufzeitdifferenzen. Dies führt zu einer falschen Lokalisierung.

Als Test wurde bei Schritt 1 von Messung Senkrecht_2 an sieben Geophonen die Einsatzzeit des Signal manipuliert. Es wurden 0,4 Sekunden auf die Einsatzzeiten addiert. Die Manipulation hatte zur Folge, dass ein falsches Lokalisierungsergebnis wie in Abbildung 5.4 zustande kam. Als Ergebnis ist festzuhalten, dass die Lokalisierung von der Genauigkeit der Laufzeitdifferenzen abhängt.

Bei den beiden vorgestellten Messungen Senkrecht_1 und Senkrecht_2 wurde der Extremwert der Signale bestimmt, um aus diesen die Laufzeitdifferenzen zu berechnen. Für die Messungen Parallel konnte dieses Vorgehen nicht wiederholt werden, da die Signale der Schritte nur an wenigen nicht an allen Geophonen ankamen, was eine Voraussetzung war um die Methode anzuwenden.



(a) Laufzeitdifferenzen M. Senkrecht_1 - Schritt 1 (b) Laufzeitdifferenzen M. Senkrecht_2 - Schritt 1

Abbildung 5.6: Es sind Laufzeitdifferenzen für jedes Geophonpaar der Messungen Senkrecht_1 (a) und Senkrecht_2 (b) vom jeweiligen ersten Schritt dargestellt. Die Abbildungen müssen symmetrisch zur Winkelhalbierenden durch den Ursprung sein. Die Farbskala ist in beiden Abbildungen gleich. Bei einer Anordnung der Geophone zu einem Profil und der Quelle in der Mitte, erwartet man eine Laufzeitdifferenzenverteilung wie in (b) zu sehen ist. Dort haben Geophone mit einem kleinem Abstand zueinander eine kleine Laufzeitdifferenz bzw. mit großem Abstand eine große Laufzeitdifferenz. Nur Geophon 2 fällt aus der Reihe. In (a) sieht man insgesamt acht Geophone, die teilweise sehr große Laufzeitdifferenzen haben. Dies führt zu einer Fehllokalisierung der Quelle.

In Kapitel 5.6 werden die Daten mit anderen Prozessingschritten, die während der Messung „Messe“ (Kapitel 5.4) entwickelt wurden, ausgewertet.

5.3.4 Zusammenfassung

Es wurden fünf Messungen (zwei senkrecht und drei parallel) mit 24 Vertikalgeophonen, die entlang eines 46 Meter langen Profils gesteckt wurden, aufgezeichnet. Davon wurden die zwei Messungen senkrecht (Senkrecht_1 und Senkrecht_2) ausgewertet. Diese gingen entlang der Mittelsenkrechten des Profils und überquerten dieses zwischen den Geophonen 12 und 13. Die Einsatzzeiten der Signale wurden über die Extremwerte der Amplitude bestimmt. Aus diesen konnte anschließend für jedes Geophonpaar eine Laufzeitdifferenz berechnet werden.

Aus den Ergebnissen kann man sehen, dass ein Problem in der Bestimmung der Laufzeitdifferenzen bzw. dem richtigen Zuordnen der Einsatzzeiten zu einem Signal besteht. Eine andere Problematik besteht in der Anordnung der Geophone zu einem Profil. Aufgrund der Spiegelsymmetrie des Profils, kommt es, trotz der großen Anzahl an Geophonen, zu Mehrdeutigkeiten. Man kann nicht sagen, auf welcher Seite des Profils die Quelle lag.

5.4 Messung Messe

Die zweite Messung „Messe“ fand aufgrund des langen und schneereichen Winters erst wieder Anfang März am, 09.03.2010 statt. In dieser Messung wird grundsätzlich und unter einfachen Bedingungen getestet, ob die Ergebnisse von der Messung „Wiese“ (Kapitel 5.3) wiederholt und vor allem verbessert werden können. Dafür wurde das Processing der Daten weiterentwickelt.

Auch standen für diese Messung neue Geräte zur Verfügung (Kapitel 5.2). Im Gegensatz zur vorherigen Messung werden nun drei Komponenten Geophone (3-C) benutzt. Die Eigenschaften und die Funktionsweise der Geophone und anderen Geräte sind im Kapitel 5.2 beschrieben.

5.4.1 Standortbeschreibung

Das Messgebiet war die Naturstart- und landebahn vom Flugplatz der Luftsportgemeinschaft Rheinstetten e.V. östlich der Messe Karlsruhe. Wegen der örtlichen Nähe zur Karlsruher Messe, ist sie auch der Namensgeber für die Messung. Die Landebahn ist circa 1000 Meter lang und 180 Meter breit. Der Belag ist Gras bzw. Wiese und besitzt, wie man es für eine Startbahn erwartet, keine Topographie. Die Messung fand am nördlichen Ende der Bahn statt. In Abbildung 5.7 ist östlich die Start- und Landebahn und das Messgebiet von oben zu sehen. Die blauen Dreiecke skizzieren die Geometrie der Geophone, die im nächsten Kapitel 5.4.2 besprochen wird. Im Westen ist bereits das Messgebiet der dritten Messung „GLS“ eingezeichnet, welche im Kapitel 5.5 beschrieben und ausgewertet wird. Zu dem Zeitpunkt der Messung im März 2010, war der Flugplatz noch nicht in Betrieb, so dass ein Betreten der Start- und Landebahn ungefährlich war. Die Lage des Messortes war sehr ruhig. Anthropogene Störeinflüsse, wie zum Beispiel Autos oder Straßenbahnen, spielten keine Rolle. Eine Baustelle, welche sich zwischen den Messgebieten „Messe“ und „GLS“ befindet, könnte eine eventuelle Störquelle sein. Es wird sich in der Auswertung zeigen, dass diese keinen Einfluss auf die Messung hat. Die Baustelle ist aufgrund des veralteten Satellitenbildes von 2005 in Abbildung 5.7 nicht zu sehen. Es wurde noch eine GPS-Koordinate mit Hilfe eines GPS-Gerätes bestimmt. Diese lag an einem Ende eines Geophonprofils für eine Hammerschlagseismik, die im Anschluss beschrieben wird. Die Koordinate ist N $48^{\circ} 58,885'$ und E $8^{\circ} 20,732'$. Um die Messgeometrie in Abbildung 5.7 einzuzeichnen, konnte man sich an dieser orientieren.

Vor meinen Messungen wurde eine Hammerschlagseismik mit 72 Vertikalgeophonen entlang eines West-Ost Profils für durchgeführt. Eine Seismogrammsektion und das daraus errechnete Untergrundmodell für die P-Wellengeschwindigkeit v_p und die Schichtmächtigkeiten mit Hilfe der Ersteinsatzzeitenmethode, ist in Abbildung 5.8 dargestellt (Stelzer, 2010). Das Prinzip der Refraktionsseismik und die Theorie hinter der Ersteinsatzzeitenmethode ist in vielen Lehrbüchern der Angewandten Geophysik beschrieben (Reynolds, 1997). Die v_p Geschwindigkeiten des errechneten Modells (Abbildung 5.8 Kasten unten rechts) werden als Anhaltspunkt genutzt um damit die im Kapitel 4.4.5 beschriebene Geschwindigkeitsproblematik zu lösen.



Abbildung 5.7: Übersichtskarte der Messgebiete „Messe“ und „GLS“. Das Satellitenbild wurde aus der Software Google Earth ausgeschnitten und ist vom 31. März 2005. Die Höhe von 2830 feet in der das Bild aufgenommen ist, entsprechen 863 Meter. Die Ost-West Ausdehnung ist genau 1000 Meter, die Nord-Süd Ausdehnung 560 Meter. Im Osten ist das Messgebiet „Messe“ mit der Geophongeometrie skizziert. Es wurde die Position N 48° 58,885' und E 8° 20,732' mit Hilfe eines GPS-Gerätes bestimmt. Westlich ist die Geophongeometrie der Messung „GLS“ skizziert, welche im Kapitel 5.5 beschrieben und ausgewertet wird.

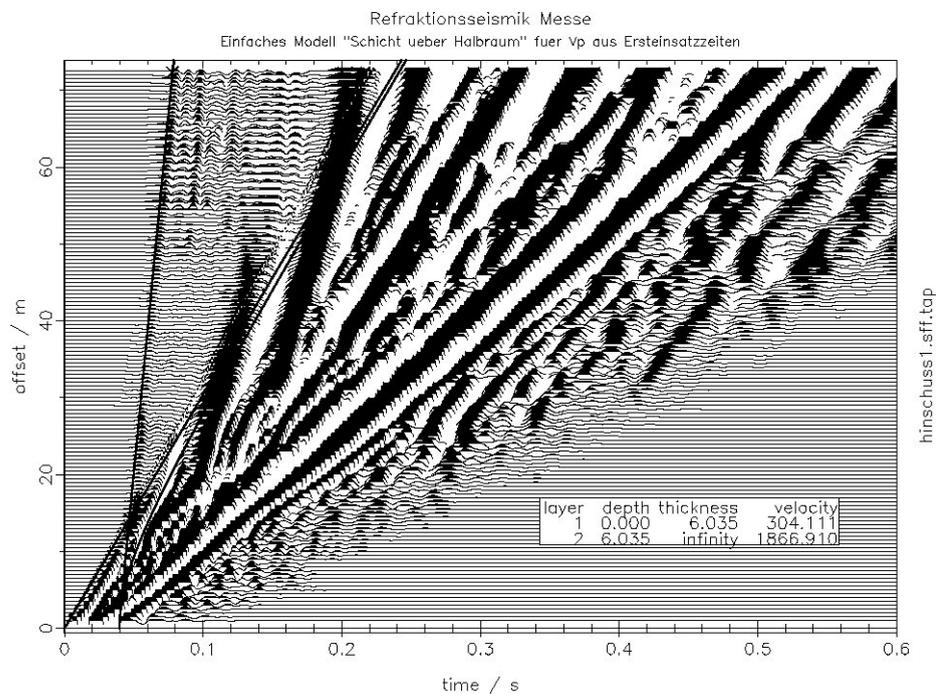


Abbildung 5.8: Seismogrammsection mit Untergrundmodell des Messgebietes Messung „Messe“. Es wurde eine Hammerschlagseismik mit 72 Vertikalgeophonen durchgeführt. Das Untergrundmodell wurde durch die Zeitpunkte der Ersteinsätze der P-Welle errechnet (schwarze Linie). Die erste Schicht hat eine Mächtigkeit von sechs Metern bei einer v_p Geschwindigkeit von $304 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, der darunterliegende Halbraum $1867 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Die Abbildung wurde aus der Diplomarbeit von Stelzer (2010) entnommen.

5.4.2 Geophongeometrie und durchgeführte Messungen

Für diese Messung standen neue Geophone und Geoden zur Verfügung. Anstatt von Vertikalgeophonen konnten 3C-Geophone benutzt werden, mit denen man neben einer Lokalisierung mittels Laufzeitdifferenzen auch eine Peilung hätte durchführen können. Zu diesem Zeitpunkt stand noch nicht fest, auf welche Lokalisierungsmethode, Laufzeitdifferenzen und/oder auch eine Peilung, der Schwerpunkt der Arbeit liegt. Deshalb war es sinnvoll die Horizontalkomponenten mit den 3C-Geophonen zu messen. Es wurden acht Geophone gesteckt. In Abbildung 5.9 ist die Anordnung der Geophone eingezeichnet. Das Messgebiet umfasst eine Fläche von 30 x 30 Meter. Aus den Erfahrungen der letzten Messungen und den synthetischen Geometrietest (Kapitel 4.4.4), wurden die Geophone möglichst asymmetrisch angeordnet. Es wurden mit Geophon 5, 6, 7 und 8 ein kleines und mit den Geophonen 1, 3, 4 und 6 ein großes Viereck gesteckt. Geophon 2 wurde an einer Stelle niedriger Geophondichte platziert. In der späteren Auswertung (Kapitel 5.4.3) soll die Frage geklärt werden, wie viele Geophone notwendig sind, um eine Lokalisierung durchzuführen. Dabei werden nur vier der acht Geophone, einmal das kleine und einmal nur das große Viereck für eine Lokalisierung genutzt.

Es wurde mit einer Samplingrate von 2000 Hz und bei dieser Samplingrate einer maximalen Aufzeichnungslänge von 30 Sekunden aufgezeichnet. Als Dateiformat wurde SEG-2 benutzt. Die eigentlichen Messungen kann man in „Tritte“ und „Pfade“ aufteilen. Es wurden an verschiedenen definierten Stellen (Tritt 1 bis 6) eine bestimmte Anzahl von Schritten abgegeben. Dabei wurden verschiedene Arten von Schritten aufgenommen um einen möglichst großen Querschnitt der Realität zu erhalten. So wurden zum Beispiel bei Messung Tritt 4 sehr feste Schritte, hingegen bei Tritt 6 nur sehr leichte Schritte aufgenommen (Abbildung 5.10). In der späteren Auswertung wird man sehen, ob man zwischen festen und leichten Schritten unterscheiden kann. Das Ziel der Messungen Tritt 3 bis 6 ist es herauszufinden, ob es möglich ist, die einzelnen Positionen der Tritte zu lokalisieren, oder ob die Positionen ineinander verschwimmen. Dies ist die Voraussetzung für die Lokalisierung von kontinuierlichen Schritten entlang eines Pfades. Außerdem soll mit den Messungen Tritt die Untergrundgeschwindigkeit ermittelt werden.

Die Messungen Pfade 1_1 bis 4_2 waren insgesamt vier Pfade. Dabei gibt die erste Zahl den Verlauf des Weges, die zweite die Richtung an. Außerdem wurde noch eine Messung Pfad 5 mit einem vorher nicht festgelegten Weg innerhalb der Geometrie aufgenommen. Alle Pfade wurden mit einem normalen, natürlichen Gang abgelaufen, d.h. es wurde nicht extra stark oder schwach getreten.

Die gewonnenen Daten werden im nächsten Kapitel 5.4.3 mit Hilfe der Werkzeuge, die im Kapitel 4 beschrieben sind, ausgewertet.

5.4.3 Auswertung der Daten

Die aufgezeichneten Daten der Messung „Messe“ werden mit den folgenden Prozessing ausgewertet.

Wie man bereits in Abbildung 5.10(b) sieht, sind für leichte Schritte und einem großen Offset die Signale der Schritte nicht mehr deutlich zu erkennen. Deshalb sieht man sich

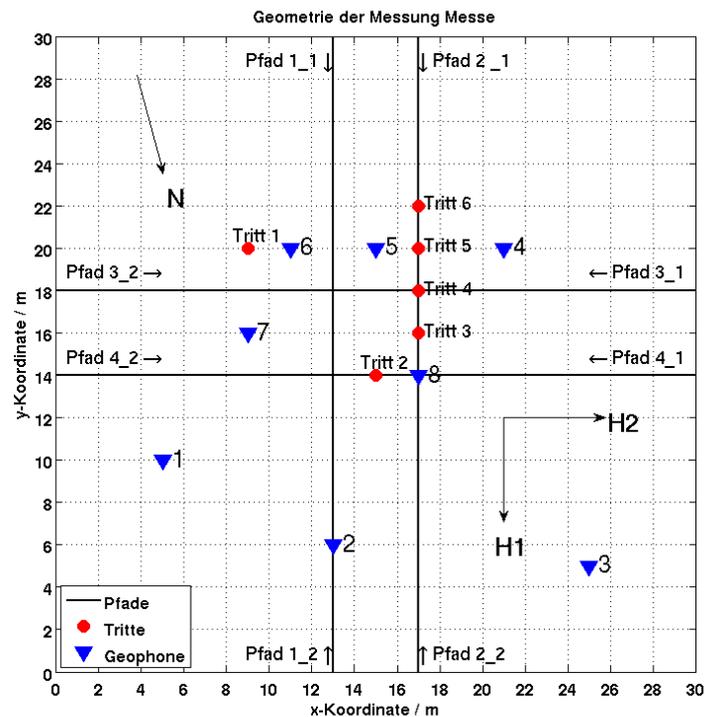


Abbildung 5.9: Übersichtskarte der Messung „Messe“. Der Nullpunkt des Koordinatensystems wurde so gewählt, dass alle Geophone und Messungen im positiven Bereich eingezeichnet werden konnten. Es wurden acht 3C-Geophone in einem kleinen (5, 6, 7, 8) und einem großen Viereck (1, 3, 4, 6) gesteckt. Geophon 2 wurde an einer Position, in deren Umkreis wenige Geophone sind, platziert. Die Messungen lassen sich in Tritte (1 bis 6) und Pfade (1.1 bis 4.4) aufteilen. Bei den Pfaden gibt die erste Zahl den Verlauf des Weges, die zweite die Richtung, sprich von oben nach unten oder von unten nach oben bzw. von links nach rechts oder rechts nach links an. Die Orientierung der Horizontalkomponente H1 der 3C-Geophone weicht leicht von der Nordrichtung ab. H2 zeigt grob in Richtung Ost.

als erstes das Frequenzspektrum der Signale an, um anschließend einen geeigneten Filter zu entwerfen, der die Signale aus dem Rauschen (im folgenden auch engl. noise genannt) hervorhebt, bzw. das Rauschen unterdrückt. Der Filter soll universal für alle Zeitreihen und alle Messungen anwendbar sein. Mit einem sta/Ita Picker und einer anschließenden Kreuzkorrelation erhält man Laufzeitdifferenzen, die schließlich mit einem Grid Search Algorithmus zu einer Lokalisierung von der Quelle des Signals führen.

5.4.3.1 Frequenzspektrum

Das Frequenzspektrum einer Zeitreihe wird, wie in Kapitel 4.1 beschrieben, berechnet. Das Ziel ist, einen Filter zu entwerfen, der das unerwünschte Rauschen ab dämpft und so die Signale hervorhebt.

Für die Berechnung der Frequenzspektren wurden zwei verschiedene Herangehensweisen gewählt. Als Erstes wird ein gleichgroß bleibendes Fenster über die Zeitreihen geschoben und für jedes Fenster das Spektrum berechnet. Man erhält ein kontinuierliches Spektrum der Zeitreihe. Als Zweites werden Spektren von einzelnen Signalen aufsummiert und an-

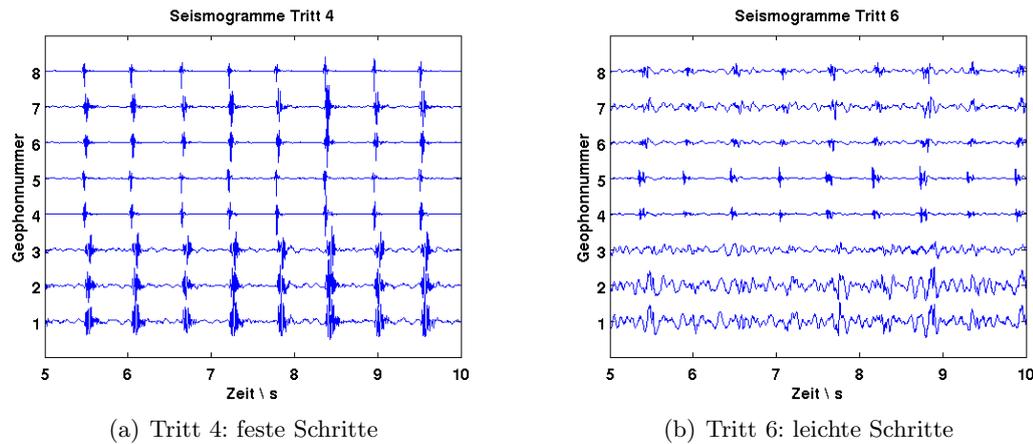


Abbildung 5.10: Vergleich von festen und leichten Schritten der Messung Tritt 4 bzw. Tritt 6. Es ist die normierte Vertikalkomponente von acht Geophonen für einen Zeitausschnitt von fünf bis zehn Sekunden dargestellt. Die Seismogramme sind ungefiltert. In (a) sind feste Schritte aus der Messung Tritt 4, in (b) leichte Schritte aus der Messung Tritt 6 dargestellt. Für nahe Geophone zur Quelle, sind in beiden Abbildungen Signale der Schritte zu sehen, für ferne Geophone (z.B. Geophon 1 oder 2) jedoch nur in (a).

schließlich betrachtet.

Kontinuierliches Frequenzspektrum

Um die Frequenzen herauszufinden, die ein Schritt erzeugt, wird ein kontinuierliches Spektrum für die Messung Tritt 4 berechnet. Dafür wird ein sich überlappendes Fenster über die Zeitreihe geschoben. Die Messung Tritt 4 waren 55 feste Schritte auf einer gleichbleibenden Stelle zwischen den Geophonen 4, 5 und 8 (Abbildung 5.9). Um die Länge des Fensters zu bestimmen, wurde in Abbildung 5.10 die Dauer eines Signals grob abgelesen. Diese liegt mit Sicherheit unter einer viertel Sekunde. Deshalb wurde ein Fenster mit einer Länge von 0,25 Sekunden bei einer Schrittweite von einer halben Fensterlänge über die Zeitreihen von Geophon 3 (großer Offset) und Geophon 5 (kleiner Offset) geschoben. Somit ist gewährleistet, dass ein Teil des Signals in einer Fensterlänge enthalten ist. Bei einer Aufzeichnungsdauer von 30 Sekunden ergeben sich insgesamt 238 Fenster. In Abbildung 5.11 sind die beiden kontinuierlichen Spektren der beiden Geophone vergleichend dargestellt. Die Amplitude der Spektren ist auf ihr jeweiliges Maximum normiert. Auf der x-Achse ist die Fensternummer, auf der y-Achse die Frequenz in der Einheit Hz geplottet. Die Farbskala gibt die Größe der spektralen Amplitude normiert auf ihr Maximum an. Die Abbildungen zeigen eine Frequenz von 0 Hz bis 200 Hz. Bei einer Samplingrate von 2000 Hz könnte man nach der Formel (4.1), dem Nyquist-Shannon-Abtasttheorem, auch noch Frequenzen bis 1000 Hz aufzeichnen. Wie sich herausstellte, sind Frequenzen über 200 Hz nicht mehr von Relevanz und werden deshalb nicht dargestellt.

In Abbildung 5.11(a) ist das Spektrum von Geophon 5 (kleiner Offset) geplottet. In regelmäßigen Abständen sind in den Abbildungen vertikale Balken mit einer großen spektralen Amplitude für bestimmte Frequenzen zu sehen. Dies ist durch die grünen, gelben bis rötlichen Bereiche farblich gekennzeichnet. Jeder dieser Balken spiegelt den Frequenzinhalt

eines Schrittes wieder. Die blauen Bereiche zwischen den Balken stellen den Frequenzgehalt des Hintergrundrauschen dar. Dort ist die spektrale Amplitude für jede Frequenz gering. Durch die Wahl der Messung Tritt 4 mit festen Schritten, sollte der Frequenzgehalt eines Schrittes bestimmt werden. Für Geophon 5 (kleiner Offset) liegt die größte spektrale Amplitude bei den meisten Schritten zwischen 20 Hz und circa 100 Hz. Ab 120 Hz ist die spektrale Amplitude wieder gering. In Abbildung 5.11(b) für Geophon 3 (großer Offset) liegen die Maxima der spektralen Amplitude zwischen 30 Hz und 80 Hz. Der unterschiedliche Frequenzgehalt von großen und kleinen Offset wird vor allem durch Dispersions- und Dämpfungseffekte zustande kommen.

Eine weitere wichtige Erkenntnis die man aus den Abbildungen der kontinuierlichen Frequenzspektren erhält ist, dass der Frequenzgehalt der Schritte der Messung Tritt 4 untereinander offensichtlich nicht einheitlich ist. Es wurde bei der Messung besonders darauf geachtet, dass jeder Schritt gleich war. Dies ist jedoch im Frequenzspektrum nicht erkennbar. So liegt zwar das Maximum der spektralen Amplitude für jeden Schritt in Abbildung 5.11(b) bei 40 Hz, jedoch streut die spektrale Amplitude für größere und kleinere Frequenzen sehr. Deshalb halte ich es für nicht sinnvoll eine Spektralanalyse, wie es Houston und McGaffigan (2003) im Kapitel 2.1 beschreiben und vorschlagen, als einen Indikationsfaktor zu nehmen, die Schritte detektieren soll.

In den Abbildungen 5.11(a) und 5.11(b) ist, wie bereits weiter oben schon erwähnt, eine Fensterlänge von 0,25 Sekunden bei einer Überlappung der Fenster von einer halben Fensterlänge gewählt worden. Verkleinert oder vergrößert man das Fenster oder die Überlappung, so sind die kontinuierlichen Spektren schärfer bzw. verschwommener. Der Frequenzgehalt und die Informationen die man daraus bekommt bleiben gleich.

Aufsummiertes Frequenzspektrum

Eine andere Methode um den Frequenzgehalt eines Schrittes zu bestimmen, ist das Aufsummieren von Spektren. Dabei werden keine Fenster mehr ausgeschnitten, sondern die gesamte Länge der Zeitreihe genutzt, um daraus ein Spektrum zu berechnen. Das Vorgehen ist wie folgt:

1. Berechnen des jeweiligen Spektrums für alle Zeitreihen der Messung.
2. Normieren der spektralen Amplitude bei jeder Zeitreihe, damit entferntere Geophone mit geringerer spektralen Amplitude gleichwertig behandelt werden.
3. Mittelwertbildung von allen Spektren einer Messung um mögliche Dispersionseffekte auszugleichen.
4. Erneute Normierung und Anwenden eines Medianfilters, der das Frequenzspektrum glättet.

Das Ziel dieses Vorgehens ist, die Offsetabhängigkeit, mögliche Dispersionseffekte und den Unterschied von Schritt zu Schritt, wie man ihn bei den kontinuierlichen Spektren (Abbildungen 5.11 (a) und (b)) gesehen hat, zu vermindern. Es sollen wieder Informationen für das Design des Filters gewonnen werden.

Die Zeitreihen von Tritt 4 und Tritt 6 wurden, wie in den Punkten 1 bis 4 beschrieben,

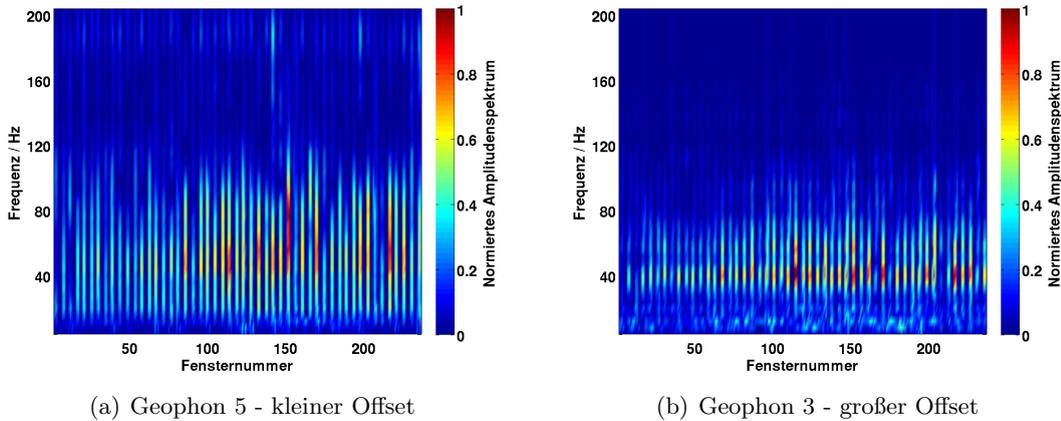


Abbildung 5.11: Kontinuierliche Frequenzspektren der Messung Tritt 4 von Geophon 5 und 3. Es wurde ein Fenster mit einer Länge von 0,25 Sekunden bei einer Überlappung von einer halben Fensterlänge über die Daten geschoben. Es ergeben sich bei einer Aufzeichnungsdauer von 30 Sekunden 238 Fenster. Die spektrale Amplitude ist jeweils auf ihr Maximum normiert. In (a) sieht man das kontinuierliche Spektrum von Geophon 5 (kleiner Offset) in (b) von Geophon 3 (großer Offset). Die regelmäßigen, grünlichen, gelblichen und rötlichen vertikalen Balken spiegeln durch die hohe spektrale Amplitude den Frequenzgehalt der Schritte wieder. Der blaue Bereich dazwischen ist das Hintergrundrauschen mit einer geringen spektralen Amplitude für alle Frequenzen. Die Maxima der spektralen Amplitude liegen zwischen 40 Hz und 80 Hz für Geophon 5 und um die 40 Hz für Geophon 3. Für verschiedene Schritte variiert der Frequenzgehalt deutlich.

prozessiert. Tritt 4 waren, wie bereits weiter oben genannt, sehr feste Schritte, Tritt 6 dagegen sehr leichte Schritte. Die Amplitude der Signale von den Schritten von der Messung Tritt 6 ist bei den meisten Geophonen nicht signifikant größer als das Hintergrundrauschen (Abbildung 5.10(b)).

In Abbildung 5.12 sind die beiden normierten Spektren von Tritt 4 und 6 bis zu einer maximalen Frequenz von 200 Hz dargestellt. Die größte spektrale Amplitude bei der blauen Kurve (Tritt 6) liegt bei circa 5 Hz, hingegen liegt bei der roten Kurve (Tritt 4) das Maximum bei 40 Hz. Bei Tritt 6 wird das Maximum der spektralen Amplitude hauptsächlich vom Hintergrundrauschen verursacht. In Abbildung 5.10(b) sieht man, dass sich die Signale der Schritte nur bei quellnahen Geophonen vom Hintergrundrauschen abheben. Bei 20 Hz und 40 Hz ist ein kleiner Sattelpunkt zu sehen. Für Tritt 4 kann man das Ergebnis aus dieser Methode mit dem aus dem kontinuierlichen Spektrum vergleichen. Beide Methoden zeigen, dass der größte Anteil der spektralen Amplitude um 40 Hz liegt.

