



Stefanie Plahs BSc

Schallemissionsmessung von Bruchereignissen in Gesteinen

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieurin

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften - Geotechnik und Wasserbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer/ Betreuerin:

O. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Wulf Schubert

Institut für Felsmechanik und Tunnelbau

Technische Universität Graz

Dipl.-Ing. Angelika Klammer

Institut für Felsmechanik und Tunnelbau

Technische Universität Graz

Graz, August 2015

EIDESSTÄTLICHE ERKLÄRUNG

AFFIDAVIT

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

Datum / Date

Unterschrift / Signature

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt Herrn O. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Wulf Schubert für die hervorragende Betreuung. Sie fanden immer eine freie Minute um mir bei meinen Fragen durch kritisches Hinterfragen weiterzuhelfen.

Außerdem möchte ich mich herzlich bei Frau Dipl.-Ing. Angelika Klammer bedanken für die Anregung zu diesem interessanten Thema und die tatkräftige Unterstützung in der Anfangsphase. Vielen Dank auch an Herrn Dipl.-Ing. Michael Henzinger, der stets ein offenes Ohr für meine Anliegen hatte und mich bei der Fertigstellung der Arbeit unterstützte.

Ebenso bedanke ich mich bei Herrn Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Manfred Blümel und Herrn Anton Kaufmann für die Unterstützung bei der Vorbereitung und Durchführung der experimentellen Untersuchungen.

Bedanken möchte ich mich auch bei meinen Freunden in Graz. Hervorheben möchte ich besonders unsere Mädlsrunde, ohne euch wären diese Jahre nur halb so schön gewesen!

Und nicht zuletzt danke ich meinen Eltern und meinem Bruder für die moralische Unterstützung sowie die Ermöglichung meines Studiums.

Abstract

The acoustic emission technique is suitable for rockburst forecast in mining and tunnelling. In the laboratory the three dimensional localization of acoustic emissions is useful to investigate the microcracking activity and failure process.

Acoustic emissions (AE) are transient elastic waves. These waves are generated by the sudden release of energy in a stressed structure. With the components of an acoustic emission system the waves can be recorded, stored and analyzed. To investigate the generation of AEs during laboratory experiments the calibration of the measuring system for each rock type is essential.

Within this thesis a concept for the calibration of the AE-system (Micro-II Digital AE System) was developed and tested on different rock types (limestone, gabbro, magnesite). Furthermore laboratory tests (uniaxial compression test) with AE data acquisition were carried out and analyzed.

An important part of the calibration was the verification and optimization of the localization accuracy. With simulated AE sources at known positions on the surface the accuracy was estimated. Varying the input parameters the effect on the localization of AEs was investigated. As controlling factors the detection threshold, the propagation velocity and some system parameters were determined.

The localization of acoustic emissions after calibration leads to a satisfying accuracy for the homogeneous rock specimens (limestone and gabbro), while for layered rock samples (magnesite) it was not possible to improve the localization accuracy. The use of the 3D localization method which is integrated in the software assumes a homogeneous, isotropic material. As a result, this method is not suitable for anisotropic materials. Other influences to be taken into account are the propagation velocity and the attenuation of the acoustic emission signals. This illustrates the need of additional investigation.

Differences of the acoustic emission activity were observed for the rock specimens (limestone and gabbro) during the laboratory experiments. A correlation between located AE events and cracks on the rock surface were observed.

Kurzfassung

Die Schallemissionstechnik eignet sich zur Vorhersage und Warnung vor dem Versagen durch Bergschlag im Berg- und Tunnelbau. Bei Laborversuchen ist die räumliche Positionsbestimmung der Schallemissionen von besonderem Interesse. Dadurch lässt sich der Bereich der Instabilität und die Mikrorissbildung zurückverfolgen.

Schallemissionen (SE) sind transiente elastische Wellen die durch plötzliches Freisetzen von Energie in einem unter Spannung stehenden Gesteinskörper generiert werden. Mit den Komponenten des Schallemissionssystems werden diese Wellen aufgezeichnet, gespeichert und ausgewertet. Vor der Durchführung von Laborversuchen mit der Aufzeichnung von SE-Daten ist das Messsystem zu kalibrieren.

Im Zuge dieser Arbeit wurde eine Systematik der Kalibrierung des SE-Systems (Micro-II Digital AE System) erarbeitet und an drei Gesteinsarten (Kalkstein, Gabbro, Magnesit) getestet. Ein weiterer Teil der Arbeit befasst sich mit der Durchführung und Auswertung von Laborversuchen.

Einen wesentlichen Bestandteil der kalibrierenden Tätigkeiten stellte die Überprüfung und Optimierung der Lokalisierungsgenauigkeit dar. Diese wurde mit generierten Bruchereignissen an gekennzeichneten Positionen auf der Oberfläche abgeschätzt. Die Einflussgrößen auf die Lokalisierung wurde durch Variation der Eingabeparameter untersucht und analysiert. Als maßgebende Einflussfaktoren stellten sich die Nachweisschwelle, die Ausbreitungsgeschwindigkeit und die Systemparameter heraus.

Bei den homogenen Gesteinsproben (Kalkstein und Gabbro) wurde eine zufriedenstellende Genauigkeit der Lokalisierung erreicht. Im Gegensatz dazu ließ sich die Lokalisierung der geschichteten Gesteinsprobe (Magnesit) nicht optimieren. Bei diesen Randbedingungen kann die 3D-Ortung der verwendeten Software nicht verwendet werden, dabei wird ein homogenes, isotropes Material vorausgesetzt. Bei einer geschichteten Probe sind außerdem Einflüsse auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit und die Abschwächung der SE-Signale zu berücksichtigen. Hier bedarf es weiterer Untersuchungen.

Die Schallemissionsaktivität der Gesteinsproben (Kalkstein und Gabbro) unterschied sich bei den durchgeführten Laborversuchen. Die Lokalisierungsergebnisse zeigten eine Korrelation zwischen georteten Schallemissionsereignissen und Rissen an der Gesteinsoberfläche.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ziel der Arbeit	2
2	Theoretische Grundlagen	3
2.1	Definitionen von Emissionen	3
2.1.1	Transiente Emissionen (burst emission).....	3
2.1.2	Kontinuierliche Emissionen (continuous emission).....	4
2.1.3	Schallemissionsgeräusche (acoustic emission noise).....	4
2.1.4	Hintergrundgeräusche (background noise)	4
2.1.5	Störgeräusche (spurious noise).....	4
2.2	Messkette	5
2.2.1	Schallemissionssensor (acoustic emission sensor).....	5
2.2.2	Vorverstärker (preamplifier)	7
2.2.3	Koaxialkabel (coax cable).....	8
2.2.4	Schallemissionssystem (acoustic emission system)	8
2.3	Signalparameter	10
2.3.1	Ankunftszeit (arrival time)	10
2.3.2	Maximalamplitude (peak amplitude).....	10
2.3.3	Anstiegszeit (rise time)	11
2.3.4	Signaldauer (duration)	11
2.3.5	Anzahl der Überschwingungen (count to peak).....	11
2.3.6	Stärke eines Schallemissionssignals (burst signal strength)	11
2.3.7	Energie eines Schallemissionssignals (burst signal energy)	11
2.3.8	Geeignete Signalparameter für die Auswertung von Schallemissionen.....	12
2.4	Lokalisierung von Schallemissionsereignissen.....	13
2.4.1	Ausbreitungsgeschwindigkeit in Gesteinen	13
2.4.2	Wellenausbreitung.....	13
2.4.2.1	<i>Körperwellen</i>	14
2.4.2.2	<i>Oberflächenwellen</i>	15
2.4.2.3	<i>Auftreffen der SE-Wellen auf eine Grenzfläche</i>	16
2.4.3	Lokalisierungsverfahren.....	17
2.4.3.1	<i>Iteratives Lokalisierungsverfahren (nach [26])</i>	17

2.4.3.2	<i>Iteratives Lokalisierungsverfahren (allgemein)</i>	19
2.4.3.3	<i>Hyperbel-Methode</i>	20
2.4.3.4	<i>Potentielle Fehlerquellen</i>	20
2.5	Einaxialer Druckversuch	22
2.5.1	Versuchsvorbereitung	22
2.5.2	Materialverhalten	22
2.5.3	Charakteristik der Schallemissionen.....	24
3	Kalibrierung des Schallemissionssystems	27
3.1	Kalibrierende Tätigkeiten	27
3.1.1	Zusammensetzung der Messkette.....	27
3.1.2	Platzierung der SE-Sensoren	28
3.1.3	Überprüfung der Kopplung	29
3.1.4	Ermittlung der Ausbreitungsgeschwindigkeit	30
3.1.5	Systemeinstellungen des SE-Systems	31
3.1.6	Ermittlung des elektronischen Rauschens.....	32
3.1.7	Konfiguration des parametrischen Eingangs	32
3.2	Kalibrierende Tätigkeiten: Kalkstein	33
3.2.1	Überprüfung der Kopplung	33
3.2.2	Ermittlung der Ausbreitungsgeschwindigkeit	34
3.2.3	Überprüfung Lokalisierungsgenauigkeit	35
3.2.3.1	<i>Rückrechnung auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit</i>	37
3.2.3.2	<i>Variation der Ausbreitungsgeschwindigkeiten</i>	40
3.2.3.3	<i>Variation der „Location Setup Parameter“</i>	41
3.2.3.4	<i>Variation der Nachweisschwelle</i>	42
3.2.3.5	<i>Variation der „AE Timing Parameter“</i>	42
3.2.4	Ermittlung des elektronischen Rauschens mit aufgebracht Vorlast.....	44
3.3	Kalibrierende Tätigkeiten: Gabbro	45
3.3.1	Überprüfung der Kopplung	45
3.3.2	Ermittlung der Ausbreitungsgeschwindigkeit	46
3.3.3	Überprüfung Lokalisierungsgenauigkeit	46
3.3.3.1	<i>Variation der Ausbreitungsgeschwindigkeiten</i>	48
3.3.3.2	<i>Variation der „AE Timing Parameter“</i>	49
3.3.4	Ermittlung des elektronischen Rauschens mit aufgebracht Vorlast.....	50
3.4	Kalibrierende Tätigkeiten: Magnesit	51

3.4.1	Versetzte Platzierung der Schallemissionssensoren	51
3.4.2	Angepasste Platzierung der Schallemissionssensoren	53
4	Laborversuche	57
4.1	Versuchsdurchführung.....	57
4.2	Versuchsergebnisse	59
4.2.1	Kalkstein	59
4.2.1.1	<i>Felsmechanische Kennwerte</i>	60
4.2.1.2	<i>Auswertung der Schallemissionsdaten</i>	61
4.2.2	Gabbro.....	68
4.2.2.1	<i>Felsmechanische Kennwerte</i>	69
4.2.2.2	<i>Auswertung der Schallemissionsdaten</i>	70
4.3	Gegenüberstellung der Ergebnisse	78
5	Zusammenfassung und Ausblick	80
5.1	Zusammenfassung und Interpretation	80
5.2	Ausblick	83
	Literatur	84
	Anhang	87

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Zwei akustische Verfahren (a. Ultraschall-; b. Schallemissionstechnik) [13]	1
Abbildung 2.1: Aufbau SE-Sensor [13]	6
Abbildung 2.2: PAC Nano 30 (links); Eichkurve (rechts) [25]	7
Abbildung 2.3: PAC 2/4/6 Vorverstärker [24]	7
Abbildung 2.4: PCI-2 Karte [26]	9
Abbildung 2.5: SE-Parameter eines transienten Signals [11]	10
Abbildung 2.6: Körperwellen (a. Kompressionswelle; b. Scherwelle) [13]	14
Abbildung 2.7: Oberflächenwellen (a. Rayleigh-Welle; b. Love-Welle) [13]	15
Abbildung 2.8: Auftreffende P-Welle auf eine Grenzfläche [13]	16
Abbildung 2.9: Direkte Wellenausbreitung von der SE-Quelle zum SE-Sensor	17
Abbildung 2.10: zwei Versagensmöglichkeiten von Gesteinen [44]	22
Abbildung 2.11: Phasen des Bruchprozesses [3]	23
Abbildung 2.12: kumulierte Schallemissionskurve [20]	25
Abbildung 2.13: Kaisereffekt [19]	26
Abbildung 3.1: Schema Messkette	27
Abbildung 3.2: Anordnung der SE-Sensoren. Draufsicht (links); Abwicklung (rechts)	28
Abbildung 3.3: Bleistiftminenbruch [13]	29
Abbildung 3.4: SE-Welle durch den Prüfkörper (links); nahe der Oberfläche (rechts)	30
Abbildung 3.5: generierte SE-Wellen mittels Bleistiftminenbruch	34
Abbildung 3.6: Positionen der Bleistiftminenbrüche (rotes x)	35
Abbildung 3.7: Draufsicht und Ansicht georteter Bruchereignisse (rote Punkte)	36
Abbildung 3.8: Bleistiftminenbruch bei Position 3	37
Abbildung 3.9: Draufsicht und Ansicht georteter Bruchereignisse (rote Punkte) mit variieren Ausbreitungsgeschwindigkeiten	40

Abbildung 3.10: Draufsicht georteter Bruchereignisse (rote Punkte) mit variierten Ausbreitungsgeschwindigkeiten	41
Abbildung 3.11: Draufsicht und Ansicht georteter Bruchereignisse (rote Punkte).....	42
Abbildung 3.12: Draufsicht und Ansicht georteter Bruchereignisse (rote Punkte).....	42
Abbildung 3.13: Draufsicht georteter Bruchereignisse (rote Punkte) der Varianten 2-5.....	43
Abbildung 3.14: generierte SE-Wellen mittels Bleistiftminenbruch.....	46
Abbildung 3.15: Draufsicht und Ansicht georteter Bruchereignisse (rote Punkte) Horizontale Ebene (links); von SE-Sensor 1 zu SE-Sensor 3 (rechts)	47
Abbildung 3.16: Positionen der Bleistiftminenbrüche (rotes x)	48
Abbildung 3.17: Draufsicht georteter Bruchereignisse (rote Punkte) mit variierten Ausbreitungsgeschwindigkeiten	48
Abbildung 3.18: Draufsicht und Ansicht georteter Bruchereignisse (rote Punkte) der unterschiedlichen Varianten	49
Abbildung 3.19: Magnesit	51
Abbildung 3.20: generierte SE-Wellen mittels Bleistiftminenbruch.....	52
Abbildung 3.21: Draufsicht und Ansicht georteter Bruchereignisse (rote Punkte).....	53
Abbildung 3.22: Anordnung der SE-Sensoren. Draufsicht (links); Abwicklung (rechts)	53
Abbildung 3.23: Draufsicht und Ansicht georteter Bruchereignisse (rote Punkte).....	54
Abbildung 3.24: Positionen der Bleistiftminenbrüche (rotes x)	55
Abbildung 3.25: Ansicht normal zur Schichtung	56
Abbildung 3.26: Ansicht parallel zur Schichtung.....	56
Abbildung 4.1: MTS 815 und SE-System	57
Abbildung 4.2: Versuchsdurchführung.....	58
Abbildung 4.3: eingebaute Gesteinsprobe in der Prüfmaschine (links); zerstörte Gesteinsprobe nach dem einaxialen Druckversuch (rechts)	59
Abbildung 4.4: Spannungs-Dehnungsdiagramm	60
Abbildung 4.5: 3D Ansicht der georteten Bruchereignisse (rote Punkte). vor dem Erreichen der einaxialen Druckfestigkeit (links); zu Versuchsende (rechts)	61
Abbildung 4.6: kumulierte Hits über die Versuchsdauer.....	62

Abbildung 4.7: Schallemissionsaktivität.....	63
Abbildung 4.8: Draufsicht georteter Bruchereignisse (rote Punkte).....	63
Abbildung 4.9: Bruch in der Nähe von Sensor 5 (oben) und Sensor 6 (unten)	63
Abbildung 4.10: absolute Schallemissionsenergie	64
Abbildung 4.11: Schallemissionsaktivität.....	65
Abbildung 4.12: Hitintensität	66
Abbildung 4.13: kumulierte Hits des 1. und 2. Lastzyklus (SE-Kanal 1).....	66
Abbildung 4.14: kumulierte Hits bis UCS (SE-Kanal 1)	67
Abbildung 4.15: eingebaute Gesteinsprobe in der Prüfmaschine (links); zerstörte Gesteinsprobe nach dem einaxialen Druckversuch (rechts)	68
Abbildung 4.16: Spannungs-Dehnungsdiagramm.....	69
Abbildung 4.17: 3D Ansicht der georteten Bruchereignisse (rote Punkte). vor dem Erreichen der einaxialen Druckfestigkeit (links); zu Versuchsende (rechts)	70
Abbildung 4.18: erfasste Hits über die Versuchsdauer.....	71
Abbildung 4.19: Schallemissionsaktivität.....	72
Abbildung 4.20: Draufsicht georteter Bruchereignisse (rote Punkte).....	72
Abbildung 4.21: Bruch in der Nähe von Sensoren 3/ 1 (oben) und Sensor 4 (unten)	72
Abbildung 4.22: absolute Schallemissionsenergie	73
Abbildung 4.23: Schallemissionsaktivität.....	74
Abbildung 4.24: Hitintensität	75
Abbildung 4.25: kumulierte Hits des 1. und 2. Lastzyklus (SE-Kanal 5).....	75
Abbildung 4.26: kumulierte Hits bis UCS (SE-Kanal 5)	76
Abbildung 0.1: elektronisches Rauschen der SE-Sensoren	87
Abbildung 0.2: Rauschen unter Vorlast	90
Abbildung 0.3: Spannungs-Dehnungsdiagramm (1. Lastzyklus).....	90
Abbildung 0.4: Zerstörungsarbeit.....	91
Abbildung 0.5: Spannungs-Dehnungsdiagramm (inkl. Volumendehnung)	91
Abbildung 0.6: Rauschen unter Vorlast	93
Abbildung 0.7: Spannungs-Dehnungsdiagramm (1. Lastzyklus).....	93

Abbildung 0.8: Zerstörungsarbeit.....	94
Abbildung 0.9: Spannungs-Dehnungsdiagramm (inkl. Volumendehnung)	94

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Zusammensetzung des Messsystems bei den durchgeführten Versuchen....	28
Tabelle 3.2: gesteinspezifische Richtwerte der „AE Timing Parameter“	32
Tabelle 3.3: Überprüfung der Kopplung.....	33
Tabelle 3.4: Koordinaten der Schallemissionssensoren.....	33
Tabelle 3.5: berechnete Ausbreitungsgeschwindigkeiten.....	34
Tabelle 3.6: Ausgangswerte der SE-Parameter	35
Tabelle 3.7: berechnete Ausbreitungsgeschwindigkeiten (Variante 1).....	38
Tabelle 3.8: berechnete Ausbreitungsgeschwindigkeiten (Variante 2).....	39
Tabelle 3.9: Variation der Ausbreitungsgeschwindigkeiten	40
Tabelle 3.10: untersuchte Varianten der Parameter EDV/ ELV/ OV	41
Tabelle 3.11: untersuchte Varianten der Parameter PDT/HDT/HLT	43
Tabelle 3.12: kalibrierte SE-Parameter.....	44
Tabelle 3.13: Überprüfung der Kopplung.....	45
Tabelle 3.14: Koordinaten der Schallemissionssensoren.....	45
Tabelle 3.15: berechnete Ausbreitungsgeschwindigkeiten.....	46
Tabelle 3.16: SE-Parameter Vorversuch	47
Tabelle 3.17: untersuchte Varianten der Parameter PDT/HDT/HLT	49
Tabelle 3.18: kalibrierte SE-Parameter.....	50
Tabelle 3.19: berechnete Ausbreitungsgeschwindigkeiten.....	52
Tabelle 3.20: berechnete Ausbreitungsgeschwindigkeiten.....	56
Tabelle 4.1: felsmechanische Kennwerte	60
Tabelle 4.2: felsmechanische Kennwerte	69
Tabelle 4.3: Vergleich der erfassten Hits und georteten SE-Ereignisse.....	78
Tabelle 4.4: Vergleich der Spannungsniveaus der Phasen des Bruchprozesses	79

Tabelle 0.1: Ausbreitungsgeschwindigkeiten der SE-Welle in drei Ausbreitungsrichtungen	88
Tabelle 0.2: Berechnungsblatt Ausbreitungsgeschwindigkeit (Variante 1)	89
Tabelle 0.3: Berechnungsblatt Ausbreitungsgeschwindigkeit (Variante 2)	89
Tabelle 0.4: Ausbreitungsgeschwindigkeiten der SE-Welle in drei Ausbreitungsrichtungen	92
Tabelle 0.5: Zusammensetzung des Messsystems	95
Tabelle 0.6: Koordinaten der SE-Sensoren	95
Tabelle 0.7: Überprüfung der Kopplung.....	95
Tabelle 0.8: Überprüfung der Kopplung.....	96
Tabelle 0.9: Koordinaten der Schallemissionssensoren.....	96
Tabelle 0.10: Ausbreitungsgeschwindigkeiten der SE-Welle in drei Ausbreitungsrichtungen	96
Tabelle 0.11: untersuchte Varianten der Parameter PDT/HDT/HLT	97
Tabelle 0.12: Überprüfung der Kopplung.....	97
Tabelle 0.13: Koordinaten der Schallemissionssensoren.....	98
Tabelle 0.14: Ausbreitungsgeschwindigkeiten der SE-Welle in drei Ausbreitungsrichtungen	98
Tabelle 0.15: Berechnungsblatt Ausbreitungsgeschwindigkeit normal zur Schichtung	99
Tabelle 0.16: Berechnungsblatt Ausbreitungsgeschwindigkeit parallel zur Schichtung	99

Abkürzungen

EDV	Event Definition Value
ELV	Event Lockout Value
HDT	Hit Definition Time
HLT	Hit Lockout Time
OV.....	Over-Calibration Value
SE	Schallemission
SET	Schallemissionstechnik
PAC	Physical Acoustics Corporation
PCI.....	Peripheral Component Interconnect
PDT.....	Peak Definition Time
UCS	unconfined compressive strength

1 Einleitung

Die Schallemissionstechnik SET (acoustic emission technique) ermöglicht die Erfassung von Schallemissionen und gehört zur Gruppe der zerstörungsfreien Prüfungsverfahren. Im Bereich der Bauingenieurwissenschaften eignet sich diese Technik für die Untersuchung des Werkstoffverhaltens unter Belastung stehender Materialien (z.B. Beton, Holz, Gestein).

In der Geotechnik wird die SET außerdem für die Überwachung von Minen und Tunneln, aber auch von Gründungen und Dämmen genutzt. Die Entwicklung hat mit der Motivation begonnen das Bergschlagrisiko in massiven, spröden Gestein vorherzusagen und zu reduzieren [13, 22]. Unter Bergschlag versteht man das schlagartige Versagen des hoch beanspruchten Gesteins durch die plötzliche Freisetzung von gespeicherter elastischer Energie [42].

Schallemissionen SE (acoustic emissions AE) sind definiert als transiente elastische Wellen, die während der Belastung durch plötzliche Freisetzung von gespeicherter, elastischer Energie in Materialien generiert werden [13, 22]. Diese Wellen breiten sich von der Entstehungsquelle (SE-Quelle) durch das Material aus bis sie zur Oberfläche gelangen. Durch den an der Oberfläche angebrachten Schallemissionssensor kann diese erzeugte Teilchenbewegung (durch die SE-Welle) an der Oberfläche in elektrische Signale umgewandelt werden [29]. Durch das Schallemissionssystem werden die Daten für die Analyse gespeichert, ausgewertet und weiterverarbeitet.

Da die SE-Sensoren keinen Einfluss auf die Schallemissionsquelle haben (siehe Abbildung 1.1 b.), handelt es sich um ein passives Verfahren [13]. Neben der Schallemissionstechnik gibt es eine Vielzahl von weiteren akustischen Methoden, beispielsweise die Durchschallung eines Materials mittels Ultraschall (siehe Abbildung 1.1 a.).

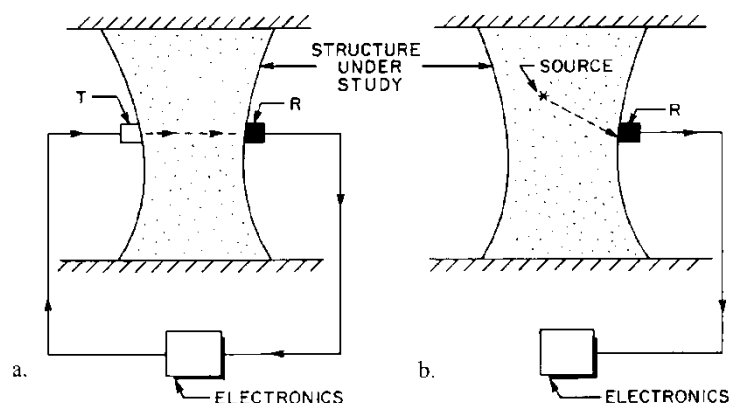


Abbildung 1.1: Zwei akustische Verfahren (a. Ultraschall-; b. Schallemissionstechnik) [13]

Hardy [13] gliedert die Entstehung von Schallemissionen in Gesteinen in mehrere Stufen. Auf der Mikroebene ist die Schallemissionsaktivität bedingt durch Dislokationen, auf Makroebene unter anderem durch Bewegung der Korngrenzen, Bruchentstehung oder Bruchausbreitung zwischen Mineralkörnern. Auf der Megaebene breiten sich SE aufgrund von Brüchen und dem Versagen großer Bereiche innerhalb des Gesteins aus.

In der Literatur [22, 29] werden als weitere Ursachen lokale Spannungskonzentrationen, strukturbedingte Inhomogenitäten oder innere strukturelle Gefügeänderungen genannt.

1.1 Ziel der Arbeit

Die vorliegende Arbeit soll als Basis für die Kalibrierung des Schallemissionssystems, welches am Institut für Felsmechanik und Tunnelbau an der Technischen Universität Graz vorhanden ist, dienen.