Die Ergebnisse der beiden Methoden helfen im nächsten Kapitel einen Filter zu entwerfen, der die Signale der Schritte nicht verändert, jedoch das Hintergrundrauschen unterdrückt.

5.4.3.2 Frequenzfilter

Im vorherigen Kapitel wurde durch eine Spektralanalyse der Frequenzgehalt von den Messungen Tritt 4 und Tritt 6 ermittelt. In diesem Kapitel sollen verschiedene Filter auf die Daten angewendet werden. Grundsätzlich wird ein nullphasiger Butterworth Bandpassfilter verwendet. Der nullphasige Filter ist notwendig, damit man durch das Filtern die

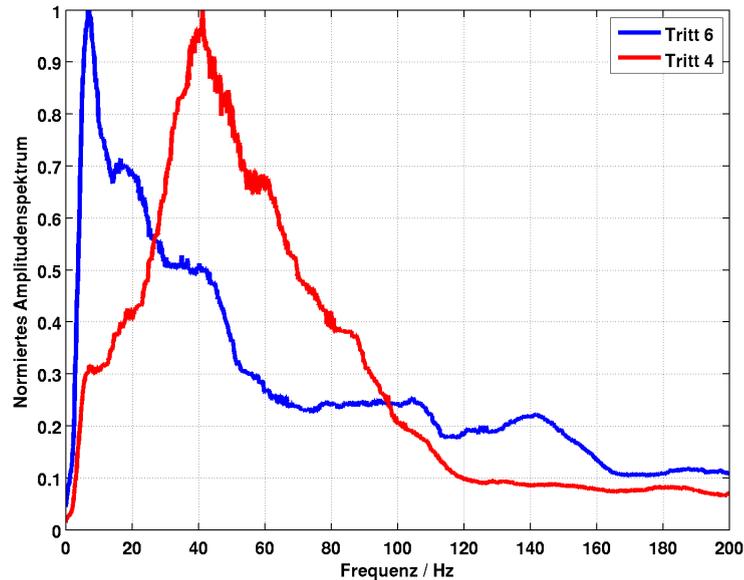


Abbildung 5.12: Aufsummierte Spektren der Messungen Tritt 4 und Tritt 6. Die Zeitreihen wurden, wie in den Punkten 1 bis 4 beschrieben, prozessiert. Tritt 6 war eine Messung mit sehr festen Schritten, Tritt 4 mit sehr leichten. Ein Ausschnitt der Zeitreihen sind in Abbildung 5.10 zu sehen. Beide Kurven sind jeweils auf ihr Maximum normiert. Das Maximum von Tritt 6 (rote Kurve) liegt um die 40 Hz und wird hauptsächlich von den Signalen der Schritte verursacht, das Maximum von Tritt 4 liegt bei circa 5 Hz. Dieses wird wohl durch die schwachen Signale der Schritte hauptsächlich vom Hintergrundrauschen erzeugt. Mit diesen Informationen soll im nächsten Kapitel ein passender Filter entworfen werden.

Einsatzzeiten der Signale nicht verändert. Dies ist im Kapitel 4.2 beschrieben. Es werden verschiedene Eckfrequenzen für den Filter ausprobiert. Dazu werden wieder die Zeitreihen von Geophon 5 (kleiner Offset) und Geophon 3 (großer Offset) von Tritt 6 (leichte Schritte) verwendet. Das Ziel der Filterung ist es, die Amplituden des Rauschens zu vermindern und so die Signale der Schritte hervorzuheben.

Es werden zwei verschiedene Paare von Eckfrequenzen und deren Ordnung vorgestellt.

1. Bandpassfilter von 10 Hz bis 120 Hz und 4ter Ordnung
2. Bandpassfilter von 20 Hz bis 60 Hz und 4ter Ordnung

Der breite Bandpassfilter von 10 Hz bis 120 Hz enthält nahezu das gesamte Frequenzspektrum das in den Schritten der Messung Tritt 4 enthalten ist. Der schmale Bandpassfilter von 20 Hz bis 60 Hz soll vor allem die Frequenz um 40 Hz hervorheben.

In Abbildung 5.13 ist die originale Zeitreihe und die gefilterten Zeitreihen von Geophon 5 (kleiner Offset) und Geophon 3 (naher Offset) jeweils von 4,6 Sekunden bis 5 Sekunden dargestellt. Bedingt durch den Offsetunterschied, kommt das Signal bei Geophon 3 später an als bei Geophon 5. Die Amplituden sind auf den Extremwert innerhalb des dargestellten Zeitfensters von der ungefilterten Zeitreihe normiert. In Abbildung 5.13(a) kann man das Signal eines Schrittes ab circa 4,75 Sekunden deutlich in der ungefilterten Zeitreihe erkennen. Der breitbandige Filter (grüne Kurve) von 10 Hz bis 120 Hz verändert das Signal, im Gegensatz zum schmalbandigen Filter, nur geringfügig. Der schmalbandige Filter (rote

Kurve) hat jedoch einen deutlichen Einfluss auf die Form des Signals. Die hohen Frequenzen sind in diesem nicht mehr enthalten. Auch die sehr kleinen Frequenzen, die man zwischen 4,6 Sekunden und 4,75 Sekunden im Rauschen vor dem eigentlichen Signal erkennt, werden abgeschwächt. Um einschätzen zu können, welcher Filter weiter verwendet wird, schaut man sich noch die Form des Signals für einen großen Offset an. In Abbildung 5.13(b) ist das Signal anhand seiner Amplitude in der ungefilterten Zeitreihe schlecht erkennbar. Die Amplitude bei 4,6 Sekunden ist nur minimal geringer als die Amplitude zwischen 4,85 Sekunden und 4,9 Sekunden. Nach dem Filtern mit den beiden oben genannten Filtern, ist das Signal sehr gut zu sehen. Die Form des Signals wird diesmal nicht verändert. Der schmalbandige Filter dämpft jedoch das Rauschen mehr ab als der breitbandige.

Man kann hier wieder den Einfluss des Offsets auf den Frequenzgehalt des Signals erkennen. Das Signal von Geophon 3 besitzt kleinere Frequenzanteile als das von Geophon 5.

In Abbildung 5.14 oben ist nochmals die komplette Zeitreihe von Tritt 6 von Geophon 3

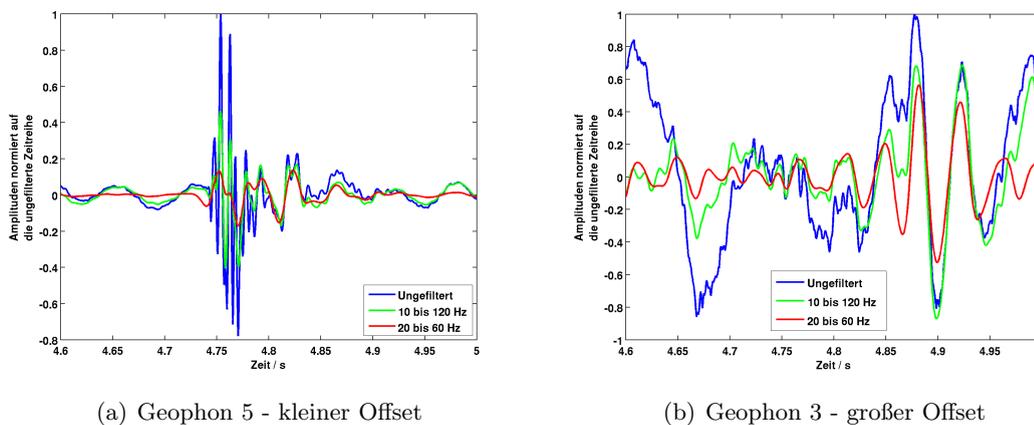


Abbildung 5.13: Originale und gefilterte Zeitreihen von Tritt 6 mit einem Bandpassfilter von 10 Hz bis 120 Hz (grüne Kurve) und 20 Hz bis 60 Hz (rote Kurve). In (a) ist das originale Signal eines Schrittes (blaue Kurve) und die beiden gefilterten Signale (grüne und rote Kurve) im Zeitraum von 4,6 Sekunden bis 5 Sekunden von Geophon 5 (kleiner Offset) zu sehen. Der schmale Bandpassfilter hat einen sehr großen Einfluss auf die Signalform. In (b) sind die beiden Filter auf dasselbe Signal wie in (a) jedoch von Geophon 3 (großer Offset) angewendet worden. Das Signal ist in der originale ungefilterten Zeitreihe (blaue Kurve) nicht zu erkennen. Erst nach dem Filtern erkennt man vor allem beim schmalen Bandpassfilter das Signal sehr gut.

ungefiltert, in der Mitte mit einem Bandpassfilter von 10 Hz bis 120 Hz und unten mit einem Bandpassfilter von 20 Hz bis 60 Hz zu sehen. In Abbildung 5.13(b) ist der Abschnitt von 4,6 Sekunden bis 5 Sekunden vergrößert dargestellt. Die Amplituden sind jeweils Spurweise auf ihren Extremwert normiert. Wie man deutlich erkennen kann, haben die Filter eine erhebliche Auswirkung auf die Zeitreihe. Sind in der oberen Abbildung (ungefiltert) die Signale der Schritte sehr schlecht bis nicht zu erkennen bzw. gehen im Hintergrundrauschen unter, so sind sie in der mittleren und unteren Abbildung (gefiltert) klar zu sehen und heben sich vom Rauschen ab. In der unteren Abbildung sind Signale, die mit dem schmalbandigen Filter gefiltert wurden, noch deutlicher zu erkennen als in der Mittleren.

Im folgenden Kapitel 5.4.3.3 werden alle drei Filtervarianten weiter verfolgt: ungefilter-

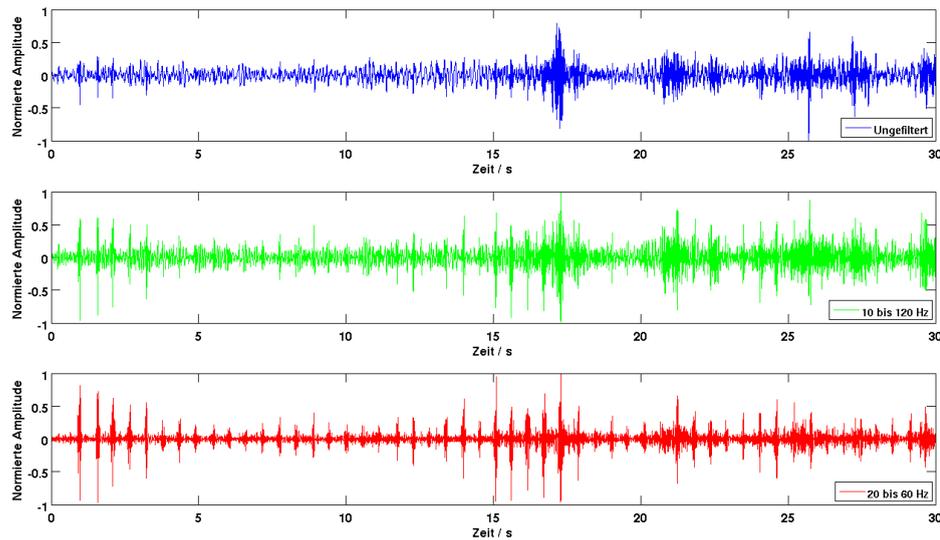


Abbildung 5.14: Gesamte Zeitreihe von Tritt 6 Geophon 3. Die Amplituden sind spurweise auf ihren Extremwert normiert. In Abbildung 5.13(b) ist der Bereich von 4,6 bis 5 Sekunden vergrößert dargestellt. Oben ist die ungefilterte Zeitreihe. Signale von Schritten sind im Rauschen nur teilweise bis gar nicht zu erkennen. In der Mitte ist die Zeitreihe von 10 Hz bis 120 Hz, unten von 20 Hz bis 60 Hz gefiltert. Die Signale der Schritte heben sich nun deutlich in beiden Abbildungen vom Rauschen ab und sind klar zu erkennen. In der unteren Abbildung (schmalbandiger Filter) sogar noch etwas besser als in der Mittleren.

te, mit schmalen und breiten Bandpass gefilterte Zeitreihen. Das Ergebnis kann schon vorne weggenommen werden. Die besten Ergebnisse erzielt man mit dem schmalbandigen Filter von 20 Hz bis 60 Hz, da dort die Signale nach dem Filtern das größte Signal-zu-Rausch-Verhältnis und die größte Kohärenz aufweisen und somit für die Kreuzkorrelation, die im folgenden Kapitel beschrieben wird, am besten geeignet sind.

5.4.3.3 sta/lta Picker und Kreuzkorrelation

Nachdem im vorherigen Kapitel der Frequenzgehalt der Zeitreihen betrachtet wurde um daraus einen geeigneten Filter zu entwerfen, geht es in diesem Kapitel darum Laufzeitdifferenzen von Signalen zu bestimmen um mit diesen eine Lokalisierung unter Hilfenahme eines Grid Search Algorithmus durchzuführen.

Wie in Kapitel 4.3.4 beschrieben, wird das Ergebnis des sta/lta Picker benutzt um ein Fenster um die Picks zu legen. Anschließend wird die Kreuzkorrelation von zwei Fenstern berechnet. Im Kapitel 4.3 wurde bereits die Theorie des sta/lta Picker und der Kreuzkorrelation beschrieben. Als erstes wird der sta/lta Picker verwendet um Signale, dessen Amplitude sich von Rauschen abheben, zu picken.

sta/lta Picker

Der benutzte sta/lta (short term average / long term average) Picker basiert auf einem MATLAB Algorithmus programmiert von Frederik Simons von der Princeton Universität

in New Jersey, USA. Die vier Parameter, die in der Theorie (Kapitel 4.3.2) beschrieben wurden, sind folgendermaßen eingestellt:

1. Länge des sta Fensters: 0,01 Sekunden
2. Länge des lta Fensters: 0,5 Sekunden
3. Verhältnis vom sta zu lta welches triggert: 2
4. Verhältnis vom sta zu lta welches enttriggert: 0,2

Die Werte der Parameter beruhen auf vielen Tests, die mit den Daten der Messung „Messe“ durchgeführt wurden. Letztendlich liefern diese die besten Ergebnisse.

Als ein Vergleich der Funktionsweise vom sta/lta Picker für die ungefilterte, die schmalbandig und breitbandig gefilterte Zeitreihe, sind in Abbildung 5.15 die gesetzten Picks für Tritt 6 Geophon 3 mit schwarzen Sternen eingezeichnet. Die vier Parameter wurden für alle Zeitreihen gleich gelassen. In der blauen ungefilterten Zeitreihe detektierte der Picker 71, in der grünen mit den breiten Bandpass gefilterten Zeitreihe 66 und in der roten mit dem schmalen Bandpass gefilterten Zeitreihe 61 Ereignisse. Da die Schritte bei Messung Tritt 6 sehr regelmäßig waren, werden die Picks auch in regelmäßigen Zeitabständen erwartet. Dies ist für die rote Kurve am besten gewährleistet.

Dies ist ein Beispiel, in dem der schmalbandige Filter am besten gearbeitet hat. Weiteres Anwenden auf andere Messungen hat gezeigt, dass der Filter immer das beste Ergebnis liefert. Im Folgenden werden alle Daten mit einem Butterworth Bandpassfilter 4ter Ordnung von 20 Hz bis 60 Hz gefiltert.

Um aus den erhaltenen Picks Laufzeitdifferenzen zu berechnen, müssen die gepickten Einsatzzeiten der Signale der Schritte von den verschiedenen Geophonen voneinander abgezogen werden. Dass die Zuordnung der Picks im Regelfall sehr problematisch ist, wurde bereits in der Tabelle 4.1 im Kapitel 4.3.4 dargestellt und war auch ein Problem bei der Messung „Wiese“ (Kapitel 5.3). Eine Lösung für die Problematik ist der Einsatz der Kreuzkorrelation.

Kreuzkorrelation

Es wird nun die Kreuzkorrelation verwendet um die bekannte Problematik des sta/lta Picker, die Picks untereinander zuzuordnen, zu umgehen. Die theoretische Betrachtung der Kreuzkorrelation ist im Kapitel 4.3.3 beschrieben.

Die Vorgehensweise, nachdem die Zeitreihen den sta/lta Picker durchlaufen haben, ist folgende:

1. Es werden die Zeitreihen aller Geophone betrachtet. Es wird die Zeitreihe des Geophons benutzt, in der der Picker die meisten Picks gesetzt hat (im folgenden Triggergeophon genannt). Dies ist so zu begründen, dass an diesem Geophon die meisten Signale eingetroffen sind. Würde man ein anderes Geophon mit weniger Picks verwenden, so läuft man Gefahr, an anderen Geophonen aufgezeichnete Signale nicht zu berücksichtigen. Die Punkte 2 bis 4 werden jeweils für jeden Pick wiederholt.
2. Es wird eine Fensterung um einen Pick vom Triggergeophon durchgeführt. Die Fensterlänge wurde auf 0,5 Sekunden festgelegt (vor dem Pick 0,175 Sekunden, nach dem

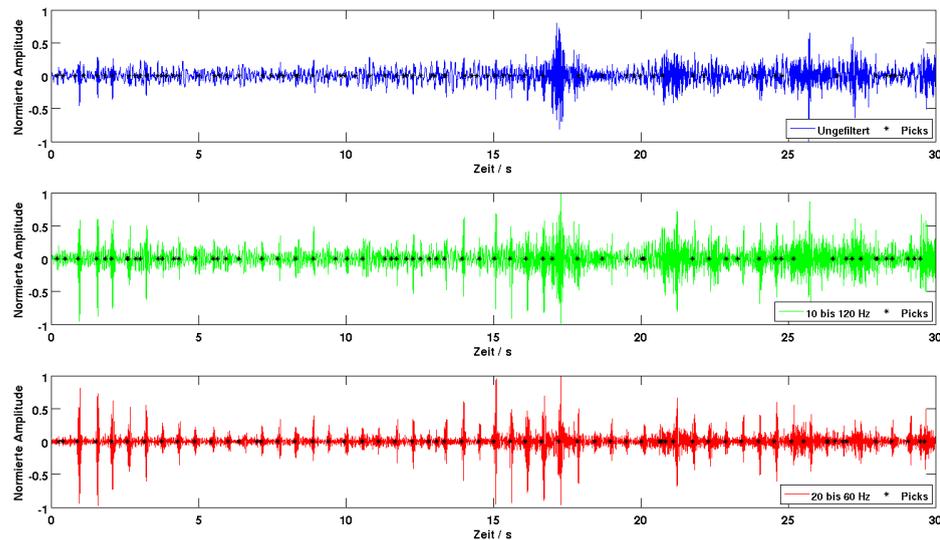


Abbildung 5.15: Vergleich der Funktionsweise des sta/lta Picker für verschieden gefilterte Zeitreihen. Oben ist die ungefilterte, in der Mitte die breitbandig und unten die schmalbandig gefilterte Zeitreihe von Tritt 6 Geophon 3 dargestellt. Die Anzahl der Picks variiert stark. Die Messung Tritt 6 waren regelmäßige Schritte. So erwartet man, dass der sta/lta Picker die Picks in regelmäßigen Zeitabständen setzt. Die zuverlässigsten Ergebnisse liefert der schmalbandige Filter (rote Kurve). Die Picks sind am regelmäßigsten gesetzt. Auch die Signale der Schritte sind in der schmalbandigen Zeitreihe am besten zu sehen, so dass der Picker dort auch am zuverlässigsten arbeitet.

Pick 0,325 Sekunden). Damit ist gewährleistet, dass das Signal, egal welches Geophon als Triggergeophon ausgewählt wurde, bei der gewählten Geometrie auf jeden Fall im Fenster enthalten ist. Auch wenn das Triggergeophon einen großen Offset hat, so ist durch die 0,175 Sekunden, die das Fenster vor dem Pick lang ist, sichergestellt, dass auch der Anfang eines Signales von einem quellnahen Geophon enthalten ist. Das Fenster um den Pick hat jetzt eine feste Start- und Endzeit.

3. Es werden Fenster in den Zeitreihen aller anderen Geophone mit der vorher ermittelten Start- und Endzeit ausgeschnitten. Jedes Fenster wird mit jedem anderen Fenster kreuzkorreliert.
4. Die Lage der Maxima in den Kreuzkorrelationsfunktionen werden bestimmt. Daraus können die absoluten Laufzeitdifferenzen des Signals für alle möglichen Geophonpaare berechnet werden.

Es soll kurz geklärt werden, warum nur Maxima und keine Minima der Kreuzkorrelationsfunktionen (KKF) bestimmt werden. In Abbildung 4.3 sind die beiden Funktionen, die miteinander kreuzkorreliert werden kohärent. Dies erzeugt ein Maximum in der KKF. Würde eine Funktion an der x-Achse gespiegelt werden, so würde es in der KKF ein Minimum ergeben. Diese Spiegelung ist mit einer Phasenverschiebung bei einem periodischen Signal von 180° bzw. einer halben Wellenlänge gleichzusetzen. In den KKF erwartet man daher rechts und links vom eigentlichen Maximum noch zwei ähnlich große Minima. Diese

entstehen, sobald eine Zeitreihe um eine halbe Wellenlänge weiter geschoben worden ist. Dort trifft auf ein Maximum ein Minimum, welches ein Minimum in der KKF erzeugt und eine falsche Laufzeitdifferenz vortäuscht.

In Abbildung 5.16 sind für die Messung Tritt 6 die absoluten Laufzeitdifferenzen für alle

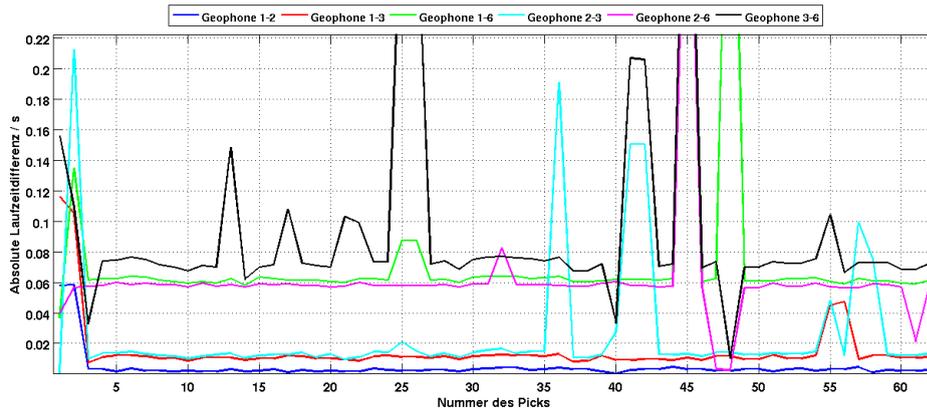


Abbildung 5.16: Laufzeitdifferenzen von sechs Geophonpaaren über die Anzahl bzw. Nummer der Picks des sta/Ita Picker aufgetragen. Es wurden mit Hilfe der Kreuzkorrelation von der Messung Tritt 6 Laufzeitdifferenzen berechnet. Für Schritte auf einer gleichbleibenden Stelle erwartet man konstante Laufzeitdifferenzen.

möglichen Geophonpaare für das große Viereck (Geophone 1, 2, 3 und 6) über die Nummer des gepickten Ereignisses aufgetragen. Aus Übersichtsgründen sind nicht alle Geophonpaare und ihre Laufzeitdifferenzen geplottet. Das Triggergeophon war Geophon 2 mit 63 Picks. Dies ist in Abbildung 5.17 zu sehen. Dort ist die Zeitreihe in drei 10 Sekunden Zeitfenster aufgeteilt und die Picks, die der Picker gesetzt hat, sind mit schwarzen Kreuzen gekennzeichnet und nummeriert. Die Zeitreihe wurde mit dem schmalen Bandpassfilter von 20 Hz bis 60 Hz gefiltert. Wie die Kreuzkorrelierte von zwei Fenstern wirklich aussieht und wie daraus die Laufzeitdifferenzen ermittelt wird, wird an einem Beispiel in Abbildung 5.18 gezeigt. Man sieht oben zwei ausgeschnittene Zeitfenster von 0,5 Sekunden Länge der Geophone 2 und 6 von Pick Nummer 8. Die Amplituden sind jeweils auf den Extremwert der gesamten Zeitreihe normiert. Unten ist die normierte Kreuzkorrelationsfunktion zu sehen. Der rote Stern gibt das Maximum der Funktion an, welches gleichzeitig die gesuchte Laufzeitdifferenz ist. Die weiter oben beschriebenen und erwarteten Minima rechts und links vom Maximum treten tatsächlich auf und sind zu ignorieren.

Zur Erinnerung sei noch einmal erwähnt, dass die Messung Tritt 6 eine Messung war, bei der an einer Stelle mehrere Schritte abgegeben wurden (Abbildung 5.9). Man erwartet also gleichbleibende Laufzeitdifferenzen für jedes Geophonpaar, da sich die Position der Quelle nicht ändert. Für eine bewegte Quelle, wie es bei den Messungen Pfad der Fall ist, werden Geraden mit einer gewissen Steigung erwartet. Die konstanten Laufzeitdifferenzen sind in Beispiel Tritt 6 auch für Picks zwischen 4 und 39, bis auf ein paar Ausreißer, gegeben. Wie man in Abbildung 5.17 sehen kann, sind die ersten drei Picks falsch gesetzt. Dort ergibt die Kreuzkorrelation auch keine einheitlichen Laufzeitdifferenzen. Nach Pick Nummer 40 gibt es zwischen den konstanten Bereichen immer wieder eine starke Streuung der Laufzeitdif-

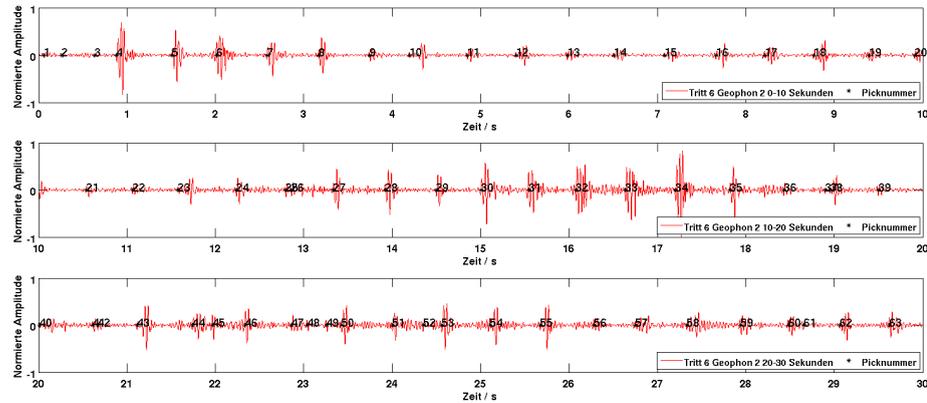


Abbildung 5.17: Zeitreihe von Geophon 2 der Messung Tritt 6 aufgeteilt in drei zehn Sekunden Abschnitten mit Picks des sta/lta Picker. Die Picks sind durchnummeriert. Wie man sieht, sind zum Beispiel die ersten drei Picks falsch gesetzt worden. Es ist kein Signal erkennbar. In der unteren Abbildung von 20 Sekunden bis 30 Sekunden spiegeln mehrere Picks, zum Beispiel Nummer 41 und 42, nur ein Signal wieder. Diese nicht korrekt gepickten Ereignisse haben eine nicht konstante Laufzeitdifferenz für manche Geophonpaare in Abbildung 5.16 zur Folge.