Um die Einflussfaktoren der Komponenten des SE-Systems auf das Messergebnis zu ermitteln, werden die theoretischen Grundlagen der Schallemissionstechnik zusammengefasst. In weiterer Folge wird eine Vorgehensweise der Kalibrierung des Messsystems erarbeitet. Eine wesentliche Rolle spielt dabei die Verbesserung der Lokalisierungsgenauigkeit von SE-Ereignissen. Die Schritte der Kalibrierung werden anschließend an drei Gesteinsarten (Kalkstein, Gabbro und Magnesit) getestet.

Einen weiteren Teil der Arbeit bildet die Auswertung der Schallemissionsdaten von durchgeführten Laborversuchen.

2 Theoretische Grundlagen

Um Schallemissionen zu erfassen, ist ein umfangreiches Messsystem notwendig. Dieses System, wird im Folgenden als Messkette bezeichnet, da es aus mehreren Komponenten besteht. Jede Komponente hat einen Einfluss auf das Messergebnis.

Bevor auf die Messkette und deren Einflussfaktoren eingegangen wird (siehe Kapitel 2.2), werden die verschiedenen Arten der Emissionen definiert (siehe Kapitel 2.1), die im Zuge einer Schallemissionsmessung auftreten.

Anschließend folgt die Definition von Signalparametern (siehe Kapitel 2.3), die in der Schallemissionstechnik verwendet werden. Zum Abschluss wird die Lokalisierung von Schallemissionsereignissen (siehe Kapitel 2.4) erläutert.

Nach den Ausführungen über die Grundlagen der Schallemissionstechnik wird auf den einaxialen Druckversuch eingegangen. Es wird auf die Versuchsvorbereitung und die Besonderheiten des Bruchprozesses von sprödem Gestein eingegangen (siehe Kapitel 2.5).

2.1 Definitionen von Emissionen

Im Zuge der Schallemissionsprüfung ist zwischen folgenden Arten von Emissionen zu unterscheiden (nach ÖNORM EN 1330-9 [29]).

2.1.1 Transiente Emissionen (burst emission)

Durch diese Emissionen erzeugte SE-Signale besitzen einen erkennbaren Anfang und Ende. Dadurch können diese Emissionen zeitlich voneinander getrennt werden.

Diese Signale enthalten Informationen über die Größe und den Ort eines SE-Ereignisses, sowie über das Versagensverhalten des Gesteins [22].

Durch die Nachweisschwelle (acoustic emission detection threshold) wird das Spannungsniveau festgelegt, ab welchen ein transientes Signal durch einen Schallemissionskanal erfasst wird. Ein SE-Kanal ist ein Schallemissionssensor mit den Instrumenten für die Messung und Weiterverarbeitung. Wenn eine Schallemission durch einen SE-Sensor detektiert wird, spricht man von einem Hit.

2.1.2 Kontinuierliche Emissionen (continuous emission)

Diese sind Schallemissionsereignisse, welche zeitlich nicht voneinander getrennt werden können. Es handelt sich dabei um kontinuierliche Signale ohne erkennbaren Anfang und Ende.

2.1.3 Schallemissionsgeräusche (acoustic emission noise)

Für die Prüfung sind diese Signale nicht relevant.

2.1.4 Hintergrundgeräusche (background noise)

Durch Erhöhung der Nachweisschwelle oder Durchführung einer Frequenzfilterung lassen sich Hintergrundgeräusche beseitigen.

2.1.5 Störgeräusche (spurious noise)

Diese Schallemissionen können nicht durch die Erhöhung der Nachweisschwelle ausgesondert werden (eventuell durch logische Filterung).

2.2 Messkette

Um die von der Schallemissionsquelle entstehende Schallemission zu erfassen, ist ein umfangreiches Messsystem mit mehreren Komponenten erforderlich.

Durch die Verwendung der Schallemissionstechnik im Labor ergeben sich einige Besonderheiten im Vergleich zur Anwendung im Gelände [13].

Aufgrund der kleinen Probenabmessungen ist der Abstand zwischen der Schallemissionsquelle und dem Schallemissionssensor geringer. Dadurch sind die Größe der SE-Quelle und die verfügbare Energie geringer, weshalb höhere Signalfrequenzen und geringere Signalamplituden zu erwarten sind. Wegen des kleinen Abstandes wird die Dämpfung der SE-Signale geringer sein. Zudem können Reflexionen der elastischen Wellen an der Gesteinsoberfläche, innerhalb der Probe oder an den Lasteinleitungsflächen auftreten (siehe Kapitel 2.4.2.3).

Zusammenfassend weisen die Schallemissionsergebnisse aus Laborversuchen folgende Eigenschaften auf [13]:

1. hohe dominante Signalfrequenzen
2. geringe Signalamplituden
3. hohe Ereignisraten
4. Wellenreflexionen an der Gesteinsoberfläche oder Lasteinleitungsfläche

Aufgrund dieser Besonderheiten sind die Komponenten der Messkette sorgfältig auszuwählen und aufeinander abzustimmen.

2.2.1 Schallemissionssensor (acoustic emission sensor)

Der Schallemissionssensor ist zugleich die wichtigste Komponente und das empfindlichste Glied der Messkette. Deshalb ist es erforderlich, jegliche Einflüsse (z.B. schlechte Kopplung, falsche Frequenzwahl, fehlerhafte Verkabelung) möglichst auszuschließen, um die Messung und das Messergebnis nicht zu beeinflussen (laut ÖNORM EN 13554 [32]).

Mithilfe des SE-Sensors wird die von der Schallemissionsquelle mechanisch erzeugte elastische Welle in ein elektrisches Signal umgewandelt. Dabei handelt es sich um einen piezoelektrischen Aufnehmer. Dieser besteht aus einer piezoelektrischen Platte, welche durch ein dämpfendes Material dicht in einem schützenden Gehäuse montiert wird [13] (siehe Abbildung 2.1). Durch das Gehäuse soll das piezoelektrische Element elektrisch abgeschirmt werden (laut ÖNORM EN 13477-1 [30]).

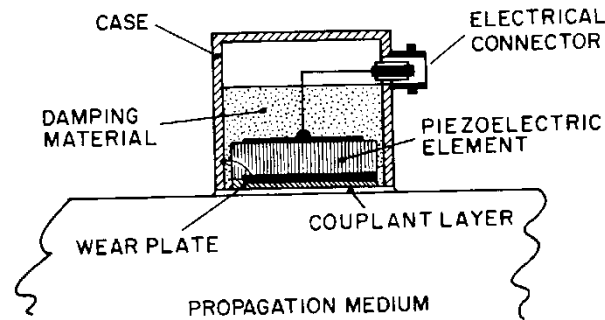


Abbildung 2.1: Aufbau SE-Sensor [13]

Für die piezoelektrische Platte werden entweder einkristalline Quarze oder polykristalline Keramiken (z.B. Blei-Zirkonat-Titanat PZT) als Material verwendet. Wenn Keramiken eingesetzt werden, muss das piezoelektrische Verhalten durch künstliche Polarisierung erzeugt werden. Keramiken weisen höhere piezoelektrische Kennwerte (z.B. Empfindlichkeit) als Quarze auf, diese sind jedoch stärker von der Temperatur abhängig und die Eigenschaften können sich durch die Alterung stärker verändern [8].

In dem piezoelektrischen Material treten durch die Verformung auf der Oberfläche Verzerrungen im Kristallgitter auf, wodurch äußere elektrische Ladungen entstehen (Piezoeffekt). Diese Ladungen werden in ein elektrisches Signal umgewandelt. Dabei handelt es sich um ein schwaches hochohmiges Signal, welches vorverstärkt werden muss um die hohen Frequenzbereiche nicht zu sehr abzuschwächen (siehe Kapitel 2.2.2). Hierfür ist es wichtig, die Länge des Kabels zwischen Schallemissionssensor und Vorverstärker möglichst gering zu halten [8].

Um sicherzustellen, dass die Verformung der Oberfläche durch den SE-Sensor sinngemäß erfasst wird, ist es wichtig eine saubere Ankopplung durchzuführen. Dafür wird ein Kopplungsmittel zwischen der Oberfläche angebracht. Die Durchführung und Überprüfung der Kopplung wird in Kapitel 3.1.3 erläutert.

Die Eichkurve gibt an welcher Frequenzbereich durch den SE-Sensor abdeckt wird. Die Kurve zeigt, wie sich die Empfindlichkeit mit der Frequenz ändert. Am größten ist die Empfindlichkeit eines Sensors bei dessen Eigenfrequenz. Die Eigenfrequenz ist von der Abmessung und der Form des piezoelektrischen Elementes abhängig. Um die größte Genauigkeit zu erreichen, werden die meisten Schallemissionssensoren im sogenannten Resonanzmodus betrieben [13]. Der Frequenzbereich des SE-Sensors sollte mit der Frequenz der erwarteten Bewegung abgestimmt werden [15, 22].

Bei Laborversuchen mit Gesteinen sind Schallemissionsereignisse mit Frequenzen zwischen 5 kHz und 800 kHz zu erwarten. Die meistens Sensoren decken einen Frequenzbereich von 100-300 kHz ab [13].

Für die Untersuchungen werden im Rahmen dieser Arbeit PAC Nano 30 Sensoren verwendet (siehe Abbildung 2.2, links).

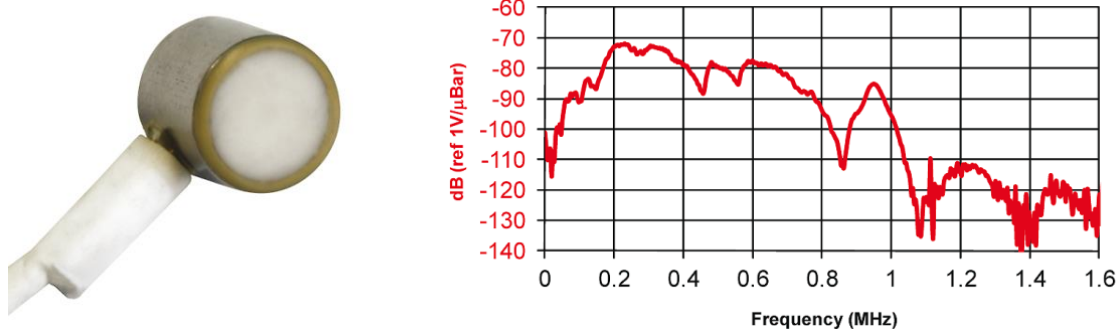


Abbildung 2.2: PAC Nano 30 (links); Eichkurve (rechts) [25]

Der Außendurchmesser des Gehäuses beträgt 30 mm, als piezoelektrisches Element ist eine PZT-Scheibe eingebaut, die Kabellänge beträgt 1 m. Diese Sensoren weisen ein gutes Frequenzverhalten im Bereich von 125-750 kHz auf, die Eigenfrequenz liegt bei 300 kHz (siehe Eichkurve, Abbildung 2.2, rechts) [25].

2.2.2 Vorverstärker (preamplifier)

Durch den Vorverstärker wird das schwache hochohmige Signal des SE-Sensors in ein starkes niederohmiges Signal umgewandelt. Dieser Prozess ist notwendig, um den Einfluss von elektromagnetischen Störungen auf die schwachen Signale des SE-Sensors möglichst gering zu halten. Danach kann die Übertragung ohne Signalverlust über längere Strecken (mit einem Koaxialkabel, mehrere hundert Meter) gewährleistet werden. Der typische Vorverstärker weist einen hochohmigen Eingang, 40 dB Verstärkung sowie eine Ausgangsimpedanz von 50Ω auf. Die Frequenzfilterung ist an die Sensorcharakteristik anzupassen (laut ÖNORM EN 13477-1 [30]). Diese Verstärkung und Filterung durch den Vorverstärker wird Signalkonditionierung genannt (laut ÖNORM EN 13554 [32]).

Bei dieser Arbeit werden PAC 2/4/6 Vorverstärker verwendet (siehe Abbildung 2.3).



Abbildung 2.3: PAC 2/4/6 Vorverstärker [24]

Es besteht die Möglichkeit zwischen 20 dB, 40 dB und 60 dB Verstärkung zu wählen. Die Ausgangsimpedanz beträgt 50Ω . Zudem sind Filter zur Optimierung der Sensorempfindlichkeit und zur Reduzierung der Hintergrundgeräusche eingebaut [24].

2.2.3 Koaxialkabel (coax cable)

Der Vorverstärker wird durch ein Koaxialkabel (abgeschirmtes Kabel) mit einem Eingang des Schallemissionssystems verbunden um die Signale zu übertragen. Dieses Kabel besitzt einen kapazitiven Charakter. Die Drahtseele (Messmasse) wird von einem nicht elektrisch leitenden Dielektrikum und einer äußeren Abschirmung umgeben. Wenn das Kabel verbogen oder verdreht verlegt wird, können lokale Kapazitätsänderungen die Folge sein, welche zu Fehlsignalen führen [8].

Durch das Koaxialkabel erfolgt auch die Stromversorgung des Vorverstärkers. Die Impedanz des Koaxialkabels ist mit der Ausgangsimpedanz des Vorverstärkers abzustimmen (laut ÖNORM EN 13477-1 [30]).

Es werden Koaxialkabel des Typs RG 58 mit einer Impedanz von 50Ω und einer Länge von 10 m für die Signalübertragung verwendet.

2.2.4 Schallemissionssystem (acoustic emission system)

Mit dem Anschluss des Koaxialkabels an einen Schallemissionskanal des SE-Systems findet die digitale Signalkonditionierung, die Datenerfassung/ -verarbeitung und -speicherung, sowie die Auswertung statt. Der Schallemissionssignalprozessor führt nochmals eine Frequenzbandfilterung zum Unterdrücken von Störgeräuschen durch [32], die erwarteten Frequenzen der zu messenden SE-Emissionen dürfen hierbei nicht herausgefiltert werden. Sowohl diese Frequenzfilter als auch die Filter im Vorverstärker müssen die Bandbreite des Sensors gut abdecken (laut ÖNORM 13477-2 [31]).

Das Ausgangssignal des Vorverstärkers wird in digitale Signalparameter umgewandelt und mit der Nachweisschwelle verglichen. Beim Überschreiten dieser Schwelle wird ein digitaler Impuls generiert, wodurch der Zeitpunkt des Hits gespeichert und der Signalmessprozess ausgelöst wird. Solange das Signal die Nachweisschwelle über- und unterschreitet, werden weitere Impulse generiert. Zusätzlich definierte Parameter, welche gespeichert werden sollen, werden miterfasst. Das Ende des Hits wird durch das SE-System bestimmt, wenn die Schwelle nicht mehr überschritten wird [15].

Es besteht auch die Möglichkeit äußere Parameter (z.B. aufgebrachte Spannung) mit einem geeigneten Messkanal zu erfassen. Dieser Messkanal wird als parametrisch bezeichnet (laut ÖNORM EN 13554 [32]).

Im Rahmen dieser Arbeit steht das Micro-II Digital AE System [26] zur Verfügung. Dabei handelt es sich um einen PAC-PC der alle üblichen Funktionen und Schnittstellen eines Standard-PCs aufweist.

Durch eine PCI-2 Karte (siehe Abbildung 2.4) erfolgt die Schallemissionssignalverarbeitung und Datenerfassung, sowie die Darstellung der Ergebnisse für zwei Schallemissionskanäle.

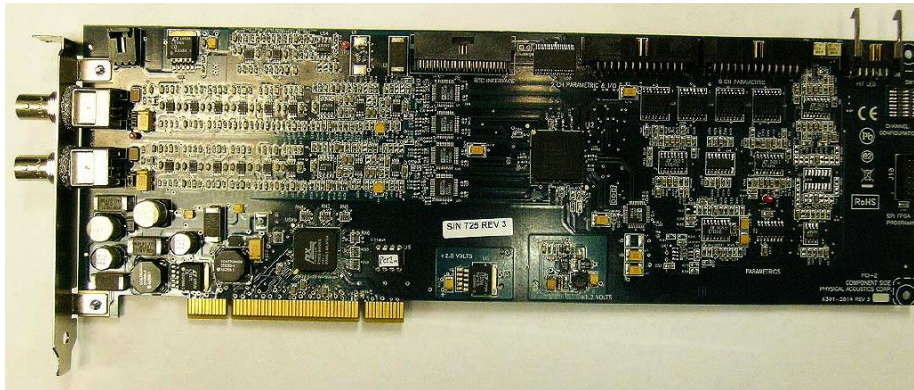


Abbildung 2.4: PCI-2 Karte [26]

Insgesamt sind vier PCI-2 Karten in dem SE-System eingebaut, wodurch maximal acht SE-Sensoren für die SE-Messung angeschlossen werden können. Mit der AEwin Software kann die Hardware konfiguriert werden. Außerdem lassen sich die Ergebnisse der Schallemissionsmessung in Echtzeit verfolgen [26].

Da dieses Schallemissionssystem die Parameter und Wellenformen der transienten Signale sowie zusätzlich definierte Parameter speichert, erfolgt die Auswertung mittels signalbasierter Schallemissionsanalyse. Im Gegensatz dazu werden bei der parameterbasierten Schallemissionsanalyse nur einzelne Parameter der transienten Signale extrahiert. Die Wellenformen werden bei dieser Analyseart nicht gespeichert [11].

2.3 Signalparameter

Die Charakteristik von transienten Signalen wird durch folgende SE-Parameter (siehe Abbildung 2.5) nach ÖNORM EN 1330-9 [29] definiert.

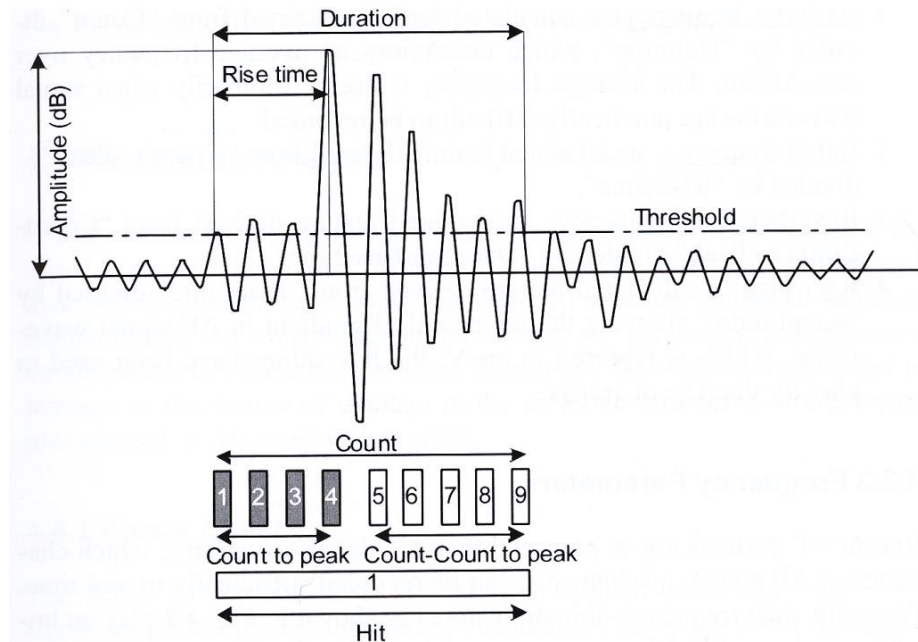


Abbildung 2.5: SE-Parameter eines transienten Signals [11]

2.3.1 Ankunftszeit (arrival time)

Wenn die Spannung eines transienten Signals das erste Mal die Nachweisschwelle überschreitet, wird diese Zeit als Ankunftszeit gespeichert.

2.3.2 Maximalamplitude (peak amplitude)

Die Maximalamplitude ist der maximale Spannungsausgang innerhalb der Signaldauer eines SE-Signals. Die Amplitude wird in Schallemissionsdezipel dB_{AE} angegeben. Da die Dezibelskala auf den Vorverstärkereingang bezogen wird, ist diese nicht linear:

$$dB_{AE} = 20 * \log\left(\frac{U}{U_r}\right) \quad \text{mit } U_r = 1 \mu V \text{ (Referenzspannung)} \quad (2.1)$$

Beispielsweise beträgt die Amplitude bei einer Eingangsspannung von $1 \mu V$ des SE-Sensors $0 dB_{AE}$ ($10 \mu V \rightarrow 20 dB_{AE}$).

Es besteht ein Zusammenhang zwischen der Amplitude eines SE-Ereignisses und der Magnitude dieses Ereignisses [11, 22, 34]. Diese Frequenz-Magnituden Relation stammt aus der Erdbebenforschung und wurde durch Gutenberg und Richter (1942) definiert. Dabei wird die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Erdbeben in Abhängigkeit der Magnitude berechnet [12].

Dieser b-Wert findet in der Schallemissionstechnik Anwendung um das Bruchverhalten des Gesteins zu erforschen [11, 22]. Ein großer b-Wert bedeutet eine hohe Anzahl von kleineren Schallemissionsereignissen (mit geringer Amplitude) durch die Entstehung neuer Risse oder langsames Risswachstum. Ein kleiner b-Wert hingegen entspricht einer hohen Anzahl von starken energiereichen SE-Ereignissen infolge eines schnellen instabilen Risswachstums (mit hoher Amplitude) [11, 17, 34].

2.3.3 Anstiegszeit (rise time)

Die Zeitdifferenz zwischen erster Überschreitung der Nachweisschwelle und der Maximalamplitude eines SE-Signals ist die Anstiegszeit. Dieser Parameter wird durch den Ausbreitungsprozess der Welle von der SE-Quelle zum SE-Sensor beherrscht und kann zum Modifizieren der Signaltypen und zum Eliminieren von Hintergrundgeräuschen herangezogen werden [11, 26].

2.3.4 Signaldauer (duration)

Die Signaldauer ist die Zeitdifferenz zwischen erster und letzter Überschreitung der Nachweisschwelle. Diese ist von der Magnitude des SE-Ereignisses abhängig und eignet sich zur Modifizierung der Signaltypen und zum Filtern von Hintergrundgeräuschen [11, 26].

2.3.5 Anzahl der Überschwingungen (count to peak)

Die Anzahl der Überschwingungen gibt an, wie oft die Nachweisschwelle innerhalb der Signaldauer überschritten wird. Dieser Parameter ist stark von dem Frequenzbereich und der Nachweisschwelle abhängig [11].

2.3.6 Stärke eines Schallemissionssignals (burst signal strength)

Die Stärke eines Schallemissionssignals ist das Integral der gleichgerichteten Spannung dieses Signals während der Signaldauer.

2.3.7 Energie eines Schallemissionssignals (burst signal energy)

Die elastische Energie der SE-Welle, welche durch das SE-Ereignis freigesetzt wird, wird mit dem Integral der quadrierten Spannung während der Signaldauer ermittelt. Diese Energie ist von den Eigenschaften der SE-Quelle und des Mediums (z.B. Geometrie, Ausbreitungsgeschwindigkeit, Korngröße) abhängig [33].

2.3.8 Geeignete Signalparameter für die Auswertung von Schallemissionen

In der Vergangenheit wurde häufig der Parameter „Anzahl der Überschwingungen“ für die Auswertung der Schallemissionssignale herangezogen. Ein Nachteil ist jedoch, dass dieser Parameter sehr stark von den festgelegten Hardwareeinstellungen (Frequenzbereich, Nachweisschwelle,...) abhängig ist [26].

Aus diesem Grund wird heutzutage die „Energie des SE-Signals“ für die Auswertung bevorzugt. Dadurch lässt sich die Magnitude eines SE-Ereignisses beurteilen. Dieser Parameter ist empfindlich gegenüber der Amplitude und der Signaldauer, aber weniger abhängig von den Hardwareeinstellungen [11, 26]. Die Energie gilt als Indikator für die Intensität der Rissbildung und dem Versagen des Gesteins [16].

Um die Größenordnung der Magnitude (Risse) der SE-Ereignisse zu erfassen, eignet sich auch die Auswertung der Maximalamplitude oder der b-Wert.

Durch die Darstellung der Schallemissionsaktivität gegenüber der aufgebrachten Druckspannung während des einaxialen Druckversuchs kann ein eventuelles Auftreten des Kaisereffektes beurteilt werden (siehe Kapitel 2.5.3).

Ein großer Vorteil der Schallemissionstechnik ist die räumliche Positionsbestimmung der Schallemissionsquelle. Demnach kann eine Aussage über den Bereich der Instabilität getroffen werden.

2.4 Lokalisierung von Schallemissionsereignissen

Um die Quelle eines SE-Ereignisses dreidimensional zu lokalisieren, muss die transiente elastische Welle von mindestens vier SE-Sensoren erfasst werden. Von wie vielen SE-Sensoren ein Ereignis erfasst wird, ist von der Stärke des SE-Ereignisses, der Wellenausbreitung im Inneren der Probe und dem Abstand der SE-Sensoren abhängig [26].

Bevor auf die Lokalisierungsverfahren eingegangen wird, werden zunächst Einflussfaktoren auf die Genauigkeit der Lokalisierung behandelt.

2.4.1 Ausbreitungsgeschwindigkeit in Gesteinen

Einen wesentlichen Einfluss auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit haben die physikalischen Parameter der Gesteine [35]. Generell ist aufgrund der unterschiedlichen Gesteinsstruktur die Geschwindigkeit von der Gesteinsart abhängig. Dabei spielt die mineralische Zusammensetzung eine wesentliche Rolle. Die einzelnen Minerale weisen unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeiten auf. Durch das Verhältnis dieser Mineralanteile und den Geschwindigkeiten ergibt sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit innerhalb des Gesteins. Weitere Einflussfaktoren sind die Korngröße, die Porosität und die Kristallorientierung (Anisotropie).

Es wurde beobachtet, dass die Geschwindigkeit mit zunehmender Spannung steigt. Von diesem Effekt ist eher die P-Wellengeschwindigkeit als die S-Wellengeschwindigkeit (siehe Kapitel 2.4.2.1) betroffen. Eine Erklärung ist der verbesserte mechanische Kontakt infolge der Belastung [35].

2.4.2 Wellenausbreitung

Die Ausbreitung der Schallemissionswelle von der punktförmigen SE-Quelle erfolgt in Form einer Kugelwelle. Das bedeutet eine gleichmäßige Ausbreitung in alle Richtungen (radial gerichtet und radialsymmetrisch) [4].