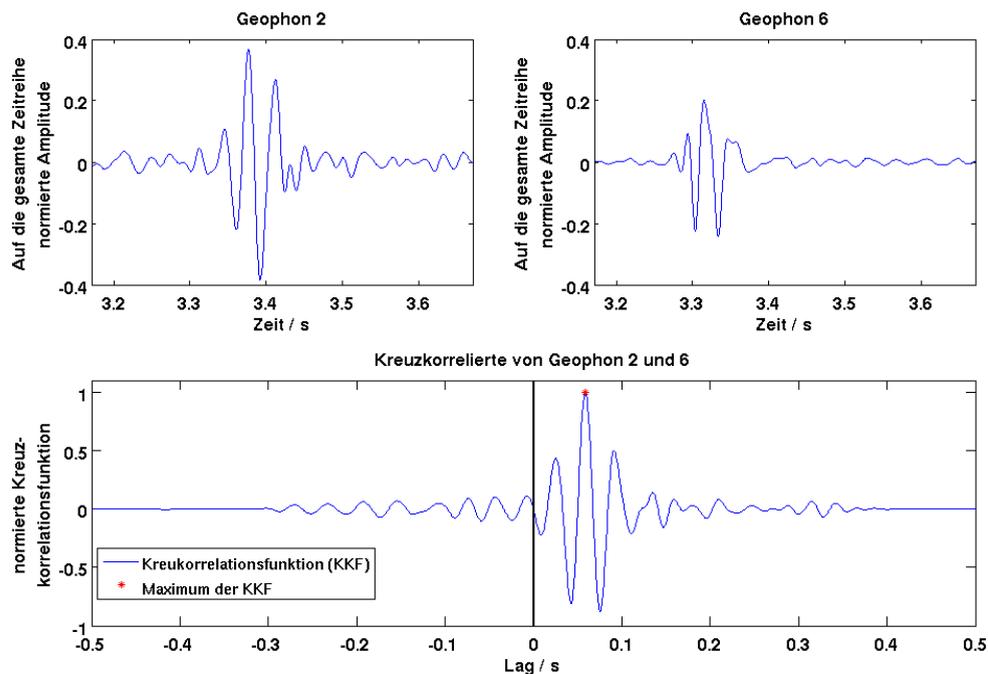


Abbildung 5.18: Oben: Ausschnitt aus den Zeitreihen um Pick 8 der Messung Tritt 6 von Geophon 2 und Geophon 6. Die Amplituden sind jeweils auf die gesamte Zeitreihe normiert. Geophon 6 hat einen kleineren Offset als Geophon 2. Das Signal kommt demnach früher an. Unten: Die Kreuzkorrelationsfunktion (KKF) von Geophon 2 und Geophon 6. Das Maximum (roter Stern) wurde bei 0.0585 Sekunden bestimmt. Dies ist die gesuchte Laufzeitdifferenz, die das Signal bei Geophon 2 später ankommt als bei Geophon 6. Die beiden Minima werden, wie im Text beschrieben, nicht berücksichtigt.

ferenzen. Vergleicht man die Bereiche mit den Picks in Abbildung 5.17, erkennt man eine große Korrelation. So zum Beispiel bei Pick Nummer 41 und 42 oder zwischen Nummer 47 und 50. Dort sind die Picks sehr eng gesetzt und spiegeln kein ankommendes Signal wieder. Die Maxima bei Pick Nummer 25, 45 und 48 sind aufgrund der Übersicht abgeschnitten. Sehr interessant ist das Geophonpaar 1-2. Dieses weist praktisch keine Laufzeitdifferenz auf, auch wenn sie räumlich knappe neun Meter voneinander entfernt sind. Betrachtet man jedoch die Mittelsenkrechte von beiden Positionen, so liegt die Position von Tritt 6 sehr nahe bei dieser. Daher kommen die Signale, trotz der großen Entfernung, ungefähr gleichzeitig an.

Im nächsten Kapitel wird aus den nun erhaltenen Laufzeitdifferenzen mit Hilfe eines Grid Search Algorithmus eine Lokalisierung durchgeführt.

5.4.3.4 Grid Search

Die Theorie des Grid Search Algorithmus wird im Grundlagenteil in Kapitel 4.4 beschrieben. Als erstes wird die Untergrundgeschwindigkeit angepasst. Dabei wird von der P-Wellengeschwindigkeit für das Untergrundmodell in Abbildung 5.8 ausgegangen. Weiter soll, wie bereits im Kapitel 5.4.2 genannt, ein Test durchgeführt werden, in dem eine unterschiedliche Anzahl von Geophonen benutzt wird. Konkret bei dieser Messung einmal das kleine Viereck und einmal das große (Abbildung 5.9). Als letztes wird ein Schwellenwert (Kapitel 4.4.6) für die Größe des Minimums des Residuums definiert.

Es wurde ein Gitter mit einer Gitterkonstanten von 10 cm pro Gitterpunkt über das Messgebiet gespannt. Bei einem Messgebiet von 30 x 30 Metern ergibt sich somit ein Netz von 300 x 300 Gitterpunkten. Die Abmessung der Quelle, ein Fuß, ist circa 30 cm, so dass diese mit Sicherheit größer als die Diskretisierung ist. Damit ist eine ausreichende Diskretisierung sichergestellt. Eine kleinere Diskretisierung hätte einen größeren Rechenaufwand zur Folge. Bei einem Gitter von 300 x 300 Gitterpunkten ist dieser verhältnismäßig gering, sodass auf Lokalisierungsergebnisse nicht lange gewartet werden muss und diese dann auch direkt betrachtet werden konnten.

Geschwindigkeitstest

An diesem Standort ist gleichzeitig zu meiner Messung eine Refraktionsseismikmessung durchgeführt worden. Dadurch ist die P-Wellengeschwindigkeit bekannt. Durch picken des Ersteinsatzes hat er ein Schicht über Halbraum Modell bestimmt (Stelzer, 2010). Die Schicht hat eine Mächtigkeit von sechs Metern bei einer Geschwindigkeit für die P-Welle von circa $300 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, der darunterliegende Halbraum hat eine P-Wellengeschwindigkeit von circa $1870 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Da die betrachteten und kreuzkorrelierten Signale Oberflächenwellen und keine P-Wellen sind (Kapitel 3), darf man die P-Wellengeschwindigkeit nicht einfach als Untergrundgeschwindigkeit für den Grid Search Algorithmus annehmen. Sie soll aber später für einen theoretischen Ansatz zur Bestimmung der Oberflächenwellengeschwindigkeit als Ausgangspunkt dienen.

Da nicht bei jeder Messung eine Refraktionsseismik durchgeführt werden konnte, wird als erstes die Geschwindigkeit mit Hilfe des Grid Search Algorithmus und der bekannten Position eines Schrittes bestimmt. Als Quelle dient Tritt 6. Diese Messung befand sich, wie

in Abbildung 5.9 zu sehen, an der Position $x = 17 \text{ m} / y = 22 \text{ m}$. Im Folgenden wird als erstes die x-Position und dann die y-Position angegeben. Es wird nur Pick Nummer 8 betrachtet. Für diesen Pick ist in Abbildung 5.17 ein deutlicher Einsatz sichtbar und auch Abbildung 5.16 zeigt, dass die Laufzeitdifferenzen um diesen Pick sehr stabil sind. Die Geschwindigkeit wird von $100 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ bis $500 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ in $100 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ Schritten variiert. Anschließend wird eine feinere Unterteilung gewählt um die Geschwindigkeit genauer anzupassen.

In Abbildung 5.19 sind die Lokalisierungsergebnisse für vier Geschwindigkeiten dargestellt. Die blauen Dreiecke sind die Positionen der Geophone, das rote Kreuz die lokalisierte Position für die jeweilige Geschwindigkeit und der rote Kreis die mit einem Maßband eingemessene Position der Messung Tritt 6. Die Farbskalen auf der rechten Seite sind für alle vier Abbildungen gleich. Durch die Refraktionsseismik ergab sich eine maximale Geschwindigkeit von circa $300 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ für die obersten sechs Meter. Wie man in Abbildung 5.19(c) erkennen kann, passt diese nicht mit der Position der Messung Tritt 6 (roter Kreis) überein. In Abbildung 5.19(a) und 5.19(b) ist das Lokalisierungsergebnis für $100 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ und $200 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ dargestellt. Wie man sieht, überspringt der lokalisierte Punkt die Position von Tritt 6, d.h. die gesuchte Geschwindigkeit muss dazwischen liegen. Man erkennt auch schon in dieser Abbildung, dass das Minimum des Residuums umso kleiner wird, desto näher man sich der Position Tritt 6 nähert. So hat das Minimum des Residuums für $500 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ (Abbildung 5.19(d)) einen Wert von über 0,8 Sekunden, wo hingegen die Minima für die anderen Geschwindigkeiten kleiner sind.

Es wird ein weiterer Geschwindigkeitstest durchgeführt. Diesmal wird die Geschwindigkeit von $100 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ bis $200 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ in $5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ Schritten verändert. Die Abbildung 5.20 zeigt wieder vier ausgewählte Geschwindigkeiten ($120 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, $155 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, $165 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, $180 \frac{\text{m}}{\text{s}}$). Die Abbildungen 5.20(a) und 5.20(b) zeigen die Ergebnisse für eine Geschwindigkeit von $120 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ und $150 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Die Quelle wird etwas zu tief lokalisiert, der Wert vom Minimum des Residuums nimmt jedoch schon in Richtung der größeren Geschwindigkeit ab. Für eine Geschwindigkeit von $165 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ (Abbildung 5.20(c)) erreicht das Minimum des Residuums seinen kleinsten Wert. Die Koordinaten des Minimums mit $17,4 \text{ m} / 22,1 \text{ m}$ passen auch sehr gut mit der eingemessenen Position der Messung Tritt 6 ($17 \text{ m} / 22 \text{ m}$) überein. Für eine Geschwindigkeit von $180 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ wird das Minimum wieder größer und entfernt sich von der eigentlichen Quelle.

Das Ergebnis mit einer Geschwindigkeit von $165 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ kann auch noch durch die Refraktionsseismik und das daraus abgeleitete Untergrundmodell bestätigt werden. Im Kapitel 3 sind die verschiedenen Wellentypen erklärt. Ein großer Anteil des Wellenfeldes, welches kreuzkorreliert wird, besteht aus Oberflächenwellen. Diese haben die größten Amplituden. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Oberflächenwelle lässt sich wie folgt aus der P-Wellengeschwindigkeit abschätzen. Das Verhältnis der Geschwindigkeit von P- zu S-Welle ist $\sqrt{3}$ (Gleichung (3.3)). Multipliziert man die S-Wellengeschwindigkeit nun mit 0,92 (Gleichung (3.4)), so erhält man die Oberflächenwellengeschwindigkeit der Fundamentalmode der Rayleighwelle. Mit einer P-Wellengeschwindigkeit von $304 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ für die ersten sechs Meter, berechnet sich dann die Oberflächenwellengeschwindigkeit zu $161 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Diese stimmt mit der aus dem Grid Search Algorithmus bestimmten Geschwindigkeit überein. Man sollte beachten, dass die Oberflächenwellen in einem nicht homogenen Medium dispersiv sind. Dies ist auch in Abbildung 5.8 beobachtbar. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen

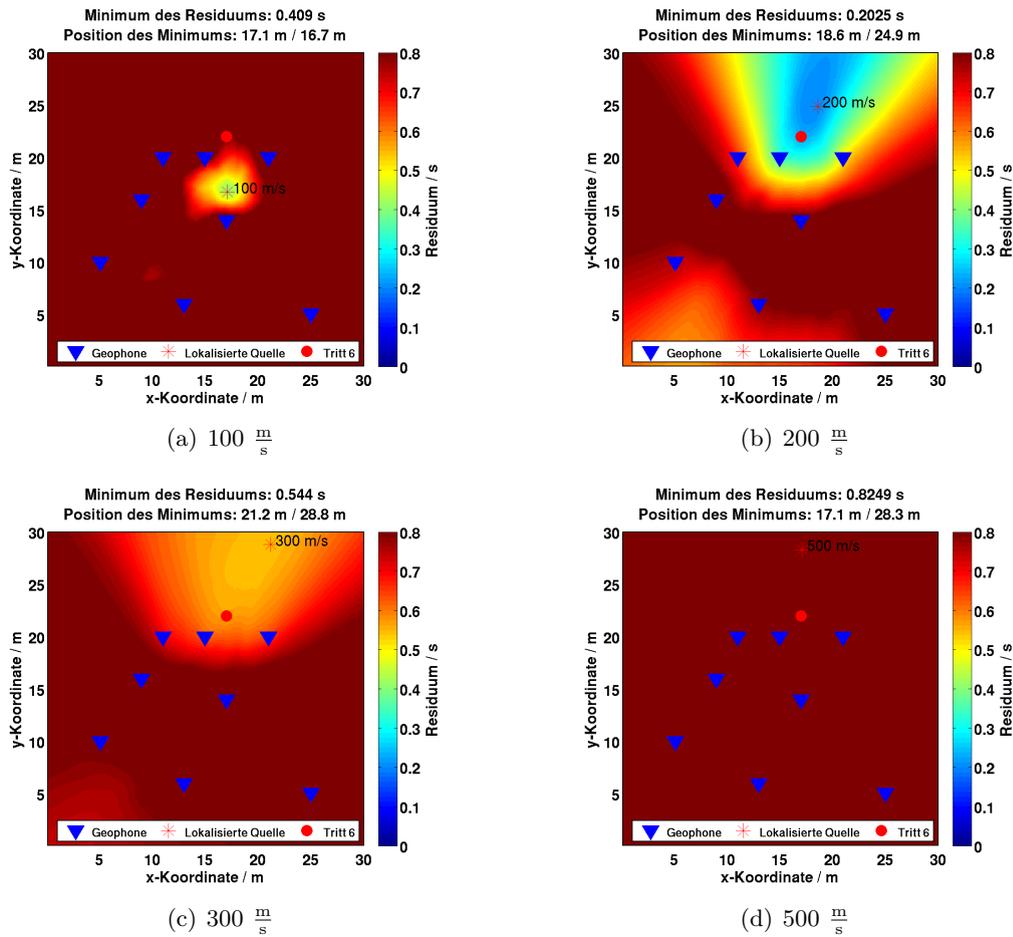


Abbildung 5.19: In den Abbildungen (a) bis (d) sind die Lokalisierungsergebnisse für vier verschiedene Geschwindigkeiten dargestellt. Die Farbskalen auf der rechten Seite sind für alle vier Abbildungen gleich. Der rote Punkt zeigt die Position der Quelle (Tritt 6), die blauen Dreiecke die Geophone und der rote Stern die lokalisierte Position von Pick 8. Von (a) nach (b) überspringt die lokalisierte Quelle die Position von Tritt 6. Erhöht man die Geschwindigkeit weiter wie in (c) und (d), so entfernt sich die lokalisierte Quelle noch weiter bzw. der Wert des Minimums des Residuums steigt stark an. In Abbildung 5.20 ist die Lokalisierung nochmals mit Geschwindigkeiten von $100 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ bis $200 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ durchgeführt.

mit der größten Amplitude (Oberflächenwellen) ist Abhängig vom Offset. Im Allgemeinen wird die ermittelte Geschwindigkeit eine Art Mittelwert von fernen und nahen Offsetbereichen sein.

Eine weitere Möglichkeit die Untergrundgeschwindigkeit zu bestimmen, wird nun vorgestellt. Geht man wieder davon aus, dass die Position der Quelle bekannt ist und diese Kugelwellen abstrahlt, so ist es möglich einen effektiven Abstand zwischen jedem Geophonpaar zu bestimmen. Der effektive Abstand ist also der radiale Abstand zwischen zwei Geophonen wenn der Mittelpunkt die Position der Quelle, sprich Tritt 6 ist. Es wird wieder die Position von Tritt 6 als gegeben betrachtet. Trägt man die bereits berechneten Kreuzkorrelationsfunktionen mit ihrem effektiven Abstand über den Lag auf, so erkennt man auf dem positiven Lag einen Moveout. Praktisch wird dies folgendermaßen durchgeführt. Man normiert die KKF auf ihr Maximum und multipliziert einen Skalierungsfaktor

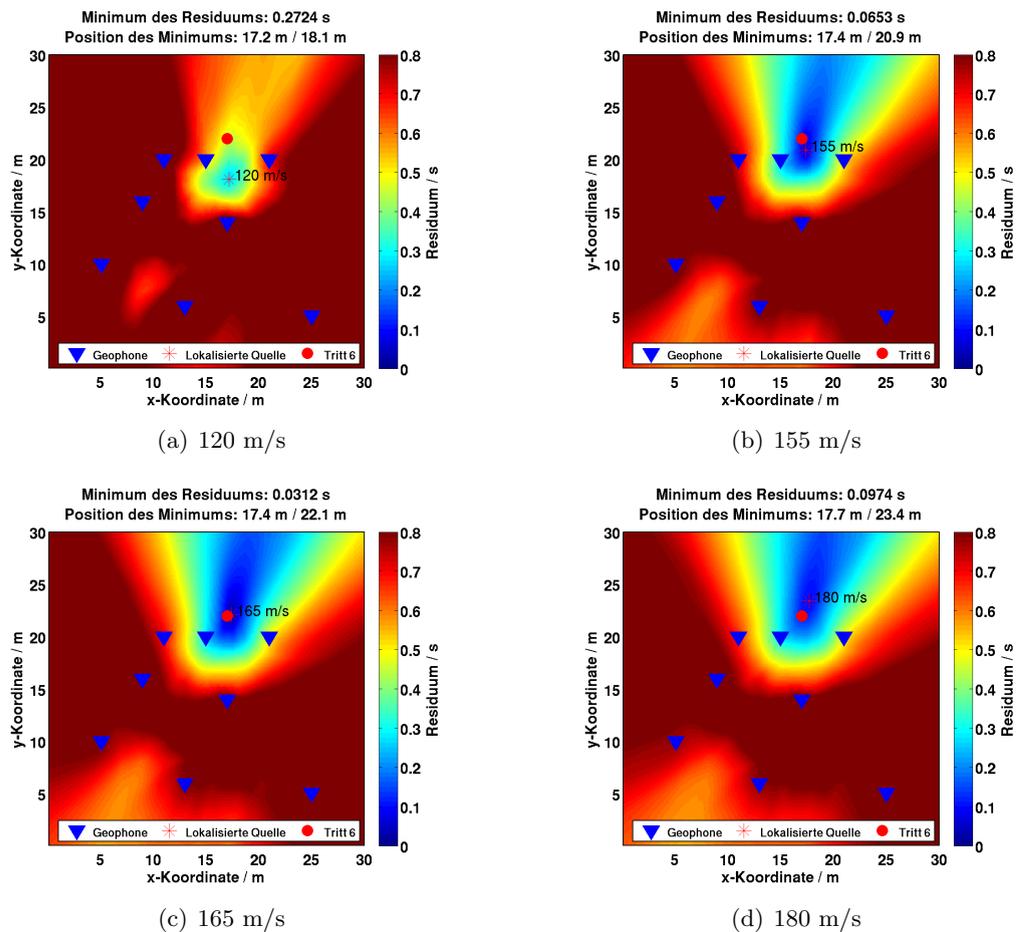


Abbildung 5.20: Diese Abbildung ist wie Abbildung 5.19 aufgebaut. In (a) und (b) sind die Geschwindigkeiten noch zu klein gewählt, die Größe des Minimums des Residuums sinkt jedoch schon. In (c) ist das Minimum vom Minimum des Residuums bei einer Geschwindigkeit von $165 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ erreicht. Die Lokalisierung (17,4 m / 22,1 m) stimmt auch sehr gut mit der eingemessenen Position der Quelle (17 m / 22 m) überein. In (d) steigt der Wert des Minimums des Residuums wieder an und die lokalisierte Position entfernt sich.

um die Amplituden besser darzustellen. In diesem Fall hat sich ein Faktor von Zwei als geeignet herausgestellt. Nun wird der dazugehörige effektive Abstand addiert. Die Maxima jeder KKF wurden bereits bestimmt um daraus Laufzeitdifferenzen zu berechnen. Verbindet man nun die Maxima der KKF durch eine lineare Regression, so gibt die Steigung die Geschwindigkeit der Welle innerhalb der Geometrie wieder. Dies ist in Abbildung 5.21 zu sehen. Es wurden die 28 möglichen Kombinationen der acht Geophone (blaue Kurven), die Maxima jeder KKF (roter Sterne) und die dazugehörige linear angepasste Gerade (rote Gerade) geplottet. Die Steigung beträgt $165,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ und stimmt mit der bereits vorher ermittelten Geschwindigkeit überein und bestätigt damit die Vorgehensweise. Der y-Achsenabschnitt von zwei Meter kommt aufgrund des Skalierungsfaktors zustande. Als nächstes soll mit der ermittelten Geschwindigkeit getestet werden, wie viele Geophone nötig sind um, eine Lokalisierung durchzuführen.

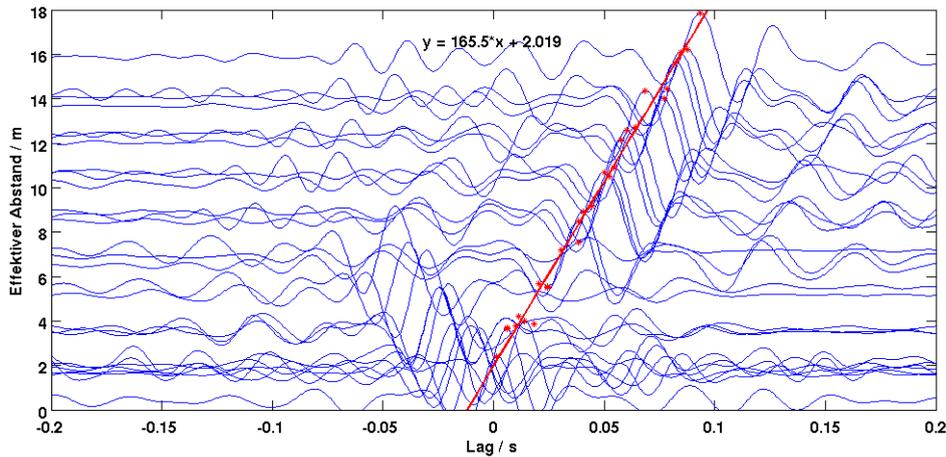


Abbildung 5.21: In der Abbildung sind die Kreuzkorrelationsfunktionen der 28 Geophonpaar mit ihrem effektiven Abstand zu Tritt 6 dargestellt. Die roten Kreuze sind die Maxima der KKF. Die rote Gerade wurde durch eine lineare Regression der Maxima berechnet. Die Steigung der Geraden gibt die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle innerhalb der Geophoneometrie wieder. Mit $165,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ stimmt die Geschwindigkeit mit der durch den Grid Search Algorithmus bestimmten Geschwindigkeit überein.

Anzahl an Geophone

Die Geometrie der Messung wurde so gewählt, dass es möglich ist, mit zwei verschiedenen großen Vierecken, bestehend jeweils aus vier Geophonen, eine Lokalisierung durchzuführen (Kapitel 5.4.2). Es soll im ersten Teil darum gehen, dass bis hierhin besprochene Datenprozessing mit allen acht Geophonen durchzuführen. Im zweiten Teil wird entweder das kleine oder das große Viereck benutzt.

Im Folgenden werden Lokalisierungsergebnisse mit allen acht Geophonen betrachtet. Es wird zu Beginn mit der mittlerweile schon bekannten Messung Tritt 6 gearbeitet. Mit dieser ist der sta/Ita Picker vorgestellt worden. Auch sind die Laufzeitdifferenzen von einigen Geophonpaaren bereits in Abbildung 5.16 dargestellt. Das Triggergeophon war Geophon 2 mit 63 Picks. Zur Erinnerung: Die Quelle war auf den Koordinaten 17 m / 22 m.

Der Grid Search Algorithmus liefert für jeden Pick eine Lokalisierung. In Abbildung 5.22 stellen die roten Sterne jeweils ein Ergebnis dar. Wie man sieht, gruppieren sich die meisten Lokalisierungsergebnisse auf einer Stelle. Der Bereich erstreckt sich auf der x-Achse von 17,2 m bis 17,6 m und auf der y-Achse von 21,7 m bis 22,4 m. Somit wurde die Stelle der Schritte richtig lokalisiert. Dennoch sind einige wenige Ausreißer zu sehen. Diese wurden bei Pick 1, 2, 45, 48 und 61 lokalisiert. Vergleicht man diese Picks mit den berechneten Laufzeitdifferenzen in Abbildung 5.16, erkennt man eine Korrelation. Bei diesen Picks weichen die dargestellten Laufzeitdifferenzen teilweise stark von ihrem konstanten Wert ab. Wie man diese Ausreißer noch eliminieren kann, wird im nächsten Abschnitt erörtert.

Die Lokalisierung findet nun mit vier Geophonen statt, einmal mit dem großen und einmal mit dem kleinen Viereck. In der Abbildung 5.23 sind beide Ergebnisse dargestellt.

In Abbildung 5.23(a) wurde mit den vier Geophonen des großen Vierecks lokalisiert. Man muss beachten, dass nun Geophon 3 als Triggergeophon benutzt worden ist, da Geophon 2

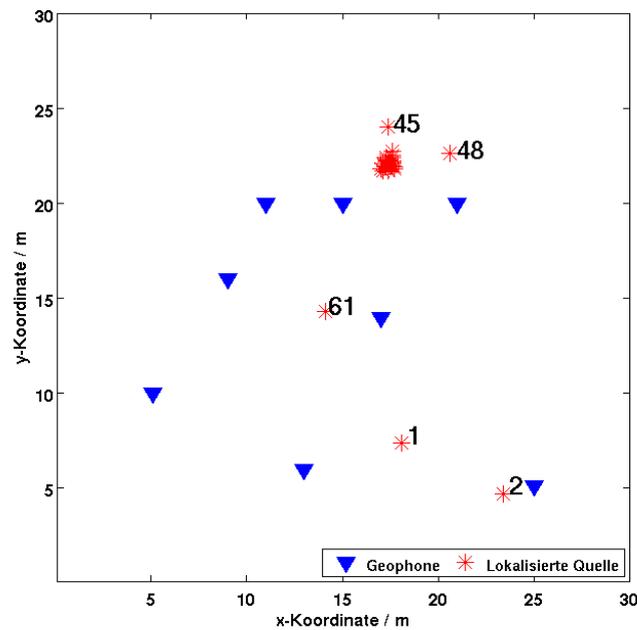


Abbildung 5.22: Das Lokalisierungsergebnis von Tritt 6 bei dem alle acht Geophone benutzt wurden. Bis auf fünf Ausreißer gruppieren sich alle anderen Sterne auf einer Stelle. Die Zahl an den Ausreißern gibt die Nummer des Picks an. Die Laufzeitdifferenzen weichen für diese Picks in Abbildung 5.16 teilweise stark von ihrem konstanten Wert ab.

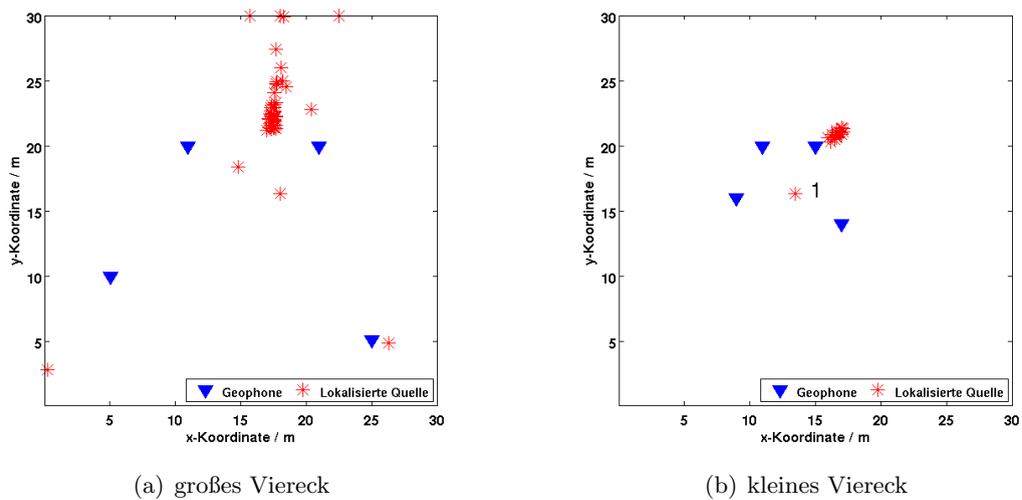


Abbildung 5.23: Die Lokalisierungsergebnisse für das große und kleine Viereck. Hierfür wurden jeweils vier Geophone zur Lokalisierung benutzt. In (a), für das große Viereck, streuen die Ergebnisse stärker. In (b), für das kleine Viereck, ergibt sich wieder eine Gruppierung an einer Stelle. Zu erwähnen ist, dass für beide Lokalisierungen jeweils ein anderes Triggergeophon benutzt wurde, da Geophon 2 nicht in den Vierecken enthalten war, so dass in (a) 60 und in (b) 55 Lokalisierungen dargestellt sind.

nicht im dem Viereck enthalten ist. Daher sind nur noch 60 Picks bzw. 60 Lokalisierungen durchgeführt worden. Es fällt die gestiegene Zahl der Ausreißern auf. Auch die Fokussierung ist nicht so gut wie bei der Lokalisierung mit allen acht Geophonen. Dennoch würde sich die Position der Schritte rekonstruieren lassen. Für das kleine Viereck (Abbildung 5.23(b)) wurde wieder ein anderes Geophon als Triggergeophon verwendet, diesmal Geophon 6. Nun sind 55 Picks gesetzt worden. Das Lokalisierungsergebnis ist jedoch sehr fokussiert. Bis auf die Lokalisierung von Pick 1 wurden alle anderen Picks sehr gruppiert gesetzt. Vergleicht man Abbildung 5.23(b) mit 5.22 stimmen beide Ergebnisse nicht exakt überein.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Position der Schritte von Messung Tritt 6 mit beiden Vierecken lokalisiert werden konnte. Für das große Viereck ergeben sich einige Ausreißer, für das kleine wurde die Position der Schritte nicht genau getroffen. Die beste Lokalisierung erhält man mit allen acht Geophonen. Mit einer geringeren Anzahl an Geophonen verkürzt sich jedoch die Rechenzeit. Auf diesen und weitere Aspekte wird im Kapitel 6, in der eine mögliche Praxisanwendung diskutiert wird, noch näher eingegangen.

Maximales Residuum

In diesem Abschnitt soll darauf eingegangen werden, wie man die nicht korrekt lokalisierten Picks in Abbildung 5.22 identifizieren kann. Normalerweise kann nicht davon ausgegangen werden, dass die Quellposition bekannt ist. Bei den selbst durchgeführten Messungen ist diese der Fall gewesen.