Da die Energie während der Wellenausbreitung konstant bleibt, nimmt die Energiedichte mit zunehmender Entfernung von der Quelle ab. Dies hat zwei Effekte zur Folge [4]:

Einerseits nimmt die Amplitude proportional zur Entfernung der SE-Quelle ab. Diese sogenannte „sphärische Divergenz“, ist rein geometrisch bedingt und für alle Frequenzen gleich.

Andererseits gibt es Energieverluste bedingt durch nichtelastisches Verhalten und innere Reibung, welche als „Dämpfung“ der SE-Wellen bezeichnet wird. Diese Dämpfung ist frequenzabhängig und dominiert mit zunehmender Distanz und höheren Frequenzen.

Außerdem zu berücksichtigen ist, dass es unterschiedliche Wellentypen und Wellengeschwindigkeiten der Kugelwelle gibt. Als Wellentypen (auch Wellenmoden) treten Körperwellen und Oberflächenwellen auf. Die Wellengeschwindigkeit hängt von den elastischen Eigenschaften des betrachteten Mediums ab (siehe Kapitel 2.4.1).

2.4.2.1 Körperwellen

Es ist zwischen drei Arten von Körperwellen zu unterscheiden [4].

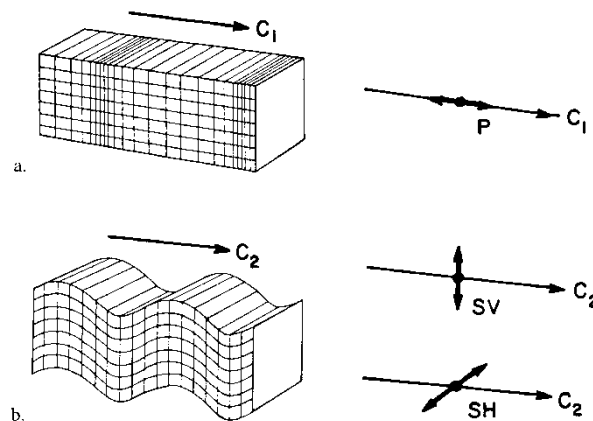


Abbildung 2.6: Körperwellen (a. Kompressionswelle; b. Scherwelle) [13]

Bei der Kompressionswelle (auch Longitudinalwelle oder P-Welle) folgt die Teilchenbewegung der Ausbreitungsrichtung der Welle (siehe Abbildung 2.6 a.).

Die Teilchenbewegung bei der Ausbreitung der Scherwelle (auch Transversalwelle oder S-Wellen) ist orthogonal zur Ausbreitungsrichtung der Kompressionswelle (siehe Abbildung 2.6 b.). Es gibt also die Möglichkeit der Ausbreitung in horizontaler oder vertikaler Richtung, wodurch es zwei Arten von Scherwellen (SH und SV) gibt.

Die Kompressionswellengeschwindigkeit ist stets größer als die Scherwellengeschwindigkeit. Bei Gesteinen mit einer Schichtung/Schieferung ist die schichtungsparelle Geschwindigkeit höher als die Geschwindigkeit normal auf die Schichtung [35]. Bei einem isotropen Medium sind die beiden Scherwellengeschwindigkeiten gleich, bei anisotropen Medien nicht.

Für isotrope homogene Medien kann mit den elastischen Parametern (E-Modul E , Poissonzahl ν , Dichte ρ) die P-Wellengeschwindigkeit v_p und S-Wellengeschwindigkeit v_s berechnet werden:

$$v_p = \sqrt{\frac{E}{\rho} * \left(\frac{1 - \nu}{(1 - 2 * \nu)(1 + \nu)} \right)} \quad (2.2)$$

$$v_s = \sqrt{\frac{E}{\rho} * \left(\frac{1}{2 * (1 + \nu)} \right)} \quad (2.3)$$

Bei inhomogenen Medien sind diese Wellentypen miteinander gekoppelt, das heißt sie werden an den Grenzflächen ineinander umgewandelt (siehe Kapitel 2.4.2.3).

2.4.2.2 Oberflächenwellen

Dieser Wellentyp breitet sich entlang einer Schicht oder entlang der Oberfläche aus, wobei zwei Arten zu unterscheiden sind [4].

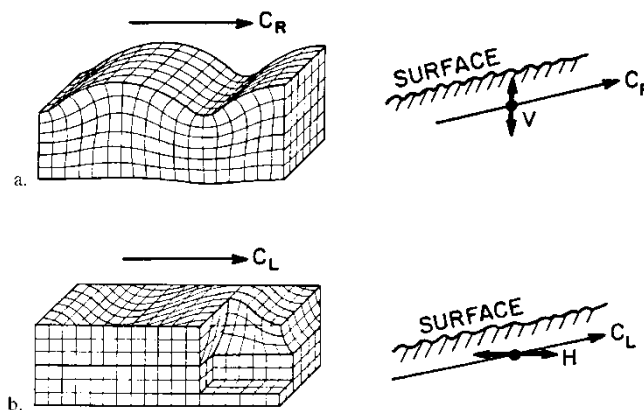


Abbildung 2.7: Oberflächenwellen (a. Rayleigh-Welle; b. Love-Welle) [13]

Bei der Rayleigh-Welle verläuft die Teilchenbewegung, welche rückwärtsgerichtet ist, in einer senkrechten Ebene zur Oberfläche (siehe Abbildung 2.7 a.). Die Geschwindigkeit ist kleiner als die Geschwindigkeit der Scherwelle.

Die Love-Welle tritt nur in einem geschichteten Medium auf, wenn die Scherwellengeschwindigkeiten von zwei übereinanderliegenden Schichten unterschiedlich sind. Die Teilchenbewegung ist parallel zur Oberfläche und senkrecht zur Ausbreitungsrichtung (siehe Abbildung 2.7 b.). Die Geschwindigkeit der Welle liegt zwischen den Scherwellengeschwindigkeiten der beiden Schichten. Die Amplituden der Love-Wellen können sehr hoch sein. Bei der Erfassung durch den SE-Sensor besteht die Gefahr, dass die P-Wellen übersehen/ überdeckt werden.

2.4.2.3 Auftreffen der SE-Wellen auf eine Grenzfläche

Durch das Auftreffen einer P-Welle P_I unter dem Einfallswinkel α auf die Grenzfläche KI (siehe Abbildung 2.8, z.B. Schichtgrenze, Inhomogenität oder Risse) wird diese Welle in zwei P-Wellen und zwei S-Wellen aufgeteilt [13].

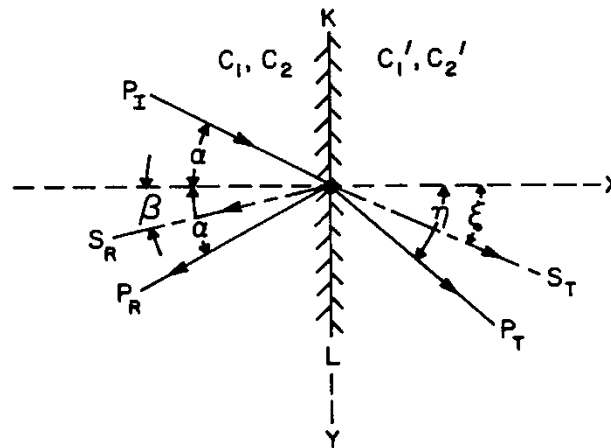


Abbildung 2.8: Auftreffende P-Welle auf eine Grenzfläche [13]

Der Teil der zurückgestrahlten (reflektierten) Wellenenergie wird durch den Anteil der reflektierten P-Welle P_R (mit der Neigung α) und durch den Anteil der reflektierten S-Welle S_R (mit der Neigung β) dargestellt.

Der Teil der Wellenenergie, welcher durch die Grenzfläche hindurch tritt (transmittiert), wird durch die Anteile P_T und S_T mit den Neigungen η und ξ dargestellt. Dieses Verhalten wird Reflexions- und Transmissionsverhalten genannt. Die P- und S-Wellengeschwindigkeiten, der durch die Grenzfläche getrennten Medien, sind durch C_1 , C_2 sowie C'_1 , C'_2 gegeben.

Die Abhängigkeit zwischen diesen Wellengeschwindigkeiten und den Einfallswinkeln wird durch das Snelliussche Brechungsgesetz beschrieben [4]:

$$\frac{\sin(\alpha)}{C_1} = \frac{\sin(\beta)}{C_2} = \frac{\sin(\eta)}{C'_1} = \frac{\sin(\xi)}{C'_2} \quad (2.4)$$

Diese Umwandlung der P-Welle in P- und S-Wellenanteile wird als Modenumwandlung bezeichnet. Dieses Verhalten gilt auch für eine S-Welle, wenn diese auf eine Grenzfläche trifft.

Der Grad der „Modenumwandlung“ ist vom Einfallswinkel der Welle und den akustischen Impedanzen (Dichte und Geschwindigkeit), der durch die Grenzfläche getrennten Medien, abhängig [13]. Das Energie- und Amplitudenverhältnis hängt wiederum von den elastischen Eigenschaften ab [4].

Die sphärische Divergenz, Dämpfung und Modenumwandlung hat eine Energie- und Amplitudenabnahme der sich ausbreitenden Welle zur Folge. Dadurch erfasst der

SE-Sensor ein abgeschwächtes Signal. Welche Auswirkung diese Abschwächung auf die SE-Parameter hat, ist derzeit noch unklar. Die Effekte sollten bei der Lokalisierung von geschichteten und anisotropen Gesteinen berücksichtigt werden [11].

2.4.3 Lokalisierungsverfahren

Die dreidimensionale Lokalisierung (Ortung) einer Schallemissionsquelle erfolgt durch die Bestimmung der Laufzeitdifferenz (Differenz zwischen zwei Ankunftszeiten eines Ereignisses an unterschiedlichen Kanälen). Es wird ein homogenes, isotropes Gestein angenommen, wodurch die in Kapitel 2.4.1 und Kapitel 2.4.2 beschriebenen Einflussfaktoren vernachlässigt werden.

Es gibt mehrere Verfahren für die 3D-Ortung (siehe [11, 18]).

Zunächst wird auf das iterative Verfahren eingegangen, welches in der AEwin Software integriert ist. Anschließend wird eine andere Variante der iterativen Lösung aufgezeigt.

2.4.3.1 Iteratives Lokalisierungsverfahren (nach [26])

Die transiente elastische Welle pflanzt sich innerhalb eines homogenen, isotropen Mediums (Annahme) direkt von einer Punktquelle in Richtung eines SE-Sensors fort (siehe Abbildung 2.9).

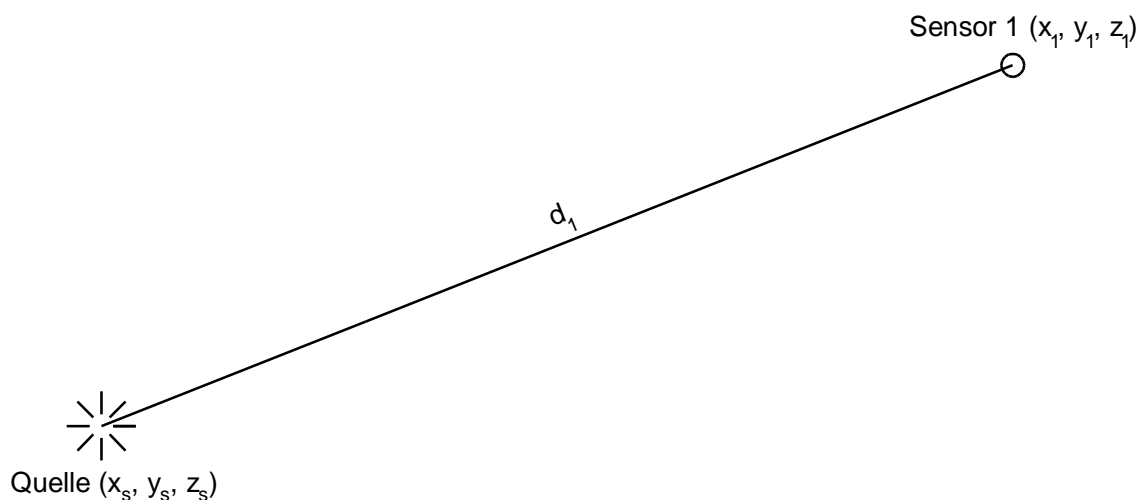


Abbildung 2.9: Direkte Wellenausbreitung von der SE-Quelle zum SE-Sensor

Die Distanz d_1 zwischen der SE-Quelle (mit den Koordinaten x_s, y_s, z_s) und dem SE-Sensor (mit den Koordinaten x_1, y_1, z_1) wird durch den Satz von Pythagoras berechnet:

$$d_1 = \sqrt{(x_1 - x_s)^2 + (y_1 - y_s)^2 + (z_1 - z_s)^2} \quad (2.5)$$

Der ursprüngliche Zeitpunkt, zu welchem das SE-Ereignis aufgetreten ist, bleibt unbekannt. Aus diesem Grund werden die Ankunftszeiten t_i der späteren Hits auf die Ankunftszeit t_1 des ersten Hits (Referenz) bezogen (laut Benutzerhandbuch [26]):

$$(t_i - t_1) = \frac{1}{v} * (d_i - d_1) \quad (2.6)$$

Die Geschwindigkeit v (P-Wellengeschwindigkeit) ist im Vorfeld zu bestimmen, die Distanz d_i wird mit Formel (2.5) für die jeweiligen Sensoren (mit den Koordinaten x_i, y_i, z_i) ermittelt. Somit lässt sich die relative Zeitdifferenz $(t_i - t_1)$ in voller Form anschreiben:

$$t_i - t_1 = \frac{1}{v} * \left[\sqrt{(x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2 + (z_i - z_s)^2} - \sqrt{(x_1 - x_s)^2 + (y_1 - y_s)^2 + (z_1 - z_s)^2} \right] \quad (2.7)$$

Es verbleiben drei Unbekannte (die Koordinaten der SE-Quelle). Mit der Erfassung von mindestens vier Ankunftszeiten stehen drei Gleichungen zur Verfügung um das Gleichungssystem zu lösen. Da es sich um ein nichtlineares System handelt, ist ein iteratives Verfahren anzuwenden.

Wenn mehr als vier Ankunftszeiten erfasst werden, ist das Gleichungssystem überbestimmt. Damit ist zusätzlich ein statistisches Verfahren erforderlich um die „beste“ Lösung für das überbestimmte System zu finden.

Hierzu werden die Differenzen zwischen den relativen Zeiten berechnet. Die beobachteten Zeitdifferenzen $\Delta t_{i,beob}$ ermitteln sich aus den erfassten Ankunftszeiten:

$$\Delta t_{i,beob} = t_i - t_1 \quad (2.8)$$

Die berechneten Zeitdifferenzen $\Delta t_{i,kalk}$ werden mit den jeweiligen Koordinaten der Sensoren und der SE-Quelle berechnet:

$$\Delta t_{i,kalk} = \frac{1}{v} * \left[\sqrt{(x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2 + (z_i - z_s)^2} - \sqrt{(x_1 - x_s)^2 + (y_1 - y_s)^2 + (z_1 - z_s)^2} \right] \quad (2.9)$$

Die Differenz $\Delta t_{i,beob} - \Delta t_{i,kalk}$ wird mit der „multiplen Regressionsanalyse“ minimiert. Dafür wird die Größe Chi-Quadrat χ^2 (Abweichung) eingeführt:

$$\chi^2 = \sum (\Delta t_{i,beob} - \Delta t_{i,kalk})^2 \quad (2.10)$$

Im Zuge der multiplen Regressionsanalyse werden die Koordinaten der SE-Quelle gesucht, bei welcher die Abweichungen am kleinsten sind.

Für die Lösung des nichtlinearen Gleichungssystems wird der Simplex-Algorithmus angewendet.

2.4.3.2 Iteratives Lokalisierungsverfahren (allgemein)

Havskov [14] (siehe auch Kurz [18]) führt die iterative Lösung des Gleichungssystems auf eine andere Art durch. Der iterative Algorithmus basiert auf den von Geiger [10] entwickelten Verfahren zur Ortung von Erdbebenherden.

Im Gegensatz zu der aufgezeigten Methode in Kapitel 2.4.3.1 werden die Ankunftszeiten an allen SE-Kanälen berechnet. Die Ankunftszeiten der späteren Hits werden also nicht auf die Ankunftszeit des ersten Hits bezogen.

Es werden als erstes die Koordinaten der SE-Quelle (x, y, z) und der Zeitpunkt t_0 , zu welchem das Schallemissionsereignis aufgetreten ist, angenommen. Mit den bekannten Koordinaten der SE-Sensoren (x_i, y_i, z_i) erhält man die berechneten Ankunftszeiten t_i^c :

$$t_i^c = \frac{1}{v} * \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} + t_0 \quad (2.11)$$

Diese Annahme kann beispielsweise ein SE-Ereignis in Probenmitte sein oder die Koordinaten und die Ankunftszeit des SE-Sensors, welcher den ersten Hit erfasst hat.

Anschließend werden die Abweichungen r_i zwischen den berechneten Ankunftszeiten t_i^c und den gemessenen Ankunftszeiten t_i^0 ermittelt:

$$r_i = t_i^0 - t_i^c \quad (2.12)$$

Um diese Abweichungen der ersten Annahme der SE-Quelle zu minimieren, werden Korrekturen $(\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta t)$ eingeführt. Bei kleinen Korrekturwerten (die erste Annahme muss nahe der tatsächlichen SE-Quelle liegen) wird Formel (2.11) mit der Taylorreihenentwicklung, auf Basis der Abweichungen, angenähert. Es ist nur das erste Glied der Taylorreihenentwicklung erforderlich:

$$r_i = \left(\frac{\partial t}{\partial x_i} * \Delta x \right) + \left(\frac{\partial t}{\partial y_i} * \Delta y \right) + \left(\frac{\partial t}{\partial z_i} * \Delta z \right) + \Delta t \quad (2.13)$$

Diese Linearisierung ist nur möglich, wenn die Abweichungen der ersten Näherung eine lineare Funktion der Korrekturen sind. Durch Anschreiben von Formel (2.13) in Matrixschreibweise wird der Korrekturvektor Δx durch Matrixinversion ermittelt (z.B. nach dem Moore-Penrose-Verfahren). Mit diesen Korrekturwerten wird der nächste Iterationsschritt durchgeführt.

Da es sich in der Regel um ein überbestimmtes Systems (mehr Ankunftszeiten als Unbekannte) handelt, ist wiederum eine statistische Methode erforderlich. Bei diesem Verfahren wird die „Methode der kleinsten Fehlerquadrate“ angewendet. Die Korrekturen für den vorhergehenden Iterationsschritt werden „bestmöglich“ berechnet und das Ergebnis für den nächsten Iterationsschritt korrigiert.

Die Iteration wird solange fortgesetzt, bis ein Abbruchkriterium erreicht wird. Das Kriterium kann eine minimale Abweichung r , eine geringe Verbesserung der Koordinaten der SE-Quelle durch die aufeinanderfolgenden Iterationsschritte oder eine Anzahl von maximalen Iterationen sein.

Als Probleme dieses Verfahrens führt Havskov [14] schlecht konfigurierte Daten oder eine falsche erste Annahme der SE-Quelle an. Dadurch könnte eine schnelle Konvergenz des iterativen Prozess auftreten, ohne die mathematisch „beste“ Lösung zu finden.

Ein Vorteil ist, dass die Veränderung der P-Wellengeschwindigkeit berücksichtigt werden kann [11].

2.4.3.3 *Hyperbel-Methode*

Dieses Verfahren ist ein direktes algebraisches Lösungsverfahren. Es wird keine Iteration durchgeführt. Bis jetzt wird die Methode weder in der Seismologie noch in der Schallemissionstechnik eingesetzt, sondern bildet die Basis zur Positionsbestimmung mittels GPS in der Geodäsie [18].

Aus diesem Grund wird im Zuge dieser Arbeit nicht auf das Lösungsverfahren mittels Hyperbel-Methode eingegangen. Nähere Ausführungen finden sich in [13, 18].

2.4.3.4 *Potentielle Fehlerquellen*

Durch die Eingangsdaten, welche für das Ortungsverfahren notwendig sind, ergeben sich als potentielle Fehlerquellen die Koordinaten der SE-Sensoren, die Ankunftszeiten und die Ausbreitungsgeschwindigkeit.

Die Bestimmung der Sensorkoordinaten sollte möglichst genau erfolgen. Außerdem spielt die Anordnung der Sensoren eine Rolle.

Die erfassten Ankunftszeiten sind von der Nachweisschwelle abhängig (siehe Kapitel 2.3.1). Wenn die Nachweisschwelle zu hoch festgelegt wird, werden zwangsläufig weniger SE-Ereignisse erfasst. Bei zu geringer Schwelle besteht die Gefahr mehr Ereignisse durch die Kombination schwacher Signale zu erfassen [13].

Ebenso ist es möglich, dass Hintergrundgeräusche oder Störgeräusche SE-Ereignisse mit kleiner Amplitude der P-Welle überdecken. Dann könnte eine später ankommende S-Welle oder ein reflektierter Modus mit größerer Amplitude durch das SE-System erfasst werden [11, 23].

Die Einflussfaktoren auf die Geschwindigkeit werden aufgrund der Annahme eines homogenes, isotropes Gesteins vernachlässigt. Aus diesem Grund sind Ungenauigkeiten

bei der Positionsbestimmung der SE-Quellen zu erwarten. Gesteine werden Inhomogenitäten aufweisen, welche einen Einfluss auf das Messergebnis haben. Dies trifft vor allem auf geschichtete oder anisotrope Gesteine zu, welche unterschiedliche Geschwindigkeiten in unterschiedliche Richtungen aufweisen.

2.5 Einaxialer Druckversuch

Beim einaxialen Druckversuch erfolgt die Belastung einer zylindrischen Gesteinsprobe in Achsrichtung bis zum Versagen. Mit der Bruchlast und der Querschnittsfläche der Probe wird die einaxiale Druckfestigkeit des Gesteins σ_{UCS} ermittelt.

2.5.1 Versuchsvorbereitung

Laut ÖNORM B 3124-9 [28] hat das Verhältnis $L/D = 2$ für zylindrische Gesteinsproben zu betragen (mit der Probenlänge L und dem Probendurchmesser D). Bei einem kleineren Verhältnis ist es möglich, dass durch den Einfluss der Endflächenreibung höhere Festigkeitswerte ermittelt werden [27].

Die Endflächen der Gesteinsproben sind planparallel (rechtwinklig zur Probenachse) zu schleifen. Die Mantelflächen müssen glatt und frei von Unregelmäßigkeiten sein. Bei Ungenauigkeiten könnte der gleichförmige einaxiale Spannungszustand im Prüfkörper gestört werden [27].

Für die Quer- und Längsdehnungserfassung während des Versuchs werden Wegaufnehmer (zwei Axialdehnungsaufnehmer und ein Umfangsdehnungsaufnehmer) auf halber Höhe der Gesteinsprobe angebracht.

2.5.2 Materialverhalten

Die in Abbildung 2.10 dargestellte Spannungs-Dehnungslinie setzt sich aus dem Pre-Failure Bereich (Vorbruch-Bereich) und aus dem Post-Failure Bereich (Nachbruch-Bereich) zusammen. Im Nachbruch-Bereich stellt die Linie eine Grenzlinie der fortlaufenden Bruchzustände dar [27]. Bezüglich des Nachbruchverhaltens ist zwischen „Class I“ und „Class II“ Gesteinen zu unterscheiden [44].

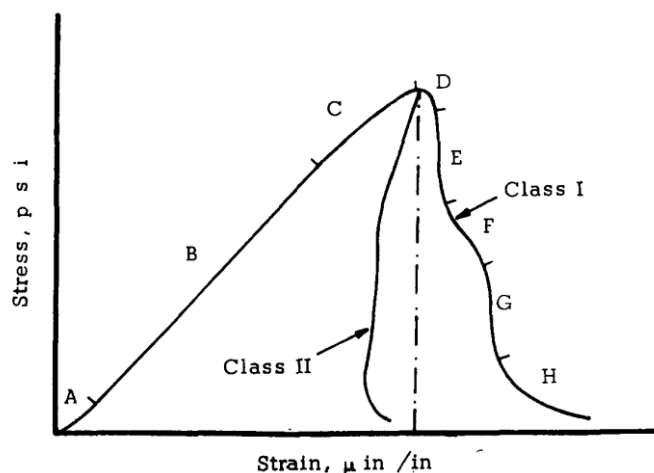


Abbildung 2.10: zwei Versagensmöglichkeiten von Gesteinen [44]

Class I Gesteine weisen ein duktiles Nachbruchverhalten auf. Nach Überschreiten der einaxialen Druckfestigkeit bleibt eine Restfestigkeit des Gesteins erhalten. Die Reduktion dieser Festigkeit kann nur durch Zuführen von Energie erzeugt werden. Damit nehmen die Rissfortpflanzung und die Verformung der Gesteinsprobe weiter zu.

Bei Class II Gesteinen wird die gespeicherte elastische Energie nach der maximal aufnehmbaren Spannung frei. Dies führt zu einem schlagartigen Versagen (sprödes Nachbruchverhalten). Die Rissfortpflanzung schreitet anschließend selbstständig, ohne Zufuhr weiterer Energie, fort. Um dieses Verhalten im Labor zu erfassen, muss dem System diese potentielle Energie entzogen werden.

Die strichpunktierte Linie in Abbildung 2.10 stellt die gespeicherte elastische Energie des Gesteins dar. Um das totale Versagen des Gesteins zu erzeugen, muss genau so viel Energie aufgebracht werden [44].

Diese Energie wird auch als spezifische Zerstörungsarbeit W_z bezeichnet und berechnet sich aus der Fläche unter der Spannungs-Dehnungslinie [40]. Das Flächenintegral unter der Kurve ist durch die maximale Längsdehnung begrenzt. Bei spröden Gestein entspricht diese Längsdehnung der Bruchdehnung.

Der Bruchprozess von Gesteinen kann in mehrere Phasen eingeteilt werden. Diese Phasen werden durch die Auswertung der Volumendehnung im Spannungs-Dehnungsdiagramm ermittelt (siehe Abbildung 2.11) und unterscheiden sich je nach Gesteinsart. Im Folgenden wird der Bruchprozess von spröden Gestein behandelt [2].