Mit Hilfe des Minimumwertes des Residuums ist es möglich Ausreißer zu erkennen. In Abbildung 5.22 sind insgesamt fünf Picks nicht korrekt lokalisiert worden. In Abbildung 5.24 ist für die 63 Picks jeweils der Wert des Minimums des Residuums geplottet. Für die Picks 2, 45 und 48 steigt dieser jeweils stark an. Diese drei Picks wurden falsch lokalisiert. Wie in der Theorie (Kapitel 4.4) beschrieben ist, sollte das Minimum theoretisch den Wert Null erreichen. In der Praxis ist dies nicht der Fall. Es wird deshalb nun ein Schwellenwert von 0,5 Sekunden definiert. Übersteigt das Minimum des Residuums diesen Wert, wird die Lokalisierung verworfen. Der Schwellenwert von 0,5 Sekunden war eine erste Annahme und ist aus der Abbildung 5.24 entstanden. Die Lokalisierung wird nun mit einem Schwellenwert von 0,5 Sekunden für Tritt 6 wiederholt. Wie nicht anders zu erwarten, wurden vier der fünf Ausreißer verworfen. Nur Pick 61 wurde noch falsch lokalisiert.

Bei der Lokalisierung mit dem großen Viereck wurden die meisten Ausreißer festgestellt. Wiederholt man diese Messung mit dem Schwellenwert von 0,5 Sekunden, werden die Ausreißer nicht verworfen. Betrachtet man das Minimum des Residuums für das große Viereck fällt auf, dass dieses im Allgemeinen viel kleiner ist als das Minimum des Residuums für alle acht Geophone. Dies ist auch nicht verwunderlich. Für die Berechnung des Residuums werden die einzelnen Residuen von allen Geophonpaaren aufsummiert. Der Wert hängt folglich von der Anzahl der Empfänger und von der Geometrie ab. Es ist daher unerlässlich, den Schwellenwert bei jeder Messung mit geänderter Geometrie oder verschiedener Anzahl an Geophonen aufs Neue zu definieren.

Im folgenden Kapitel werden einige Messungen stellvertretend mit den in diesem Kapitel verwendeten Methoden, ausgewertet. Der Augenmerk wird auf die Messungen Pfad gelegt,

da dieser Fall auch in der Realität am häufigsten vorkommen wird.

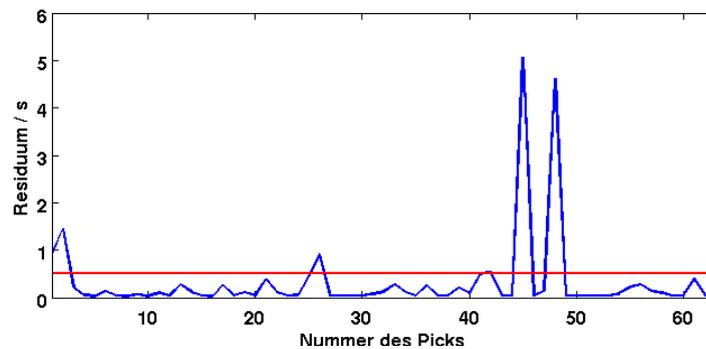


Abbildung 5.24: In dieser Abbildung ist der Wert des Minimums des Residuums für jeden Pick eingezeichnet. Man erkennt eine sehr große Korrelation zwischen dem Wert des Minimums und den Ausreißern bei der Lokalisierung. Die rote Gerade bei 0,5 Sekunden gibt den Schwellenwert für die Messung Tritt 6 an. Ist das Minimum größer als dieser Wert, wird die Lokalisierung verworfen.

5.4.4 Ergebnisse der Messungen

Es werden nun exemplarisch einige Lokalisierungsergebnisse präsentiert. Grundsätzlich wird die Zeitreihe der Vertikalkomponente für alle acht Geophone mit einem Bandpassfilter von 20 Hz bis 60 Hz gefiltert. Die weiteren Auswerteschritte sind in den Kapiteln 4.3 und 4.4 nachzulesen.

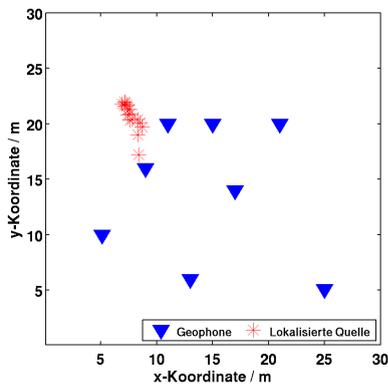
Tritte

Als erstes werden die Messungen Tritt betrachtet. Dafür wurden mehrere Schritte 30 Sekunden lang auf einer Stelle abgegeben. Davon ist die Messung Tritt 6 bereits beispielhaft im vorherigen Kapitel verwendet worden um die Auswerteschritte zu beschreiben. Als erstes wird die Messung Tritt 1 betrachtet. Die Koordinaten der Schritte waren $x = 4 \text{ m} / y = 15 \text{ m}$. Der einzige Wert, der bei der Auswertung variiert wurde, war der Schwellenwert. Dieser wurde auf 0,5 Sekunden, 1 Sekunde, 2 Sekunden und so eingestellt, dass jeder Pick zugelassen wird. In Abbildung 5.25 sind die Ergebnisse der vier verschiedenen Schwellenwerte dargestellt. Insgesamt wurden 66 Picks gesetzt, das Triggergeophon war in dieser Messung Geophon 3. In Abbildung 5.25(a) sind bei einem Schwellenwert von 0,5 Sekunden nur 24 der 66, in Abbildung 5.25(b) bei einem Schwellenwert von 1,0 Sekunden 38 der 66, in Abbildung 5.25(c) bei einem Schwellenwert von 2,0 Sekunden 36 und in Abbildung 5.25(d) bei keinem Schwellenwert natürlich alle 66 Picks lokalisiert worden.

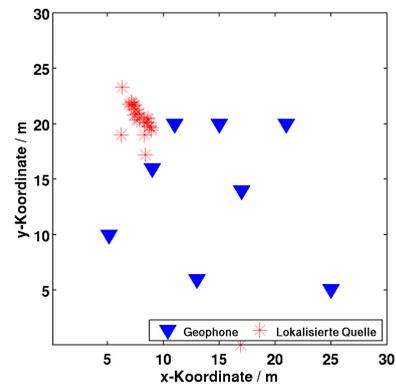
Die Position der Schritte ist bei allen Schwellenwerten erkennbar. Aufgrund der Lage des Tritts außerhalb der Anordnung ergibt sich ein leichtes Verschmieren der Lokalisierung. Die Zahl der Ausreißer nimmt mit größerem Schwellenwert deutlich zu. Für die weitere Auswertung der Messungen Tritte wird ein Schwellenwert von 1,0 Sekunden benutzt, da dort über die Hälfte der Picks richtig lokalisiert wurden und nur minimale Ausreißer zu erkennen sind. Für die Messungen Tritt 2 bis 5 sind die Lokalisierungsergebnisse bei einem Schwellenwert von 1,0 Sekunden in Abbildung 5.26 zu sehen.

Vergleicht man die lokalisierten Stellen der Tritte mit der Übersichtskarte in Abbildung 5.9, stellt man fest, dass die Positionen von allen Messungen sehr gut bestimmt wurden. Es wurden immer über 50 Picks benutzt, d.h. nur wenige Picks wurden aufgrund des Überschreitens des Schwellenwertes von 1,0 Sekunden verworfen. Die angepasste Geschwindigkeit (Kapitel 5.4.3.4) von $165 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ wurde richtig bestimmt. Die Fokussierung der lokalisierten Quellen ist sehr gut. Das liegt auch an der Position der Tritte innerhalb der Geometrie. Dort lässt sich die Quelle sehr viel genauer fokussieren als außerhalb (Abbildung 5.25(a)). Dies wird bereits im Kapitel 4.4.4 beschrieben. Insgesamt sind in den vier Abbildungen (a) bis (d) nur sehr wenige Ausreißer enthalten.

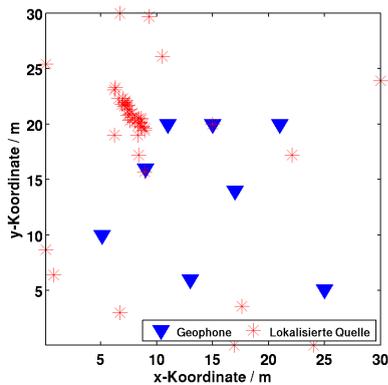
Da es sich bei den Messungen Tritt um Schritte auf einer gleichbleibenden Position handelt und sich bei jedem Schritt die Messung wiederholt, ist die Messung geeignet um eine Fehlerbetrachtung durchzuführen. Es wird als erstes der Mittelwert der Lokalisierungsergebnisse und anschließend die Standardabweichung berechnet. Das Ergebnis ist in Tabelle



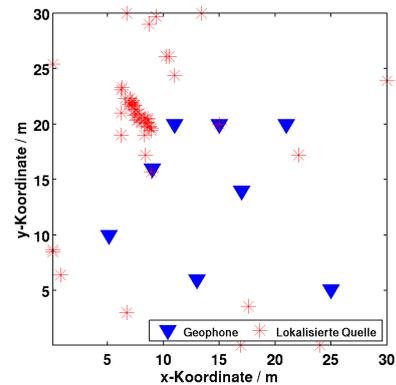
(a) Schwellenwert bei 0,5 Sekunden



(b) Schwellenwert bei 1,0 Sekunde

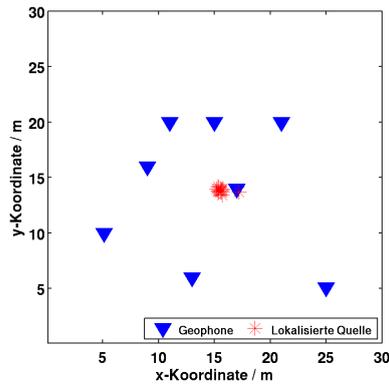


(c) Schwellenwert bei 2,0 Sekunden

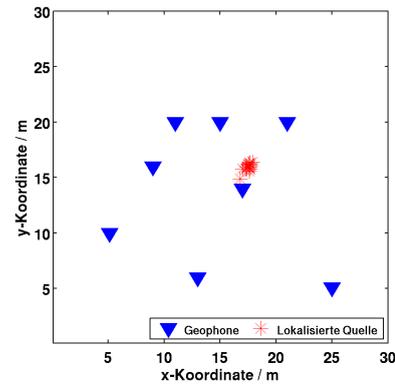


(d) Kein Schwellenwert

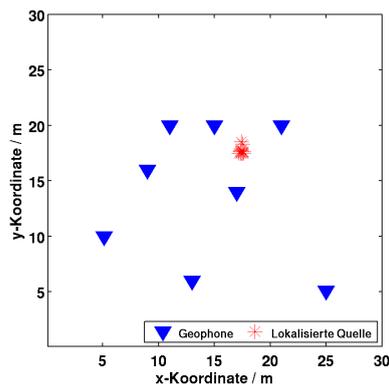
Abbildung 5.25: Lokalisierungsergebnisse für verschiedene Schwellenwerte für die Messung Tritt 1. Für (a) bis (c) variiert der Schwellenwert ab wann eine Lokalisierung verworfen werden soll von 0,5 Sekunden über 1,0 Sekunden bis 2,0 Sekunden. In (d) wurden alle Lokalisierungen zugelassen. Einerseits nimmt die Zahl der Ausreißer mit größer werdenden Schwellenwert zu, andererseits werden bei einem zu klein gewählten Schwellenwert viele Lokalisierungen verworfen. Für die Messungen Tritt wird ein Schwellenwert von 1,0 Sekunden gewählt.



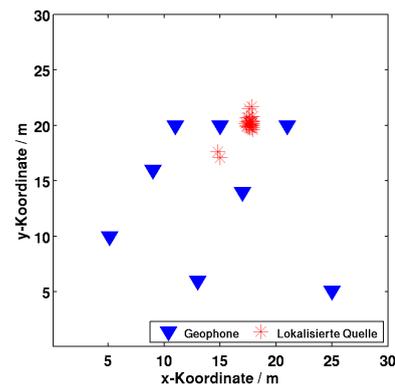
(a) Messung Tritt 2



(b) Messung Tritt 3



(c) Messung Tritt 4



(d) Messung Tritt 5

Abbildung 5.26: In den Abbildungen (a) bis (d) sind die Lokalisierungsergebnisse für die Messungen Tritt 2 bis Tritt 5 dargestellt. Die Positionen stimmen mit den in der Übersichtskarte (Abbildung 5.9) überein. Als Untergrundgeschwindigkeit wurden die vorher bestimmten $165 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ benutzt. Als Schwellenwert für das Residuum wurde 1,0 Sekunden gewählt.

5.1 zusammengefasst.

Die Standardabweichung von Tritt 5 ist im Gegensatz zu der Standardabweichung der Messungen Tritt 2 bis Tritt 4 recht groß. Betrachtet man nochmal Abbildung 5.26(d), werden die Gründe für die hohe Standardabweichung die beiden Ausreißer links unterhalb des eigentlichen Tritts sein. Die Mittelwerte der vier Messungen bilden mindestens 50 Einzelwerte. Diese haben eine maximale Abweichung von 0,6 Meter, zu den mit einem Maßband eingemessenen, Positionen im Messgebiet. Für die eingemessenen Positionen wird ein Fehler von $\pm 0,5$ Meter angenommen. Eine genaueres Einmessen ist aufgrund der äußeren Gegebenheiten nicht realisierbar. Somit liegen die Schwankungen der Lokalisierungsergebnisse innerhalb des Messfehlers der tatsächlichen Schrittposition.

Für die Messung Tritt 4 wurde nochmals eine Lokalisierung mit veränderter Diskretisierung durchgeführt. Es wurde mit dem Faktor 5 multipliziert und dividiert, so dass man Diskretisierungen von 50 cm und 2 cm pro Gitterpunkt erhält. Die Mittelwerte und die Standardabweichungen sind in Tabelle 5.2 vergleichend mit der eingemessenen Position und dem Ergebnis bei einer Diskretisierung von 10 cm pro Gitterpunkt dargestellt. Die

	Eingemessene Position $\pm 0,5$ / m	Mittelwert \pm Standardabweichung / m
Tritt 2	$x = 15,0$ $y = 14,0$	$15,5 \pm 0,3$ $13,8 \pm 0,1$
Tritt 3	$x = 17,0$ $y = 16,0$	$17,5 \pm 0,2$ $16,0 \pm 0,2$
Tritt 4	$x = 17,0$ $y = 18,0$	$17,4 \pm 0,1$ $17,7 \pm 0,2$
Tritt 5	$x = 17,0$ $y = 20,0$	$17,6 \pm 0,6$ $20,1 \pm 0,7$

Tabelle 5.1: Für die Messungen Tritt 2 bis Tritt 5 sind die eingemessene x- und y-Koordinate sowie der Mittelwert und die Standardabweichung für die Lokalisierungsergebnisse dargestellt. Aufgrund der Gitterdiskretisierung von 10 cm sind die Werte auf die erste Nachkommastelle gerundet. Die eingemessenen Positionen sind mit einem Maßband im Gelände bestimmt und damit mindestens auch mit einem Fehler von $\pm 0,5$ Meter behaftet.

Ergebnisse der kleineren Diskretisierung sind auf 2 cm, die der größeren Diskretisierung auf 50 cm genau gerundet.

Eine kleine Diskretisierung von 2 cm pro Gitterpunkt liefert dasselbe Ergebnis wie die

	Eingemessene Position $\pm 0,5$ / m	Diskretisierung 50 cm pro Gitterpunkt Mittelw. \pm Stdabw. / m	Diskretisierung 10 cm pro Gitterpunkt Mittelw. \pm Stdabw. / m	Diskretisierung 2 cm pro Gitterpunkt Mittelw. \pm Stdabw. / m
Tritt 4	$x = 17,0$ $y = 18,0$	$17,0 \pm 0,5$ $18,0 \pm 0,5$	$17,4 \pm 0,1$ $17,7 \pm 0,2$	$17,42 \pm 0,12$ $17,66 \pm 0,24$

Tabelle 5.2: Mittelwert und Standardabweichung der Messung Tritt 4 mit verschiedenen Diskretisierungen. Die Werte sind auf die jeweilige Diskretisierung gerundet. Für eine Diskretisierung von 50 cm pro Gitterpunkt stimmt die eingemessene und lokalisierte Position überein. Die Standardabweichung ist jedoch so groß wie die Diskretisierung selbst. D.h. die Position kann genauer bestimmt werden. Für eine Diskretisierung von 2 cm pro Gitterpunkt erhält man eine kleinere Standardabweichung, die ein vielfaches der Diskretisierung ist. Durch runden auf die erste Nachkommastelle erhält man dasselbe Ergebnis wie bei einer Diskretisierung von 10 cm pro Gitterpunkt.

größere Diskretisierung von 10 cm pro Gitterpunkt. Durch Runden der Ergebnisse in der letzten Spalte, kommt man auf die gleichen Werte wie in der Spalte Mitte rechts. Vergrößert man die Diskretisierung auf 50 cm pro Gitterpunkt, so vergrößern sich auch die Standardabweichung auf 50 cm. In diesem Fall wurde die Standardabweichung nicht abgerundet. Die Quelle wurde so zwar genau an ihrer eingemessenen Position lokalisiert, dies wäre jedoch auch der Fall gewesen, wenn man die Lokalisierungsergebnisse mit einer Diskretisierung von 2 cm und 10 cm pro Gitterpunkt auf 50 cm genau gerundet hätte.

Die weiteren Berechnung werden alle mit einer Diskretisierung von 10 cm pro Gitterpunkt berechnet. Dadurch ist eine Vergleichbarkeit mit den anderen Ergebnisse der Messung

„Messe“ gewährleistet. Die Rechenzeit macht bei solch einer Diskretisierung keine Probleme. Ebenso sprechen die Werte der Standardabweichung dafür. Bei einer größeren Diskretisierung ist der Fehler so groß wie die Diskretisierung selbst. Für die feine Diskretisierung könnte sowohl auf- und abgerundet werden und ist ein Vielfaches der Diskretisierung. Welche Diskretisierung man bei einer möglichen Praxisanwendung benötigt, ist im Kapitel 6 diskutiert.

Pfade

In der Realität erwartet man nicht mehrere Schritte auf einer Stelle. Es ist Realitätsnäher von Pfaden auszugehen. Auf diese Messungen wird im Folgenden eingegangen.

In der Abbildung 5.9 sind die Messungen Pfad 1_1 bis 4_4 eingezeichnet. Dabei bezeichnet die erste Zahl den Verlauf des Weges, die zweite die Richtung. Es wird jeweils eine Richtung ausgewertet (immer Messung -1). Die zweite Messung in die andere Richtung erbrachte bei allen Pfaden ein vergleichbares Ergebnis. Die Messung Pfad 5 die nicht in die Übersichtskarte eingezeichnet ist, war eine Art willkürliches Laufen. Die Testperson ist keinen vorgegebenen Weg abgeschritten, sondern willkürlich durch die Geometrie gelaufen. Alle Pfade wurden mit einem natürlichen Gang abgelaufen, d.h. es wurde nicht extra stark oder schwach bzw. schnell oder langsam gelaufen. In Abbildung 5.27 sind die Ergebnisse der Messungen Pfad dargestellt.

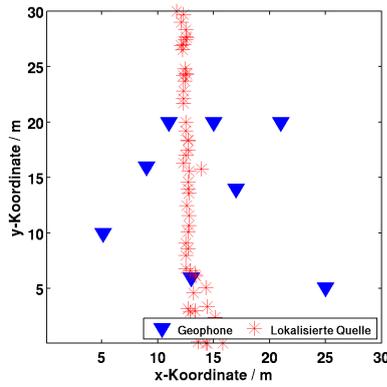
Die Wege der Messungen Pfade lassen sich rekonstruieren. Ob der Pfad 3_1 in Abbildung 5.27(c) leicht schräg abgelaufen worden ist, lässt sich im Nachhinein nicht mehr feststellen, da beim Abläufen die Richtung nur grob angepeilt wurde. So ist nicht auszuschließen, dass die Testperson den Pfad wirklich schräg abgelaufen ist. In den Abbildungen (a) bis (d) sind wenige Ausreißer zu erkennen. Der Schwellenwert von 1,0 Sekunden hat sich für diese Geometrie bewährt. Es ist zu erwähnen, dass einige Schritte am Rand lokalisiert worden sind. Dies kommt zustande, wenn die Quelle außerhalb der berechneten Fläche liegt (Kapitel 5.5.4).

Pfad_5 wurde ebenfalls erfolgreich ausgewertet und lokalisiert. Es wurde vor allem im oberen Bereich der Geometrie gelaufen. Der Weg kreuzt sich oft. Daher ist es nicht sinnvoll eine Abbildung mit allen lokalisierten Schritten darzustellen, da man den Weg nicht erkennt. Man würde lediglich eine Ansammlung von lokalisierten Quellen im oberen Bereich sehen und der Verlauf des Weges wäre nicht nachvollziehbar. Sieht man sich jedoch die Lokalisierung Pick für Pick an, so lässt sich der Weg rekonstruieren.

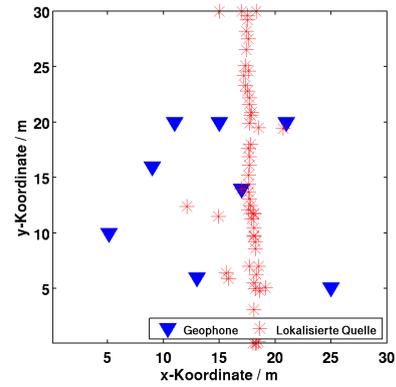
Für die Messungen Pfade lassen sich keine Mittelwerte oder Standardabweichungen berechnen, da jeder Schritt an einer anderen Stelle war und es somit keine Messreihen im Sinne von Wiederholungsmessungen waren.

5.4.5 Zusammenfassung und Diskussion

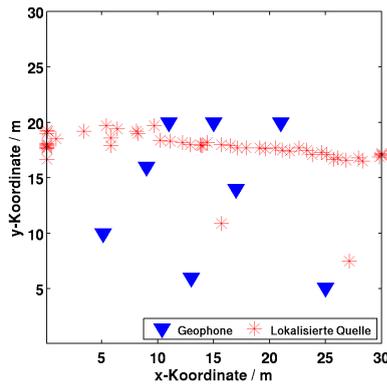
Für die Messung „Messe“ wurde eine Geometrie aus acht 3C-Geophonen gewählt, die man in einem kleinen und einem großen Viereck aufspalten kann. Es wurden zwei Arten von Messungen vorgenommen: Schritte auf einer gleichbleibenden Stelle (Messung Tritte) und das Abläufen von festgelegten Wegen (Messung Pfade). Die Aufzeichnungsdauer betrug 30 Sekunden bei einer Samplingrate von 2000 Hz. Die Daten durchliefen als erstes einen



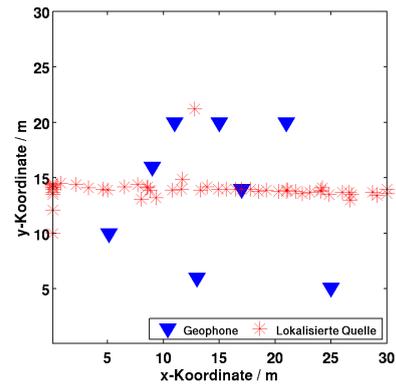
(a) Messung Pfad 1_1



(b) Messung Pfad 2_1



(c) Messung Pfad 3_1



(d) Messung Pfad 4_1

Abbildung 5.27: In den Abbildungen (a) bis (d) sind die Lokalisierungsergebnisse der Messungen Pfad 1_1 bis Pfad 4_1 geplottet. Vergleicht man die Ergebnisse mit den in der Übersichtskarte (Abbildung 5.9) eingezeichneten Pfaden, stimmen diese sehr gut miteinander überein. Als Schwellenwert für das Residuum wurde, wie bei den Messungen Tritt, auch 1,0 Sekunden gewählt. Dieser Wert hat sich für diese Geometrie bewährt. Es sind nur wenige Ausreißer zu erkennen. Als Untergrundgeschwindigkeit wurden die vorher bestimmten $165 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ benutzt.

Bandpassfilter 4ter Ordnung mit Eckfrequenzen von 20 Hz bis 60 Hz. Weiter wurde auf ihnen ein sta/lta Picker angewendet, der mit vorher bestimmten Parametern die Zeitpunkte der Schritte aus den Daten pickte. Anhand der Anzahl der Picks vom sta/lta Picker wurde ein Triggergeophon bestimmt und eine Fensterung mit 0,5 Sekunden Länge um die Zeitpunkte durchgeführt. Um zuverlässigere Laufzeitdifferenzen zu erhalten wurden die Fenster untereinander kreuzkorreliert. Das Maximum der Kreuzkorrelationsfunktion gibt die Laufzeitdifferenz eines Signals zwischen den beiden Geophonen an. Ein Grid Search Algorithmus wird benutzt um aus den Laufzeitdifferenzen eine Lokalisierung zu berechnen. Anhand der bekannten Position einer Quelle konnte so die Ausbreitungsgeschwindigkeit ermittelt werden. Weiter wurden Lokalisierungen mit allen acht Geophonen, den kleinen sowie den großen Viereck für die Messung Tritt 6 durchgeführt. Ein Schwellenwert von 1,0 Sekunden für die Größe des Minimums des Residuums wurde definiert. Der Schwellenwert steuert, ob eine Lokalisierung durchgeführt werden soll oder nicht. Eine Vergrößerung

und Verkleinerung der Diskretisierung des Gitters stellte sicher, dass auch die passende Diskretisierung gewählt worden ist, um Rechenkapazitäten und Rechenzeit zu sparen. Schließlich wurden für alle Messungen eine Lokalisierung berechnet.

Die Ergebnisse waren sehr zufriedenstellend. Das Prozessing hat für diese Messung durchweg sehr gute Ergebnisse geliefert. Alle Tritte und Pfade konnten damit lokalisiert bzw. rekonstruiert werden. Die Zahl der Ausreißer konnte durch eine Anpassung des Schwellenwertes sehr stark reduziert werden. Eine Fehlerbetrachtung der Messungen Tritt brachte ebenfalls kleine Standardabweichungen hervor.

5.5 Messung GLS

Die dritte Messung, die Messung „GLS“ fand am 23.09.2010 statt. Nach den sehr guten Ergebnissen der Messung „Messe“ (Kapitel 5.4), sollten diese bestätigt werden. Es wurde außerdem eine neue Geometrie für die Anordnung der Geophone getestet. Das Ziel war, eine möglichst einfache Anordnung zu finden, die auch in der Praxis Einsatz finden könnte.

5.5.1 Standortbeschreibung

Die Messung sollte ursprünglich auf demselben Standort wie die Messung „Messe“ durchgeführt werden. Dies hätte den Vorteil, dass man die Untergrundgeschwindigkeiten zu zwei verschiedenen Zeitpunkten miteinander hätte vergleichen können. Zum Zeitpunkt der Messung „Messe“ Mitte März war der Flugplatz aufgrund der kalten Witterung noch nicht in Betrieb und wir konnten das Ende der Start- und Landebahn als Messort nutzen. Im September war der Flugplatz geöffnet. Deshalb war es nicht erlaubt, die Start und Landebahn zu betreten bzw. auf ihr zu messen.

Westlich des Flugplatzes befindet sich zwischen der Messe Karlsruhe und einem Logistikzentrum des Paketdienstes Global Logistics System (GLS) eine mit Gras bewachsene Wiese. Das Logistikzentrum ist der Namensgeber für diese Messung. In Abbildung 5.7 ist der Standort der Messung eingezeichnet bzw. die Anordnung der Geophone skizziert. Ein Eckpunkt der aufgebauten Geometrie, die im folgenden Kapitel beschrieben ist, wurde mit einem GPS-Gerät eingemessen. Dessen Koordinate ist N 48° 58,918 und E 8° 20,110'. Das Logistikzentrum befindet sich südlich und ist in der Satellitenaufnahme von 2005 nicht zu sehen, da es erst später gebaut wurde. Im Gegensatz zur Messung „Messe“ fuhren diesmal Autos und kleine Transporter auf der nahegelegenen Straße. Diese hatten jedoch keinen Einfluss auf die Messung, da nur gemessen wurde, solange kein Fahrzeug in Sicht war, das die Messung hätte stören können.

Es wurde keine Refraktionsseismik, wie bei der Messung „Messe“ durchgeführt, so dass ich keine Apriori Informationen über den Aufbau und die Eigenschaften des Untergrundes hatte.

5.5.2 Geophongeometrie und durchgeführte Messungen

Bei dieser Messung sollten die gesammelten Erfahrungen aus den vorherigen zwei Messungen eingebracht werden. Außerdem sollte möglichst eine Geometrie gewählt werden, die einfach aufzubauen ist und auch so bei einem Praxiseinsatz verwendet werden könnte. Eine Geometrie, wie bei der Messung „Messe“ ist ungünstig für einen realen Einsatz des Verfahrens. Der Aufbau war kompliziert und hat viel Zeit beansprucht. Für die neue Messung „GLS“ wurden zwei parallele Profile mit je acht Geophonen, deren Geophonabstand fünf Meter betrug gesteckt. Der Abstand zwischen den Profilen war ebenfalls fünf Meter. Um die Symmetrie zu brechen, sind die beiden Profile um 2,5 Meter zueinander verschoben (Abbildung 5.28, blaue Dreiecke). Diese Geometrie erinnert stark an die Geometrie der ersten Messung „Wiese“ (Kapitel 5.3). Im Gegensatz dazu, sind jetzt zwei Profile parallel angeordnet. Diese Anordnung soll die Spiegelsymmetrie, die bei der Messung „Wiese“ aufgetreten ist, brechen.