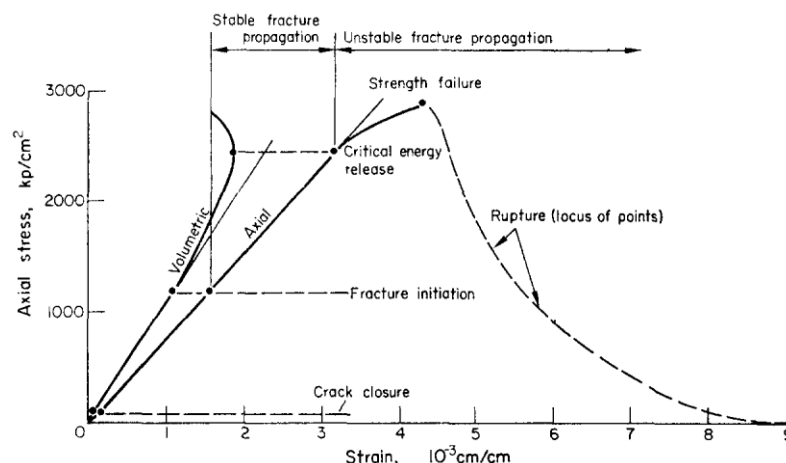


Abbildung 2.11: Phasen des Bruchprozesses [3]

Schließen der Risse: Zu Beginn der Lastaufbringung findet ein Schließen bereits existierender Mikrorisse (z.B. an Korngrenzen oder zwischen Mineralbestandteilen) statt. Demnach ist die Spannungs-Dehnungslinie zu Belastungsbeginn konkav. Ein weiterer Grund dieser nicht-linearen Kurvencharakteristik kann sein, dass die Enden der Proben nicht plan-parallel sind [36].

Linear elastische Verformung: In dieser Phase ist ein lineares Verhalten zwischen Spannung und Dehnung gegeben. Dabei kann zum Teil ein Gleiten zwischen geschlossenen Rissoberflächen stattfinden. Mit der Bildung von Mikrorissen ist dieses lineare Verhalten nicht mehr gegeben [36].

Stabile Bruchfortpflanzung: Mit zunehmender Belastung wird die Scherfestigkeit der Rissoberflächen überwunden und es findet die Bildung von Mikrorissen statt. Die Mikrorissbildung beginnt an lokalen Spannungskonzentrationen aufgrund der Inhomogenität des Gesteins (z.B. Anisotropie, Poren, bereits existierende Mikrorisse) [44].

Die meisten Mikrorisse pflanzen sich parallel zur Belastungsrichtung fort und es bilden sich Scherzonen aus. Die stabile Bruchfortpflanzung ist bis zu einem Spannungsniveau gegeben, bei welchem das Risswachstum durch Konstanthalten der Belastung gestoppt werden kann [2].

Instabile Bruchfortpflanzung: Ab einem Spannungsniveau von ca. 80% der einaxialen Druckfestigkeit wechselt plötzlich das Verhaltensmuster der sich fortpflanzenden Risse. Die Bruchfortpflanzung kann nicht mehr durch Konstanthalten der Belastung aufgehalten werden. Ab diesem Zeitpunkt ist diese selbsterhaltend und schreitet schnell voran bis das Versagen erreicht wird. Der Großteil der sich fortpflanzenden Risse folgt der Richtung der aufgebrauchten Belastung.

Bruch/Versagen: Nachdem das maximale Spannungsniveau erreicht wurde, versagt das Gestein mit plötzlichem Freiwerden der gespeicherten Energie im Post-Failure Bereich (sprödes Verhalten) [21, 42].

Nachbruchbereich: Die Verformung nimmt nur durch die Bewegung entlang von Rissen zu. Der selbsterhaltende Prozess der Rissfortpflanzung, wird durch die in der Probe gespeicherte Energie aufrechterhalten. Durch die Bildung neuer Risse wird Energie umgewandelt [3].

2.5.3 Charakteristik der Schallemissionen

Die Mikrorissbildung stellt in Bezug auf die SE-Technik Schallemissionsereignisse dar. Im Bergbau wird die Erfassung von Schallemissionen für die Warnung vor Bergschlägen herangezogen. Vor dem Versagen durch Bergschlag finden vermehrt SE-Ereignisse in diesem Bereich statt [9, 16].

Wenn die kumulierten Hits eines SE-Sensors gegenüber der Druckspannung aufgetragen werden, ist es möglich die einzelnen Phasen des Bruchprozesses zu erkennen (siehe Abbildung 2.12).

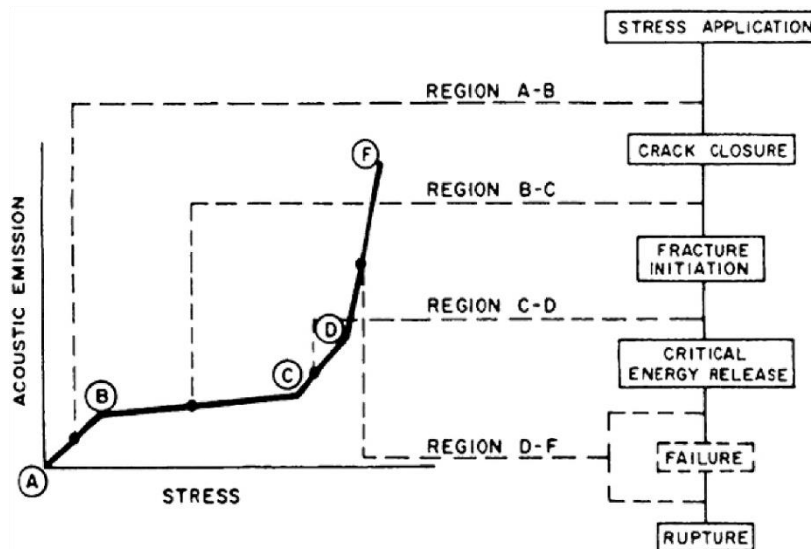


Abbildung 2.12: kumulierte Schallemissionskurve [20]

Region A-B: Die SE-Aktivität zu Beginn der Lastaufbringung wird auf unterschiedliche Faktoren zurückgeführt. Darunter fallen unter anderem das Schließen von vorhandenen Mikrorissen, nicht plan-parallele Probenenden oder das „Einregeln“ der Gesteinsprobe in der Prüfmaschine [20].

Region B-C: Während der linear elastischen Verformung treten kaum Schallemissionen auf. Der geringfügige Anstieg wird durch die Anpassung an die steigende Belastung erklärt [20].

Region C-D: Mit zunehmender Mikrorissbildung in der Phase des stabilen Risswachstums findet ein Anstieg der erfassten Hits statt [45].

Region D-F: Die Phase des instabilen Risswachstums ist durch einen exponentiellen Anstieg der kumulierten Hits gekennzeichnet. Dieser Anstieg ist durch das selbsterhaltende und schnell voranschreitende Risswachstum bedingt [45].

Bei der Ermittlung der einzelnen Spannungsniveaus wurde eine Abweichung zwischen der Auswertung mittels Volumendehnung und Schallemissionsdaten festgestellt. Diese bezieht sich insbesondere auf den Beginn der Mikrorissbildung [1, 17].

Durch die stufenweise Belastung in mehreren Lastzyklen (siehe Kapitel 4.1) ist es möglich, dass der sogenannte Kaisereffekt auftritt. Dieser Effekt wurde von Kaiser (1953) bei Zugversuchen von metallischen und organischen Materialien entdeckt [39]. Der Kaisereffekt wurde aber auch bei unterschiedlichen Gesteinsarten und Laborversuchen beobachtet [19].

Unter diesem Phänomen wird die „Erinnerung“ an das zuvor aufgebrachte Spannungsniveau verstanden, welche mit zunehmender Belastung (ca. 70% der einaxialen Druckfestigkeit [22]) verschwindet [19].

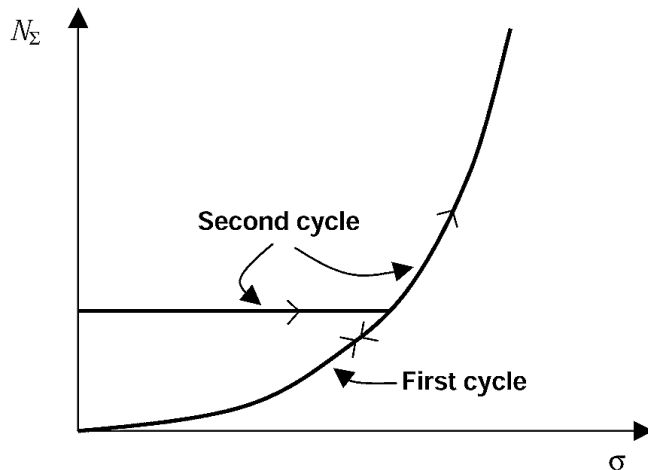


Abbildung 2.13: Kaisereffekt [19]

In Abbildung 2.13 sind die kumulierten SE-Hits N_{Σ} bezüglich der aufgetragenen Spannung σ von zwei aufeinanderfolgenden Lastzyklen dargestellt.

Wenn bei der Ent- und Wiederbelastung von Gesteinsproben unterhalb des Spannungsniveaus des vorherigen Lastzyklus keine (kaum) Schallemissionen erfasst werden,

spricht man vom Kaisereffekt. Erst nach dem Überschreiten des vorherigen Spannungsniveaus wird ein weiterer Anstieg der SE-Aktivität erwartet.

Dieser Effekt tritt allerdings nur unter stabilen (intakten) Bedingungen auf. Mit fortschreitendem Risswachstum (interne Instabilitäten) werden bereits unterhalb der zuvor aufgetragenen Spannung Schallemissionen (aufgrund von Reibungsbewegungen [19]) erfasst. Das Verhältnis zwischen aufgetragener Belastung ab welcher Schallemissionen auftreten und der maximalen Belastung des vorigen Lastzyklus ist als Felicity Verhältnis definiert [11]. Für intakte Bedingungen ist das Verhältnis größer/gleich eins, ansonsten kleiner als eins.

Der Kaisereffekt und das Felicity Verhältnis sind in der ÖNORM EN 1330-9 [29] definiert.

Es spielen wiederum einige Faktoren bei der SE-Datenerfassung eine Rolle, welche einen Einfluss auf das Auftreten des Kaisereffektes haben. Dazu zählen beispielsweise das Spannungsniveau, die Nachweisschwelle, die Korngrößen, die Porosität, die Mineralogie und das zeitabhängige Risswachstum [22].

3 Kalibrierung des Schallemissionssystems

Bevor Laborversuche mit der Aufzeichnung von Schallemissionsdaten durchgeführt werden können, ist es notwendig das Schallemissionssystem zu kalibrieren.

Zu diesen Tätigkeiten gehört unter anderem die Zusammensetzung der Messkette, die Systematik in der Anbringung der SE-Sensoren und deren Überprüfung sowie die Optimierung der Lokalisierungsgenauigkeit (siehe Kapitel 3.1).

Die Umsetzung der Kalibrierung an den, im Zuge dieser Arbeit, untersuchten Gesteinen Kalkstein, Gabbro und Magnesit wird anschließend erläutert (siehe Kapitel 3.2, Kapitel 3.3 und Kapitel 3.4).

3.1 Kalibrierende Tätigkeiten

Im Zuge der Vorbereitung des Schallemissionssystems auf den einaxialen Druckversuch sind die im Folgenden erläuterten Tätigkeiten durchzuführen.

3.1.1 Zusammensetzung der Messkette

Die Komponenten der Messkette sind in Kapitel 2.2 beschrieben. Es werden 6 Schallemissionssensoren auf der Gesteinsprobe platziert (siehe Kapitel 3.1.2). Diese Sensoren werden jeweils mit einem Vorverstärker verbunden und an die einzelnen SE-Kanäle des Schallemissionssystems angeschlossen (siehe Abbildung 3.1).

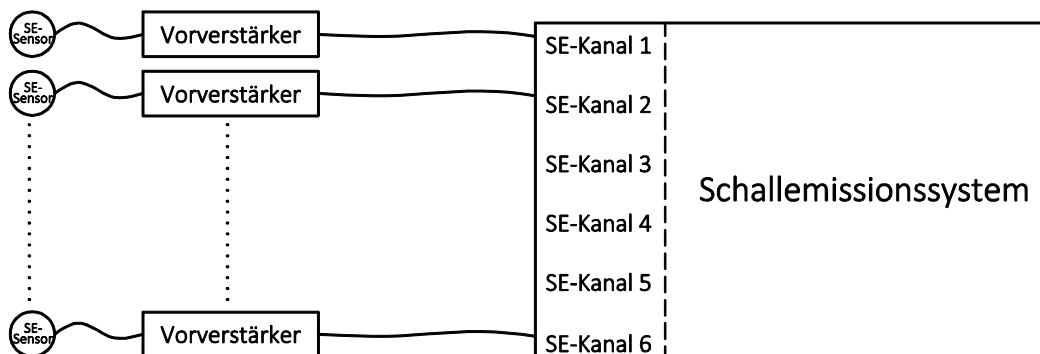


Abbildung 3.1: Schema Messkette

In Tabelle 3.1 ist die Zusammensetzung der Messkette mit Angabe der Seriennummern der SE-Sensoren und der Vorverstärker nach deren Positionen angeführt.

Tabelle 3.1: Zusammensetzung des Messsystems bei den durchgeführten Versuchen

Sensorpos.	SE-Sensor	Vorverstärker	SE-Kanal	Anordnung
1	FY84	598	1	Obere Sensorreihe
2	FY85	599	2	
3	FY83	600	3	
4	FY67	601	4	Untere Sensorreihe
5	FY60	602	5	
6	FX80	603	6	

3.1.2 Platzierung der SE-Sensoren

Laut Benutzerhandbuch des Schallemissionssystems [26] ist eine gegenüberliegende Platzierung der SE-Sensoren zu vermeiden. Stattdessen wird eine versetzte Anordnung in möglichst gleichmäßigen Dreiecken empfohlen.

Die Anordnung erfolgt in zwei Sensorreihen mit je drei Schallemissionssensoren. Diese werden jeweils ungefähr 1 cm unter-/ oberhalb der Probenober- und Probenunterkante angebracht, sowie mit einem Winkel um je 120° zueinander versetzt. Zudem ist die untere Sensorreihe (Pos.4, Pos.5, Pos.6) um 60° zu der oberen Sensorreihe (Pos.1, Pos.2, Pos.3) verdreht (siehe Abbildung 3.2). Dadurch werden gleichmäßige Dreiecke zwischen den SE-Sensoren erzielt.

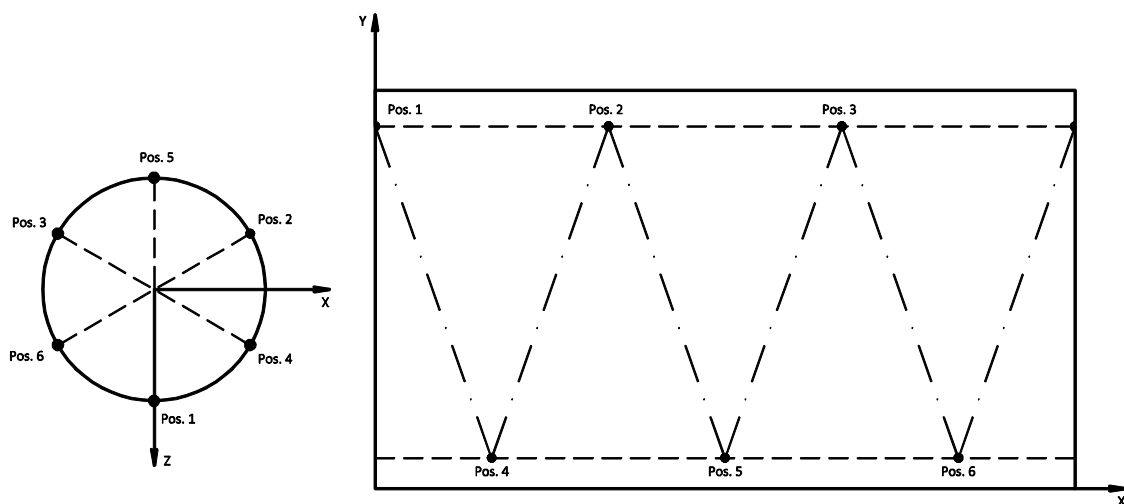


Abbildung 3.2: Anordnung der SE-Sensoren. Draufsicht (links); Abwicklung (rechts)

Die Positionen der SE-Sensoren sind auf der Gesteinsoberfläche zu markieren. Dafür werden die Sensorachsen auf der Kopffläche der Probe gekennzeichnet. Anschließend werden diese Achsen entlang der Oberfläche nach unten gezogen und die 10 cm von oben und unten markiert. Dadurch wird eine genaue Positionierung der SE-Sensoren möglich.

Die SE-Sensoren werden mit einem Kopplungsmittel auf der Gesteinsoberfläche direkt angeklebt. Dabei ist auf eine sparsame Verwendung des Kopplungsmediums zu achten (laut ÖNORM EN 13477-2 [31]). Die Anbringung mit teilweise fehlendem Kopplungsmittel ist zu vermeiden [26]. Als Kopplungsmittel wird der Silikonkleber Poly-Max Glasklar Express (auf Basis UHU Polymer-Technologie) verwendet.

Dieser Silikonkleber wird zuerst auf den markierten Positionen aufgebracht. Die Platzierung der einzelnen SE-Sensoren erfolgt ca. 10 Minuten nach dem Auftragen des Klebers. Dadurch hat sich eine Anfangsfestigkeit entwickelt, was eine nachträgliche Verdrehung des SE-Sensors verhindert. Der Schallemissionssensor wird leicht auf die „Klebestelle“ gedrückt und gedreht um Luftschlüsse (fehlendes Kopplungsmittel) zu vermeiden.

Nach weiteren 5 Minuten ist der Silikonkleber ausreichend ausgehärtet und die Ankopplung der SE-Sensoren kann überprüft werden.

3.1.3 Überprüfung der Kopplung

Die Überprüfung der Empfindlichkeit eines Schallemissionssensors (Kopplung) erfolgt mit dem Bleistiftminenbruch. Hierfür wird eine spröde Graphitmine (Hsu-Nielsen-Quelle) in einer Halterung auf die Gesteinsoberfläche, in der Nähe des zu überprüfenden Sensors, angehalten und abgebrochen (siehe Abbildung 3.3). Dadurch wird ein Schallemissionsereignis simuliert.

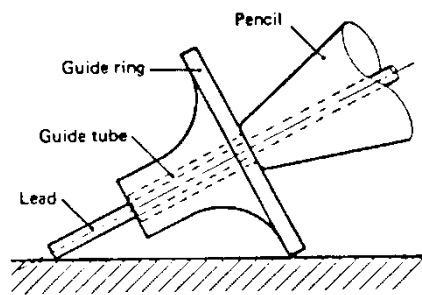


Abbildung 3.3: Bleistiftminenbruch [13]

Die verwendeten Graphitminen mit einem Durchmesser von 0,5 mm (alternativ 0,3 mm) und dem Härtegrad 2H [29] sind stets vom selben Hersteller (gleichbleibende Qualität) zu verwenden. Dadurch sollen Abweichungen bezüglich der Minenqualität vermieden werden.

Der Kontaktwinkel der freien Minenlänge ($3 \pm 0,5$ mm) wird durch den Führungsring (Halterung) definiert. Dadurch ist die Hsu-Nielsen-Quelle eine reproduzierbare Referenzquelle (laut ÖNORM EN 1330-9 [29]).

Diese Parameter definieren die Bruchkraft [7], womit eine Signalamplitude von 95-100 dB bei dem aktuell überprüften Schallemissionssensor zu erwarten ist. Bei mehreren Bleistiftminenbrüchen muss die Differenz zwischen höchster und niedrigster Amplitude weniger als 3 dB betragen (laut ÖNORM EN 13477-2 [31]).

Um eine ausreichende Ankopplung eines SE-Sensors handelt es sich, wenn die Signalamplitude von mindestens drei Bleistiftminenbrüchen innerhalb dieses

Frequenzbereiches liegt. Somit wird sichergestellt, dass der SE-Sensor die Verformung der Probenoberfläche während des Versuchs sinngemäß erfasst.

Bei der Überprüfung ist darauf zu achten, dass kein anderer SE-Kanal eine höhere Signalamplitude aufweist als der überprüfte SE-Kanal. Wenn dies der Fall ist oder die gemessene Signalamplitude kleiner als 95 dB ist, muss der Sensor abgenommen und nochmals befestigt sowie überprüft werden.

Nachdem die Kopplung jedes Schallemissionssensors erfolgreich durchgeführt wurde, sind die tatsächlichen Koordinaten der SE-Sensoren nachzumessen. Eine exakte Platzierung der Schallemissionssensoren an den markierten Positionen ist gelegentlich nicht möglich (ein geringfügiges Abrutschen kann nicht ausgeschlossen werden).

3.1.4 Ermittlung der Ausbreitungsgeschwindigkeit

Mit dem Bleistiftminenbruch wird nicht nur die Kopplung überprüft, sondern auch die Ausbreitungsgeschwindigkeit innerhalb des Gesteins.

Es wird eine Hsu-Nielsen-Quelle in der Nähe eines frei gewählten SE-Sensors ausgelöst. Der Bleistift ist derart an die Probenoberfläche anzuhalten, dass sich die generierte SE-Welle in Richtung eines anderen SE-Sensors ausbreitet. Dafür gibt es grundsätzlich zwei Möglichkeiten. Entweder wird ein Schallemissionswelle durch den Prüfkörper (siehe Abbildung 3.4, links) oder nahe der Oberfläche (siehe Abbildung 3.4, rechts) angeregt.

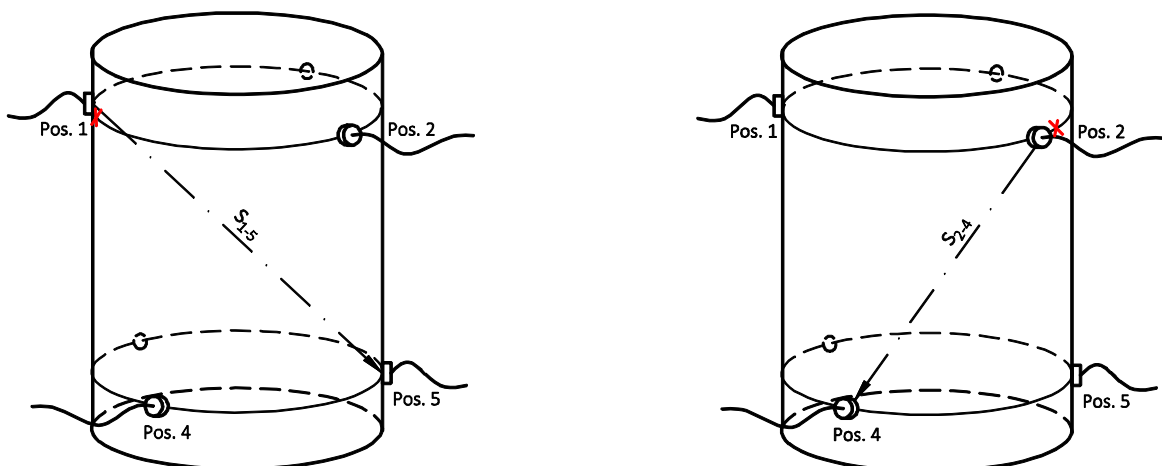


Abbildung 3.4: SE-Welle durch den Prüfkörper (links); nahe der Oberfläche (rechts)

Bei Position 1 ist der Bleistift derart an die Gesteinsoberfläche anzuhalten und abzurechen, dass sich die SE-Welle durch den Gesteinskörper in Richtung der Position 5 fortpflanzt. Die bei Position 2 generierte Schallemissionswelle wird in Richtung Position 4 nahe der Gesteinsoberfläche angeregt.

Es sind mehrere Hsu-Nielsen-Quellen auszulösen, da nur diejenigen mit den höchsten Signalamplituden (>95 dB) für die Berechnung herangezogen werden sollten.

Die Zeitdifferenz dt wird durch die erfassten Ankunftszeiten der zugehörigen SE-Kanäle (t_i und t_j) ermittelt.

$$dt = t_i - t_j \quad (3.1)$$

Es wird eine direkte Wellenausbreitung angenommen. Dieser direkte Weg $ds = s_{1-5}; s_{2-4}$ wird mit den bekannten Koordinaten der SE-Sensoren (x_i, y_i, z_i und x_j, y_j, z_j) ermittelt.

$$ds = \sqrt{(y_i - y_j)^2 + (x_i - x_j)^2 + (z_i - z_j)^2} \quad (3.2)$$

Folglich lässt sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit v bestimmen.

$$v = \frac{ds}{dt} \quad (3.3)$$

Diese Geschwindigkeit kann als Plausibilitätskontrolle mit der Durchschallungsgeschwindigkeit verglichen werden.

Es ist darauf zu achten, dass die Bleistiftminenbrüche sauber ausgeführt werden. Fehlstellen der Mine oder eine „unsaubere“ Ausführung haben eine geringere Signalamplitude und somit „spätere“ Ankunftszeiten an den SE-Kanälen zur Folge.

Lockner und Byerlee [23] haben die Auswirkung der ungenau bestimmten Hitankunftszeiten auf die Rückrechnung der Geschwindigkeit untersucht. Es wurden für SE-Ereignisse mit geringen Signalamplituden geringere Geschwindigkeiten berechnet, als die angenommene Ausbreitungsgeschwindigkeit. Als Gründe wurden die geringe Signalamplitude der P-Welle und die Dämpfung der Signalamplitude angeführt. Aufgrund der kleineren Signalamplitude wurde eine später ankommende S-Welle oder ein reflektierter Modus mit größerer Amplitude von dem SE-System erfasst.