Der Koordinatenursprung wurde wie in der Abbildung 5.28 gezeigt so gewählt, dass jede Messung im positiven Bereich des Koordinatensystems dargestellt werden kann.

Ein Profil von acht 3C-Geophonen wurde jeweils mit einem 24-poligen Kabel angeschlossen. Das bedeutet, man benötigt zwei Geoden, für die insgesamt 48 Kanäle. Die 3C-Geophone waren alle gleich orientiert. Die H1 Komponente verläuft nicht exakt in Nord-Süd-Richtung, sondern weicht um circa 10° von Norden nach Osten ab. Selbiges gilt für die H2 Komponente mit einer Abweichung von circa 10° von Osten in Richtung Süden. Der Aufbau dieser Geometrie ging, im Gegensatz zum Aufbau der Messung „Messe“ viel zügiger voran. Solch eine Geometrie ist für die Praxis geeigneter.

Die Messungen wurden mit einer Samplingrate von 1000 Hz aufgezeichnet und sind je nach Messung entweder 30 Sekunden oder 60 Sekunden lang. Im Gegensatz zu den vorherigen Messungen bei der mit 2000 Hz gesampelt wurde, ist hier eine kleinere Frequenz gewählt worden. Da die Nyquistfrequenz bei einer Samplingrate von 1000 Hz bei 500 Hz ist und die Daten mit einem Bandpassfilter mit einer maximalen Frequenz von 60 Hz gefiltert werden, besteht keine Gefahr das Nyquist-Shannon-Abtasttheorem (Gleichung (4.1)) zu verletzen. Man hätte die Samplingrate noch kleiner wählen können, da jedoch die Aufzeichnungsdauer lang genug gewählt werden konnte und genug Festplattenspeicher zur Verfügung stand, wurden 1000 Hz eingestellt. Das Dateiformat ist wieder SEG-2.

Wie bei der Messung „Messe“, wurden Tritte und Pfade aufgenommen. Zusätzlich dazu wurden noch drei Messungen ohne festgelegten Weg und zwei Zickzack Messungen durchgeführt. Die abgelaufenen Pfade und die Stelle der Tritte sind in der Abbildung 5.28 zu sehen. Die Zickzack Messung wurde nicht eingezeichnet. Die Aufzeichnungsdauer war bei den Tritten, den Zickzack Messungen und den Messungen ohne festgelegten Weg 60 Sekunden, bei den Pfaden 30 Sekunden.

Die Messungen sollten alle möglichen Szenarien abdecken: Tritte innerhalb und außerhalb der beiden Profile, sowie Pfade senkrecht und parallel dazu. Die Messungen Tritt sind von 1 bis 6 durchnummeriert. Bei den Pfaden bedeutet die erste Zahl wieder welcher Weg abgelaufen wurde und die zweite gibt die Richtung an. Pfad 2_2 ging z.B. mittig durch die Profile von oben nach unten (Abbildung 5.28).

5.5.3 Auswertung der Daten

Prinzipiell war die Messung „GLS“ dafür gedacht, die sehr guten Ergebnisse, die mit den Datenprozessing von der Messung „Messe“ erzielt wurden, zu bestätigen. Das Prozessing sollte so allgemeingültig wie möglich gehalten werden. D.h. dass die Parameter des Filters oder des sta/lta Picker nicht geändert werden sollten. Im Folgenden wird das Prozessing bis zum Geschwindigkeitstest nochmals kurz in Stichpunkten beschrieben. Eine ausführliche Erläuterung zu den einzelnen Schritten ist in Kapitel 5.4.3 nachzulesen.

1. Berechnen von Frequenzspektren auf zwei unterschiedliche Art und Weißen:
 - a) Kontinuierliches Frequenzspektrum: Es werden Spektren von 0,25 Sekunden langen Fenstern berechnet. Die Überlappung der Fenster beträgt eine halbe Fensterlänge. Die Frequenz ist mit ihrer farblich gekennzeichneten spektralen Amplitude über die Nummer des Fensters aufgetragen. Ein Beispiel für ein

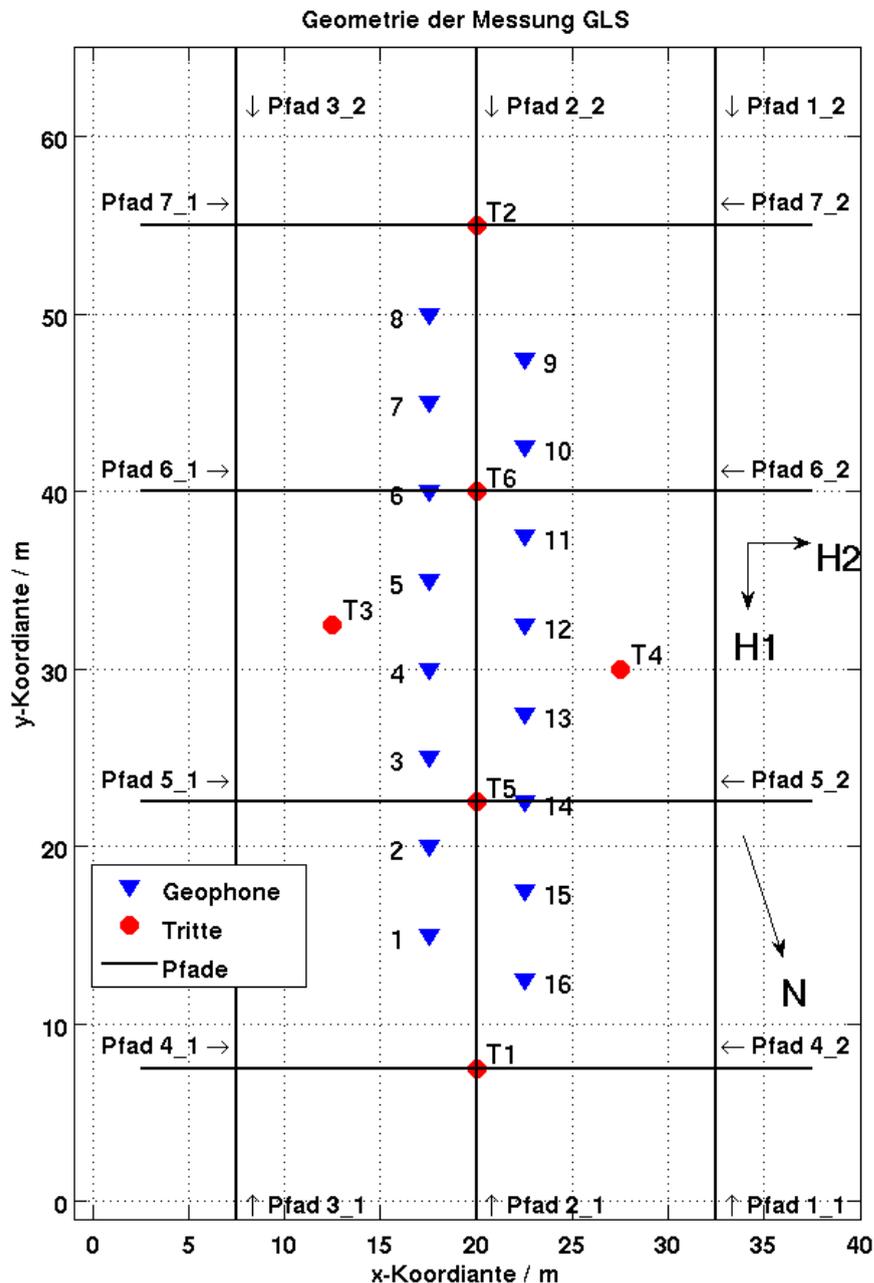


Abbildung 5.28: Übersichtskarte der Messung „GLS“. Der Koordinatenursprung wurde wieder so gewählt, dass alle Geophone und Messungen im positiven Bereich des Koordinatensystems eingezeichnet werden konnten. Diesmal wurden 16 3C-Geophone benutzt, die in zwei Profilen zu je acht Geophonen angeordnet sind. Die Geophonabstände betragen fünf Meter, der Abstand zwischen den beiden Profilen betrug ebenfalls fünf Meter. Die Profile sind um 2,5 Meter zueinander verschoben. Es wurden sechs Messungen Tritte (Tritt 1 bis 6) und sieben Messungen Pfade jeweils in zwei Richtungen (Pfad 1_1 bis 7_2) aufgenommen. Die Messungen Tritte waren wieder Schritte an einer gleichbleibenden Stelle. Die Orientierung der beiden Horizontalkomponenten H1 und H2, sowie der Nordpfeil sind ebenfalls in der Abbildung eingezeichnet.

kontinuierliches Spektrum einer Zeitreihe der Messung „Messe“ ist in Abbildung 5.11 zu sehen.

- b) Aufsummierte Frequenzspektrum: Jedes Geophon liefert eine Zeitreihe. Von jeder Zeitreihe wird ein Spektrum berechnet. Alle Spektren werden gemittelt und mit einem Medianfilter geglättet. Für zwei Messungen Tritt 4 und 6 der Messung „Messe“ sind die Spektren in Abbildung 5.12 zu sehen.

Das Ziel war, den Frequenzgehalt eines Schrittes zu ermitteln.

2. Anwenden eines geeigneten Filters, der das Rauschen unterdrückt und so die Signale hervorhebt. Das beste Ergebnis erhielt man mit einem schmalbandigen Bandpassfilter von 20 Hz bis 60 Hz. Offsetnahe Signale werden zwar in ihrer Signalform stark verfälscht, die dadurch größere Kohärenz der Signale hat jedoch einen positiven Einfluss auf die spätere Kreuzkorrelation.
3. Ermitteln von Laufzeitdifferenzen mittels eines sta/lta Picker und der Kreuzkorrelation: Es werden mit einem sta/la Picker Signale gepickt, dessen Verhältnis von sta zu lta größer als zwei ist. Um die Picks des Triggergeophons wird ein Fenster von 0,5 Sekunden Länge gelegt. Die Fenster eines Signals werden von allen Geophonenpaaren untereinander kreuzkorreliert umso Laufzeitdifferenzen zu erhalten.

Das Processing der Daten wurde, wie in der Aufzählung beschrieben, durchgeführt. Die nun erhaltenen Laufzeitdifferenzen werden weiter mit einem Grid Search Algorithmus bearbeitet, der aus diesen eine Lokalisierung berechnet. Die dafür notwendige Gitterkonstante wurde wieder auf 10 cm pro Gitterpunkt festgelegt. Daher hat das Gitter eine Größe von 400 x 650 Gitterpunkten. Dies ist fast dreimal so groß wie das Gitter bei der Messung „Messe“. Durch die doppelte Anzahl an Geophonen und dem größeren Gitter, hat die Berechnung der Daten eine dementsprechend längere Zeit in Anspruch genommen. Im den folgenden Abschnitten wird ein Geschwindigkeitstest durchgeführt um die Untergrundgeschwindigkeit zu ermitteln, da diese von der vorherigen Messung „Messe“ nicht übernommen werden kann. Anschließend wurde die Anzahl der Geophone variiert um herauszufinden wie viele Geophone notwendig sind um eine Quelle sicher zu lokalisieren. Der Schwellenwert Minimums des Residuums musste ebenfalls auf diese Messung angepasst und festgelegt werden.

Geschwindigkeitstest

Wie bereits erwähnt, wurde an diesem Standort keine Refraktionsseismik durchgeführt, sodass man nicht von der P-Wellengeschwindigkeit auf die Oberflächenwellengeschwindigkeit schließen kann. Durch die Messungen Tritt, an denen an definierten Stellen Schritte getätigt wurden, kann man mit Hilfe des Grid Search Algorithmus die Untergrundgeschwindigkeit ermitteln. Dies wurde bereits in der Messung „Messe“ durchgeführt (Kapitel 5.4.3.4). Für die Messung „GLS“ wurde der Tritt 6 ausgewählt um den Geschwindigkeitstest durchzuführen. Dafür wurde wieder ein Schritt der Messung ausgewählt und im Grid Search Algorithmus die Geschwindigkeit so lange verändert bis die Lokalisierung am besten mit der eingemessenen Position übereinstimmt. Dort erwartet man auch den kleinsten Wert des Minimums des Residuums. Die Messung Tritt 6 wurde ausgewählt, da diese innerhalb

der Geometrie lag und daher ein gutes Lokalisierungsergebnis zu erwarten war. Die mit einem Maßband eingemessene Position von Tritt 6 ist 20 m / 40 m. Der Messfehler wird, wie auch bei der letzten Messung, auf $\pm 0,5$ Meter abgeschätzt.

Aufgrund der Erfahrung aus der letzten Messung, wird die Geschwindigkeit zwischen $100 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ und $200 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ in $5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ Schritten variiert. In Abbildung 5.29 sind Lokalisierungsergebnisse von vier verschiedenen Geschwindigkeiten mit der Position und der Größe des Minimums des Residuums dargestellt. Die beste Übereinstimmung mit der eingemessenen Position und den geringsten Wert des Minimums erreicht man mit einer Geschwindigkeit von $145 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ (Abbildung 5.29(b)). Die Position der Quelle wird auf 19,7 m / 40,1 m bestimmt. Diese weicht nur leicht von der eingemessenen Position von 20 m / 40 m ab. Die Geschwindigkeit ist $20 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ kleiner wie die ermittelte Geschwindigkeit bei der Messung „Messe“. Betrachtet man die Lokalisierungsergebnisse für $140 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ und $150 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, so sind auch diese sehr nahe an der eingemessenen Position von Tritt 6. Der Wert des Minimums des Residuums ist für eine Geschwindigkeit von $140 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ nur minimal größer als mit einer Geschwindigkeit von $145 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Um das Ergebnis zu verifizieren wurde eine Lokalisierung mit einer Geschwindigkeit von $140 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ und $145 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ für Tritt 5 durchgeführt (Abbildung 5.30(b)). Tritt 5 hatte eine eingemessene Position von 20 m / 22,5 m. Auch hier sind die Ergebnisse sehr ähnlich. Beide Male ist die Position des Minimums bei 20 m / 22 m, das Residuum hat jedoch bei $140 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ einen kleineren Wert für das Minimum.

Eine weitere Möglichkeit die Oberflächenwellengeschwindigkeit zu ermitteln, ist mit Hilfe der Kreuzkorrelationsfunktionen. Das Vorgehen dafür ist in Kapitel 5.4.3.4 genau beschrieben. Um die effektiven Abstände der Geophonpaare zu berechnen, ist es zwingend notwendig die Position des Schrittes zu kennen. Dies ist hier der Fall. Die Messung Tritt 6 wurde auf den Koordinaten 20 m / 40 m durchgeführt.

In Abbildung 5.31 sind alle 256 Kreuzkorrelationsfunktionen dargestellt. Dies sind alle möglichen Kombinationen die man mit 16 Geophonen hat, sprich 16×16 . Im Gegensatz zu Abbildung 5.21 sind hier alle Kombinationen geplottet. Man erkennt einen symmetrischen Moveout auf beiden Lags. Für den positiven Lag wurden die Maxima der KKF's bestimmt. Eine lineare Regression der Maxima errechnet eine Steigung von $136 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ für die angepasste Gerade. Diese Geschwindigkeit ist um $5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ bis $10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ kleiner als die ermittelte Geschwindigkeit des Grid Search Algorithmus.

Der Geschwindigkeitstest hat gezeigt, dass es auch für die Messung „GLS“ möglich ist mit verschiedenen Methoden auf die Untergrundgeschwindigkeit zu schließen. Man erhält eine Geschwindigkeit zwischen $135 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ und $145 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Für die weiteren Lokalisierungen der Tritte und Pfade wird eine Geschwindigkeit von $140 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ benutzt.

Anzahl der Geophone

Wie auch bei der Messung „Messe“, wird hier auf die Anzahl der Geophone eingegangen. Bei der Messung „Messe“ wurden ein kleines Viereck und ein großes Viereck bestehend aus jeweils vier Geophonen benutzt. Es sollte grundsätzliche geklärt werden, ob eine Lokalisierung mit wenigen Geophonen überhaupt durchzuführen ist. Dies wurde bestätigt.

Bei der Messung „GLS“ zielt man auf eine praxisnahe Tauglichkeit ab und will diese tes-

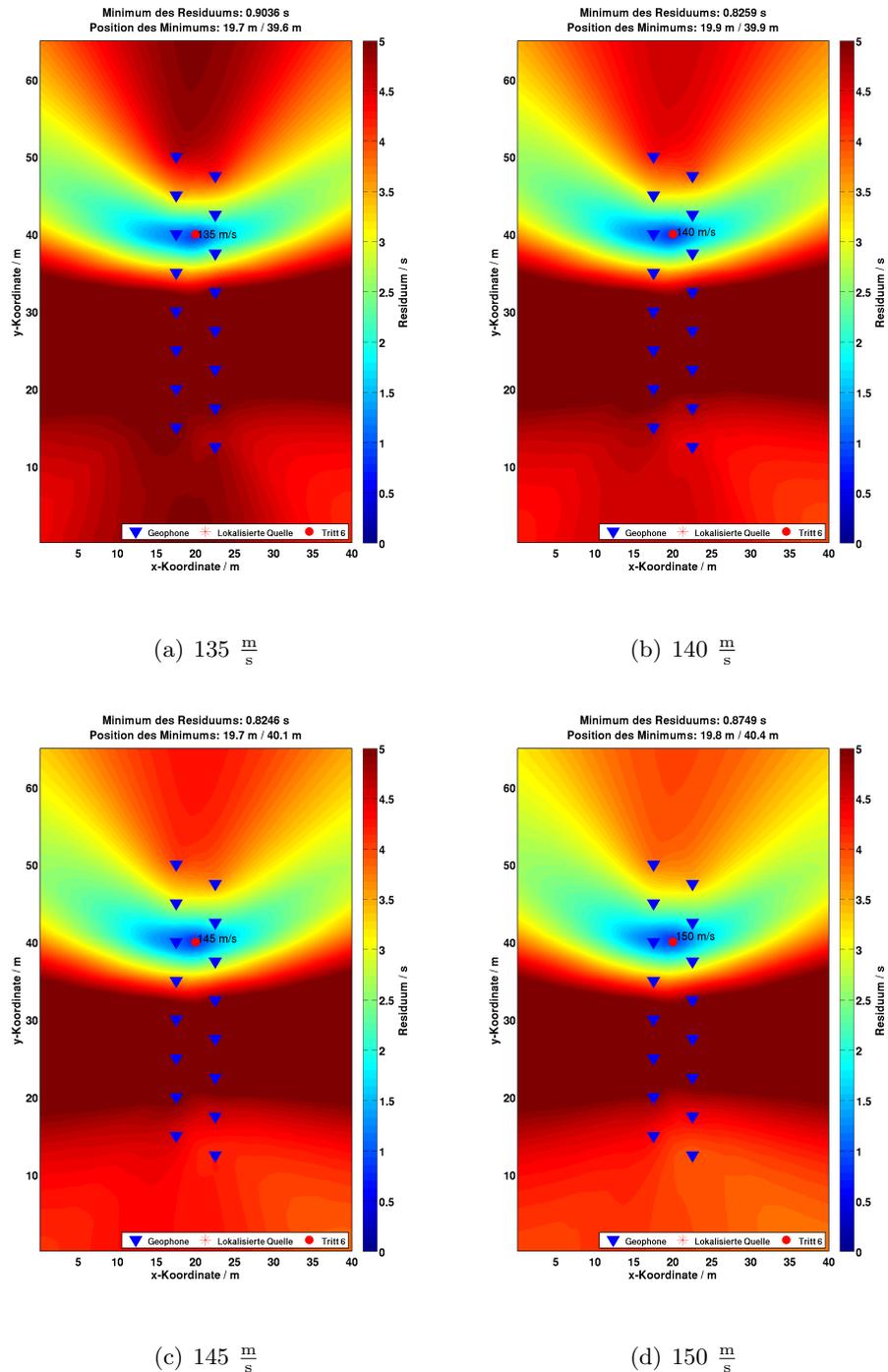


Abbildung 5.29: Geschwindigkeitstest mit $135 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ bis $150 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ für Messung Tritt 6 (eingemessene Position 20 m / 40 m). Es wurde ein Schritt ausgewählt und für verschiedene Geschwindigkeiten eine Lokalisierung durchgeführt. Der Wert und die Position des Minimums des Residuums sind im Titel der jeweiligen Abbildung zu lesen. Für (c) $145 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ hat das Minimum seinen kleinsten Wert. Für (b) $140 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ verändert sich der Wert praktisch nicht und die Lokalisierung passt besser zur eingemessenen Position. Mit einer Geschwindigkeit von (a) $135 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ und (d) $150 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ weichen die Ergebnisse minimal von der eigentlichen Position ab.

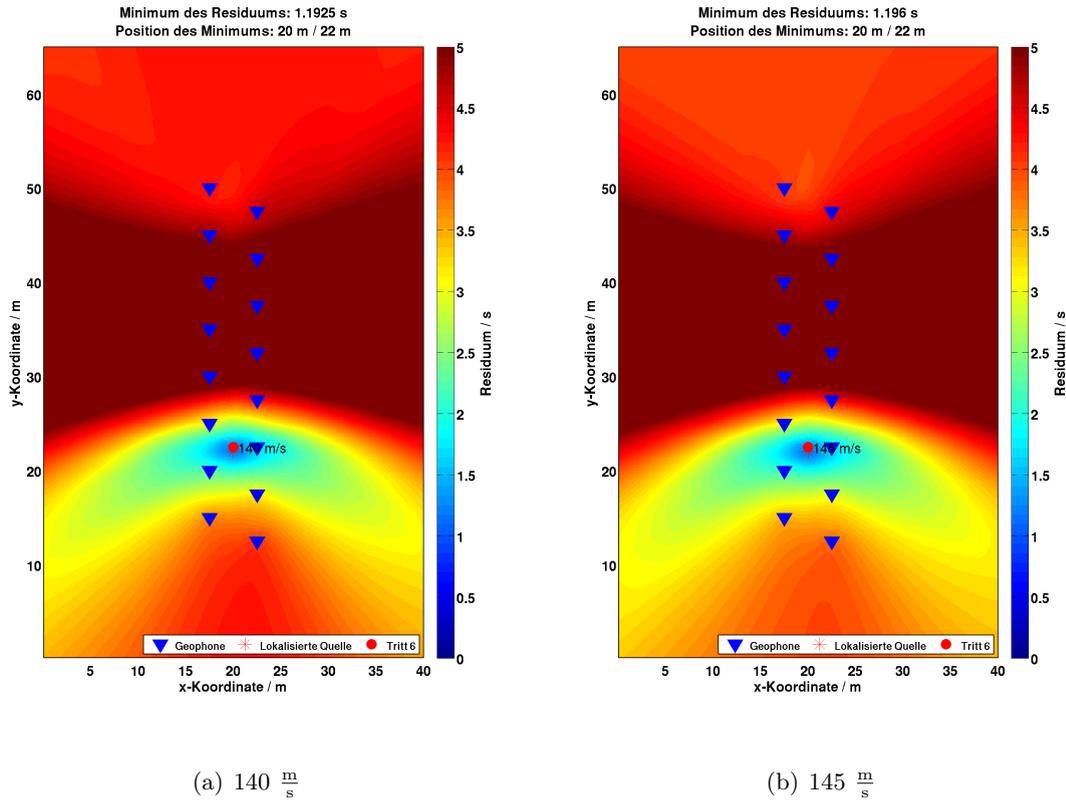


Abbildung 5.30: Geschwindigkeitstest mit (a) $140 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ und (b) $145 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ für Messung Tritt 5 (eingemessene Position 20 m / 25,5 m). Um die Geschwindigkeit, die man durch die Messung Tritt 6 erhalten hat (Abbildung 5.29), nochmals zu verifizieren, wurde mit einer Geschwindigkeit von $140 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ und $145 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ die Lokalisierung für einen Schritt von der Messung Tritt 5 wiederholt. Beide Geschwindigkeiten ergeben dieselbe Position, jedoch ist für $140 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ das Minimum des Residuums etwas kleiner.

ten. Es stellt sich die Frage, welcher Abstand zwischen den Geophonen notwendig ist um noch eine Lokalisierung durchführen zu können. Um dies herauszufinden wird der Abstand zwischen den Geophonen vergrößert, indem einmal jedes zweite und einmal jedes vierte Geophon benutzt wird. D.h. die Lokalisierung wird einmal mit insgesamt acht Geophonen und einmal mit nur vier Geophonen durchgeführt. Die Ergebnisse sind, vergleichend zur Lokalisierung mit allen sechzehn Geophonen mit einer anschließenden Diskussion, im Kapitel 5.5.4 nachzulesen. Es wird eine Messung Tritt und eine Messung Pfad mit unterschiedlicher Anzahl an Geophonen ausgewertet.

Maximales Residuum

Der Schwellenwert für den maximalen Wert des Minimums des Residuums wird für alle Messungen erst mal auf zwei Sekunde festgelegt. Dies haben Tests gezeigt, wie sie bereits in Kapitel 5.4.3.4 bei der vorherigen Messung „Messe“ durchgeführt wurden. Ob dieser Wert für alle Messungen passend ist, wird im nächsten Kapitel bei der Präsentation der Ergebnisse diskutiert.

5.5.4 Ergebnis der Messungen

Es werden als erstes die Lokalisierungsergebnisse für die Messungen Tritt erörtert, später die Ergebnisse der Messungen Pfad und Zickzack. Grundsätzlich wurden die Daten nach den Auswerteschritten prozessiert, die im Kapitel 5.5.3 beschrieben sind.

Tritte

Es wird bei der Auswertung mit Tritt 1 gestartet. Dieser befand sich, wie in Abbildung 5.28 dargestellt, zwischen Geophon 1 und 16, fünf Meter unterhalb von Geophon 16. Das beste Ergebnis des Geschwindigkeitstests ergab eine Untergrundgeschwindigkeit von $140 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Das Lokalisierungsergebnis mit einem Schwellenwert von zwei Sekunden ist in Abbildung 5.32 zu sehen. Als Triggergeophon wurde Geophon 6 mit 158 Picks ausgewählt. Von diesem Pick sind 108 lokalisiert worden. Die Lokalisierungen gruppieren sich um einen Bereich neben Geophon 16. Die Position der Schritte war fünf Meter weiter unten. Außerdem sind einige Ausreißer, sogar am anderen Ende des Messgebietes bei Geophon 8, zu erkennen. Mögliche Gründe für die nicht korrekte Lokalisierung sind folgende: Erstens kann die Geschwindigkeit nicht richtig angepasst worden sein, zweitens gibt es wahrscheinlich ein Symmetrieproblem in der Anordnung der Geophone und drittens muss getestet werden, wie gut die Lokalisierung in y-Richtung überhaupt sein kann. Gegen die Symmetrieproblematik kann man im Nachhinein nichts mehr tun.

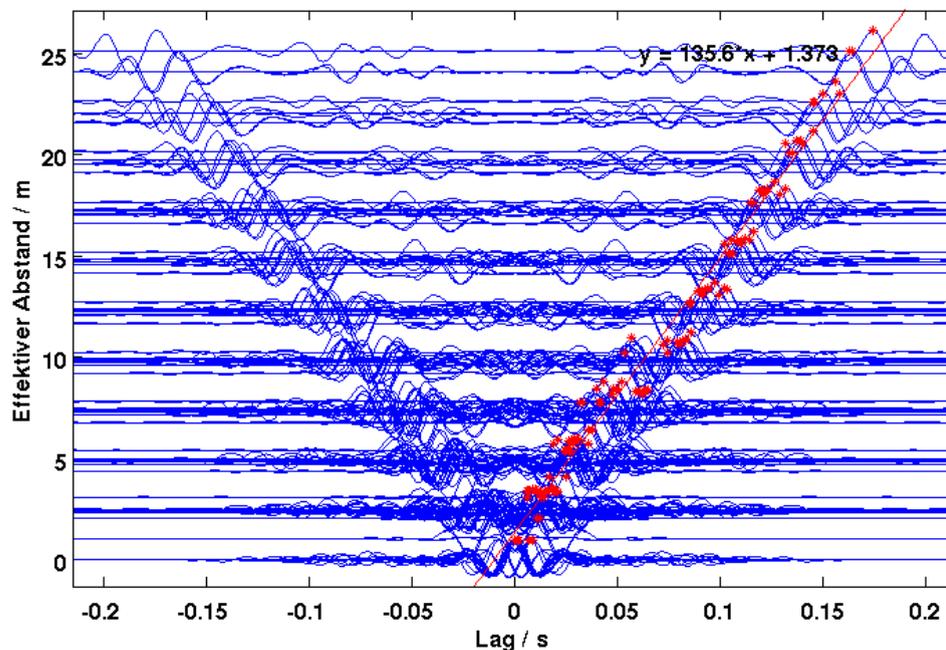


Abbildung 5.31: In der Abbildung sind die 256 Kreuzkorrelationsfunktionen der 16 Geophone mit ihrem effektiven Abstand zur Messung Tritt 6 dargestellt. Die roten Kreuze sind die Maxima der KKF. Die rote Gerade ist durch eine lineare Regression der Maxima berechnet. Die Steigung der Geraden gibt die Untergrundgeschwindigkeit wieder. Mit $136 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ weicht die Geschwindigkeit um $4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ von der mit dem Grid Search Algorithmus bestimmten Geschwindigkeit ab.

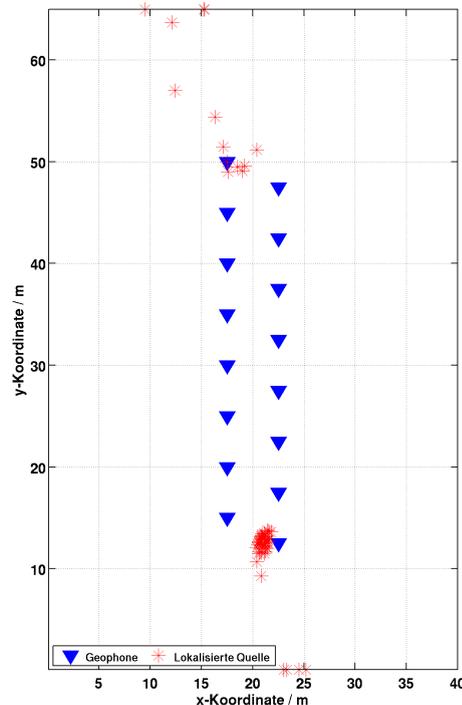


Abbildung 5.32: Lokalisierungsergebnis der Messung Tritt 1. Die lokalisierten Quellen gruppieren sich alle um Geophon 16. Die eigentliche Position der Schritte war 20 m / 7,5 m, also circa fünf Meter unterhalb der im Moment lokalisierten Position. Es sind noch einige Lokalisierungen am unteren Rand, aber auch symmetrisch zu Geophon 16 am anderen Ende der Profile zu erkennen. Dies deutet auf ein Symmetrieproblem hin.

Die Geschwindigkeit wird nochmals für Pick 20, dessen Quelle bei Geophon 16 lokalisiert worden ist, angepasst. In Abbildung 5.33 ist das Lokalisierungsergebnis für die Geschwindigkeiten $135 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, $141 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, $142 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ und $150 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ mit dem jeweiligen Residuum dargestellt. Der hellrote Punkt zeigt die eingemessene Position des Schrittes. Wie man erkennt, sind die Bereiche eines kleinen Residuums sehr in y-Richtung ausgedehnt und an beiden Enden der Profile ausgeprägt. Für $135 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ und $141 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ (Abbildungen 5.33(a) und 5.33(b)) ist kaum ein Unterschied in der Lokalisierung zu erkennen. Erhöht man die Geschwindigkeit lediglich um $1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, so springt das Minimum des Residuums bzw. die lokalisierte Quelle an den unteren Rand. Für eine Untergrundgeschwindigkeit von $150 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ springt das Minimum sogar an das andere Ende. Wie in Abbildung 5.33(d) erkennbar, wurde hier die Quelle an den oberen Rand gesetzt. (oberhalb der Legende).

An diesem Beispiel kann man zwei Dinge beobachten. Erstens gibt es wieder eine Symmetrie in der Anordnung die mehrdeutige Ergebnisse hervorruft und zweitens ist das Vermögen eine Quelle in ihrer y-Richtung zu lokalisieren sehr beschränkt, wenn die Quelle oberhalb oder unterhalb der Enden der Profile ist.

Bei den weiteren Auswertungen der anderen Tritte und Pfade wird die Geschwindigkeit bei $140 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ belassen. Bei der Messung Tritt 2 tritt dasselbe Problem wie bei der Messung Tritt 1 auf. Schon bei einer kleinen Geschwindigkeitsänderung springt die Lokalisierung

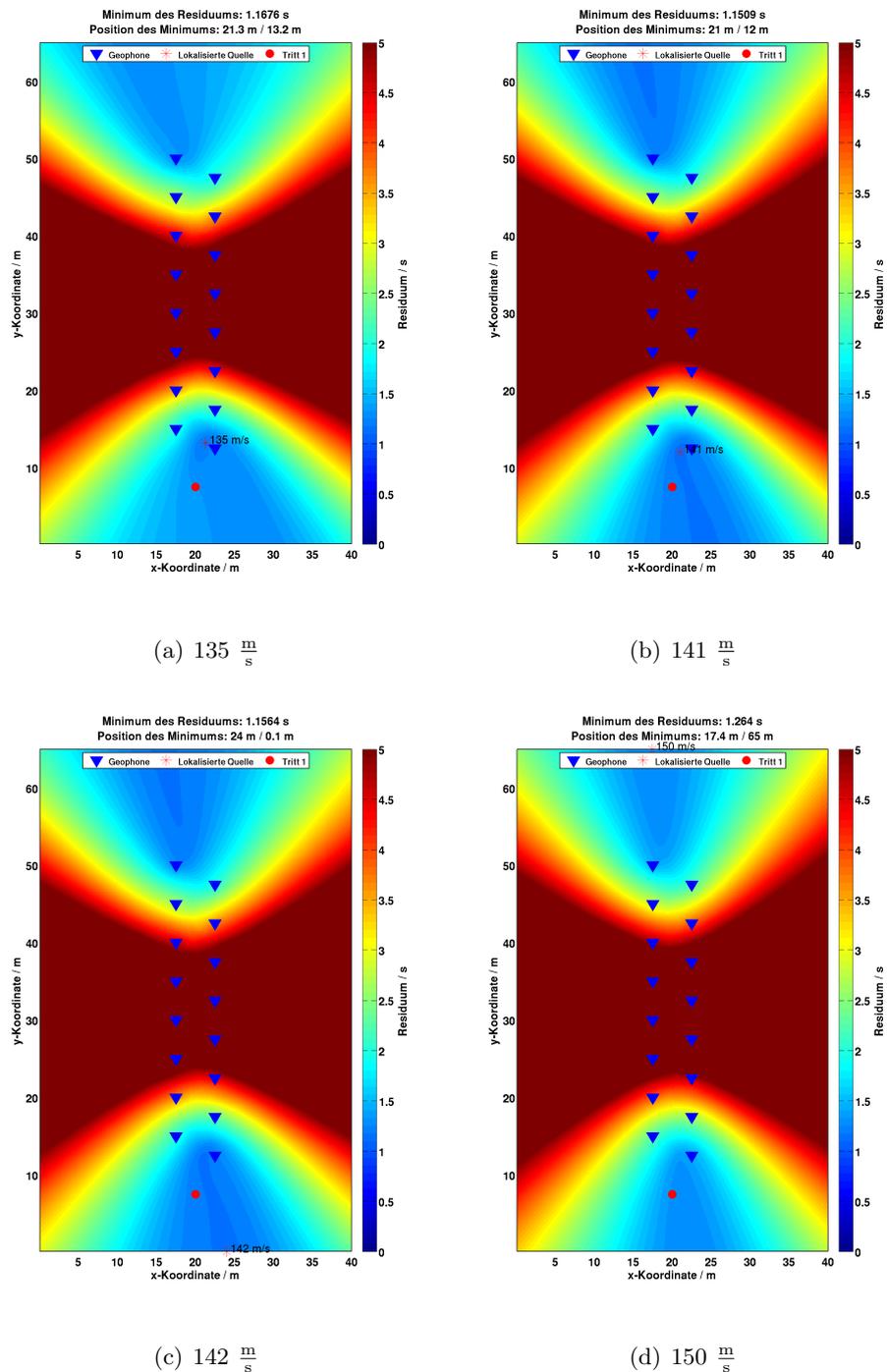


Abbildung 5.33: Lokalisierungsergebnisse für $135 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, $141 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, $142 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ und $150 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ für Messung Tritt 1. Der hellrote Punkt zeigt die eingemessene Position der Schritte von Messung Tritt 1 an. Für eine Untergrundgeschwindigkeit von (a) $135 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ und (b) $141 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ist die lokalisierte Quelle zu weit oben lokalisiert worden. Vergrößert man die Geschwindigkeit um $1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ auf $142 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ (c), so springt die Position der Quelle an den unteren Rand. Erhöht man die Geschwindigkeit weiter auf (d) $150 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, macht sich die Symmetrieproblematik bemerkbar und die Lokalisierung springt ans obere Ende. Die Quelle wird oberhalb der Legende lokalisiert.

sehr stark. Auch werden Quellen wieder an dem falschen Ende der Geometrie lokalisiert. Ob die Pfade 4 und 7, die ebenfalls unterhalb und oberhalb der Enden abgelaufen wurden, zu lokalisieren sind wird später erörtert.

In Abbildung 5.34 sind die Lokalisierungsergebnisse für die Messungen Tritt 3 bis 6 dargestellt. Für einen Schwellenwert von zwei Sekunden und einer Geschwindigkeit von $140 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ sind die Ergebnisse sehr gut. Die Lokalisierungen gruppieren sich auf einer Stelle. Es ist nur ein Ausreißer in Abbildung 5.34(b) bei Tritt 4 am rechten Rand zu sehen. Es war daher wieder möglich den Mittelwert und die Standardabweichung von den Lokalisierungsergebnissen von jeder Messung Tritt zu berechnen. Aufgrund der Diskretisierung von 10 cm pro Gitterpunkt, wurden die Mittelwerte und die Standardabweichung auf die erste Stelle nach dem Komma gerundet. In Tabelle 5.3 sind diese mit den eingemessenen Positionen aufgeführt. Die berechneten und eingemessenen Positionen stimmen wieder gut überein. Auch die Standardabweichungen sind, bis auf die x-Position bei Tritt 4, gering. Bei Tritt 3 weicht die x-Position um mehr als einen Meter von der eingemessenen Position ab. Wie bei der Messung „Messe“, lässt es sich im Nachhinein nicht mehr klären, ob dies ein Fehler in der Lokalisierung ist oder ob die Position falsch eingemessen wurde. Für die große Standardabweichung bei Tritt 4 für die x-Position, lässt sich größtenteils der Ausreißer verantwortlich machen. Die y-Position ist richtig bestimmt.

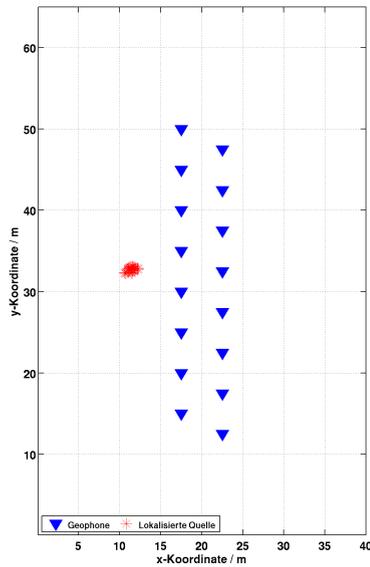
Die Tritte 3 bis 6 wurden alle richtig und sehr stabil lokalisiert. Für die Tritte 1 und 2 war dies nicht der Fall. Aufgrund ihrer Lage oberhalb und unterhalb des Profils können diese nicht korrekt lokalisiert werden. Es bildet sich ein stark gedehnter Bereich in y-Richtung aus, in dem sich das Residuum sehr wenig vom Wert des Minimums unterscheidet. Man darf gespannt sein, ob sich die Pfade 4 und 7 lokalisieren lassen.

Wie in der Auswertung beschrieben, werden die Lokalisierungsergebnisse für eine unter-

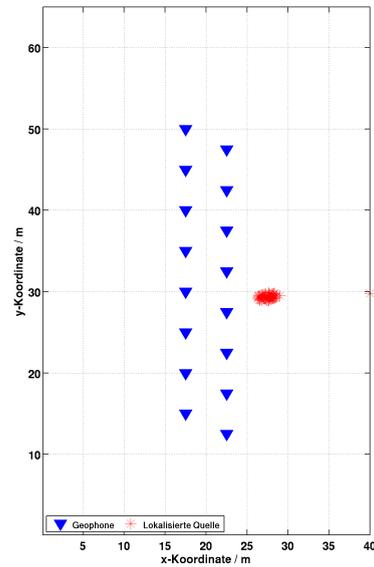
	Eingemessene Position $\pm 0,5$ / m	Mittelwert \pm Standardabweichung / m
Tritt 3	$x = 12,5$ $y = 32,5$	$11,4 \pm 0,3$ $32,8 \pm 0,2$
Tritt 4	$x = 27,5$ $y = 30,0$	$27,6 \pm 1,3$ $29,4 \pm 0,2$
Tritt 5	$x = 20,0$ $y = 22,5$	$20,0 \pm 0,1$ $22,0 \pm 0,2$
Tritt 6	$x = 20,0$ $y = 40,0$	$19,8 \pm 0,2$ $39,9 \pm 0,2$

Tabelle 5.3: Für die Messungen Tritt 3 bis Tritt 6 sind die eingemessene x- und y-Koordinate sowie der Mittelwert und die Standardabweichung für die Lokalisierungsergebnisse dargestellt. Aufgrund der Gitterdiskretisierung von 10 cm pro Gitterpunkt sind die Werte auf die erste Nachkommastelle gerundet. Die eingemessenen Positionen sind mit einem Maßband im Gelände bestimmt und mindestens mit einem Fehler von $\pm 0,5$ Meter behaftet.

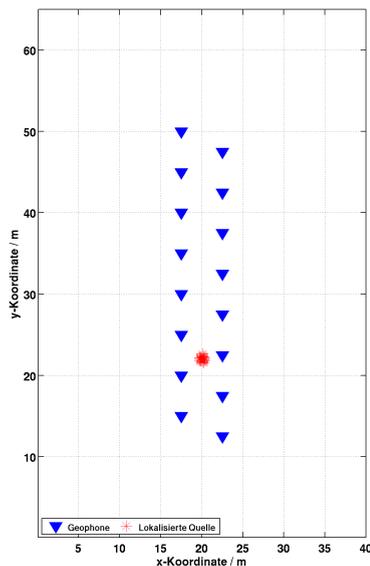
schiedliche Anzahl von Geophonen betrachtet. In Abbildung 5.35 sind die Ergebnisse mit vier, acht und sechzehn Geophonen für die Messung Tritt 5 dargestellt. Für die Lokalisierung mit acht Geophonen wurde jedes zweite, mit vier Geophonen jedes vierte Geophon zur Auswertung verwendet. Die Abbildung 5.35(a) ist identisch mit der Abbildung 5.34(c)



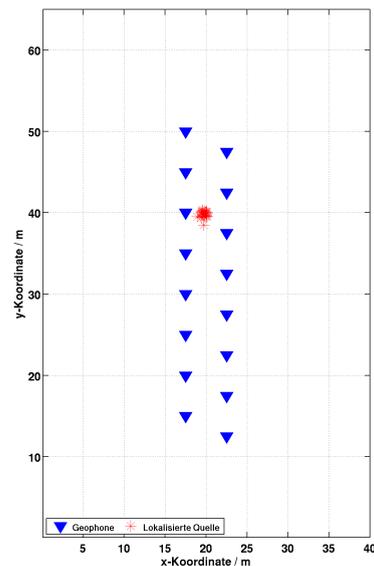
(a) Tritt 3



(b) Tritt 4



(c) Tritt 5

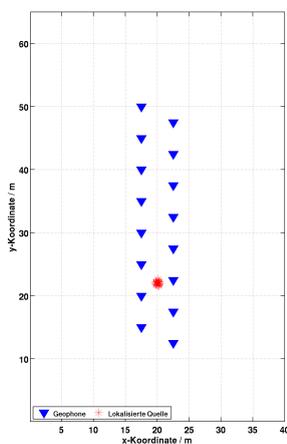


(d) Tritt 6

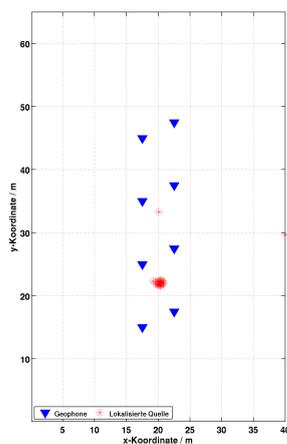
Abbildung 5.34: Lokalisierungsergebnisse der Messungen Tritt 3 bis Tritt 6 mit einer Geschwindigkeit von $140 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ und einem Schwellenwert von zwei Sekunden. Alle Schritte wurden richtig lokalisiert. Nur in Abbildung (b) bei der Messung Tritt 4 ist ein Ausreißer am rechten Rand zu erkennen. Für die Schritte wurde jeweils der Mittelwert und die Standardabweichung berechnet und sind in Tabelle 5.3 zusammengefasst.

und ist nur zum Zwecke des einfacheren Vergleiches nochmal dargestellt.

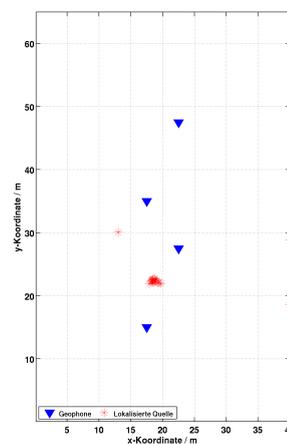
Die Position der Messung Tritt 5 konnte entweder mit acht oder mit vier Geophonen sehr gut lokalisiert werden. Bei genauerer Betrachtung streuen die Lokalisierungen mit kleiner werdender Anzahl von Geophonen leicht mehr, dennoch ist dies ein sehr gutes Ergebnis.



(a) Tritt 5 - 16 Geophone



(b) Tritt 5 - 8 Geophone



(c) Tritt 5 - 4 Geophone

Abbildung 5.35: Lokalisierungsergebnis mit 16, 8 und 4 Geophonen: Abbildung (a) entspricht der Abbildung 5.34(c) und ist nur zur besseren Vergleichbarkeit nochmals dargestellt. In (b) sind die Schritte mit nur acht Geophonen und in (c) mit vier Geophonen lokalisiert worden. Die Lokalisierung war auch mit acht und auch vier Geophonen sehr gut. Bei genauerem Betrachten streuen die Lokalisierungen etwas mehr als mit allen 16 Geophonen.

Ein Mittelwert und eine Standardabweichung wurden nicht berechnet. Bei der Auswertung der Pfade wird ebenfalls ein Pfad mit weniger Geophonen lokalisiert werden.

Im Folgenden wird noch beschrieben, welche Auswirkung es auf die Lokalisierungsergebnisse hat, wenn die Quelle außerhalb des berechneten Gebietes liegt. Um dies zu testen, wurde die Messung Tritt 4 verwendet. Die ursprünglichen Lokalisierungen sind in Abbildung 5.34(b) zu sehen. Das Messgebiet wurde nun bei der x-Koordinate 25 m abgeschnitten. Die Quelle bzw. die Position der Schritte liegt nicht mehr im berechneten Gebiet. Der Grid Search Algorithmus berechnete folgendes Ergebnis. Alle Lokalisierungen wurden auf den rechten Rand bei der x-Position 25 m gelegt. Was dies für eine mögliche Praxisanwendung bedeutet, wird im Kapitel 6 diskutiert.

Pfade

In diesem Abschnitt sollen die Ergebnisse der Messungen Pfade präsentiert werden. Als erstes werden die drei Pfade parallel zu den Geophonprofilen betrachtet. Die Aufzeichnungsdauer für die Pfade wurde auf 30 Sekunden verkürzt. Die Parameter Geschwindigkeit und der Schwellenwert wurden fürs erste gleich bei $140 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ und zwei Sekunden belassen. In der Abbildung 5.36 ist wieder das Lokalisierungsergebnis für die drei Pfade 1_1, 2_1 und 3_1 zu sehen. Diese starteten jeweils zehn Meter unterhalb von Geophon 16. Pfad 1_1 verlief zehn Meter rechts vom rechten Geophonprofil, Pfad 2_1 durch die beiden Profile und Pfad 3_1 zehn Meter links vom linken Profil. Pfad 2_1 in Abbildung 5.36(b) wurde richtig lokalisiert. Alle Quellen liegen zwischen den beiden Profilen. Der Pfad startet allerdings zehn Meter unterhalb von Geophon 16. Die Schritte unterhalb der Profile wurden mit einem eingestellten Schwellenwert von zwei Sekunden verworfen. Wie man bei den

Messungen Tritt 1 und 2 gesehen hat, kann man diese Schritte nicht exakt lokalisieren. In den Abbildungen 5.36(a) und 5.36(c) sind die Ergebnisse der Messungen Pfad 1_1 und 3_1 dargestellt. Den groben Verlauf der Pfade kann man hiermit gut rekonstruieren. Der Abstand zum jeweiligen Profil variiert stark. Dieser kann aufgrund der Geophonanordnung nicht genau bestimmt werden. Die Quellen in Abbildung 5.36(c) links oben sind der Symmetrieproblematik zuzuschreiben. Die Quellen sollten links unten lokalisiert werden. Bei den Messungen Pfade ist es nicht möglich einen Mittelwert bzw. eine Standardabweichung zu berechnen, da sich die Quelle bewegt. Die y-Position konnte bei den parallelen Pfaden gut bestimmt werden. Die x-Position variiert um circa zehn Meter.

Nun sollen die Pfade 4 bis 7, die senkrecht zu den Profilen abgelaufen wurden, lokalisiert

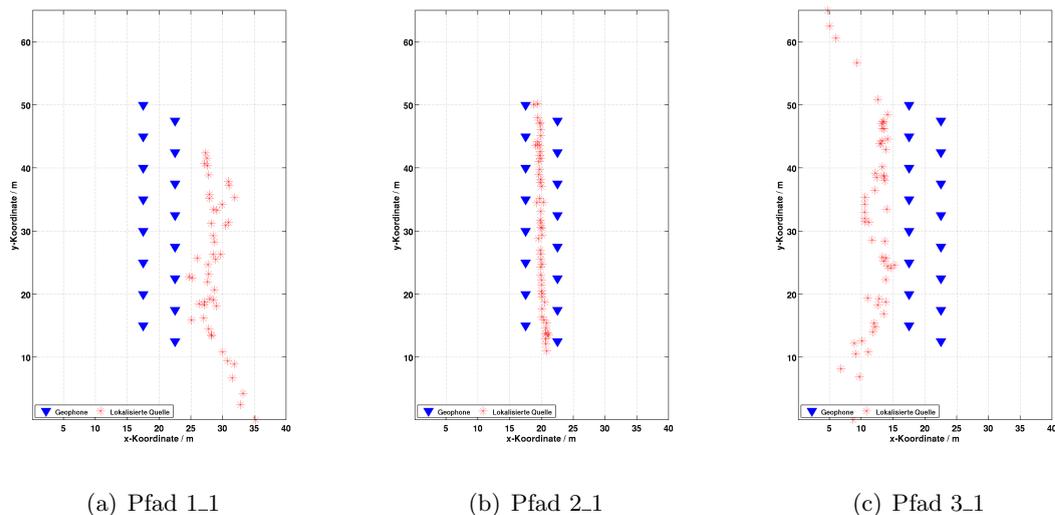
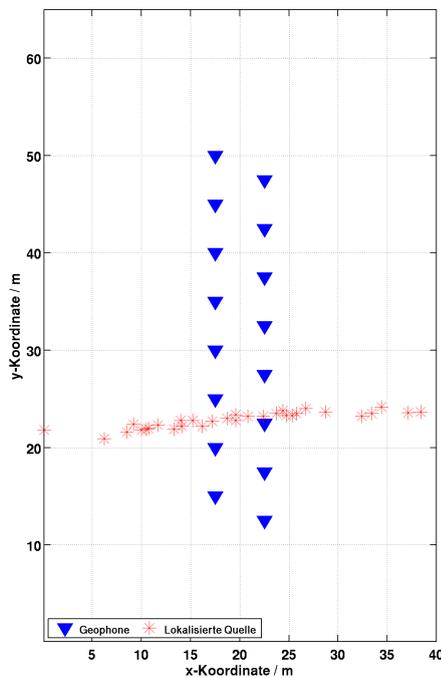


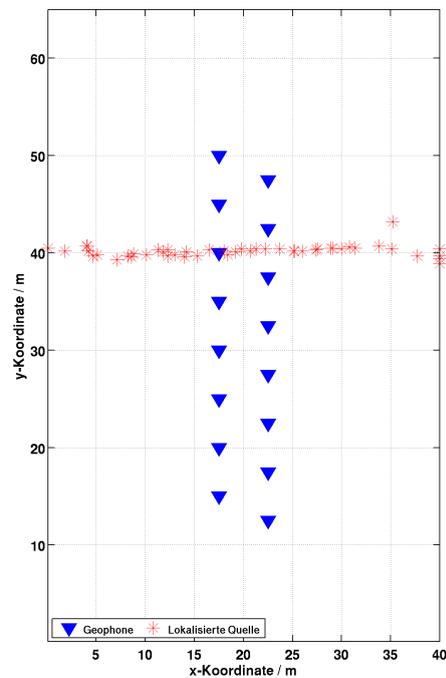
Abbildung 5.36: Lokalisierungsergebnisse für die Messungen Pfad 1_1, 2_1 und 3_1 mit einer Untergrundgeschwindigkeit von $140 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ und einem Schwellenwert von zwei Sekunden. Pfad 2_1 (b) wurde zwischen den beiden Profilen richtig lokalisiert. Bei den Pfaden 1_1 (a) und 3_1 (c) ist der grobe Weg rekonstruierbar. Der Abstand zum jeweiligen Profil variiert stark.

werden. Aus den bisher gewonnenen Erfahrungen, lässt sich bereits vermuten, dass sich die Pfad 4 und 7 nicht gut lokalisieren lassen, da diese unterhalb bzw. oberhalb des Profils entlang liefen. Die Pfade 5 und 6 sollten jedoch keine Probleme bereiten. Die Ergebnisse dieser beiden Pfade, von links nach rechts gelaufen (Pfad 5_1 und Pfad 6_1), sind in Abbildung 5.37 dargestellt. Beide Pfade sind richtig lokalisiert. Ob Pfad 5_1 wirklich leicht schräg abgelaufen wurde, lässt sich im Nachhinein nicht mehr überprüfen. Die Schrittdichte wird mit größerem Abstand zu den Profilen kleiner. Dort steigt der Wert des Minimums des Residuums an und kann dann den Schwellenwert leichter übersteigen. Dennoch kann man Schritte mit einem Abstand von über 15 Metern zum Profil noch detektieren und lokalisieren.

Wie bereits vermutet, lassen sich die Pfade 4 und 7 nicht lokalisieren. Die Lokalisierungsergebnisse springen sehr stark zwischen dem Geophon am Ende des Profils und dem Rand hin und her. Auch sind einige Quellen an das falsche Ende der Profile lokalisiert worden. Diese Effekte wurden bereits bei der Messung Tritt 1 (Abbildung 5.33) beobachtet. Die



(a) Pfad 5_1



(b) Pfad 6_1

Abbildung 5.37: Lokalisierungsergebnisse der Messungen Pfad 5_1 und 6_1 mit einer Geschwindigkeit von $140 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ und einem Schwellenwert von zwei Sekunden. (a) Pfad 5_1 konnte rekonstruiert werden. Die Dichte der Lokalisierungen nimmt zu den Rändern hin ab. (b) Der Pfad 6_1 konnte sehr gut rekonstruiert werden. Dieser geht genau über Geophon 6, wie es auch in der Übersichtskarte (Abbildung 5.28) eingezeichnet ist.

Gründe für die fehlgeschlagene Lokalisierung sind dieselben wie für die Messung Tritt 1: Erstens kommt es aufgrund von Symmetrieeffekten an beiden Enden der Profile zu Bereichen mit erniedrigten Residuumswerten. Zweitens haben diese Bereiche eine sehr große Ausdehnung in y-Richtung, da die Geometrie es nicht zulässt unterhalb bzw. oberhalb davon eine bessere Lokalisierung zu erreichen.

Auch bei einem Pfad sollen die Lokalisierungsergebnisse mit acht und vier Geophonen betrachtet und diskutiert werden. Die Ergebnisse für den Pfad 6_1 sind in Abbildung 5.38 zu sehen. Abbildung 5.38(a) entspricht Abbildung 5.37(b) und ist aufgrund der besseren Vergleichbarkeit nochmals dargestellt.

Auch hier konnte sowohl mit acht (Abbildung 5.38(b)) als auch mit vier Geophonen (Abbildung 5.38(c)) der Weg des Pfades 6_1 rekonstruiert werden. In der mittleren Abbildung mit acht Geophonen fallen einige Ausreißer ins Auge. Diese kommen zustande, weil der Schwellenwert mit zwei Sekunden nicht geändert wurde. Dieser hängt, wie bereits beschrieben, von der Anzahl der Geophonpaare ab. Würde man den Schwellenwert auf eine Lokalisierung mit acht Geophonen anpassen, so könnte man die Ausreißer mit einer großen Wahrscheinlichkeit noch eliminieren. In der rechten Abbildung (4 Geophone) ist der Pfad nicht durchgängig, sondern nur Teile davon sind lokalisiert worden. Bedenkt man, dass der Abstand zwischen den Geophonen in diesem Profil 20 Meter betrug, so ist das

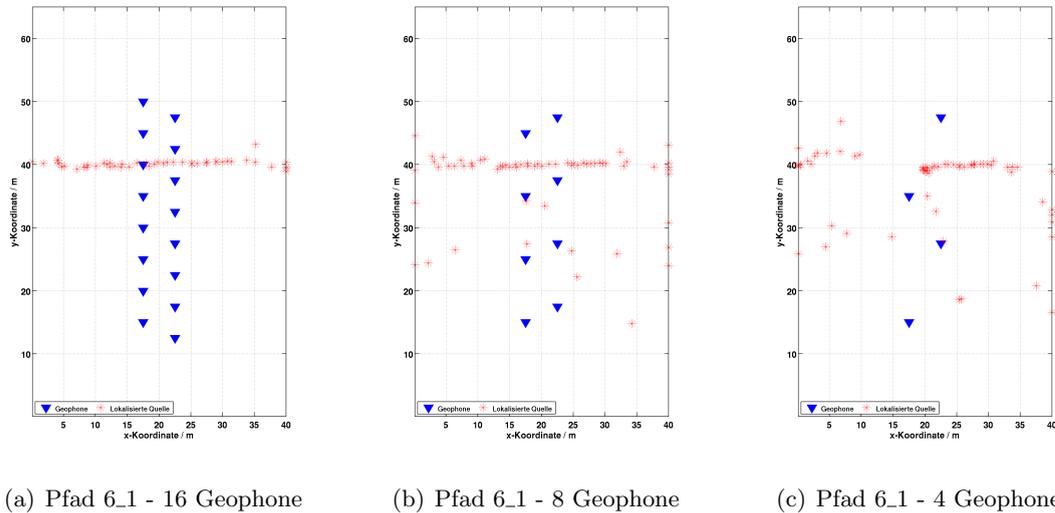


Abbildung 5.38: Lokalisierungsergebnis mit 16, 8 und 4 Geophonen: Abbildung (a) entspricht der Abbildung 5.37(b) und ist zur besseren Vergleichbarkeit nochmals dargestellt. In (b) ist der Pfad mit acht Geophonen und in (c) mit vier Geophonen lokalisiert worden. Der Pfad ist bei beiden Abbildungen rekonstruierbar. Die Anzahl der Ausreißer nimmt jedoch stark zu. Dies ist vor allem damit zu erklären, dass der Schwellenwert bei zwei Sekunden konstant gehalten wurde.