3.1.5 Systemeinstellungen des SE-Systems

Das Niveau der Signalverstärkung des Vorverstärkers wird mit 40 dB gewählt. Die analogen Filter des SE-Systems werden auf 200 kHz und 3 MHz festgelegt. Die Aufzeichnung der Wellenformen erfolgt mit einer Abtastrate von 5 MSPS, einem Pre-Trigger von 50.000 μ s und einer Speichertiefe von 5 k (abhängig von der Abtastrate). Es werden maximal 256 Iterationsschritte für die Lokalisierung durchgeführt.

Zusätzlich sind Einstellungen der „Location Setup Parameter“ [mm] (Event Definition Value EDV, Event Lockout Value ELV, Over-Calibration Value OV) und „AE Timing Parameter“ [μ s] (Peak Definition Time PDT, Hit Definition Time HDT, Hit Lockout Time HLT) zu treffen. Die Definitionen sind dem Benutzerhandbuch des Schallemissionssystems [26] zu entnehmen.

Um eine Bandbreite der „AE Timing Parameter“ für Gesteine zu erhalten, wurde eine Literaturstudie durchgeführt. Dabei stellte es sich als schwierig dar, gesteinspezifische Richtwerte zu eruieren. In Tabelle 3.2 sind die recherchierten Werte dieser Parameter angeführt.

Tabelle 3.2: gesteinspezifische Richtwerte der „AE Timing Parameter“

Quelle	Material	PDT [μs]	HDT [μs]	HLT [μs]
„Erfahrungswerte“	k.A.	200	800	100
[26]	Verbundmaterial	20-50	100-200	300
[1]	Granit, Gabbro	50	200	300
[5]	Granit, Marmor	50	100	100
[6]	Granit	50	75	100
[17]	Granit	50	100	500
[43]	Sandstein	50	200	300

Die Variation der SE-Parameter für die Optimierung der Lokalisierungs Genauigkeit wird für die Gesteine Kalkstein und Gabbro in Kapitel 3.2.3.3, Kapitel 3.2.3.5 und Kapitel 3.3.3.2 erläutert.

3.1.6 Ermittlung des elektronischen Rauschens

Um die Nachweisschwelle für die SE-Messung festzulegen sind das Eigenrauschen der SE-Sensoren (= elektronisches Rauschen) und die Hintergrundgeräusche (im Felsmechaniklabor) zu berücksichtigen.

Das Eigenrauschen der Schallemissionssensoren liegt bei ca. 23 dB (siehe Anhang, Abbildung 0.1). Die Nachweisschwelle sollte 3-6 dB höher als dieses Eigenrauschen sein. Wenn die Schwelle zu gering festgelegt wird ist es möglich, dass Signale als scheinbare Hits erfasst werden.

Nachdem die Gesteinsprobe in der Prüfmaschine eingebaut und die Vorlast aufgebracht wurde, ist das Rauschen der SE-Sensoren zu kontrollieren und eventuell anzupassen.

3.1.7 Konfiguration des parametrischen Eingangs

Um die aufgebrachte Spannung während des einaxialen Druckversuchs zu erfassen ist ein eigener Messkanal erforderlich. Dieser äußere Parameter wird mit dem parametrischen Eingang „Parametric 1“ aufgezeichnet.

Die erfasste Spannung der Gesteinsprüfmaschine wird durch einen Multiplikator (50.000 für jeden SE-Kanal) skaliert.

3.2 Kalibrierende Tätigkeiten: Kalkstein

Der Kalkstein gehört zu der Gruppe der Sedimentgesteine [37]. Die Gesteinsprobe hatte einen Durchmesser von 51,2 mm und eine Länge von 102,9 mm. Die Durchschallungsgeschwindigkeit in axialer Richtung betrug 4.500.000 mm/s.

3.2.1 Überprüfung der Kopplung

Nachdem die SE-Sensoren an der Gesteinsoberfläche angebracht wurden (siehe Kapitel 3.1.2), erfolgte die Kopplungsüberprüfung nach Kapitel 3.1.3. Die Signalamplituden an den SE-Kanälen wiesen mehr als 95 dB (siehe Tabelle 3.3).

Tabelle 3.3: Überprüfung der Kopplung

SE-Kanal	Signalamplitude [dB]		
1	100	100	100
2	99	97	99
3	100	100	100
4	100	97	97
5	100	99	97
6	96	98	98

Nach der positiven Überprüfung der Kopplung wurden die Koordinaten der SE-Sensoren bestimmt (siehe Tabelle 3.4).

Tabelle 3.4: Koordinaten der Schallemissionssensoren

Sensorposition	X	Y (Höhe)	Z	Anordnung
1	1,5	91,9	25,6	Obere Sensorreihe
2	21,9	91,4	-13,2	
3	-22,2	90,9	-12,8	
4	22,9	11,0	11,5	Untere Sensorreihe
5	0,0	10,0	-25,6	
6	-21,9	12,0	13,3	

3.2.2 Ermittlung der Ausbreitungsgeschwindigkeit

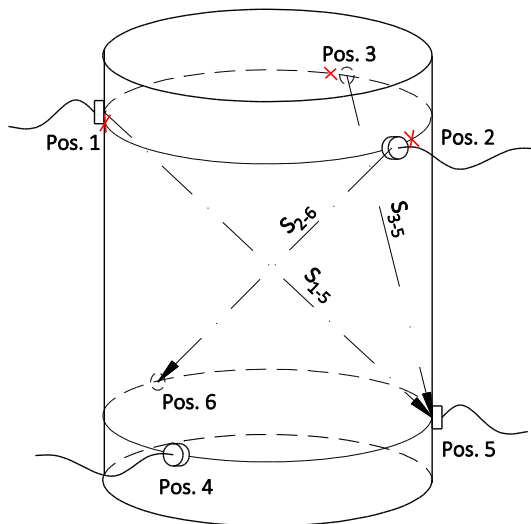


Abbildung 3.5: generierte SE-Wellen mittels Bleistiftminenbruch

Um die Ausbreitungsgeschwindigkeit innerhalb des Gesteins zu bestimmen, wurden Bleistiftminenbrüche an unterschiedlichen Positionen erzeugt (siehe Abbildung 3.5, rotes x).

Die angeregten SE-Wellen bei Position 1 und Position 2 pflanzten sich durch den Gesteinskörper fort, die Welle bei Position 3 nahe der Gesteinsoberfläche.

Die detaillierte Vorgehensweise sowie die Berechnungsschritte sind Kapitel 3.1.4 zu entnehmen.

Mit Auswertung der jeweiligen Zeitdifferenzen dt und der direkten Wege ds (siehe Anhang (A), Tabelle 0.1) wurde die Ausbreitungsgeschwindigkeit v berechnet. In Tabelle 3.5 sind die ermittelten Ausbreitungsgeschwindigkeiten für die einzelnen Positionen zusammengefasst.

Tabelle 3.5: berechnete Ausbreitungsgeschwindigkeiten

Schallemissionswelle	ds [mm]	dt [s]	v [mm/s]
quer durch den Probenkörper s_{1-5}	96,6	0,0000196	4.930.000
quer durch den Probenkörper s_{2-6}	94,5	0,0000190	4.970.000
in der Nähe der Gesteinsoberfläche s_{3-5}	84,9	0,0000187	4.540.000
	84,9	0,0000180	4.720.000

Die Geschwindigkeit der generierten Schallemissionswelle lag bei ca. 4,9-5,0 km/s durch den Probenkörper und im Bereich 4,5-4,7 km/s nahe der Probenoberfläche. Diese Ausbreitungsgeschwindigkeiten wichen von der Durchschallungsgeschwindigkeit ab, welche mit 4,5 km/s ermittelt wurde.

3.2.3 Überprüfung Lokalisierungsgenauigkeit

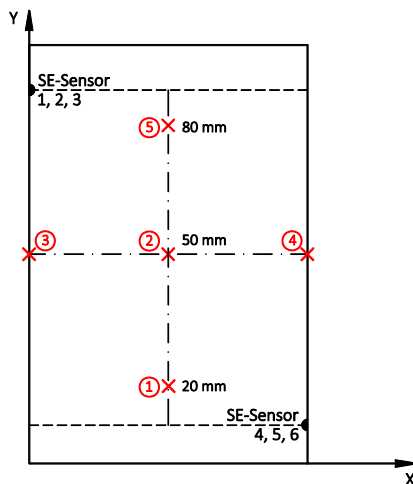


Abbildung 3.6: Positionen der Bleistiftminenbrüche (rotes x)

Um die Genauigkeit der 3D-Ortung zu überprüfen, wurden auf der Probenoberfläche fünf Positionen (siehe Abbildung 3.6) markiert.

Diese Markierungen befanden sich jeweils zwischen zwei diagonal gegenüberliegenden SE-Sensoren. Drei Markierungen waren mittig zwischen den Sensoren und je eine Markierung ober-/unterhalb eines SE-Sensors angeordnet.

An diesen gekennzeichneten Positionen wurden Bleistiftminenbrüche erzeugt. Demnach waren die Koordinaten der Bruchereignisse eindeutig

bestimmt und die Lokalisierungsgenauigkeit konnte abgeschätzt werden. Als Ausgangswerte für die „AE Timing Parameter“ und die „Location Setup Parameter“ wurden Erfahrungswerte anderer Materialien herangezogen (siehe Tabelle 3.6). Die Ausbreitungsgeschwindigkeit wurde zunächst mit 4.700.000 mm/s angenommen, die Nachweisschwelle wurde mit 40 dB gewählt.

Tabelle 3.6: Ausgangswerte der SE-Parameter

„AE Timing Parameter“	PDT	200 μ s
	HDT	800 μ s
	HLT	100 μ s
„Location Setup Parameter“	EDV	90 mm
	ELV	0 mm
	OV	10 mm
weitere Einflussfaktoren	Geschwindigkeit	4.700.000 mm/s
	Nachweisschwelle	40 dB

Anmerkung: Die an der Probenoberfläche generierten Bruchereignisse werden in den Abbildungen „Draufsicht und Ansicht“ durch rote Punkte dargestellt. Die Nummerierung von 1-6 stellt die Positionen der SE-Sensoren dar.

Mit diesen SE-Parametern wurden Bleistiftminenbrüche, an den gekennzeichneten Positionen, erzeugt. Das Ortungsergebnis eines Tests ist in Abbildung 3.7 dargestellt.

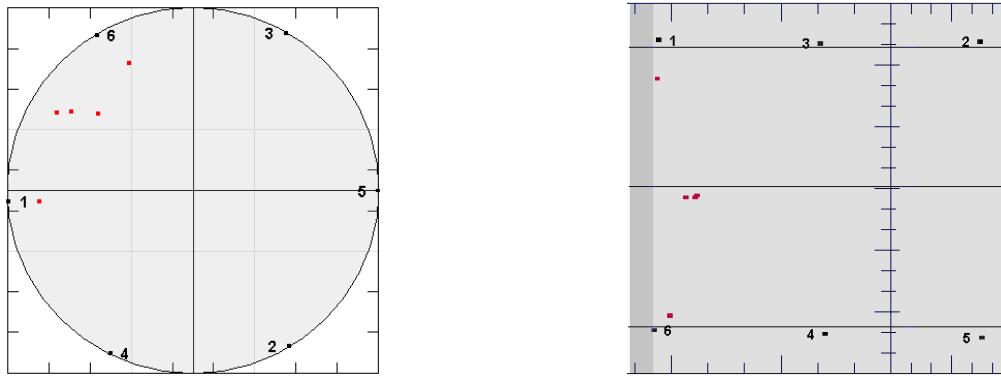


Abbildung 3.7: Draufsicht und Ansicht georteter Bruchereignisse (rote Punkte)

Das dargestellte Ergebnis zeigt, dass die an der Gesteinsoberfläche generierten SE-Ereignisse nicht an der Oberfläche, sondern innerhalb des Gesteins lokalisiert wurden. Die Bleistiftminenbrüche, welche in der Nähe der SE-Sensoren ausgelöst wurden (Position 1 und Position 5), wurden näher an der Probenoberfläche geortet. Im Gegensatz dazu wiesen die lokalisierten Schallemissionsereignisse im mittleren Bereich der Probenhöhe (Position 2-4) eine größere Abweichung von der Gesteinsoberfläche auf.

Aufgrund der Abweichung zwischen der tatsächlichen und der georteten Position des generierten Bruchereignisses, waren Vorversuche bezüglich einer Anpassung der SE-Parameter notwendig. Somit sollte die Genauigkeit der 3D-Ortung optimiert werden.

Mithilfe der AEWin Software ist es möglich, die „AE Timing Parameter“ und die Ausbreitungsgeschwindigkeit der aufgezeichneten SE-Daten im Nachhinein zu verändern. Die Originaldaten (Ankunftszeiten, Amplitude,...) werden dabei nicht modifiziert, es ändern sich lediglich die Randbedingungen für die Berechnung des Lokalisierungsverfahrens. Durch erneutes Abspielen („Replay“) der Daten mit veränderten Randbedingungen ist es möglich die Einflüsse der einzelnen Parameter auf die Ortungsgenauigkeit zu untersuchen.

3.2.3.1 Rückrechnung auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit

Da eine Richtungsabhängigkeit der Geschwindigkeit zu Beginn der Untersuchungen nicht auszuschließen war, wurde zunächst auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit zurückgerechnet.

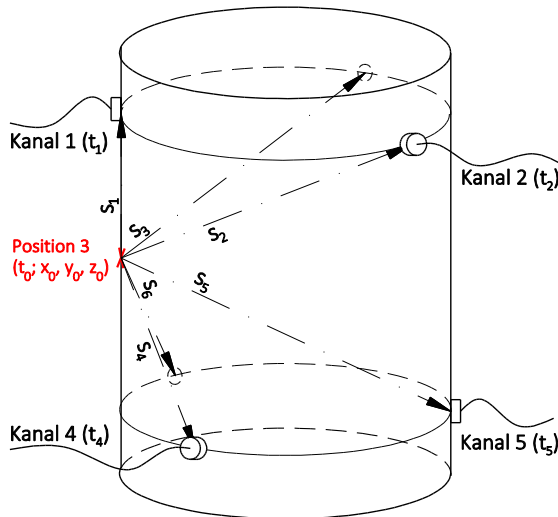


Abbildung 3.8: Bleistiftminenbruch bei Position 3 SE-Sensoren ausbreitet, dargestellt.

Diese Rückrechnung ist aufgrund der bekannten Positionen an der Gesteinsoberfläche möglich (siehe Abbildung 3.6).

Das Prinzip der Rückrechnung wird anhand einer an Position 3 generierten Hsu-Nielsen-Quelle aufgezeigt. In Abbildung 3.8 ist der direkte Weg, auf welchem sich die Schallemissionswelle in Richtung der

Die Wege ($s_1 \dots s_6$) werden nach Formel (3.2) berechnet. Die relativen Zeitdifferenzen $\Delta t_{i,rel}$ setzen sich aus einer Anfangszeit t_0 und einer Zeitdifferenz Δt_i zusammen.

Die Anfangszeit t_0 stellt den ursprünglichen Zeitpunkt dar, zu welchem das SE-Ereignis ausgelöst wurde. Da die Ankunftszeiten an den SE-Kanälen ($t_1 \dots t_6$) unabhängig von diesem Zeitpunkt sind, bleibt die tatsächliche Anfangszeit unbekannt.

Für die Berechnung werden die Ankunftszeiten der späteren Hits auf die Ankunftszeit des ersten Hits $t_{1.Hit}$ bezogen (vgl. Kapitel 2.4.3.1). Für die betrachtete Position erfasste der SE-Kanal 1 den ersten Hit. Es werden zwei verschiedene Varianten untersucht.

Bei Variante 1 wird die Geschwindigkeit v angenommen und die Anfangszeit für den SE-Kanal berechnet, welcher den ersten Hit erfasste.

$$t_0 = \frac{s_1}{v} \quad (3.4)$$

Somit entspricht die berechnete Geschwindigkeit der SE-Welle zu diesem SE-Sensor der angenommenen Geschwindigkeit (siehe Tabelle 3.7, grau markierte Zellen).

Bei Variante 2 wird die Anfangszeit mit einer Zielwertsuche (Microsoft Excel) ermittelt. Dafür wird die Summe der Differenz zwischen den berechneten Geschwindigkeiten ($v_1 \dots v_6$) und der angenommenen Geschwindigkeit v gebildet.

$$(v - v_1) + (v - v_2) + (v - v_3) + (v - v_4) + (v - v_5) + (v - v_6) \stackrel{!}{=} 0 \quad (3.5)$$

Um die Anfangszeit zu erhalten, wird die Summe der Differenzen solange variiert, bis diese zu Null wird.

Die Zeitdifferenz Δt_i zu den übrigen SE-Sensoren wird mit den ausgelesenen Hitankunftszeiten t_i der SE-Kanäle berechnet.

$$\Delta t_i = t_i - t_{1.Hit} \tag{3.6}$$

Schlussendlich ermittelt sich die Ausbreitungsgeschwindigkeiten v_i zu jedem SE-Sensor mit:

$$v_i = \frac{s_i}{t_0 + \Delta t_i} \tag{3.7}$$

Die Berechnungsblätter für die aufgezeigte Position 3 der beiden Varianten sind im Anhang (A) angeführt (siehe Tabelle 0.2 und Tabelle 0.3).

In Tabelle 3.7 und Tabelle 3.8 sind die Ergebnisse der Geschwindigkeitsberechnung für die Positionen 1-5 dargestellt. Die markierten Zellen (grau und orange) geben an zwischen welchen diagonal gegenüberliegenden SE-Sensoren die Bleistiftminenbrüche erzeugt wurden. Die fünf Positionen der jeweiligen Schallemissionssensoren sind durch horizontale Linien getrennt.

Tabelle 3.7: berechnete Ausbreitungsgeschwindigkeiten (Variante 1)

gekennzeichnete Position	v_1 [mm/s]	v_2 [mm/s]	v_3 [mm/s]	v_4 [mm/s]	v_5 [mm/s]	v_6 [mm/s]
1 h = 20mm; zw. Sensoren	4 736 959	4 903 769	4 481 345	5 390 878	6 371 641	4 700 000
2 h = 50mm; zw. Sensoren	4 960 615	4 951 776	4 477 223	4 867 315	5 088 710	4 700 000
3 h = 50mm; unter Sensor 3	5 043 521	5 167 231	4 700 000	5 066 644	5 160 830	4 655 644
4 h = 50mm; über Sensor 6	4 573 450	4 740 807	4 690 946	4 852 350	5 291 211	4 700 000
5 h = 80mm; zw. Sensoren	4 740 505	4 843 182	4 700 000	4 564 085	4 733 369	4 218 199
1 h = 20mm; zw. Sensoren	4 124 007	4 528 311	4 424 131	4 918 247	4 949 134	4 700 000
2 h = 50mm; zw. Sensoren	4 813 169	4 883 472	4 954 709	4 892 623	5 078 301	4 700 000
3 h = 50mm; unter Sensor 1	4 326 051	4 682 878	4 753 821	4 515 863	4 745 395	4 700 000
4 h = 50mm; über Sensor 6	5 036 069	4 810 087	4 645 780	4 932 647	5 110 098	4 700 000
5 h = 80mm; zw. Sensoren	4 700 000	4 376 062	4 190 930			4 237 914
1 h = 20mm; zw. Sensoren	4 534 416	4 618 229	4 582 045	4 700 000	5 218 604	5 503 210
2 h = 50mm; zw. Sensoren	4 908 424	5 081 432	4 988 467	4 700 000	5 060 914	5 186 446
3 h = 50mm; unter Sensor 1	4 700 000	5 103 651	5 061 332	4 775 832	5 231 033	4 994 302
4 h = 50mm; über Sensor 4	5 095 950	4 746 076	4 927 111	4 700 000	4 974 699	4 972 037
5 h = 80mm; zw. Sensoren	4 700 000	4 806 826	4 497 261	4 418 960	4 567 364	4 530 166
1 h = 20mm; zw. Sensoren	4 407 443	4 365 262	4 466 786	4 700 000	4 720 668	4 689 329
2 h = 50mm; zw. Sensoren	4 939 803	4 655 776	4 912 316	4 700 000	4 963 779	5 034 111
3 h = 50mm; unter Sensor 2	4 794 231	4 700 000	4 983 419	4 781 491	4 841 451	5 057 917
4 h = 50mm; über Sensor 4	4 940 016	5 256 183	5 040 778	4 700 000	5 058 987	5 147 975
5 h = 80mm; zw. Sensoren	4 580 121	4 700 000	4 406 800	4 167 139	4 555 848	4 541 341
1 h = 20mm; zw. Sensoren	4 388 684	4 309 045	4 465 053	4 815 032	4 700 000	4 640 022
2 h = 50mm; zw. Sensoren	4 975 469	4 831 946	5 123 125	5 015 657	4 700 000	5 095 574
3 h = 50mm; unter Sensor 2	4 832 557	4 700 000	5 110 018	5 043 946	4 994 191	5 098 350
4 h = 50mm; über Sensor 5	4 755 018	4 608 815	4 506 248	4 674 713	4 700 000	4 685 964
5 h = 80mm; zw. Sensoren	4 743 619	4 700 000	4 379 196	4 340 205	4 281 423	4 516 059
1 h = 20mm; zw. Sensoren	4 260 495	4 310 730	3 934 697	4 604 622	4 700 000	4 393 085
2 h = 50mm; zw. Sensoren	4 661 630	4 734 230	4 314 848	4 724 461	4 700 000	4 410 393
3 h = 50mm; unter Sensor 3	4 922 497	5 080 402	4 700 000	4 766 446	4 997 893	4 655 644
4 h = 50mm; über Sensor 5	4 622 109	4 839 010	4 506 248	4 674 713	4 700 000	4 685 964
5 h = 80mm; zw. Sensoren	4 634 229	4 912 715	4 700 000	4 612 734	4 437 672	4 450 397

Tabelle 3.8: berechnete Ausbreitungsgeschwindigkeiten (Variante 2)

gekennzeichnete Position	v_1 [mm/s]	v_2 [mm/s]	v_3 [mm/s]	v_4 [mm/s]	v_5 [mm/s]	v_6 [mm/s]
1 h = 20mm; zw. Sensoren	4 553 002	4 719 549	4 296 947	5 021 694	5 703 383	3 905 425
2 h = 50mm; zw. Sensoren	4 822 204	4 831 236	4 330 905	4 748 831	4 937 629	4 529 195
3 h = 50mm; unter Sensor 3	4 808 350	4 916 496	4 398 360	4 839 277	4 846 515	4 391 002
4 h = 50mm; über Sensor 6	4 471 007	4 657 153	4 579 887	4 755 798	5 176 800	4 559 357
5 h = 80mm; zw. Sensoren	4 814 078	4 902 330	4 868 178	4 595 150	4 769 485	4 250 779
1 h = 20mm; zw. Sensoren	4 162 178	4 567 142	4 464 621	5 023 418	5 029 647	4 952 995
2 h = 50mm; zw. Sensoren	4 600 647	4 731 026	4 770 325	4 710 550	4 911 206	4 476 246
3 h = 50mm; unter Sensor 1	4 843 702	4 675 945	4 476 554	4 777 449	4 943 993	4 482 357
4 h = 50mm; über Sensor 6	4 413 233	4 752 921	4 826 632	4 599 802	4 812 693	4 794 718
5 h = 80mm; zw. Sensoren	5 395 824	4 580 527	4 446 609			4 377 040
1 h = 20mm; zw. Sensoren	4 453 572	4 541 951	4 512 290	4 353 826	5 065 776	5 272 584
2 h = 50mm; zw. Sensoren	4 577 125	4 798 051	4 751 454	4 382 768	4 814 998	4 875 604
3 h = 50mm; unter Sensor 1	4 392 621	4 849 694	4 809 480	4 493 113	4 980 714	4 674 379
4 h = 50mm; über Sensor 4	4 861 686	4 544 114	4 763 151	4 454 347	4 791 886	4 784 815
5 h = 80mm; zw. Sensoren	4 995 187	4 937 424	4 582 974	4 478 055	4 619 227	4 587 133
1 h = 20mm; zw. Sensoren	4 468 558	4 431 326	4 524 834	5 101 328	4 872 746	4 801 208
2 h = 50mm; zw. Sensoren	4 774 786	4 473 133	4 772 616	4 501 363	4 795 014	4 883 088
3 h = 50mm; unter Sensor 2	4 603 792	4 880 589	4 777 715	4 326 915	4 769 668	4 841 321
4 h = 50mm; über Sensor 4	4 659 375	4 513 034	4 837 622	4 606 539	4 667 787	4 915 643
5 h = 80mm; zw. Sensoren	4 816 036	5 248 124	4 564 269	4 267 928	4 662 778	4 640 865
1 h = 20mm; zw. Sensoren	4 448 997	4 378 990	4 533 404	4 993 265	5 087 223	4 758 120
2 h = 50mm; zw. Sensoren	4 763 555	4 539 876	4 860 281	4 753 666	4 415 906	4 866 715
3 h = 50mm; unter Sensor 2	4 615 588	4 405 898	4 867 637	4 738 085	4 703 345	4 869 448
4 h = 50mm; über Sensor 5	4 791 730	4 656 026	4 551 538	4 714 878	4 759 603	4 726 226
5 h = 80mm; zw. Sensoren	4 922 952	5 260 093	4 584 874	4 436 595	4 383 528	4 611 958
1 h = 20mm; zw. Sensoren	4 390 331	4 456 755	4 069 488	4 878 064	5 675 683	4 729 679
2 h = 50mm; zw. Sensoren	4 751 256	4 844 581	4 432 010	4 820 186	4 842 285	4 509 682
3 h = 50mm; unter Sensor 3	4 644 048	4 871 912	4 534 872	4 700 111	4 737 634	4 711 423
4 h = 50mm; über Sensor 5	4 787 702	4 934 472	4 517 282	4 645 345	4 819 368	4 495 831
5 h = 80mm; zw. Sensoren	4 694 113	5 004 925	4 888 659	4 648 449	4 476 998	4 486 857

Für die Berechnung wurde die als bekannt vorausgesetzte Geschwindigkeit v mit 4,7 km/s angenommen. Bei der Untersuchung der berechneten Geschwindigkeiten war eine Streuung der Ergebnisse ersichtlich. Bei Variante 1 lag die berechnete Ausbreitungsgeschwindigkeit zwischen 3,9-6,4 km/s, bei Variante 2 zwischen 3,9-5,7 km/s.