Ergebnis noch sehr gut. Für die Ausreißer gilt das Gleiche wie für die mittlere Abbildung (8 Geophone). Es wurde auch hier gezeigt, dass man auch mit weniger Geophonen die Quellen richtig detektieren kann. Welche Anzahl bei einer Praxisanwendung sinnvoll wäre, wird in Kapitel 6 diskutiert.

Zickzack

Hier werden die Ergebnisse der Messungen Zickzack präsentiert. Was mit Zickzack gemeint ist, ist in der Abbildung 5.39 zu erkennen. Es wurde in Zickzack 1 von unten nach oben innerhalb der beiden Profile und in Zickzack 2 von oben nach unten auch außerhalb der Profile gelaufen. Wie bei den Pfaden, konnte der Weg gut rekonstruiert werden.

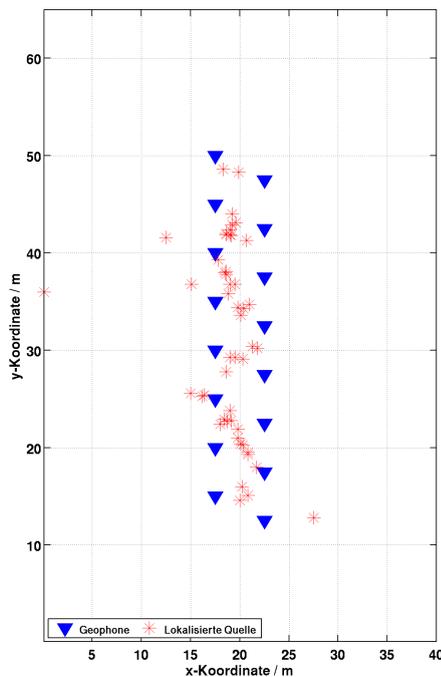
Die Messungen ohne vorgegebenen Weg sind ebenfalls erfolgreich ausgewertet und lokalisiert worden. Sie werden hier nicht gezeigt, da man den Weg, wie auch bei der Messung „Messe“, aufgrund der unübersichtlichen Schrittfolge, nicht wiedererkennen würde. Man würde lediglich ein Gebiet mit vielen Lokalisierungen erkennen, aber keinen abgelaufenen Weg. Erkennbar ist dieser nur, wenn man sich die lokalisierten Quellen nacheinander ansieht. In einer der Messungen liefen zwei Personen gleichzeitig einen nicht vorgegebenen Weg ab. Nach der Auswertung der Daten konnte jedoch nur der Weg einer Person rekonstruiert werden. Ob und wie man mehrere Personen lokalisieren kann, wird im Kapitel 6 diskutiert.

Im Folgenden wird für diese Messung eine Echtzeitauswertung durchgeführt, d.h. die benötigte Rechenzeit für die Lokalisierungen soll kleiner sein als die Aufzeichnungsdauer der Daten.

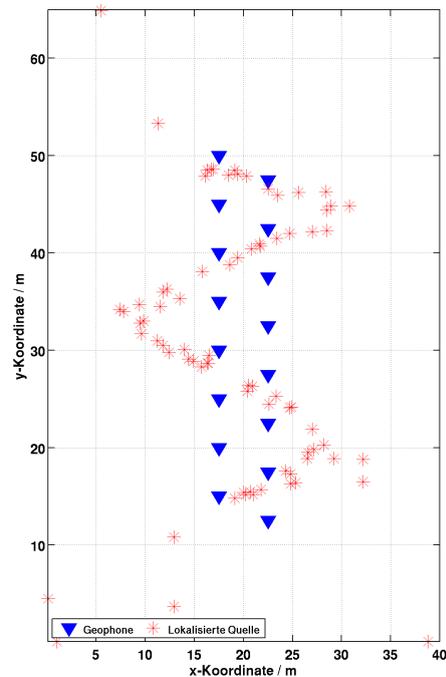
5.5.5 Test einer Echtzeitauswertung

In den Grundlagen (Kapitel 4.5) ist der Unterschied zwischen einer Echtzeit- und Offlineauswertung beschrieben. Es soll an zwei Beispielen, eine Messung Tritt und eine Messung Pfad der Messung GLS, eine Echtzeitauswertung simuliert werden. Die neuen Prozessingsschritte werden kurz erörtert.

1. Es werden Fenster mit einer Länge von 0,5 Sekunden ausgeschnitten.
2. Diese werden wie gewohnt mit einem Bandpassfilter 4ter Ordnung von 20 Hz bis 60 Hz gefiltert. Zu beachten ist, dass dies ein normaler und kein nullphasiger Bandpassfilter ist.
3. Es werden die Kreuzkorrelationsfunktionen berechnet und die Laufzeitdifferenzen anhand des Maximums der KKF bestimmt.
4. Anhand der Laufzeitdifferenzen wird mit Hilfe des Grid Search Algorithmus eine Lokalisierung durchgeführt.
5. Der Schwellenwert entscheidet, ob die Lokalisierung verworfen wird oder nicht.
6. Es wird ein neues Fenster um die halbe Fensterlänge weiter geschoben, ausgeschnitten und die Punkte 2 bis 6 wiederholt.



(a) Zickzack 1



(b) Zickzack 2

Abbildung 5.39: Lokalisierungsergebnisse für die Messungen Zickzack. (a) Bei dieser Messung wurde von unten nach oben innerhalb der beiden Profile ein Zickzack weg abgelaufen. Dieser konnte, bis auf ein paar wenige Ausreißer lokalisiert werden. (b) Hier wurde von oben nach unten ein Zickzackweg über die beiden Profile hinaus abgelaufen. Auch dieser konnte rekonstruiert werden.

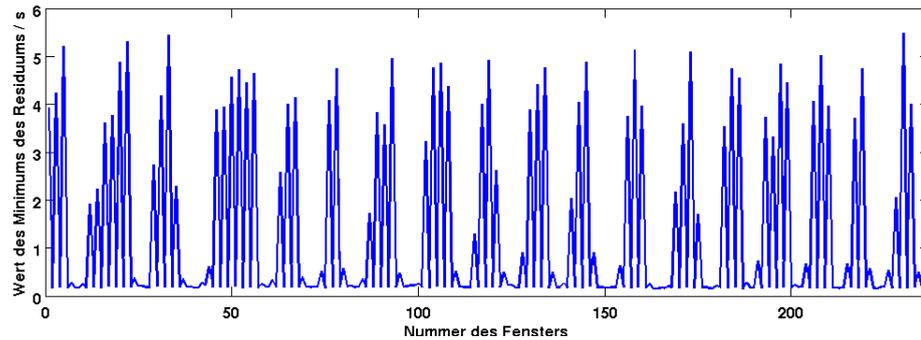


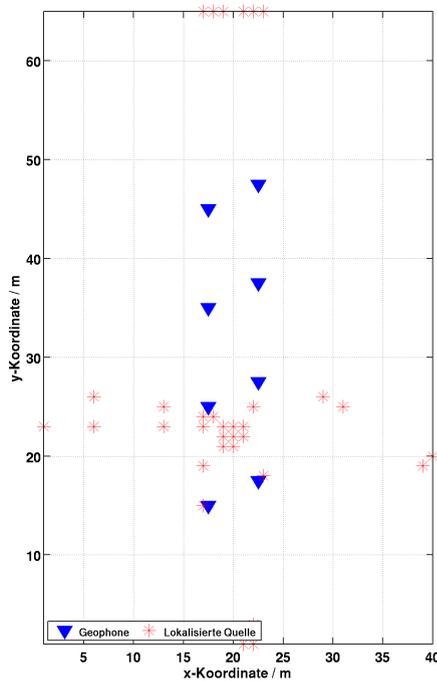
Abbildung 5.40: Hier ist die Größe des Minimums des Residuums für Tritt 5 über die Nummer des Fensters aufgetragen. Werden Fenster gewählt, in denen ein Signal eines Schrittes enthalten ist, ist das Minimum des Residuums ein kleiner Wert. Enthält ein Fenster hingegen nur Rauschen, so wird das Residuum einen großen Wert haben. Der Schwellenwert wurde auf 0,4 Sekunden festgelegt.

Weggefallen ist somit der sta/lta Picker und das Triggergeophon. Viel wichtiger ist der Schwellenwert geworden. Ist in einem Fenster nur Rauschen vorhanden, so wird der Wert des Minimums des Residuums nach dem Grid Search groß sein. Der Schwellenwert sollte so eingestellt werden, dass er das große Residuum erkennt und das Ergebnis verwirft.

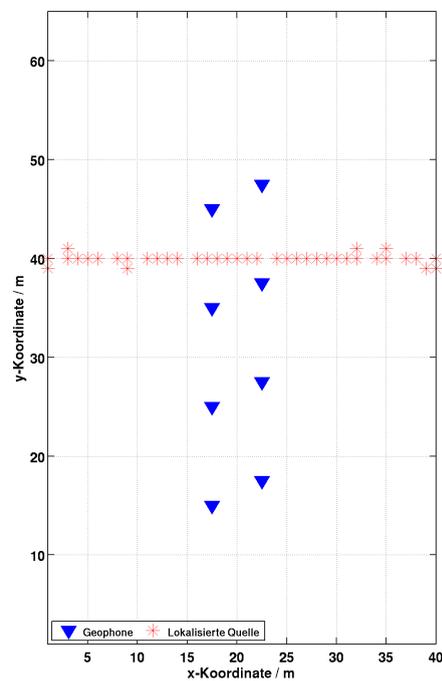
Beispielhaft wird nun wieder Tritt 4 und Pfad 6_1 mit dem oben genannten Prozessing-schritten ausgewertet. Die Fensterlänge wurde auf 0,5 Sekunden gesetzt und die Überlappung beträgt 0,25 Sekunden. Diese Werte stammen aus einfachen Überlegungen. Die Länge eines Signals von einem Schritt ist, wie man in Abbildung 5.13 sieht, maximal 0,1 Sekunden lang. Die normale Gangart eines Menschen hat geschätzt eine Frequenz zwischen 1 Hz und 2 Hz. Durch eine Fensterlänge von 0,5 Sekunden und einer halben Fensterlänge, die als Überlappung gewählt worden ist, werden somit theoretisch alle Schritte einzeln erfasst. Um Rechenzeit einzusparen werden nur acht der sechzehn Geophone benutzt und die Diskretisierung wird auf ein Meter pro Gitterpunkt hoch gesetzt. Dadurch konnte die Rechenzeit auf einem Quad-Core Computer mit 2 GHz und 16 GB Arbeitsspeicher für Pfad 6_1 auf circa 35 Sekunden bei einer Aufzeichnungsdauer von 30 Sekunden und für Tritt 4 auf circa 70 Sekunden bei einer Aufzeichnungsdauer von 60 Sekunden reduziert werden.

In Abbildung 5.40 ist die Größe des Minimums des Residuums über der Nummer des Fensters für die Messung Tritt 5 aufgetragen. Das Minimum des Residuums schwankt zwischen circa 0,2 Sekunden und 5 Sekunden. Durch die Länge des Fensters von 0,5 Sekunden und einer Überlappung von einer halben Fensterlänge ergeben sich bei einer Aufzeichnungsdauer von 60 Sekunden 238 Fenster. In machen Fenstern sind Signale von Schritten enthalten und in manchen nur Rauschen. Ist ein Signal enthalten, wird die Kreuzkorrelation sinnvolle Laufzeitdifferenzen ermitteln, die im Grid Search Algorithmus zu einem niedrigen Wert des Minimums führen. Hohe Werte kommen durch kreuzkorrelierte Rauschen zustande, da in diesem Fall keine sinnvollen Laufzeitdifferenzen erhält. Der Schwellenwert wurde anhand der Abbildung 5.40 auf 0,4 Sekunden festgelegt. Die periodische Abfolge von mehreren Fenstern mit einem niedrigen Wert des Minimums des Residuums, kann man sich so erklären, dass es Bereiche gibt, indem sich das Fenster so überlappt, dass bereits im nächsten Fenster ein Signal eines Schrittes enthalten ist.

Im Folgenden werden die Lokalisierungsergebnisse aus Abbildung 5.41 für Tritt 5 und Pfad 6_1 beschrieben. Bei Tritt 5 sind trotz des niedrigen Schwellenwertes einige Ausreißer zu erkennen. Berechnet man den Mittelwert ergibt dieser eine Position von 20 m / 24 m. In 5.41(b) sieht man die Lokalisierungsergebnisse für Pfad 6_1. Diese sind fast alle, durch die grobe Diskretisierung auf einer horizontalen Linie. Vergleicht man Abbildung 5.41(b) mit Abbildung 5.37(b) in der das „offline“ Datenprozessing verwendet wurde, so ist das Ergebnis durchweg positiv. Der Weg konnte auch in Echtzeit vollständig rekonstruiert werden. Dieser Test zeigt, dass es möglich ist eine Echtzeitauswertung durchzuführen und dabei



(a) Tritt 5



(b) Pfad 6_1

Abbildung 5.41: Lokalisierungsergebnisse bei einer Echtzeitauswertung für (a) Tritt 5 und (b) Pfad 6_1 mit einem Schwellenwert von 0,4 Sekunden. Tritt 5 konnte nicht eindeutig bestimmt werden. Es gibt einige Ausreißer. Bildet man jedoch den Mittelwert aller Lokalisierungen, so ergibt sich eine Position von 20 m / 24 m. Diese stimmt mit der eigentliche Position (20 m / 22,5 m) der Schritte gut überein. Pfad 6_1 ergibt eine horizontale Linie und stimmt gut mit dem abgelaufenen Weg überein.

gute Ergebnisse zu erhalten. Auf welche weiteren Dinge man bei einem möglichen Praxisanwendung achten muss, wird im Kapitel 6 besprochen.

5.5.6 Zusammenfassung und Diskussion

Die Messung „GLS“ wurde auf einer Wiese neben einem Logistikzentrum des Paketdienstes Global Logistics System (GLS) durchgeführt. Dafür wurden zwei Profile mit je acht Geophonen gesteckt. Der Geophonabstand betrug fünf Meter, der Abstand der Profile zueinander ebenfalls fünf Meter. Die Profile waren um 2,5 Meter zueinander versetzt. Die Geometrie wurde so gewählt, dass diese einfach aufzubauen ist und auch so bei einem

Praxiseinsatz verwendet werden kann. Es wurden zwei Arten von Messungen durchgeführt: Schritte auf einer gleichbleibenden Stelle (Messungen Tritt) und das Ablaufen von festgelegten Wegen (Messungen Pfad). Das Processing der Daten war das Gleiche wie bei der Messung „Messe“ (Kapitel 5.4). Die Untergrundgeschwindigkeit und der Schwellenwert wurden auf diese Messung angepasst. Außerdem wurden Lokalisierungen mit einer verminderten Anzahl an Geophonen durchgeführt.

Die Lokalisierungsergebnisse sind für die meisten Messungen sehr gut. Vier Messungen (Tritt 1 und Tritt 2 / Pfad 4 und Pfad 7) haben ein Problem der Geometrie aufgedeckt. Befanden sich die Quellen unterhalb bzw. oberhalb der beiden Enden der Profile, so konnten diese nicht lokalisiert werden. Das Minimum des Residuums war dort lang gestreckt und konnte nicht fokussiert werden. Durch Symmetrieprobleme konnte es passieren, dass einige Schritte am falschen Ende der Profile lokalisiert worden sind. Alle anderen Messungen konnten sehr gut lokalisiert werden, wobei der Abstand zu den Profilen nicht immer korrekt war (Pfad 1 und Pfad 3).

Außerdem wurde noch eine Echtzeitauswertung getestet. Dafür wurde das Datenprocessing so verändert, dass nicht mehr die gesamte Zeitreihe zur Verfügung stehen musste. Konkret fiel der *sta/lta* Picker weg und es wurde ein Fenster mit einer Länge von 0,5 Sekunden mit einer Überlappung von einer halben Fensterlänge über die Daten geschoben. Die Fenster wurden untereinander kreuzkorreliert und die daraus erhaltenen Laufzeitdifferenzen wurden mit dem Grid Search Algorithmus zu einer Lokalisierung berechnet. Für eine Echtzeitauswertung muss die Rechenzeit kürzer wie die Aufzeichnungsdauer der Daten sein. Um dies zu erreichen, wurde die Diskretisierung auf 1 m pro Gitterpunkt heruntersetzt und nur acht der sechzehn Geophone benutzt. Die Ergebnisse sind sehr gut. Alle Pfade und Tritte, bis auf die ober- und unterhalb der Profile konnten auch so lokalisiert werden.

5.6 Erneute Auswertung der Messung Wiese

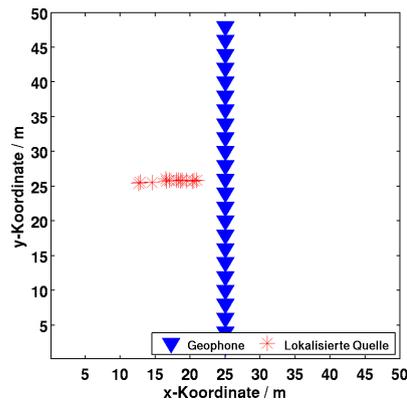
In diesem Kapitel werden die Daten, die im Kapitel 5.3 bereits ausgewertet wurden, nochmals mit neuen Prozessingschritten, die bei der Messung „Messe“ (Kapitel 5.4) entwickelt wurden, ausgewertet. Auf die Standortbeschreibung, Geometrie und Messungen wird hier nicht mehr eingegangen.

Der Unterschied zur Auswertetechnik in Kapitel 5.3 liegt darin, dass nun die Laufzeitdifferenzen nicht mehr über den Zeitpunkt des Extremwertes bestimmt werden, sondern mit Hilfe der Kreuzkorrelation.

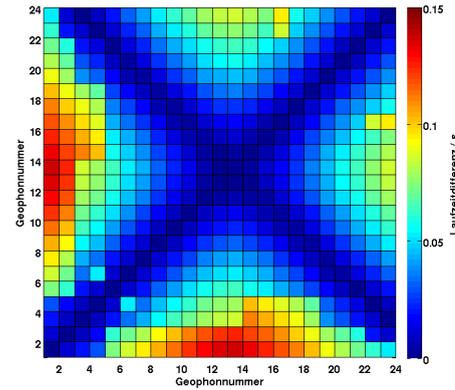
Es wurde für die Lokalisierung mit dem Grid Search Algorithmus wieder $150 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ als Geschwindigkeit gewählt, damit die Ergebnisse vergleichbar sind. Als Schwellenwert für die Messungen Senkrecht wurden fünf Sekunden definiert. Die Lokalisierungsergebnisse und beispielhafte Darstellung von Laufzeitdifferenzen ist in Abbildung 5.42 zu sehen. Durch die gewählte Anordnung der Geophone als Profil, sind die Lokalisierungen nicht eindeutig. Es existiert immer eine zweite Lösung die man durch Spiegelung am Profil erlangt. In den Abbildungen 5.42(a) und 5.42(c) sind die Lokalisierungsergebnisse nur auf der linken Seite dargestellt. Spiegelt man diese am Profil, so erhält man den abgelaufenen Pfad. Mit dem neuen Processing können auch die Schritte der Messung Senkrecht_1 ermittelt werden. Auf der rechten Seite der Abbildung sind beispielhaft Laufzeitdifferenzen von allen Geophonpaare für einen Schritt dargestellt. Es ist weiterhin zu beachten, dass der Maximalwert der Farbskala 0,15 Sekunden ist. Vergleicht man die Abbildungen mit den Abbildungen 5.6, so erkennt man, dass bei dem jetzigen Vorgehen Laufzeitdifferenzen zu bestimmen, keine Geophone bzw. Geophonpaare mehr auffällig werden.

Vergleicht man die Größe des Minimums des Residuums, so liegt man mit den jetzigen Prozessingschritten bei maximal drei Sekunden. Das Residuum ist aufgrund der Übersichtlichkeit nicht mehr eingezeichnet. Im Kapitel 5.3 wurden minimale Werte von acht bzw. sechsundzwanzig Sekunden erreicht. Dies zeigt, dass mit Hilfe der Kreuzkorrelation die Laufzeitdifferenzen stabiler bestimmt werden können.

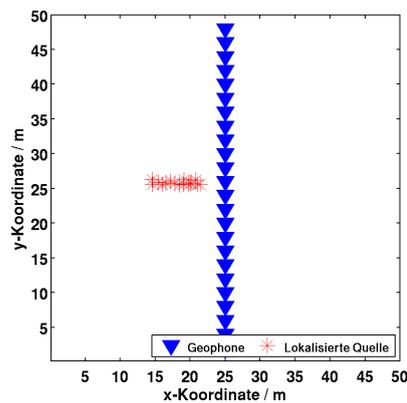
Die Messungen Parallel, die in Kapitel 5.3 nicht ausgewertet werden, ergeben hier auch keine Ergebnisse. Da nicht kontrolliert wird, ob an einem Geophon ein Signal ankommt, werden grundsätzlich alle Geophone zur Lokalisierung genutzt. Für die Messungen Parallel ist es schlicht und ergreifend so, dass an den meisten Geophonen kein Signal angekommen ist. Dadurch werden nicht kohärente Signale kreuzkorreliert, die dann eine zufällige Laufzeitdifferenz ergeben. Dies ist bei einer möglichen Praxisanwendung ein Problem, da Geophone an denen kein Signal angekommen ist, die Größe des Residuums steigern. Eine Lösung dafür wird im Kapitel 6 beschrieben.



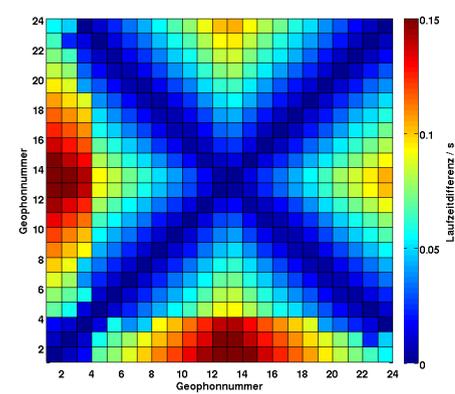
(a) Lokalisierungen Senkrecht_1



(b) Laufzeitdifferenzen Senkrecht_1



(c) Lokalisierungen Senkrecht_2



(d) Laufzeitdifferenzen Senkrecht_2

Abbildung 5.42: Links Lokalisierungen und rechts Laufzeitdifferenzen von den Messungen Senkrecht_1 und Senkrecht_2. Die notwendigen Informationen dazu sind im Kapitel 5.3 nachzulesen. Mit den neuen Prozessingschritten, die bei der Messung „Messe“ (Kapitel 5.4) entwickelt wurden, konnten nun auch die Schritte der Messung Senkrecht_1 lokalisiert werden. Durch die Spiegelsymmetrie die durch das Anordnen der Geophone als Profil zustande kommt, kann nicht entschieden werden, ob die Schritte rechts oder links davon waren. In den Abbildungen (a) und (c) sind daher alle lokalisierten Quellen auf die linke Seite gesetzt worden. Die Schritte wurden richtig lokalisiert. In den Abbildungen (b) und (d) sind beispielhaft die Laufzeitdifferenzen für einen Schritt für alle Geophonpaare dargestellt. Wie man erwartet, ergeben sich für die Geophone mit einem kleinen Abstand zueinander kleine Laufzeitdifferenzen bzw. mit einem großem Abstand große Laufzeitdifferenzen.

6. Diskussion einer Praxisanwendung

Um das Verfahren der Lokalisierung von Schritten anhand von Laufzeitdifferenzen auch in der Praxis einsetzen zu können, müssen einige Dinge beachtet werden. Für die Daten der Messung „GLS“ wurde testweise versucht eine Echtzeitauswertung durchzuführen.

Unter einer Echtzeitauswertung versteht man, im Gegensatz zu einer Offlineauswertung, dass die Daten nicht erst komplett aufgenommen und später prozessiert werden, sondern dass dies insitu passiert. Dies ist natürlich für alle Praxisanwendungen eine notwendige Voraussetzung. Es wäre nicht realistisch, die Daten erst aufzuzeichnen und im Nachhinein auszuwerten.

In Kapitel 5.5.5 ist eine Echtzeitauswertung simuliert worden. Die Daten lagen natürlich alle schon vor. Es wurde alle 0,25 Sekunden ein kleines Fenster mit einer Länge von 0,5 Sekunden ausgewertet. So konnte ein kontinuierlicher Datenfluss simuliert werden. Praktisch wurden immer Fenster ausgeschnitten, welche sich um die halbe Länge überlappten. Die Rechenzeit darf nicht länger als 0,25 Sekunden sein, da dann wieder ein neues Fenster ausgeschnitten und ausgewertet wird.

Es muss eine leicht veränderte Auswertetechnik als wie sie im Kapitel 4 beschrieben wird, genutzt werden. Es wurde kein sta/Ita Picker mehr verwendet. Es werden immer Fenster, egal ob ein Signal in der Zeitreihe enthalten ist oder nicht, kreuzkorreliert und daraus Laufzeitdifferenzen berechnet. Bei einem Praxiseinsatz muss man sich die Frage stellen, wie genau eine Quelle lokalisiert werden soll. Im Falle der Messung „GLS“, bei der ein Gebiet von 40 m x 65 m berechnet wurde, wurde eine Diskretisierung von 1 m pro Gitterpunkt gewählt. Auch wenn man eigentlich, wie man bei der Messung „Messe“ (Kapitel 5.4.4) gesehen hat, genauer als einen Meter lokalisieren könnte, hat man in der Praxis von der genaueren Position keinen Nutzen. Durch die große Diskretisierung verringert sich die Rechenzeit dramatisch. Im Beispiel „GLS“ wurden außerdem nur acht der sechzehn Geophone zur Lokalisierung benutzt, die auf einer Länge von 40 Metern zu zwei Profilen gesteckt waren. Die Rechenzeit bei einem Zeitfenster mit der Länge 0,5 Sekunden verkürzt sich damit weiter auf etwas mehr als die geforderten 0,25 Sekunden. Durch eine Optimierung des Codes könnte man mit Sicherheit unter die gewünschten 0,25 Sekunden kommen.

Unterhalb und oberhalb der Profilen konnten keine Quellen lokalisiert werden. D.h. für einen möglichen Praxiseinsatz müssten über die gesamte Länge Geophone gesteckt werden. Man will jedoch so wenig Material, sprich Geophone wie möglich benutzen, da dann der Aufwand und der Preis sinkt. Aus den Tests mit einer verschiedenen Anzahl an Geophonen (Kapitel 5.5.4) kann man sagen, dass ein maximaler Abstand von zehn Metern zwischen den Geophonen gewählt werden sollte.

Im Beispiel „GLS“ wurden acht Geophone, die in zwei Profilen zu einer Länge von 40 Metern gesteckt wurden, zur Lokalisierung genutzt. Sollte man z.B. eine Länge von 200 Meter überwachen wollen, wofür man circa 40 Geophone benötigt, müsste man das Gebiet in Teilgebiete aufteilen. Eine Lokalisierung ist nur sinnvoll mit Geophonen zu rechnen, an denen auch das Signal der Schritte ankommt. Dies wird ab einer Quell-Empfänger-Distanz von circa 40 Metern nicht mehr der Fall sein. Deshalb müsste man das berechnete Gebiet in kleinere Teilgebiete aufteilen und jedes Teilgebiet parallel auswerten.

Sollte eine Quelle außerhalb des berechneten Gebietes sein, stellt dies kein Problem dar, da dann die Position der Quelle auf den Rand des berechneten Gebietes gesetzt wird. Dies wurde für eine Messung in Kapitel 5.5.4 getestet.

Was passiert wenn nicht nur eine Person, sondern mehrere Personen und somit auch mehrere Quellen an verschiedenen Positionen auftreten, ist nicht geklärt. Wie darauf der Algorithmus reagiert, müsste vor einem Praxiseinsatz noch getestet werden. Auch spielt das Wetter, welches in der ganzen Arbeit noch nicht erwähnt wurde, eine Rolle. Sollte der Boden aufgeweicht und sehr matschig sein, werden Signale an deutlich weniger Geophonen ankommen als bei einem trockenen und festen Boden. Auch dies müsste vor einem Praxiseinsatz getestet werden.