Die Kanäle der SE-Sensoren, welche in der Nähe des Bleistiftminenbruches platziert waren, erfassten den ersten Hit (siehe grau markierte Zellen). Daraus ergab sich bei Variante 1 eine berechnete Geschwindigkeit zu diesen SE-Sensoren, welche der angenommenen Geschwindigkeit entsprach. Die berechnete Geschwindigkeit mittels Variante 2 wich von dieser Geschwindigkeit ab.

Die ermittelte Ausbreitungsgeschwindigkeit zu den Schallemissionssensoren, welche sich in der unmittelbaren Nähe des Bruchereignisses befanden, wurde meistens kleiner berechnet als die angenommene Geschwindigkeit (siehe orange markierte Zellen).

Eine Richtungsabhängigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit war aufgrund dieser Ergebnisse nicht festzustellen.

3.2.3.2 Variation der Ausbreitungsgeschwindigkeiten

Die Geschwindigkeit wurde zwischen 4,5-5,0 km/s variiert und Hsu-Nielsen-Quellen an den markierten Positionen ausgelöst. Ein Vergleich der 3D-Ortung der unterschiedlichen Geschwindigkeiten ist in Abbildung 3.9 dargestellt.

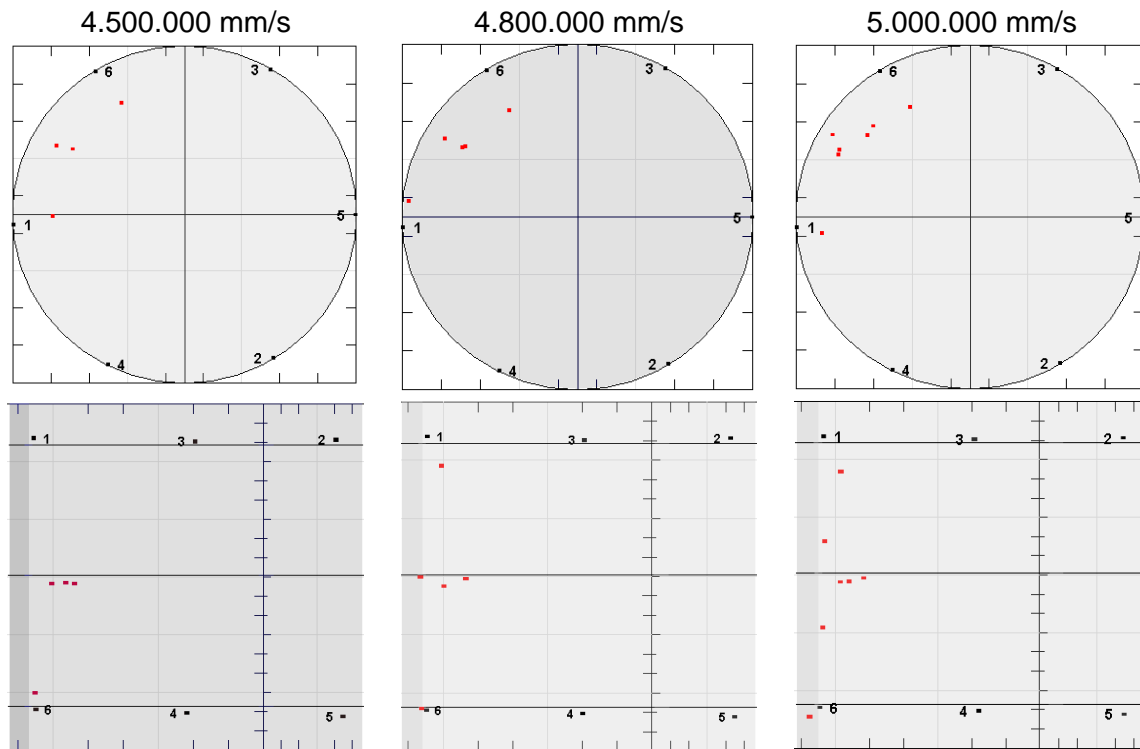


Abbildung 3.9: Draufsicht und Ansicht georteter Bruchereignisse (rote Punkte) mit variierten Ausbreitungsgeschwindigkeiten

Die Abweichung der georteten SE-Ereignisse für die unterschiedlichen Geschwindigkeiten war sowohl in der Draufsicht als auch in der Ansicht (Höhenlage) gleichartig. Deshalb wurden die Ausbreitungsgeschwindigkeiten im „Replay“ verändert.

Beispielsweise wurden die aufgezeichneten SE-Daten (Originalgeschwindigkeit 4,5 km/s) mit einer Geschwindigkeit von 4,8 km/s sowie 5,0 km/s wiedergegeben. Die qualitative Auswertung dieser Geschwindigkeitsvariation ist in Tabelle 3.9 dargestellt.

Tabelle 3.9: Variation der Ausbreitungsgeschwindigkeiten

Originalgesch. Replaygesch.	4.500.000 mm/s	4.800.000 mm/s	5.000.000 mm/s
4.500.000 mm/s		+	-
4.800.000 mm/s	-		=
5.000.000 mm/s	-	-	

Es zeigte sich, dass die georteten SE-Ereignisse mit größeren Werten der Geschwindigkeit (im Vergleich zur Originalgeschwindigkeit) in der Draufsicht enger

zusammenrückten, aber die Höhenlage gleich blieb. Die Änderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit von 4,5 km/s auf 5,0 km/s war jedoch im Vergleich mit der Änderung auf 4,8 km/s als „schlechter“ anzusehen (siehe Abbildung 3.10).

Die SE-Ereignisse mit kleineren Werten der Geschwindigkeit (im Vergleich zur Originalgeschwindigkeit) wurden in der Draufsicht zu weit auseinander geortet.

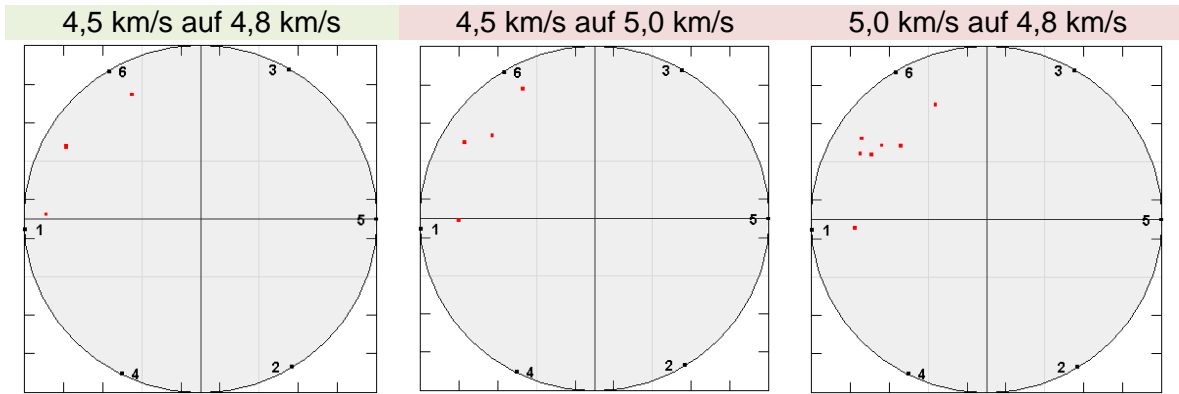


Abbildung 3.10: Draufsicht georteter Bruchereignisse (rote Punkte) mit variierten Ausbreitungsgeschwindigkeiten

Es wurde eine Ausbreitungsgeschwindigkeit von 4,8 km/s für die weiteren Versuche gewählt.

3.2.3.3 Variation der „Location Setup Parameter“

Um den Einfluss dieser Parameter auf die Genauigkeit der Lokalisierung zu ermitteln, wurden zwei Varianten untersucht (siehe Tabelle 3.10).

Durch die Einstellungen der Variante 1 wurden sich zeitlich überschneidende SE-Ereignisse zugelassen und eine Fehlertoleranz bei der Berechnung der Zeitdifferenzen des Lokalisierungsverfahrens erlaubt.

Mit Variante 2 wurden Hits nach dem SE-Ereignis ignoriert (z.B. Reflexionen) und keine Fehlertoleranzen bei der Berechnung der Zeitdifferenzen zugelassen.

Tabelle 3.10: untersuchte Varianten der Parameter EDV/ ELV/ OV

„Location Setup Parameter“	Variante 1	Variante 2
Event Definition Value (EDV)	90 mm	85 mm
Event Lockout Value (ELV)	0 mm	90 mm
Overcal Value (OV)	10 mm	0 mm

Die Abbildung 3.11 zeigt die Lokalisierung von Bleistiftminenbrüchen für die Parametereinstellungen der Variante 2. Diese unterschieden sich geringfügig von den Ergebnissen mit den Parametereinstellungen der Variante 1 in Abbildung 3.7.

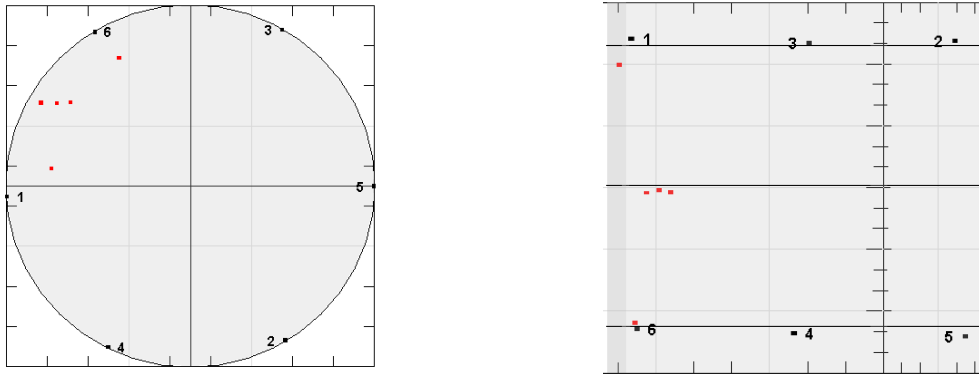


Abbildung 3.11: Draufsicht und Ansicht georteter Bruchereignisse (rote Punkte)

Für die weiteren Versuche wurden die „Location Setup Parameter“ der Variante 1 verwendet.

3.2.3.4 Variation der Nachweisschwelle

Das Niveau der Nachweisschwelle wurde zwischen 30-40 dB variiert. In Abbildung 3.12 ist das Ortungsergebnis für die Einstellung mit einer Nachweisschwelle von 30 dB dargestellt.

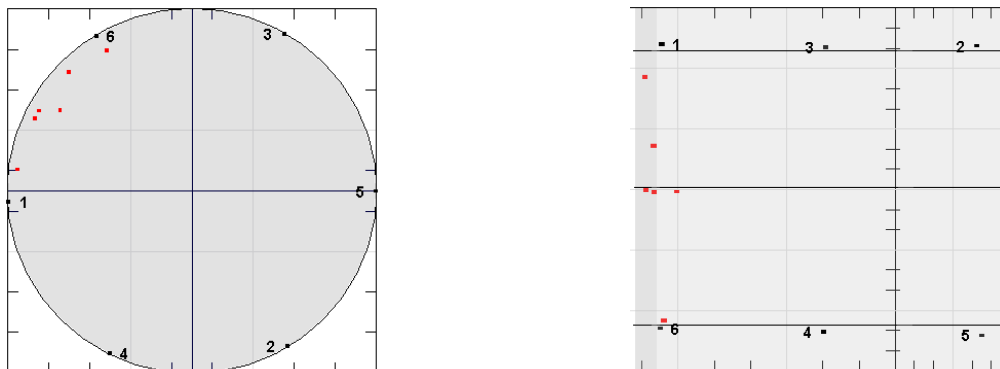


Abbildung 3.12: Draufsicht und Ansicht georteter Bruchereignisse (rote Punkte)

Der Vergleich des Lokalisierungsergebnis mit einer Schwelle von 40 dB (siehe Abbildung 3.7) zeigte, dass sich die 3D-Ortung der SE-Ereignisse mit geringerer Nachweisschwelle wesentlich verbesserte. Folglich wurde die Nachweisschwelle mit 30 dB festgelegt.

3.2.3.5 Variation der „AE Timing Parameter“

Um den Einfluss dieser Parameter auf die Lokalisierung zu ermitteln, wurden fünf Varianten untersucht. Diese Varianten orientierten sich an den gesteinspezifischen Richtwerten (siehe Tabelle 3.2).

Bei Variante 1 handelte es sich um Erfahrungswerte, welche die Basis der bisherigen Vorversuche waren.

Die Parameter der Variante 2 orientierten sich an den Werten für Granit [17], Variante 3 orientierte sich an den Werten von Granit und Marmor [5]. Die Parameter der Variante 4 stellten eine Variation der angegebenen Werte nach [5] und [1, 43] dar. Für Variante 5 wurde eine Variation der Erfahrungswerte und der angegebenen Werte nach [1, 43] gewählt.

Tabelle 3.11: untersuchte Varianten der Parameter PDT/HDT/HLT

„AE Timing Parameter“	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4	Variante 5
PDT	200 μ s	50 μ s	50 μ s	50 μ s	100 μ s
HDT	800 μ s	100 μ s	100 μ s	200 μ s	200 μ s
HLT	100 μ s	500 μ s	100 μ s	100 μ s	100 μ s

In Abbildung 3.13 ist die Draufsicht der Lokalisierungsergebnisse der Varianten 2-5 dargestellt. Es wurden SE-Ereignisse bei mehr als zwei diagonal gegenüberliegenden SE-Sensoren in einem Versuch erzeugt.

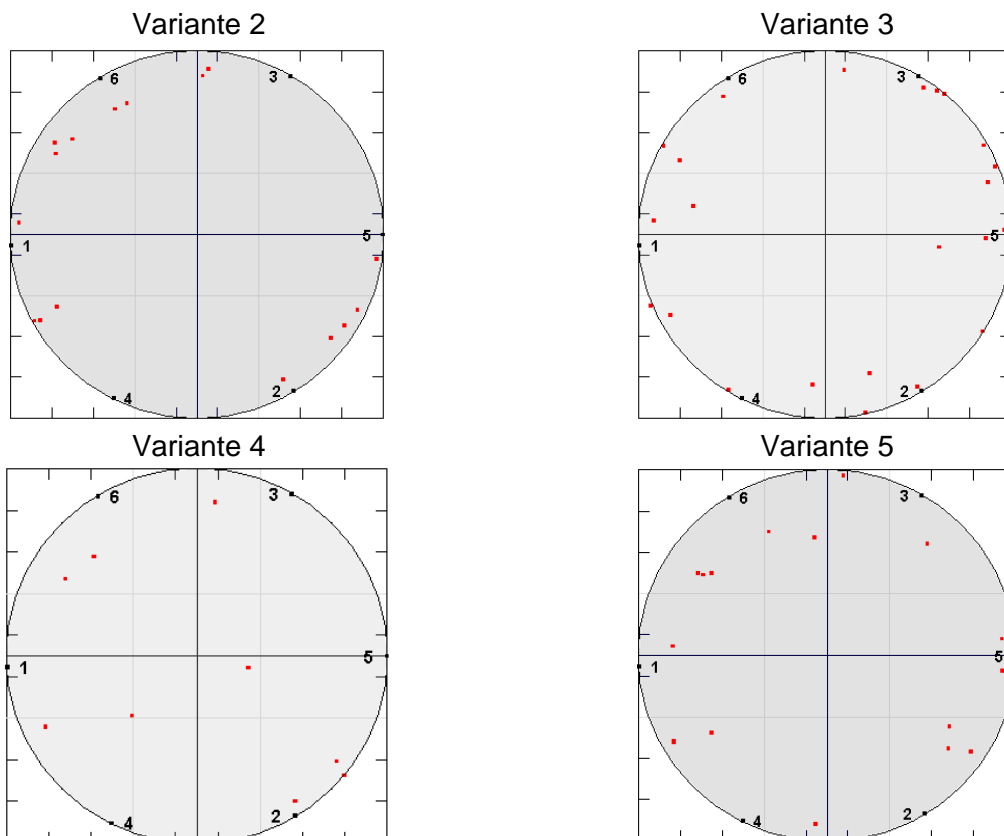


Abbildung 3.13: Draufsicht georteter Bruchereignisse (rote Punkte) der Varianten 2-5

Die georteten SE-Ereignisse der Variante 4 und Variante 5, zeigten gegenüber der Variante 2 und Variante 3 eine größere Abweichung von der Oberfläche. Die Resultate der ersten drei Varianten (Variante 1 siehe Abbildung 3.12) waren gleichartig. Allerdings

wurden bei Variante 3 sieben SE-Ereignisse auf den Positionen an der Gesteinsoberfläche geortet.

Es wurden die „AE Timing Parameter“ der Variante 3 gewählt.

3.2.4 Ermittlung des elektronischen Rauschens mit aufgebracht Vorlast

Nachdem die Wegaufnehmer auf der Gesteinsprobe angebracht und die Probe auf die Vorlast belastet wurde (siehe Abbildung 4.3, links), erfolgte die Erfassung von Hintergrundgeräuschen im Felsmechaniklabor.

In dem beobachteten Zeitraum des Rauschverhaltens erfassten die SE-Kanäle einige Hits (siehe Anhang(A), Abbildung 0.2). Deshalb wurde das Niveau der Nachweisschwelle auf 35 dB erhöht.

Die kalibrierten SE-Parameter, mit welchen der einaxiale Druckversuch durchgeführt wurde, sind Tabelle 3.12 zu entnehmen.

Tabelle 3.12: kalibrierte SE-Parameter

„AE Timing Parameter“	PDT	50 μ s
	HDT	100 μ s
	HLT	100 μ s
„Location Setup Parameter“	EDV	90 mm
	ELV	0 mm
	OV	10 mm
weitere Einflussfaktoren	Ausbreitungsgeschwindigkeit	4,8 km/s
	Nachweisschwelle	35 dB

3.3 Kalibrierende Tätigkeiten: Gabbro

Der Gabbro gehört zu der Gruppe der magmatischen Gesteine [37]. Die Gesteinsprobe hatte einen Durchmesser von 50,6 mm und eine Länge von 101,5 mm. Die Durchschallungsgeschwindigkeit in axialer Richtung betrug 5.800.000 mm/s.

3.3.1 Überprüfung der Kopplung

Bei diesem Gestein stellte sich das Anbringen der SE-Sensoren an der Gesteinsoberfläche schwieriger dar. Die Kopplungsüberprüfung wurde nach Kapitel 3.1.3 durchgeführt. Die SE-Sensoren 4 und 5 wurden mehrmals abgenommen und erneut angebracht, da die Signalamplituden dieser SE-Kanäle weniger als 95 dB aufwiesen. Es war allerdings keine Verbesserung der Ankopplung zu erzielen. In Tabelle 3.13 sind die Signalamplituden je Schallemissionskanal dargestellt.

Tabelle 3.13: Überprüfung der Kopplung

SE-Kanal	Signalamplitude [dB]		
1	96	97	98
2	97	99	99
3	96	97	98
4	92	93	93
5	94	95	95
6	97	98	99

In Tabelle 3.14 sind die ermittelten Koordinaten der SE-Sensoren nach der Kopplungsüberprüfung angeführt.

Tabelle 3.14: Koordinaten der Schallemissionssensoren

Sensorposition	X	Y (Höhe)	Z	Anordnung
1	0,5	89,5	25,3	Obere Sensorreihe
2	21,9	87,5	-12,7	
3	-21,9	90,5	-12,7	
4	22,6	11,0	11,3	Untere Sensorreihe
5	0,0	10,0	-25,3	
6	-21,1	12,0	13,9	

3.3.2 Ermittlung der Ausbreitungsgeschwindigkeit

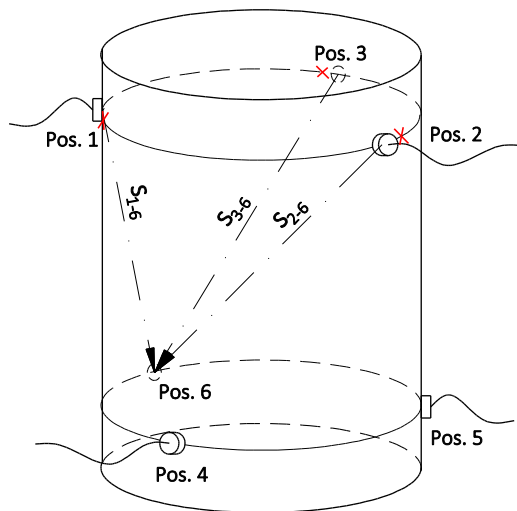


Abbildung 3.14: generierte SE-Wellen mittels Bleistiftminenbruch

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit innerhalb des Gesteins wurde mittels Bleistiftminenbrüchen an drei Positionen (siehe Abbildung 3.14, rotes x) bestimmt. Die Vorgehensweise und die Berechnungsschritte sind Kapitel 3.1.4 zu entnehmen.

Es wurde darauf geachtet, dass die SE-Sensoren welche geringe Signalamplituden bei der Überprüfung der Kopplung aufwiesen, nicht herangezogen werden.

In Tabelle 3.15 sind die berechneten Geschwindigkeiten v der unterschiedlichen Ausbreitungsrichtungen zusammengefasst. Die detaillierte Auswertung der Zeitdifferenzen dt und direkten Wege ds ist dem Anhang (B), Tabelle 0.4 zu entnehmen.

Tabelle 3.15: berechnete Ausbreitungsgeschwindigkeiten

Schallemissionswelle	ds [mm]	dt [s]	v [mm/s]
quer durch den Probenkörper s_{2-6}	90,9	0,0000140	6.500.000
in der Nähe der Gesteinsoberfläche s_{1-6}	81,0	0,0000132	6.100.000
in der Nähe der Gesteinsoberfläche s_{3-6}	82,9	0,0000133	6.200.000
	82,9	0,0000132	6.300.000

Die Geschwindigkeit der simulierten Schallemissionswelle lag bei ca. 6,5 km/s durch den Probenkörper und zwischen 6,1-6,3 km/s nahe der Probenoberfläche. Diese Geschwindigkeiten wichen von der Durchschallungsgeschwindigkeit ab.

3.3.3 Überprüfung Lokalisierungsgenauigkeit

Bevor die SE-Parameter des Kalksteins optimiert wurden, gab es Vorversuche an diesem Gestein auf Basis der Erfahrungswerte (siehe Tabelle 3.2).

Im Zuge dieser Vorversuche wurden die Abweichungen zwischen dem an der Probenoberfläche ausgelösten Bruchereignis und dem georteten Bruchereignis festgestellt. Da es sich um eine frühere Versuchsreihe handelte, war die Nummerierung der SE-Sensoren sowie die Zusammensetzung des Messsystems eine andere (siehe

Anhang (B), Tabelle 0.5, Tabelle 0.6, Tabelle 0.7). Die Einstellungen der SE-Parameter sind Tabelle 3.16 zu entnehmen.

Tabelle 3.16: SE-Parameter Vorversuch

„AE Timing Parameter“	PDT	200 μ s
	HDT	800 μ s
	HLT	100 μ s
„Location Setup Parameter“	EDV	90 mm
	ELV	0 mm
	OV	10 mm
weitere Einflussfaktoren	Ausbreitungsgeschwindigkeit	5.750.000 mm/s
	Nachweisschwelle	40 dB

In Abbildung 3.15 sind die Lokalisierungsergebnisse von zwei Versuchen dargestellt.

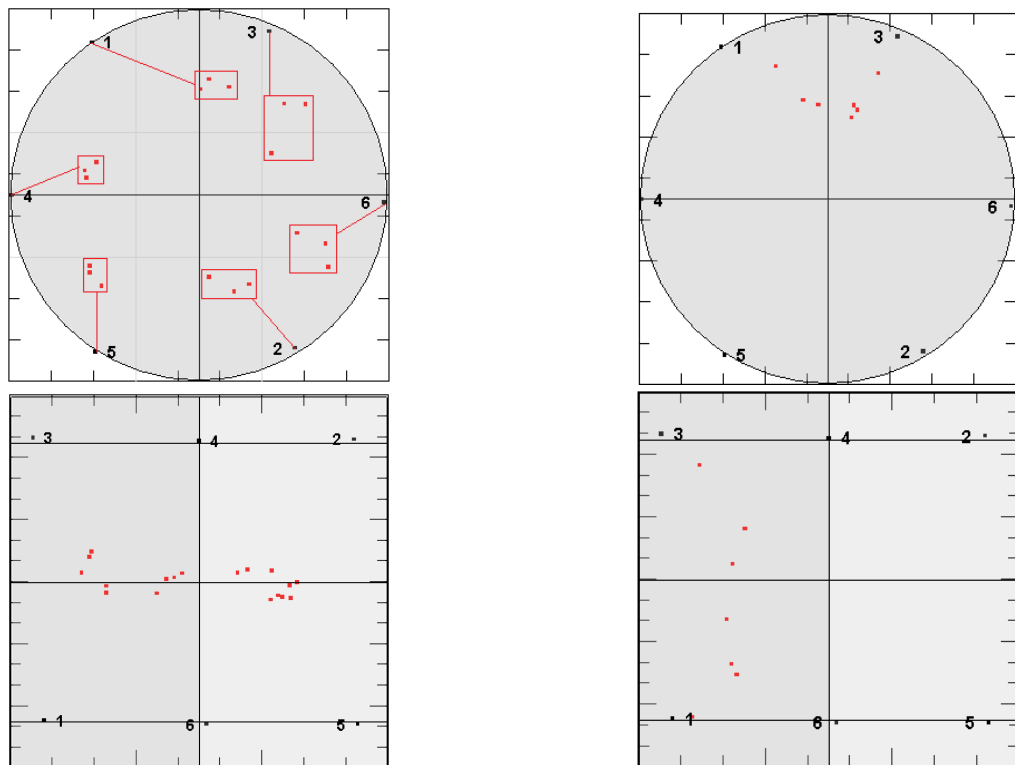


Abbildung 3.15: Draufsicht und Ansicht georteter Bruchereignisse (rote Punkte)
Horizontale Ebene (links); von SE-Sensor 1 zu SE-Sensor 3 (rechts)

Es wurden jeweils drei Bleistiftminenbrüche ober-/unterhalb der Positionen der SE-Sensoren in einer horizontalen Ebene erzeugt (siehe Abbildung 3.15, links). Das Ergebnis zeigte nicht nur eine Abweichung zwischen der tatsächlichen Position des Bleistiftminenbruches und des georteten Ereignisses, sondern auch eine Abweichung zwischen den SE-Ereignissen an derselben Position (siehe rote Vierecke).

Die Abbildung 3.15, rechts stellt das Lokalisierungsergebnis von SE-Ereignissen dar, die

zwischen zwei diagonal gegenüberliegenden SE-Sensoren generiert wurden. Die Bruchereignisse, welche in der Nähe der SE-Sensoren erzeugt wurden, wiesen eine geringere Abweichung von der Probenoberfläche auf als die im mittleren Bereich der Probenhöhe.

Aufgrund dieser signifikanten Abweichungen wurden diese SE-Parameter nicht weiter in Betracht gezogen. Als Ausgangswerte der „AE Timing Parameter“ für die Überprüfung der Lokalisierungsgenauigkeit wurden die kalibrierten SE-Parameter des Kalksteins herangezogen (siehe Tabelle 3.12). Auf eine Variation der „Location Setup Parameter“ wurde verzichtet, da diese keinen entscheidenden Einfluss auf die Lokalisierung zeigten (siehe Kapitel 3.2.3.3). Das Niveau der Nachweisschwelle wurde mit 30 dB festgelegt.

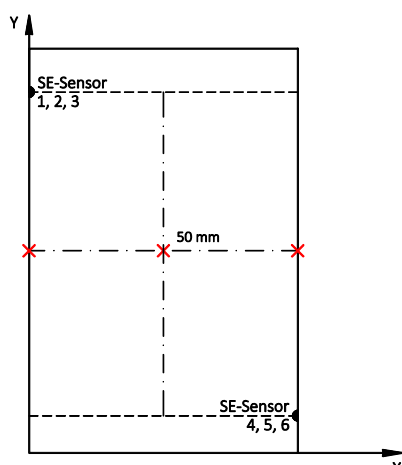


Abbildung 3.16: Positionen der Bleistiftminenbrüche (rotes x)

Um die Genauigkeit der 3D-Ortung zu überprüfen, wurden auf der Probenoberfläche Positionen (siehe Abbildung 3.16) markiert.

Diese Markierungen befanden sich in einer horizontalen Ebene ober-/unterhalb und zwischen den SE-Sensoren.

An diesen gekennzeichneten Positionen wurden Bleistiftminenbrüche erzeugt. Demnach waren die Koordinaten der Bruchereignisse eindeutig bestimmt.

3.3.3.1 Variation der Ausbreitungsgeschwindigkeiten

Die Geschwindigkeit wurde zwischen 5,8-6,5 km/s variiert und Hsu-Nielsen-Quellen an den markierten Positionen ausgelöst. Ein Vergleich der 3D-Ortung für die unterschiedlichen Geschwindigkeiten ist in Abbildung 3.17 dargestellt.

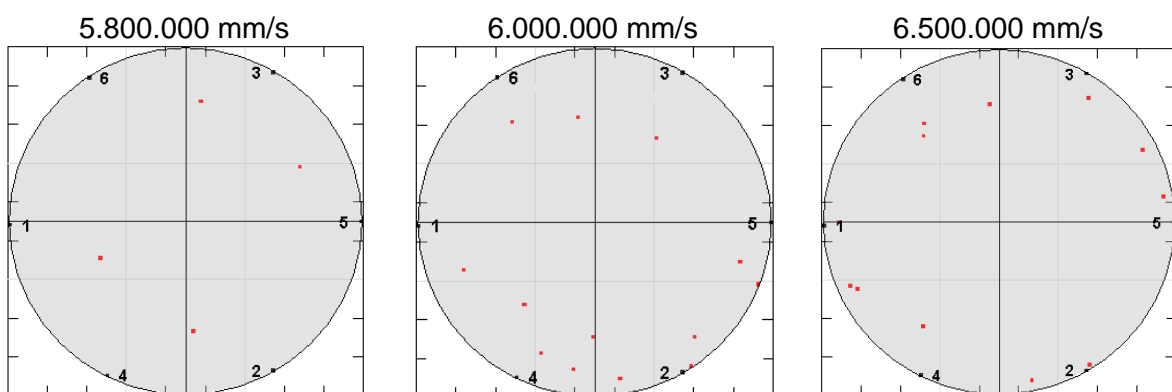


Abbildung 3.17: Draufsicht georteter Bruchereignisse (rote Punkte) mit variierten Ausbreitungsgeschwindigkeiten

Die georteten SE-Ereignisse mit einer Geschwindigkeit von 6,5 km/s lagen näher an der Position der tatsächlichen Hsu-Nielsen-Quelle. Für die weiteren Versuche wurde diese Ausbreitungsgeschwindigkeit angenommen.

3.3.3.2 Variation der „AE Timing Parameter“

Es wurden drei Varianten betrachtet (siehe Tabelle 3.17). Variante 1 und Variante 2 entsprachen Variante 2 und Variante 3 des Kalksteins (siehe Tabelle 3.11). Die Parameter der Variante 3 stellten eine Variation der angegebenen Werte nach [17] und [1, 43] dar (siehe Tabelle 3.2).

Tabelle 3.17: untersuchte Varianten der Parameter PDT/HDT/HLT

„AE Timing Parameter“	Variante 1	Variante 2	Variante3
PDT	50 μ s	50 μ s	50 μ s
HDT	100 μ s	100 μ s	200 μ s
HLT	500 μ s	100 μ s	500 μ s

In Abbildung 3.18 sind die Lokalisierungsergebnisse dieser Varianten dargestellt.

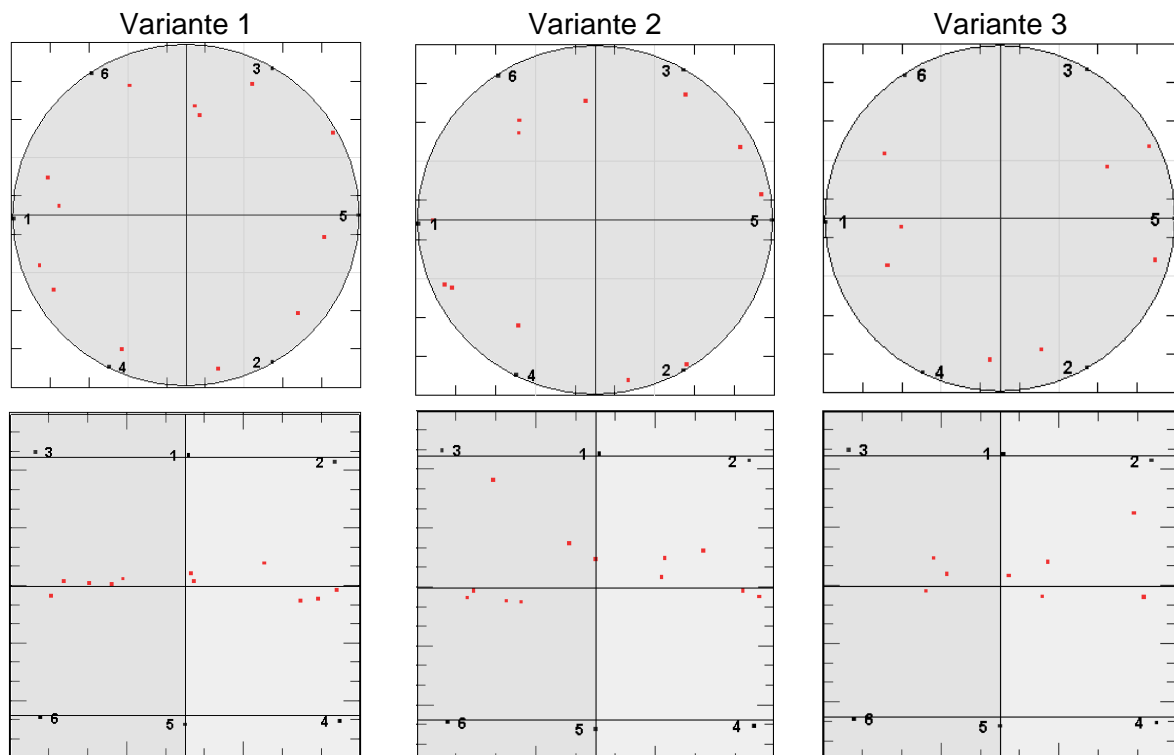


Abbildung 3.18: Draufsicht und Ansicht georteter Bruchereignisse (rote Punkte) der unterschiedlichen Varianten

Die Variante 3 wies gegenüber den anderen Varianten die größte Abweichung der lokalisierten SE-Ereignisse von der Oberfläche auf. Die Lokalisierung der SE-Ereignisse in der Höhe ergab bei Variante 1 eine geringere Streuung als bei Variante 3.

Es wurden die „AE Timing Parameter“ der Variante 1 gewählt.

3.3.4 Ermittlung des elektronischen Rauschens mit aufgebracht Vorlast

Nachdem die Gesteinsprobe mit Wegaufnehmern (und SE-Sensoren) in der Prüfmaschine eingebaut und auf die Vorlast belastet wurde (siehe Abbildung 4.15, links), erfolgte die Erfassung von Hintergrundgeräuschen im Felsmechaniklabor.

Über den beobachteten Zeitraum wurden nur zwei Hits erfasst, weshalb das Niveau der Nachweisschwelle mit 30 dB nicht verändert wurde (siehe Anhang(B), Abbildung 0.6).

Die kalibrierten SE-Parameter, mit welchen der einaxiale Druckversuch durchgeführt wurde, sind Tabelle 3.18 zu entnehmen.

Tabelle 3.18: kalibrierte SE-Parameter

„AE Timing Parameter“	PDT	50 μ s
	HDT	100 μ s
	HLT	500 μ s
„Location Setup Parameter“	EDV	90 mm
	ELV	0 mm
	OV	10 mm
weitere Einflussfaktoren	Ausbreitungsgeschwindigkeit	6,5 km/s
	Nachweisschwelle	30 dB

3.4 Kalibrierende Tätigkeiten: Magnesit



Abbildung 3.19: Magnesit

Mit dem Kalkstein und dem Gabbro wurde die Kalibrierung an homogenen Gesteinen durchgeführt. Mit dem Magnesit (Karbonatgestein) wird der Einfluss der Schichtung auf die kalibrierenden Tätigkeiten getestet.

Dieser Magnesit stammte aus der Lagerstätte Breitenau (siehe Abbildung 3.19). Somit handelt es sich um einen Spatmagnesit, der aus abwechselnden Schichtpaketen aufgebaut ist. Diese Pakete sind dunkle Magnesit- und helle Dolomitschichten [41].

Zunächst erfolgte die Platzierung der Schallemissionssensoren auf der Probenoberfläche nach Kapitel 3.1.2. Um die Platzierung der SE-Sensoren an die Schichtung des Gesteins anzupassen, wurde zusätzlich eine andere Anordnung der Sensoren untersucht.

Eine eindeutige Orientierung der Schichtung war nicht festzulegen. Die angenommene Richtung der Schichtung ist in Abbildung 3.20 schematisch eingezeichnet.

Für die Lokalisierung der Bruchereignisse wurde das Lokalisierungsverfahren der AEWin Software herangezogen. Dieses setzt ein homogenes, isotropes Material mit konstanter Ausbreitungsgeschwindigkeit voraus. Unter diesen Bedingungen ist keine zufriedenstellende Lokalisierung zu erwarten. Denn die Schichtung und die unterschiedlichen Minerale (unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeit) beeinflussen die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Gesteins. Welche Auswirkung die Schichtung auf die 3D-Ortung von SE-Ereignissen hatte, wird im Folgenden aufgezeigt.

Die Überprüfung der Kopplung wurde nach Kapitel 3.1.3 durchgeführt. Die gemessenen Signalamplituden je Schallemissionskanal und die Koordinaten der SE-Sensoren beider Varianten sind im Anhang (C) angeführt. Diese Gesteinsprobe hatte einen Durchmesser von 51,2 mm und eine Länge von 102,9 mm.

3.4.1 Versetzte Platzierung der Schallemissionssensoren

Die SE-Sensoren wurden, wie in Abbildung 3.20 dargestellt, zur angenommenen Orientierung der Schichtung angeordnet. Aufgrund der versetzten Anordnung um einen Winkel von 120° , war die Platzierung parallel und normal zur Schichtung nicht für alle SE-Sensoren durchführbar.

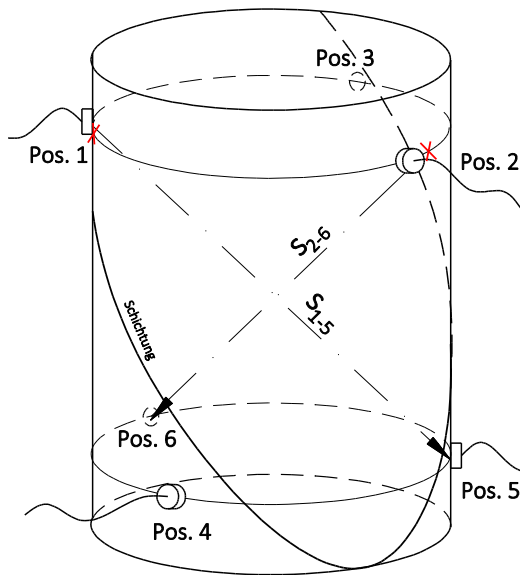


Abbildung 3.20: generierte SE-Wellen mittels Bleistiftminenbruch

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit innerhalb des Gesteins wurde durch ausgelöste Hsu-Nielsen-Quellen an zwei Positionen bestimmt (siehe Abbildung 3.20, rotes x).

Die generierte SE-Welle bei Position 2 pflanzte sich normal auf die Schichtung und die bei Position 1 parallel zur Schichtung fort.

Die Berechnung der Geschwindigkeit erfolgte nach Kapitel 3.1.4. und ist Anhang (C), Tabelle 0.10 zu entnehmen.

In Tabelle 3.19 sind die ermittelten Ausbreitungsgeschwindigkeiten in beide Richtungen zusammengefasst.

Tabelle 3.19: berechnete Ausbreitungsgeschwindigkeiten

Ausbreitungsrichtung	ds [mm]	dt [s]	v [mm/s]
normal auf die Schichtung s_{2-6}	93,2	0,0000153	6.100.000
	93,2	0,0000158	5.900.000
	93,2	0,0000150	6.200.000
parallel zur Schichtung s_{1-5}	94,1	0,0000135	7.000.000
	94,1	0,0000143	6.600.000
	94,1	0,0000140	6.700.000

Die Geschwindigkeit der erzeugten Schallemissionswelle normal auf die Schichtung lag im Bereich von 5,9-6,2 km/s und parallel zur Schichtung zwischen 6,6-7,0 km/s. Die berechneten Ausbreitungsgeschwindigkeiten mittels Bleistiftminenbruch wichen von der Durchschallungsgeschwindigkeit ab. Diese wurde mit 6,6 km/s normal auf die Schichtung, mit 6,2 km/s parallel zur Schichtung und in axialer Richtung mit 5,6 km/s ermittelt.

Die Lokalisierung von Hsu-Nielsen-Quellen wurde für mehrere Varianten der „AE Timing Parameter“ untersucht (siehe Anhang (C), Tabelle 0.10). Eine Optimierung der Lokalisierungsgenauigkeit wurde weder durch die Variation der SE-Parameter noch durch eine Variation der Ausbreitungsgeschwindigkeit erzielt. In Abbildung 3.21 ist das Ergebnis der 3D-Ortung eines Versuches dargestellt (mit einer Nachweisschwelle von 30 dB, einer Geschwindigkeit v von 6,5 km/s und den SE-Parametern EDV/ELV/OV = 90/0/10 mm; PDT/HDT/HLT = 50/100/500 μ s).

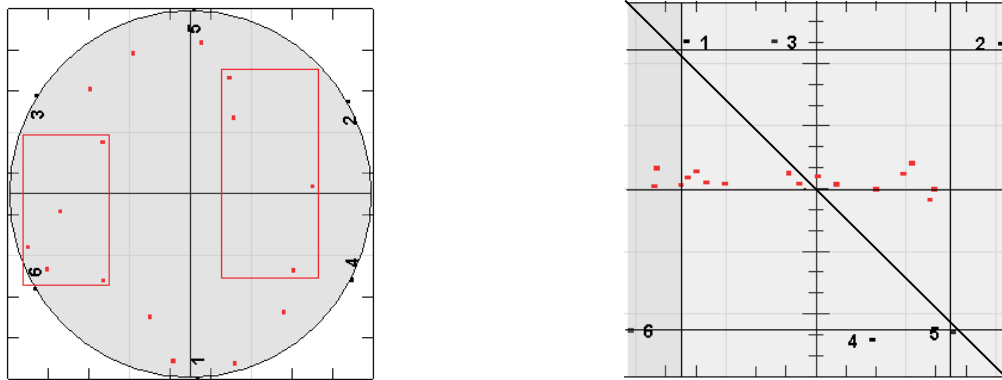


Abbildung 3.21: Draufsicht und Ansicht georteter Bruchereignisse (rote Punkte)

Die Bleistiftminenbrüche wurden auf halber Probenhöhe in einer horizontalen Ebene um die Gesteinsprobe erzeugt. Die angenommene Orientierung der Schichtung ist in der Ansicht schematisch dargestellt.

Das Ergebnis zeigte eine größere Abweichung der georteten SE-Ereignisse, welche normal auf die Schichtung ausgelöst wurden gegenüber jenen welche in Schichtungsrichtung ausgelöst wurden (siehe Draufsicht, rotes Viereck). Bezüglich der Höhenlage war eine Verteilung der SE-Ereignisse oberhalb der Probenmitte aber keine eindeutige Tendenz zu erkennen.

3.4.2 Angepasste Platzierung der Schallemissionssensoren

Um die Platzierung der SE-Sensoren an die (angenommene) Orientierung der Schichtung anzupassen, werden die Schallemissionssensoren mit einem Winkel von 90° zueinander versetzt. Die Sensorreihen sind vertikal übereinander und einander gegenüberliegend angeordnet. Die untere Sensorreihe (Pos.5, Pos.1, Pos.6) wird um 90° zu der oberen Sensorreihe (Pos.4, Pos.2, Pos.3) verdreht (siehe Abbildung 3.22).

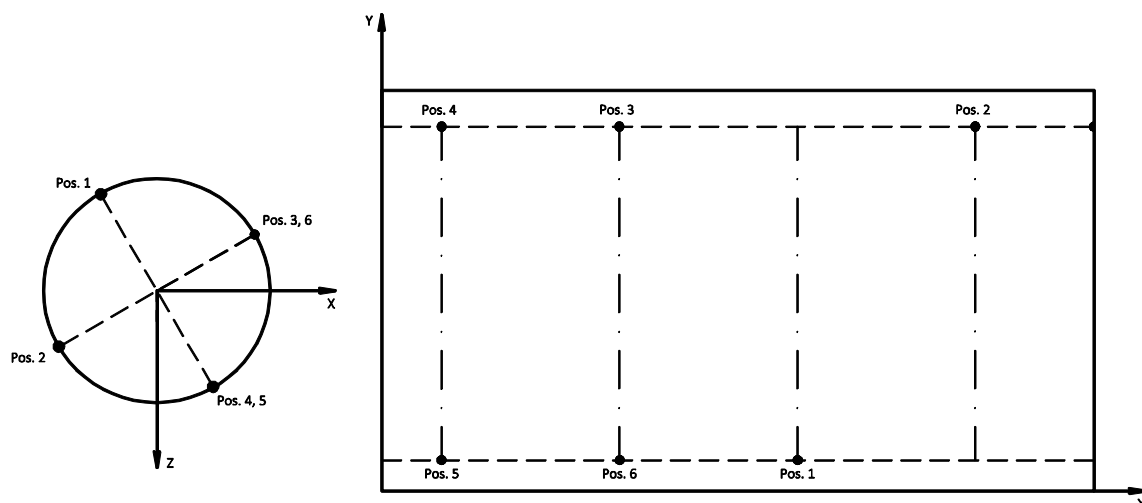


Abbildung 3.22: Anordnung der SE-Sensoren. Draufsicht (links); Abwicklung (rechts)

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit wurde für die angepasste Platzierung erneut ermittelt und unterschied sich geringfügig von der berechneten Geschwindigkeit in Kapitel 3.4.1 (siehe Anhang (C), Tabelle 0.14).

In Abbildung 3.23 ist das Lokalisierungsergebnis für Bleistiftminenbrüche, welche auf halber Probenhöhe in einer horizontalen Ebene um die Gesteinsprobe erzeugt wurden, dargestellt (mit einer Nachweisschwelle von 30 dB, einer Geschwindigkeit v von 6,5 km/s und den SE-Parametern EDV/ ELV/ OV =90/0/10 mm; PDT/ HDT/ HLT = 50/100/500 μ s).

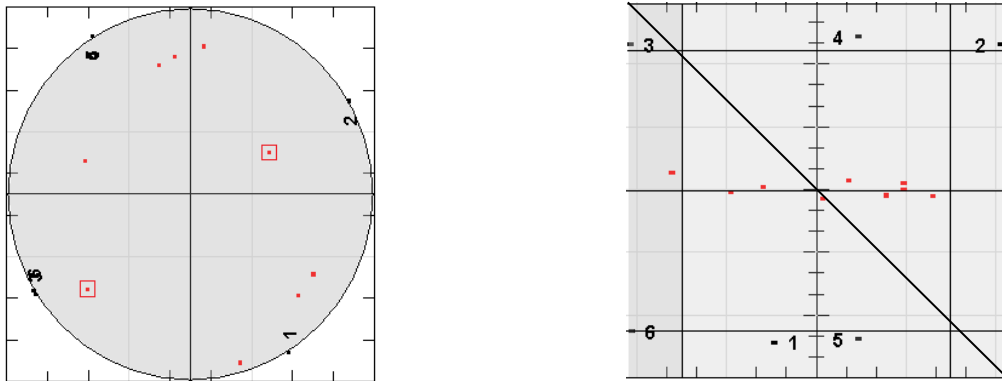


Abbildung 3.23: Draufsicht und Ansicht georteter Bruchereignisse (rote Punkte)

Die Abweichung zwischen den tatsächlichen und den georteten Positionen der SE-Ereignisse in der Draufsicht war vergleichbar mit der Abweichung in Kapitel 3.4.1. Die Höhenlage der georteten SE-Ereignisse war im mittleren Bereich der Gesteinsprobe konzentriert. Dieses Ergebnis entspricht eher den tatsächlichen Positionen der Bleistiftminenbrüche.

Nachdem die Auswirkung der Schichtung auf die Lokalisierung untersucht wurde, erfolgte die Rückrechnung auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit parallel und normal zur Schichtung. Dadurch sollte ein Korrekturfaktor ermittelt werden, welcher die unterschiedliche Geschwindigkeit des geschichteten Gesteinskörpers berücksichtigt.

Es wurden neun Positionen vertikal über und unter SE-Sensor 1 und 2 auf der Probenoberfläche markiert (siehe Abbildung 3.24). An diesen gekennzeichneten Positionen wurden Hsu-Nielsen-Quellen generiert.

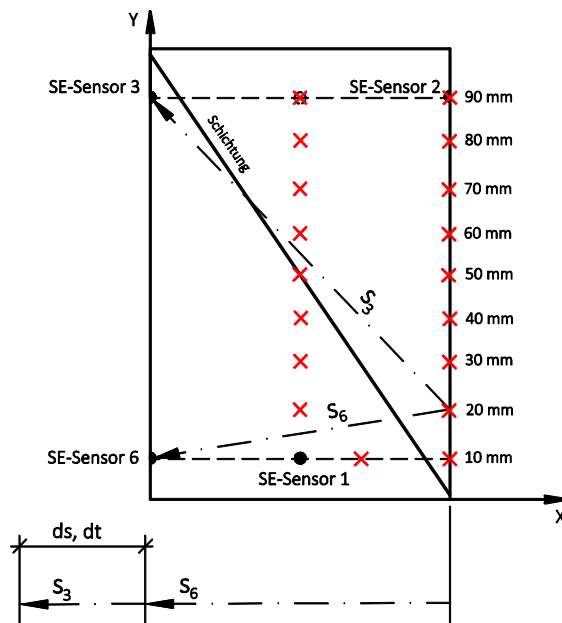


Abbildung 3.24: Positionen der Bleistiftminenbrüche (rotes x)

Das Prinzip der Rückrechnung wird anhand eines SE-Ereignisses vertikal unter dem SE-Sensor 2 aufgezeigt (siehe Abbildung 3.24).

Es sind die direkten Wege (s_3, s_6) der SE-Welle zu den gegenüberliegenden Sensoren dargestellt. Eine direkte Wellenausbreitung wird trotz der Schichtung angenommen.

Aufgrund der gegenüberliegenden Anordnung der Schallemissionssensoren ist der Weg der SE-Welle zu SE-Sensor 3 größer als zu SE-Sensor 6 ($s_3 > s_6$).

Dies hat eine spätere Hitankunftszeit am SE-Kanal 3 zur Folge ($t_3 > t_6$). Die Ausbreitungsgeschwindigkeit v_{normal} wird mit der Weg- und Zeitdifferenz (ds, dt) berechnet. Somit ist der ursprüngliche Zeitpunkt, zu welchem das SE-Ereignis generiert wurde, für die Rückrechnung nicht erforderlich.

$$v_{normal} = \frac{ds}{dt} = \frac{s_3 - s_6}{t_3 - t_6} \quad (3.8)$$

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit $v_{parallel}$ wird nach dem gleichen Prinzip berechnet:

$$v_{parallel} = \frac{s_4 - s_5}{t_4 - t_5} \quad (3.9)$$

Es ist hervorzuheben, dass es sich bei den ermittelten Geschwindigkeiten um „verschmierte“ Werte über die Gesteinsschichten handelt. Dies erschwert die Interpretation der Ergebnisse.