Alle Programme die für das Datenprozessing benutzt wurden, sind in MATLAB geschrieben. Wie man diese umschreiben müsste, bzw. ob man mit MATLAB auch für eine Echtzeitauswertung nutzen kann, muss noch geklärt werden.

Trotz einiger Probleme die noch zu lösen sind, ist der Grundstein für eine Praxisanwendung gelegt. Es konnte sehr deutlich gezeigt werden, dass es möglich ist, Daten in einer Geschwindigkeit zu prozessieren, die ausreicht wird um eine Echtzeitauswertung durchzuführen und dabei noch gute Ergebnisse zu erhalten.

7. Zusammenfassung und Ausblick

In meiner Diplomarbeit habe ich mich mit der Detektion und der Lokalisierung von sich bewegenden Objekten beschäftigt, wobei der Schwerpunkt auf der Lokalisierung der Objekte lag, d.h. es sollte dem Objekt eine Position im Raum zugeordnet werden. Das Ziel war es, mit Hilfe eines automatisierten Prozessings von seismischen Daten menschliche Schritte, die eine Quelle seismischer Wellen sind, zu lokalisieren. Mögliche Anwendungsgebiete können ,z.B. eine Überwachung von Museen oder Tresoren innerhalb eines Gebäudes sein. Eine weitere, vorwiegend militärische Nutzung einer seismischen Quelllokalisierung, z.B. von Panzern oder Soldaten ist möglich, soll aber vor allem aus moralischen Gründen nicht im Vordergrund meiner Arbeit stehen.

Die Auswertestrategie der Daten wurde im Laufe der Diplomarbeit parallel zu den Messungen weiterentwickelt. Das Processing war am Ende weitestgehend automatisiert, d.h. ein menschliches Zutun war nicht erforderlich. Auch wurde auf eine große Allgemeingültigkeit der Parameter und der Prozessingschritte Wert gelegt.

Um das Processing von seismischen Daten zu entwickeln, wurden drei Messungen mit den Bezeichnungen „Wiese“, „Messe“ und „GLS“ durchgeführt.

Im Folgenden werden für jede der drei Messungen zuerst die Messung an sich, die Fortschritte im Datenprocessing und schließlich die Ergebnisse zusammengefasst.

Die erste Messung mit der Bezeichnung „**Wiese**“ war eine Testmessung um die Messapparatur kennenzulernen und erste Erfahrungen mit der Lokalisierung von Schritten zu gewinnen. Dafür wurden Vertikalgeophone entlang eines Profils gesteckt. Es wurden zwei Messungen (Senkrecht_1 und Senkrecht_2) mit sehr festen Schritten, welche starke seismische Quellen sind, entlang der Mittelsenkrechten des Geophonprofils ausgewertet. Das Processing der Daten war zu diesem Zeitpunkt nur teilweise entwickelt. Laufzeitdifferenzen wurden über den Zeitpunkt der maximalen Amplitude eines Signals bestimmt. Mit dem Grid Search Algorithmus konnten Laufzeitdifferenzen zu einer Quellposition berechnet werden. Das Minimum des Residuums von theoretischen und gemessenen Laufzeitdifferenzen gibt den Ort der Quelle an. Durch die symmetrische Geophongeometrie kam es zu einer Mehrdeutigkeit bei der Lokalisierung. Es konnte nicht unterschieden werden, ob die Quelle

rechts oder links vom Profil lag. Auch führte die Methode nur bei der Ersten von zwei durchgeführten Messungen auf ein richtiges Ergebnis. Die Schritte der zweiten Messung wurden aufgrund von nicht korrekt bestimmten Laufzeitdifferenzen falsch lokalisiert. Am Ende von Kapitel 5 wird die Messung „Wiese“ nochmals mit dem aktuellen Datenprozessing ausgewertet. Dieses führt bei beiden Messungen zu einem richtigen Ergebnis.

Die zweite Messung mit der Bezeichnung „**Messe**“ wurde auf einem Segelflugplatz hinter der Karlsruher Messe durchgeführt. Mit dieser wurde das finale Datenprozessing entwickelt. Die Geometrie bestand aus acht 3C-Geophonen, die zu einem großen und einem kleinen Viereck gesteckt wurden. Aufgezeichnet wurden zwei verschiedene Arten von Messungen. Einerseits wurden Schritte auf einer gleichbleibenden Stelle aufgenommen (Messungen Tritt). Andererseits wurden vorher festgelegte Wege abgescritten (Messung Pfad). Als optimales Datenprozessing stellten sich folgende Arbeitsschritte heraus. Als erstes wurden die Daten mit einem nullphasigen Bandpassfilter 4ter Ordnung von 20 Hz bis 60 Hz gefiltert. Die Eckfrequenzen wurden anhand einiger Frequenzspektren von verschiedenen Messungen bestimmt und erwiesen sich günstig für alle Messungen. Durch das Filtern konnten Signale, die im Rauschen durch ihre geringe Amplitude nicht sichtbar waren, hervorgehoben werden. Das Filtern war notwendig um einen sta/lta Picker anzuwenden. Dieser konnte anhand des Verhältnisses der Mittelwerte von zwei verschiedenen langen Fenstern die Einsatzzeit von Signalen bestimmen. Es erwies sich als nicht, oder nur sehr schwer möglich herauszufinden, welcher der gepickten Einsatzzeiten von verschiedenen Geophonen zu dem gleichen Signal gehörten. Der sta/lta Picker wurde deshalb für einen anderen Zweck genutzt. Er sollte das Geophon finden, an dem die meisten vermuteten Signale von Schritten deutlich aufgezeichnet wurden. Dieses wird als Triggergeophon bezeichnet. Eine Fensterung mit definierter Start- und Endzeit wurde um die Picks des Triggergeophons durchgeführt. Diese Fenster, mit der vorher definierten Start- und Endzeit, wurden auch in den Zeitreihen aller anderen Geophone ausgeschnitten. Daraufhin wurde die Kreuzkorrelation benutzt um Laufzeitdifferenzen eines Signal zu berechnen. Es wurden alle Fenster eines Picks untereinander kreuzkorrelierte. Dadurch erhält man sehr viel stabilere Laufzeitdifferenzen als es in der ersten Messung „Wiese“ der Fall war. Die Laufzeitdifferenzen konnten wieder mit dem Grid Search Algorithmus zu einer Quellposition berechnet werden. Anhand der Größe des Minimums des Residuums überprüft ein Schwellenwert, ob es sich um eine gute oder schlechte Lokalisierung handelt. Wird der Schwellenwert überschritten, wird die Lokalisierung verworfen. Der Schwellenwert ist der wichtigste Parameter im Prozessing. Er kann Ausreißer und falsche Lokalisierungsergebnisse erkennen. Eine Gleichung oder eine Vorschrift um dem Wert des Schwellenwertes zu bestimmen, konnte nicht gefunden werden. Er hängt mit der Anzahl und Geometrie der Geophone und von der Oberflächenwellengeschwindigkeit ab. Der Grid Search Algorithmus funktioniert jedoch nur, wenn die Geschwindigkeit des Untergrundes bekannt ist. Die kreuzkorrelierten Signale stammen in meinen Messungen hauptsächlich von Oberflächenwellen. Daher musste noch die Oberflächenwellengeschwindigkeit bestimmt werden. Die Geschwindigkeit konnte mit drei verschiedene Methoden auf $165 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ abgeschätzt werden. Zum einem über die P-Wellengeschwindigkeit der obersten Schicht, die durch eine Refraktionsseismik bekannt war, dadurch das die Geschwindigkeit im Grid Search Algorithmus solange variiert wird,

bis die errechnete Position mit der eingemessenen übereinstimmt und anhand der Steigung der Maxima der Kreuzkorrelationsfunktionen, wenn diese mit ihrem effektiven Abstand zur Quelle aufgetragen sind. Daraufhin konnten anschließend alle Messungen Tritt und Pfad richtig lokalisiert werden. Die Standardabweichung der Positionen für die Messungen Tritt lagen zwischen 0,1 m und 0,7 m bei einer Diskretisierung von 10 cm pro Gitterpunkt. Ein Test, bei dem verschiedene Diskretisierungen gewählt wurden hat ergeben, dass mit einer kleineren Diskretisierung im Grid Search Algorithmus keine genauere Position berechnet werden konnte. Die Standardabweichungen blieben gleich. Mehrere Tests mit einer unterschiedlichen Anzahl an Geophonen wurden durchgeführt. Das Ergebnis der Tests war, dass eine Lokalisierung der Schritte mit vier Geophonen gut möglich ist.

Die dritte und letzte Messung mit dem Namen „GLS“ fand in der Nähe der Messung „Messe“ statt, sodass eine ähnliche Untergrundstruktur zu erwarten war. Sie sollte die Ergebnisse der vorherigen Messung „Messe“ verifizieren. Für diese Messung wurde eine Geometrie für die Geophone gewählt, die für eine Praxisanwendung besser geeignet ist, als die Geometrie der Messung „Messe“. Die Geometrie war leichter und schneller aufzubauen und hat den Vorteil, dass sie beliebig erweiterbar ist. Es wurden zwei parallele Profile mit 3C-Geophonen gesteckt. Die Profile hatten einen gewissen Abstand zueinander, wobei sie um den halben Abstand zueinander verschoben waren. Wieder wurden verschiedene Arten von Messungen aufgenommen: Tritte und Pfade. Alle Messungen wurden nach den selben Prozessingschritten wie die Messung „Messe“ ausgewertet. Lediglich die Oberflächenwellengeschwindigkeit und der Schwellenwert mussten angepasst werden. Die Geschwindigkeit konnte auf $140 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ bestimmt werden. Fast alle Messungen Tritt und Pfad konnten richtig lokalisiert werden. Die Standardabweichung der Positionen der Messung Tritte lagen zwischen 0,1 m und 0,3 m bis auf einen Ausreißer mit 1,3 m. Jeweils zwei Messungen, die oberhalb bzw. unterhalb der Profile gemessen wurden, konnten nicht lokalisiert werden. Dort war das Minimum des Residuums nicht fokussiert. Die lokalisierten Positionen variierten daher sehr stark von Schritt zu Schritt. Die eigentliche Position der Schritte konnte nicht bestimmt werden. Ein Test mit einer verschiedenen Anzahl an Geophonen ergab, dass mit acht und selbst mit nur vier Geophonen akzeptable Ergebnisse bei der Lokalisierung der Quelle zustande kommen. Mit zwei Messungen, eine Messung Tritt und eine Messung Pfad, wurde noch testweise eine Echtzeitauswertung simuliert. Das bedeutet, dass die Rechenzeit für die Lokalisierung kleiner sein muss als die Aufzeichnungsdauer der Daten. Es wurden acht der sechzehn Geophone bei einer Diskretisierung von 1 m pro Gitterpunkt benutzt. Dadurch konnte die Rechenzeit verringert werden. Ein gleitendes Fenster mit einer Länge von 0,5 Sekunden und einer Überlappung von einer halben Fensterlänge wurde über die Daten geschoben. Für jedes Fenster wurde eine Lokalisierung durchgeführt. Waren in den Daten keine Signale eines Schrittes, so hat der Schwellenwert dafür gesorgt, dass die Lokalisierung verworfen wurde. War ein Signal eines Schrittes im Fenster enthalten, so wurde der Wert des Minimums des Residuums klein und der Schwellenwert hat eine Lokalisierung nicht verworfen. Die Position des Tritts und der Weg des Pfades konnten so sehr gut rekonstruiert werden. Die Rechenzeit auf einem Quad-Core Computer mit 2 GHz und 16 GB Arbeitsspeicher war nur geringfügig länger, als die Aufzeichnungsdauer der Daten.

Als letztes wurde eine mögliche Praxisanwendung und die dafür notwendigen Änderungen bei der Auswertung diskutiert. Problematisch wird es vor allem dann, wenn das zu überwachende Gebiet sehr groß ist. Dafür müsste das Gebiet in mehrere, kleinere Teilgebiete aufgeteilt werden, so, dass die Berechnung nur mit Geophonen durchgeführt wird, an denen auch ein Signal angekommen ist. Ist das nicht der Fall, dann würden die Geophone, an denen kein Signal angekommen ist, die Größe des Minimums des Residuums stark erhöhen und der Schwellenwert würde die Lokalisierung verwerfen. Alle benutzten Programme sind für MATLAB geschrieben. Um die Rechenzeit für eine Echtzeitauswertung zu verringern, könnte der Code auch in einer schnelleren Programmiersprache wie C oder C++ neu geschrieben werden.

In dieser Arbeit wurde ausschließlich mit Laufzeitdifferenzen gerechnet um Lokalisierungen zu berechnen. Eine weitere Möglichkeit die bereits in Succi et al. (2000) vorgestellt wurde, ist eine Peilung der Quelle. Die dafür notwendigen drei Komponentendaten sind bereits vorhanden, da bei den Messungen „Messe“ und „GLS“ 3C-Geophone benutzt wurden. Ansatzweise ist eine Peilung auch schon im Rahmen dieser Diplomarbeit durchgeführt worden. Es stellte sich jedoch als ein komplexes Thema dar und wurde nicht weiter verfolgt. Die Ergebnisse die man mit Laufzeitdifferenzen erhält, könnte man durch eine Kombination der beiden Methoden, Lokalisierung mit Laufzeitdifferenzen und Peilung, bestätigen.

Dessen ungeachtet sind die erzielten Ergebnisse in meiner Arbeit sehr gut. Im Allgemeinen konnten die Positionen der Schritte mit einem größtenteils automatisierten Prozessing lokalisiert werden. Dabei wurden die Stärken und Schwächen von verschiedenen Geophonometrien und von verschiedenen Auswerteverfahren bestimmt. Zwei zueinander versetzte Profile, wie sie in Kapitel 5.5 verwendet wurden, lieferten mit dem Datenprozessing aus Kapitel 4 gute Ergebnisse und sind für einen möglichen Praxiseinsatz geeignet.

Der Vorteil einer Sicherheitsüberwachung anhand von seismischen Wellen ist vor allem bei den Empfängern zu sehen. Geophone können in den Untergrund eingebracht werden und sind so unsichtbar vor Schäden durch Vandalismus oder Manipulation geschützt. Dadurch ist auch nicht zu erkennen, ob eine Überwachung stattfindet. Auch lässt es sich nicht vermeiden, dass menschliche Schritte bei einem normalen Gang eine Quelle für seismische Wellen sind. In Folge kann die Methode einer seismischen Sicherheitsüberwachung eine zusätzliche Sicherheit zu bereits üblichen Überwachungen mit Kameras oder Wärmesensoren sein.

Literaturverzeichnis

- Allen, Rex V.: Automatic earthquake recognition and timing from single traces. In: *Bulletin of The Seismological Society of America*, Band 68(5):S. 1521–1532, 1978.
- Bendat, Julius S. und Piersol, Allan G.: *Random data : analysis and measurement procedures*. A Wiley-interscience publication. Wiley, New York [u.a.], zweite Auflage, 1986.
- Buttkus, Burkhard: *Spektralanalyse und Filtertheorie in der angewandten Geophysik*. Springer, Berlin, 1991.
- Forbriger, Thomas: *Das elektrodynamische Seismometer. Skriptum zur Seismologischen Messtechnik*. Geophysikalisches Institut am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2007.
- Geiger, Ludwig: Herdbestimmung bei Erdbeben aus den Ankunftszeiten. In: *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-Physikalische Klasse*, 1910.
- Houston, Kenneth M. und McGaffigan, Daniel P.: Spectrum analysis techniques for personnel detection using seismic sensors. SPIE, 2003, Band 5090, S. 162–173.
- Kertz, Walter: *Einführung in die Geophysik*, Band 1: Erdkörper von *BI-Hochschultaschenbücher ; 275*. Bibliogr. Inst., Mannheim, unveränd. nachdr. Auflage, 1989. Literaturangaben.
- Lang, Norbert, Christian B. ; Pucker: *Mathematische Methoden in der Physik*. Hochschul-Taschenbuch. Spektrum, Akad. Verl., Heidelberg [u.a.], 1998.
- Marzinger, Wille Wirth, Mühlbach: *Formeln + Hilfen zur Höheren Mathematik*. Binomi, Springe, 2004.
- Müller, G.: *Theorie seismischer Wellen*. Universität Frankfurt, 1994.
- Reynolds, John M.: *An introduction to applied and environmental geophysics*. Wiley, Chichester [u.a.], 1997.
- Ritter, J.R.R.: *Skriptum zur Digitalen seismologischen Signalverarbeitung und Zeitreihenanalyse*. Geophysikalisches Institut am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2009.
- Sambridge, M. S. und Kennett, B. L. N.: A novel method of hypocentre location. In: *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society*, 1986.

- Stelzer, Zacharias: *Akquisition und Interpretation von Oberflächenwellen für die Wellenforminversion*. Diplomarbeit, Geophysikalisches Institut am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2010.
- Succi, George P., Clapp, Daniel, Gampert, Robert und Prado, Gervasio: Footstep detection and tracking. SPIE, 2001, Band 4393, S. 22–29.
- Succi, George P., Prado, Gervasio, Gampert, Robert, Pedersen, Torstein K. und Dhaliwal, Hardave: Problems in seismic detection and tracking. SPIE, 2000, Band 4040, S. 165–173.
- Thome, Helmut: *Zeitreihenanalyse: eine Einführung für Sozialwissenschaftler und Historiker*. Oldenbourg, München, 2005.
- Waldhauser, Felix und Ellsworth, William L.: A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the northern hayward fault, california. In: *Bulletin of the Seismological Society of America*, Band 90(6):S. 1353–1368, 2000.
- Yilmaz, Ö.: *Seismic data analysis*, Band 1: von *Investigations in geophysics ; 10*. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, 1987.
- Zürcher, Thomas, Christoph ; Frank: *Bau und Energie*, Band 2: Bauphysik. VDF, Zürich, 1998.

Anhang

A Programmbeschreibungen

In diesem Abschnitt des Anhangs werden kurz die benutzten Programme beschrieben. Alle Berechnungen sind mit MATLAB® von The MathWorks™ in der Version 7.8.0.347 (R2009a) durchgeführt worden. Die meisten Programme sind selbst geschrieben. Sollte dies bei einzelnen nicht der Fall sein, wird die Quelle angegeben.

MATLAB Programme

bandpassfilter.m

Der Filter benötigt die Zeitreihe, die Eckfrequenzen, die Ordnung, ob der Filter ein Zero-phasefilter sein soll oder nicht und die Samplingrate in Sekunden. Als Output liefert die Funktion die gefilterte Zeitreihe. Übergibt man den Filter eine Matrix mit vielen Zeitreihen, so erhält man wieder eine Matrix derselben Größe mit den gefilterten Zeitreihen zurück.

seg2load.m

Diese Funktion kann Dateien im SEG-2 Format in MATLAB einlesen. Sie wurde ursprünglich von Pièce vom Swiss Federal Institute of Technology geschrieben, ist modifiziert von Vilhelm von der Charles Universität in Prag und ist im Internet frei verfügbar. Es werden die Daten wieder als Matrix eingelesen. Die Zeilengröße bestimmt die Anzahl der Geophone, die Spaltengröße die Anzahl der aufgezeichneten Samples. Die Headerinformationen sind wieder als struct gespeichert, wobei alles in einem struct gespeichert ist. Link: <http://web.natur.cuni.cz/uhigug> Stand: 11.03.2010

gridsearch.m

Diese Funktion ist das Herzstück der Auswertung. In dieser wird das Residuum berechnet, dessen Minimum die Position der Quelle anzeigt. Dafür benötigt die Funktion folgende Parameter. Die Positionen der Geophone, die Untergrundgeschwindigkeit, die Laufzeitdifferenzen von jedem Geophonpaar und die Größe der berechneten Fläche. Das Prinzip hinter dem Grid Search ist in Kapitel 4.4 beschrieben. Die einzige Outputvariable ist das Residuum.

komp splitter.m

Die Datei zerlegt drei Komponentendaten in ihre einzelnen Komponenten. Die Voraussetzung dafür ist, dass die Komponenten immer in der gleichen Reihenfolge z.B. V, H1, H2 aufgenommen wurden. Die Datei prüft die Anzahl der Spalten und speichert jede dritte Spalte in eine neue Matrix. So ist das Handling mit den drei Komponenten sehr einfach.

Lokalisierer.m

Dies ist das Hauptprogramm in dessen alle anderen Programme aufgerufen werden. Es sind alle notwendig Parameter hier definiert. Im Folgenden werden diese aufgezählt:

Ordnername: Ordnername in dem die Daten enthalten sind.

Dateiname: Dateiname der Messung mit Endung.

Samplingrate: Samplinginterval in Sekunden.

AnzahlGeo: Die Anzahl der benutzten Geophone.

Komponente: Bei 3C Geophonen kann hier eingestellt werden, welche Komponente benutzt werden soll.

f1: Untere Eckfrequenz des Filters.

f2: Obere Eckfrequenz des Filters.

Ordnung: Die Ordnung des Filters (ganzzahlig).

Zerophase: 1 oder 0.

Vorpick: Länge des Fensters welches kreuzkorreliert wird vor dem Pick in Samples.

Hinterpick: Länge des Fensters welches kreuzkorreliert wird nach dem Pick in Samples.

Geschwindigkeit: Untergrundgeschwindigkeit (auf Diskretisierung achten!).

PosGeo: Die Positionen der Geophone.

Flaeche: Die Größe des berechneten Gitters. Hiermit und mit PosGeo kann die Diskretisierung bestimmt werden. Dabei ist darauf zu achten, dass die Geschwindigkeit auch mit der richtigen Einheit angegeben wird.

maxResiduum: Größe des Schwellenwertes in Sekunden.

Hier wird auch die Kreuzkorrelation der einzelnen Fenster berechnet, sowie deren Maximum bestimmt um die Laufzeitdifferenz jedes Geophonpaares zu erhalten. Nach den Grid Search wird durch den vorher definierten Schwellenwert überprüft, ob die Lokalisierung verworfen werden soll oder nicht. Ist dies nicht der Fall kann diese dargestellt und die Abbildung in einem Ordner gespeichert werden.

stalta.m

Die Funktion des sta/lta Picker wurde von Frederik Simons von der Princeton University, New Jersey, USA geschrieben und ist auf seiner Homepage frei verfügbar. Link: <http://geoweb.princeton.edu/people/simons/software.html> Stand: 11.05.2010

Die Funktionsweise eines sta/lta Picker ist im Grundlagenteil 4.3.2 beschrieben. Der sta/lta Picker benötigt einige Parameter, die im Folgenden mit ihrer jeweiligen Funktion aufgelistet ist. Der originale Kommentar aus der Funktion erklärt den Parameter.

sig	Vector containing the signal
DT	Sampling interval (s)
BE	Beginning and end time of signal ([s s])
STA	Short-term averaging window length (s)
LTA	Long-term averaging window length (s)
TR	Value of STA/LTA ratio that triggers
DTR	Value of STA/LTA ratio that untriggers
PEM	Time buffer added before triggering time (s)
PET	Time-buffer added after detraggering time (s)
PNL	Minimum window length of any triggered section (s)
ATL	Time between trigger and dettrigger that must be exceeded (s)

Der Picker liefert einige Parameter zurück. Diese sind wieder mit dem originalen Kommentar, der den Parameter erklärt, hier nachzulesen.

trigt	Matrix with begin and end times of triggered sections (s)
stav	Short-term average of absolute values of detrended signal
ltav	Long-term average of absolute values of detrended signal
ratio	Ratio of short-term to long-term average
tim1	Time axis for 'ratio'
tim2	Time axis for 'stav'
tim3	Time axis for 'ltav'
trigs	Vector with triggering points, in samples
drtigs	Vector with detraggering points, in samples

SegyMAT Toolbox für MATLAB

SegyMAT ist eine Toolbox für MATLAB, in der Funktionen enthalten sind, die Dateien im SEG-Y Format einlesen können. So z.B. die Funktion *ReadSegy* oder *wiggle*. Mit dem Befehl *segyrat* kann man ein GUI aufrufen. Herunterladbar ist diese Toolbox unter folgenden Link: <http://segyrat.sourceforge.net/> Stand:08.11.2009

ReadSegy.m

Diese Funktion ist Teil der SegyMAT Toolbox für MATLAB. Mit dieser kann man die allgemeinen Headerinformationen über die Messung, Headerinformationen über jede Spur und die Daten einlesen. Die Headerinformationen werden als struct, die Daten als Matrix gespeichert. Jede Spalte enthält die Daten eines Geophons. Eine Spalte hat die Länge der aufgezeichneten Samples. Die Anzahl der Zeilen ist gleich der Anzahl der aufgezeichneten Geophone.

wiggle.m

Mit dieser mitgelieferten Funktion der Toolbox SegyMAT kann man Seismogrammmontagen plotten. Die Nummer des Geophons wird auf die x-Achse, die Samples von oben nach unten auf die y-Achse aufgetragen. Stellt man keinen zusätzlichen Skalierungsfaktor ein, berechnet die Funktion automatisch die optimale Darstellung.

B Inhalt der CD-ROM

Auf dieser CD-ROM sind die Daten der Messungen, die Beschreibungen und die benötigten Programme zur Auswertung der Daten gespeichert. Auf der CD-ROM sind zwei Verzeichnisse /Daten und /Programme.

Im Verzeichnis /Daten sind die aufgezeichneten Daten der vier durchgeführten Messungen in einem entsprechenden Ordner gespeichert. Die Messung BoxStern wurde in der Arbeit nicht ausgewertet. Die notwendigen Informationen zur Messung sind als Textdatei und sofern vorhanden die Übersichtskarten als png Datei und MATLAB Figure gespeichert.

Im Verzeichnis /Programme sind alle Programme zur Auswertung und die MATLAB Toolbox gespeichert die notwendig ist um SEG-Y Dateien in MATLAB einzulesen. Eine Beschreibung der Programme ist im Anhang A zu finden.

```
|  
|-- Daten /  
| |-- BoxStern /  
| |-- GLS /  
| |-- Messe /  
| |-- Wiese /  
|-- Programme /  
| |-- bandpassfilter.m  
| |-- seg2load.m  
| |-- gridsearch.m  
| |-- kompsplitter.m  
| |-- Lokalisierer.m  
| |-- segymat-1.3.pdf  
| |-- SegyMAT-1.3.tgz  
| |-- SegyMAT-1.3.zip  
| |-- stalta.m  
|-- SHei_Diplomarbeit_2010.pdf
```

C Bilder der Messgeräte



(a) Vertikalgeophon



(b) 3C-Geophon



(c) Geode

Abbildung C.1: Bilder der verwendeten Messgeräte. (a) Ein Vertikalgeophon des Typs SM-4 der Firma Input/Output Netherlands (ION). (b) Ein 3C-Geophon. Auf dem Gehäuse ist eine Libelle angebracht um das Geophon gerade zu stecken. Die drei Spieße an der Unterseite des Gehäuses sind nicht zu erkennen. Die drei Komponenten sind mit VERT, HORZ 1 und HORZ 2 gekennzeichnet. (c) Eine Geode der Firma Geometrics. Dies ist ein A/D Wandler mit 24 Kanälen.

Danksagung

Ich möchte mich bei all Denjenigen bedanken, die mich während des ganzen Studiums und vor allem im letzten Jahr so toll und herzlich unterstützt haben.

Vielen Dank an Thomas Bohlen für die sehr gute Betreuung im letzten Jahr und für die Übernahme des Referats.

Ebenfalls einen herzlichen Dank an Stefan Jetschny, der im Büro gegenüber mit unzähligen Fragen gelöchert wurde aber immer eine passende Antwort hatte. Auch Abseits des Instituts war es mit dir immer eine tolle Zeit.

Vielen Dank an Joachim Ritter für die Übernahme des Korreferats.

Ein Moin geht in das Diplomandenzimmer 104 an Tobias Geib, Martin Schäfer und Zacharias Stelzer. Es war ein super Jahr mit Euch. Nicht nur die Zeit zwischen der Wissenschaft, sondern vor allem die anregenden und hitzigen fachlichen Diskussionen, machen das Jahr zum schönsten im Studium.

Der Arbeitsgruppe Angewandte Geophysik möchte ich ebenfalls danken. Die gute Stimmung in der Gruppe trug maßgeblich dazu dabei, dass ich jeden Tag aufs Neue gerne in die Uni gegangen bin.

Ein großer Dank geht an die fleißigen Messhelfer Matthias Heck, Martin Schäfer, Zacharias Stelzer und Niklas Thiel, die bei eisiger Kälte, Wind und Regen nie müde wurden.

Danke an Anja Diez, die die Arbeit unermüdlich Korrektur las.

Auch vielen Dank an meinen Mitbewohner und Kommilitonen Michael Bachmann der regelmäßig mein Leiden anhören musste und es immer wieder verstand mich vom Unialltag abzulenken.

Danke an meine Freundin Tanja, die im letzten Jahr öfters auf mich verzichten musste und „jedoch dann nun auch“ mit ihren vielen hilfreichen Kommentaren und Anmerkungen ein maßgebliches Stück zum Gelingen der Arbeit beitrug.

Zuletzt ein großer Dank an meine Eltern für die finanzielle aber auch vor allem für die moralische Unterstützung und für das Vertrauen in den letzten fast sechs Jahren. Danke vielmals!