Die berechneten „verschmierten“ Geschwindigkeiten in die zwei Ausbreitungsrichtungen sind Tabelle 3.20 zu entnehmen. Die Berechnungsblätter sind im Anhang (C) angeführt (Tabelle 0.15 und Tabelle 0.16).

Tabelle 3.20: berechnete Ausbreitungsgeschwindigkeiten

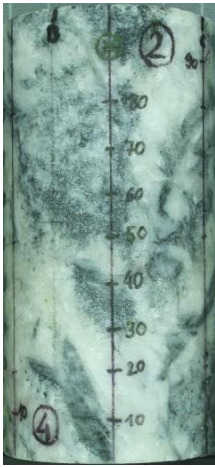
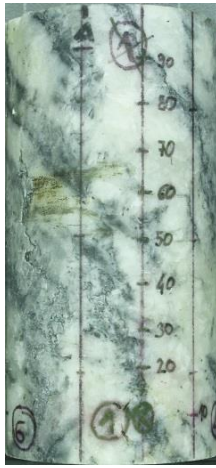
	v_{normal} [mm/s]		$v_{parallel}$ [mm/s]
	4.650.000		4.800.000
	5.000.000		5.200.000
	4.700.000		5.100.000
	3.850.000		3.700.000
	3.000.000		7.500.000
	8.100.000		6.300.000
	5.050.000		6.500.000
	5.100.000		6.550.000
	5.150.000		5.750.000

Abbildung 3.25: Ansicht normal zur Schichtung

Abbildung 3.26: Ansicht parallel zur Schichtung

Die Ergebnisse zeigten eine Streuung der Ausbreitungsgeschwindigkeit. Die ermittelte Geschwindigkeit lag normal zur Schichtung zwischen 3,0-8,1 km/s und parallel zur Schichtung zwischen 3,7-7,4 km/s. Diese Extremwerte wurden jeweils im mittleren Bereich der Probenhöhe ermittelt.

In Abbildung 3.25 sind im Bereich 30-60 mm abwechselnde Schichtpakete zu sehen. Die ermittelte Geschwindigkeit wich in diesem Bereich deutlich von den Werten an den übrigen Positionen ab. Ein vergleichbares Verhalten wurde für den Bereich 50-60 mm normal zur Schichtung beobachtet (siehe Abbildung 3.26).

Aufgrund der Streuung der „verschmierten“ Ausbreitungsgeschwindigkeiten war der Rückschluss auf einen Korrekturfaktor nicht möglich.

4 Laborversuche

Nachdem die Kalibrierung des Schallemissionssystems vorgenommen wurde, können die Laborversuche mit der Aufzeichnung von Schallemissionsdaten durchgeführt werden.

In dieser Arbeit wurden einaxiale Druckversuche an dem Kalkstein und dem Gabbro durchgeführt. Zunächst wird auf die Versuchsdurchführung eingegangen (siehe Kapitel 4.1).

Anschließend werden die Versuchsergebnisse der untersuchten Gesteine dargestellt (siehe Kapitel 4.2). Zum Abschluss erfolgt eine Gegenüberstellung der wesentlichen Unterschiede der Ergebnisse (siehe Kapitel 4.3).

4.1 Versuchsdurchführung



Abbildung 4.1: MTS 815 und SE-System

Die einaxialen Druckversuche wurden mit dem servohydraulischen Gesteinsprüfsystem MTS 815 (Rock Mechanics Test System) im Labor des Instituts für Felsmechanik und Tunnelbau an der Technischen Universität Graz durchgeführt. Die Schallemissionen wurden mit dem Micro-II Digital AE System aufgezeichnet.

Im Hintergrund der Abbildung 4.1 ist die Prüfmaschine zu sehen, im Vordergrund befindet sich das Schallemissionssystem.

Die Gesteinsprobenvorbereitung erfolgte nach Kapitel 2.5.1. Es wurden mehrere Lastzyklen durchgeführt, bevor die Belastung der Gesteinsprobe bis zur einaxialen Druckfestigkeit gesteigert wurde (siehe Abbildung 4.2). Dadurch konnte das Materialverhalten der Gesteine beobachtet werden (siehe Kapitel 2.5.2 und Kapitel 2.5.3).

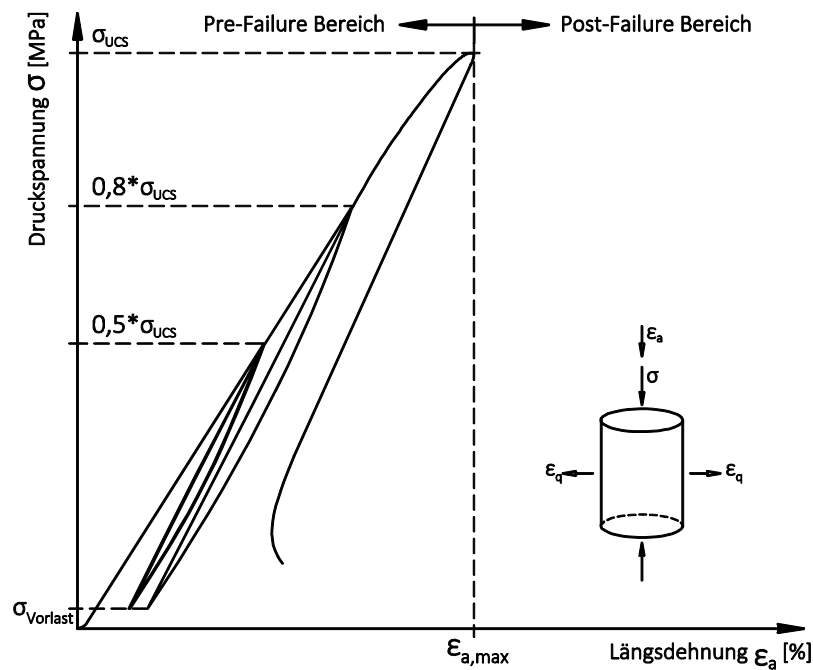


Abbildung 4.2: Versuchsdurchführung

Die Gesteinsprobe wurde bis zu einem Spannungsniveau von 50% der erwarteten Druckfestigkeit ($0,5 \cdot \sigma_{UCS}$) belastet. Danach erfolgte die Entlastung auf das Spannungsniveau der Vorlast $\sigma_{vorlast}$ und anschließend die Wiederbelastung. Dieser Lastzyklus wurde zweimal hintereinander durchgeführt. Vor der Belastung bis zum Versagen, wurde ein weiterer Lastzyklus bis zu einem Spannungsniveau von 80% der erwarteten Druckfestigkeit ($0,8 \cdot \sigma_{UCS}$) gefahren. Nach dem Erreichen des maximalen Spannungsniveaus σ_{UCS} (mit der Bruchdehnung $\epsilon_{a,max}$) wurde das Nachbruchverhalten des Gesteins erfasst. Dieses Verhalten gibt einen Hinweis auf das Materialverhalten, wenn die Druckfestigkeit überschritten wurde [27].

Die Belastung bis zu dem Spannungsniveau $0,5 \cdot \sigma_{UCS}$ erfolgte kraft geregelt. Anschließend wurde auf eine Umfangs-Dehnungssteuerung umgeschaltet.

Durch die ersten zwei Lastschleifen kann das elastische Verhalten des Gesteins beurteilt werden. Aus der Erstbelastungskurve wird der Verformungsmodul V und aus der Ent-/ Wiederbelastungskurve werden der Elastizitätsmodul E und die Poissonzahl ν ermittelt [28]. Bei sprödem Gestein liegen diese beiden Lastzyklen fast übereinander.

4.2 Versuchsergebnisse

Im Folgenden werden die Versuchsergebnisse der felsmechanischen Kennwerte und der Schallemissionsdaten für die untersuchten Gesteine (Kalkstein und Gabbro) angeführt und erläutert.

4.2.1 Kalkstein

In Abbildung 4.3, links ist die in dem Gesteinsprüfsystem eingebaute Gesteinsprobe mit platzierten Schallemissionssensoren sowie Wegaufnehmern dargestellt. Die rechten Abbildungen zeigen die zerstörte Gesteinsprobe nach dem Laborversuch.

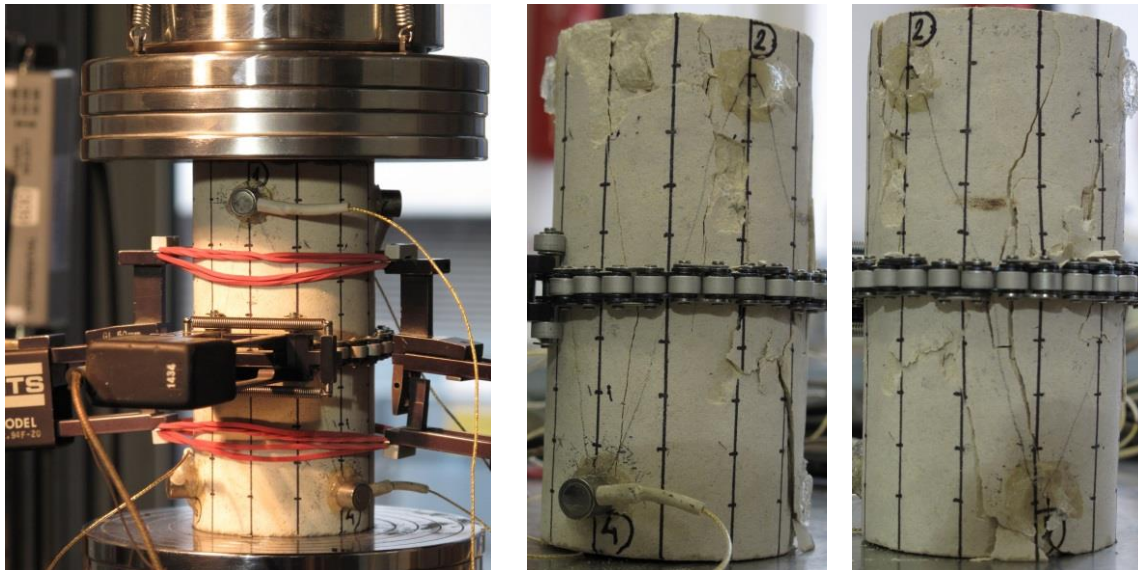


Abbildung 4.3: eingebaute Gesteinsprobe in der Prüfmaschine (links);
zerstörte Gesteinsprobe nach dem einaxialen Druckversuch (rechts)

Die Risse an der Oberfläche der zerstörten Gesteinsprobe waren homogen verteilt. Nachdem die maximale Druckfestigkeit erreicht wurde, fanden im Nachbruchbereich zahlreiche Abplatzungen an der Gesteinsoberfläche statt.

4.2.1.1 Felsmechanische Kennwerte

Die Auswertung der in Abbildung 4.4 dargestellten Spannungs-Dehnungslinie ist im Anhang (A) angeführt.

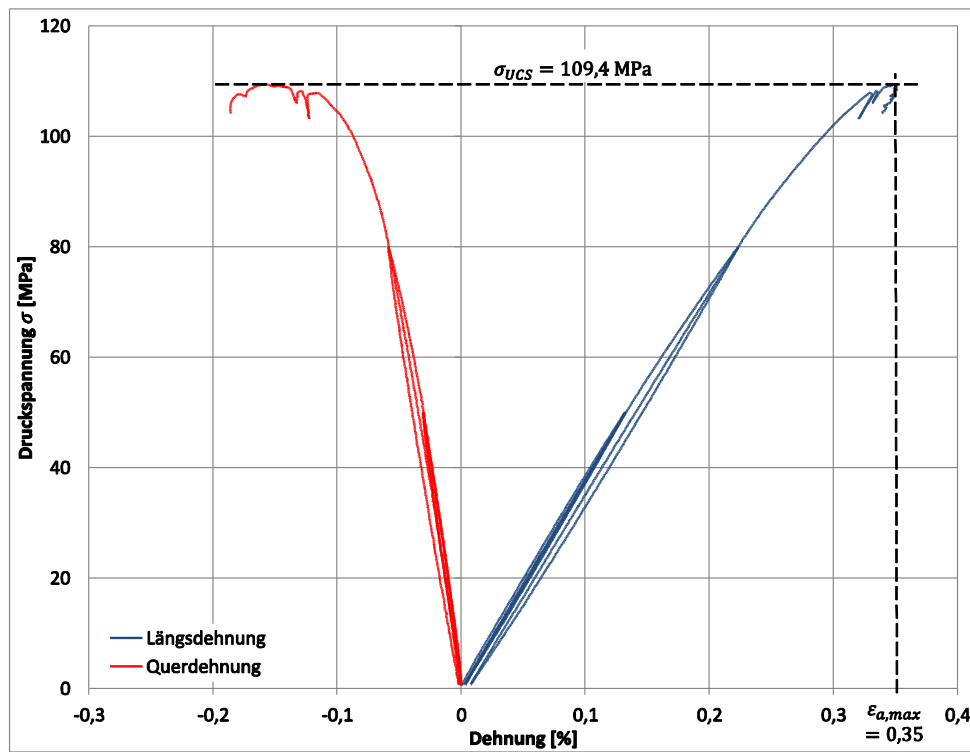


Abbildung 4.4: Spannungs-Dehnungsdiagramm

Für den Kalkstein wurden die in Tabelle 4.1 dargestellten Kennwerte ermittelt.

Tabelle 4.1: felsmechanische Kennwerte

Elastizitätsmodul E	38,2	GPa
Verformungsmodul V	37,7	GPa
Poissonzahl ν	0,22	
Einaxiale Druckfestigkeit σ_{UCS}	109,4	MPa
Bruchdehnung $\epsilon_{a,max}$	0,35	%
Zerstörungsarbeit $W_{z,UCS}$	221	kJ/m ³
Zerstörungsarbeit $W_{z,Versuchsende}$	174	kJ/m ³

Es handelt sich um ein Class II Gestein, da die Zerstörungsarbeit zum Versuchsende geringer war als die Zerstörungsarbeit bei dem maximalen Spannungsniveau (einaxiale Druckfestigkeit).

4.2.1.2 Auswertung der Schallemissionsdaten

Die einaxiale Druckfestigkeit wurde nach einer Versuchsdauer von 542 Sekunden erreicht. Bis zu diesem Zeitpunkt erfassten die sechs Schallemissionskanäle 16.464 Hits woraus 12 SE-Ereignisse geortet wurden (siehe Abbildung 4.5, links). Zu Versuchsende wurden insgesamt 123.462 Hits erfasst und 217 Schallemissionsereignisse mit dem SE-System geortet (siehe Abbildung 4.5, rechts).

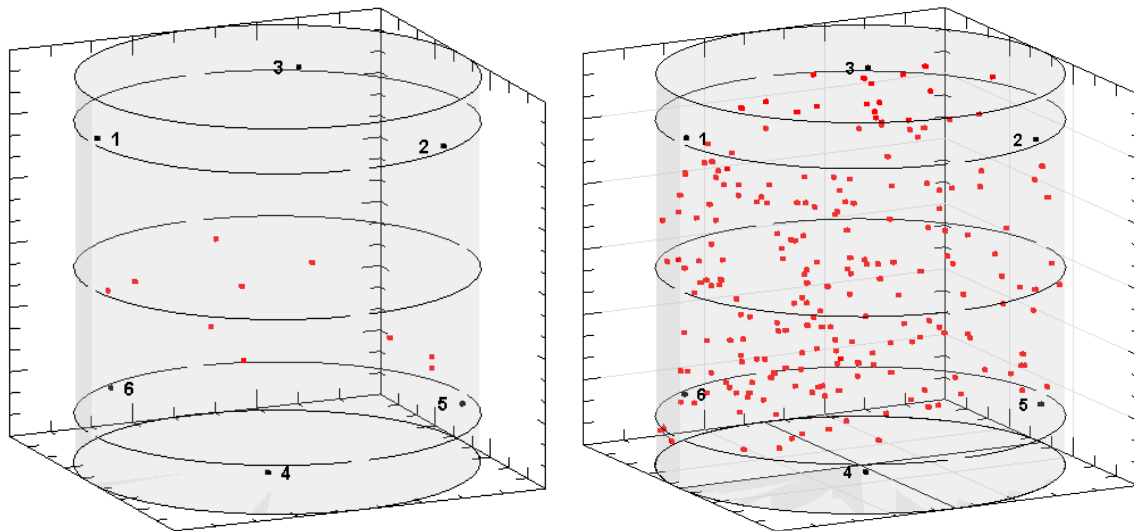


Abbildung 4.5: 3D Ansicht der georteten Bruchereignisse (rote Punkte).

vor dem Erreichen der einaxialen Druckfestigkeit (links); zu Versuchsende (rechts)

Die Bruchereignisse vor dem Erreichen des maximalen Spannungsniveaus wurden im mittleren und unteren Bereich der Gesteinsprobe geortet. Zu Versuchsende zeigte sich eine homogene Verteilung der georteten Bruchereignisse über die gesamte Probenhöhe. Diese homogene Verteilung war ebenso an der Gesteinsoberfläche zu erkennen (siehe Abbildung 4.3, rechts).

Zu Beginn der Auswertung der Schallemissionsdaten sind jene SE-Sensoren zu bestimmen, welche über die gesamte Versuchsdauer eine gute Ankopplung an die Probenoberfläche hatten. Es wird das in Abbildung 4.6 dargestellte Diagramm herangezogen. Dieses zeigt die kumulierten Hits der SE-Kanäle über die Versuchsdauer.

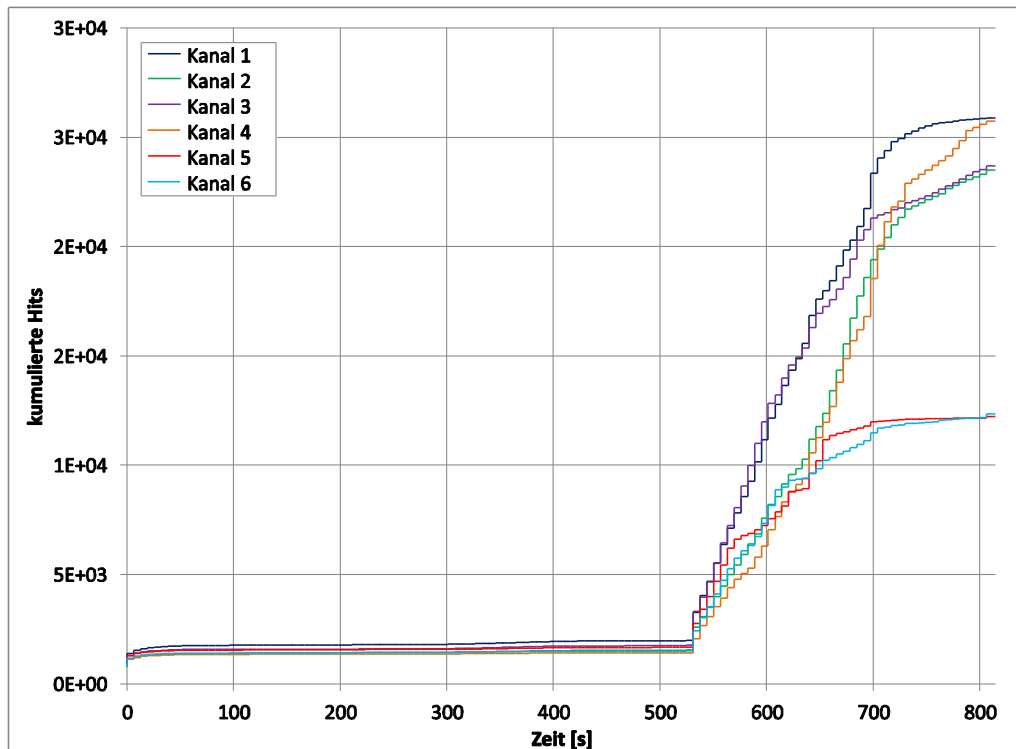


Abbildung 4.6: kumulierte Hits über die Versuchsdauer

Die Schallemissionskanäle 1 und 4 erfassen am meisten, die Schallemissionskanäle 5 und 6 am wenigsten Hits. Es wurden zu Versuchsbeginn und nach dem Erreichen der einaxialen Druckfestigkeit (542 s) vermehrt Hits erfasst.

Die Linie der kumulierten Hits der SE-Kanäle 5 und 6 verläuft ab ca. 700 Sekunden annähernd horizontal. Zu diesem Zeitpunkt wurden durch die übrigen SE-Kanäle jedoch Hits erfasst. Somit besaßen die SE-Sensoren 5 und 6 ab diesem Zeitpunkt keine ausreichende Ankopplung an die Probenoberfläche. Diese Sensoren dürfen nicht für die Auswertung der SE-Daten herangezogen werden.

Mit der Darstellung der absoluten Energierate je SE-Kanal (siehe Abbildung 4.7) ist der Zeitpunkt der Entkopplung exakter zu bestimmen. Nachdem durch den jeweiligen SE-Kanal keine SE-Aktivität erfasst wird, ist eine Entkopplung des zugehörigen SE-Sensors nicht auszuschließen.

Für den SE-Sensor 5 wurde dieser Zeitpunkt mit ca. 650 s und für den SE-Sensor 6 mit ca. 600 s festgestellt.

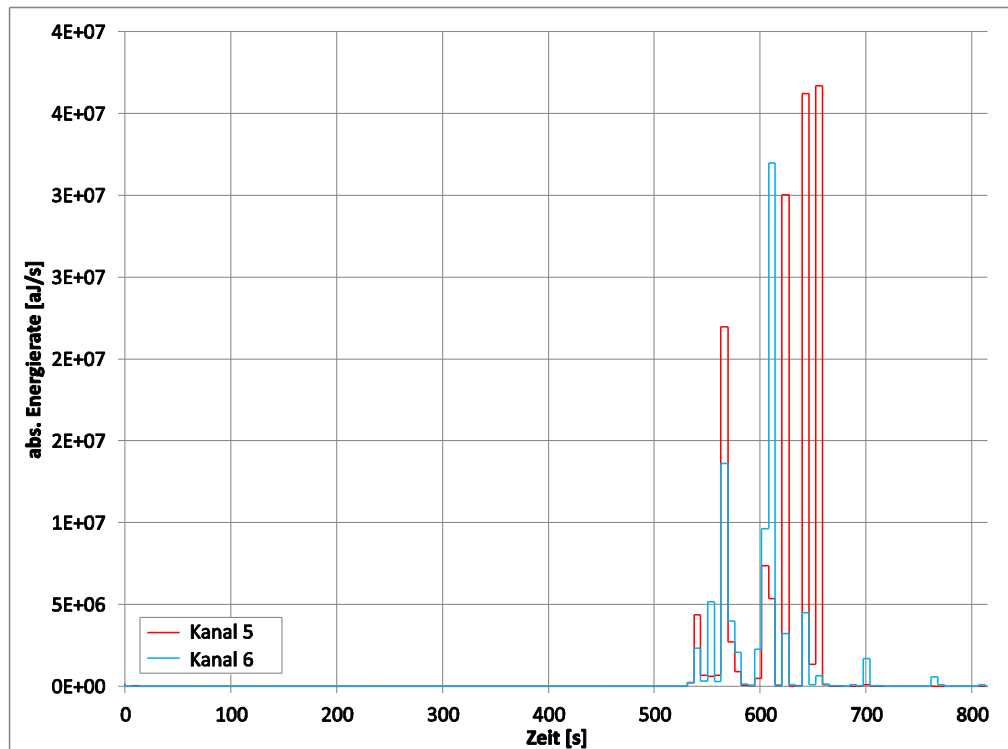


Abbildung 4.7: Schallemissionsaktivität

Es wurde jeweils ein SE-Ereignis an der Probenoberfläche in der Nähe dieser SE-Sensoren geortet (siehe Abbildung 4.8, blaues Viereck). Beide Ereignisse wurden ca. 550 s nach Versuchsbeginn geortet. Zudem waren Brüche in der Nähe dieser Schallemissionssensoren auf der Gesteinsoberfläche zu erkennen (siehe Abbildung 4.9, blaues Viereck).

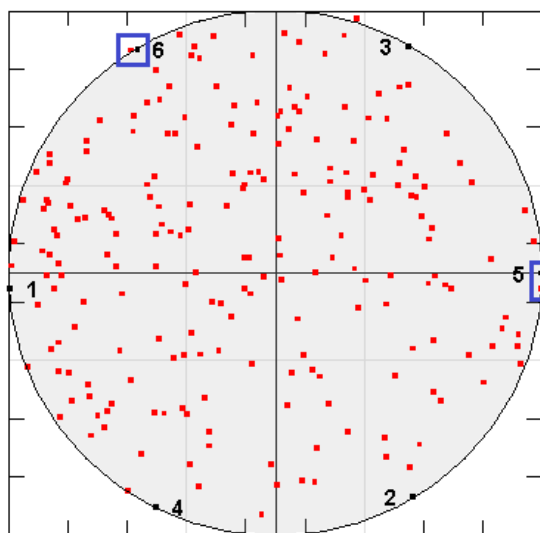


Abbildung 4.8: Draufsicht georteter Bruchereignisse (rote Punkte)

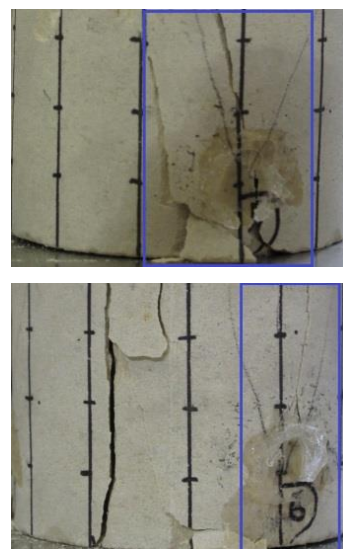


Abbildung 4.9: Bruch in der Nähe von Sensor 5 (oben) und Sensor 6 (unten)

Der Einfluss dieser unzureichenden Kopplung auf die Auswertung der SE-Daten, wird im Folgenden durch Vergleiche zwischen SE-Kanal 1 (obere Sensorreihe), SE-Kanal 4 (untere Sensorreihe) und SE-Kanal 6 (schlechte Ankopplung) aufgezeigt.

In Abbildung 4.10 ist die kumulierte absolute Energie der SE-Signale, welche von den SE-Kanälen erfasst wurden, dargestellt.

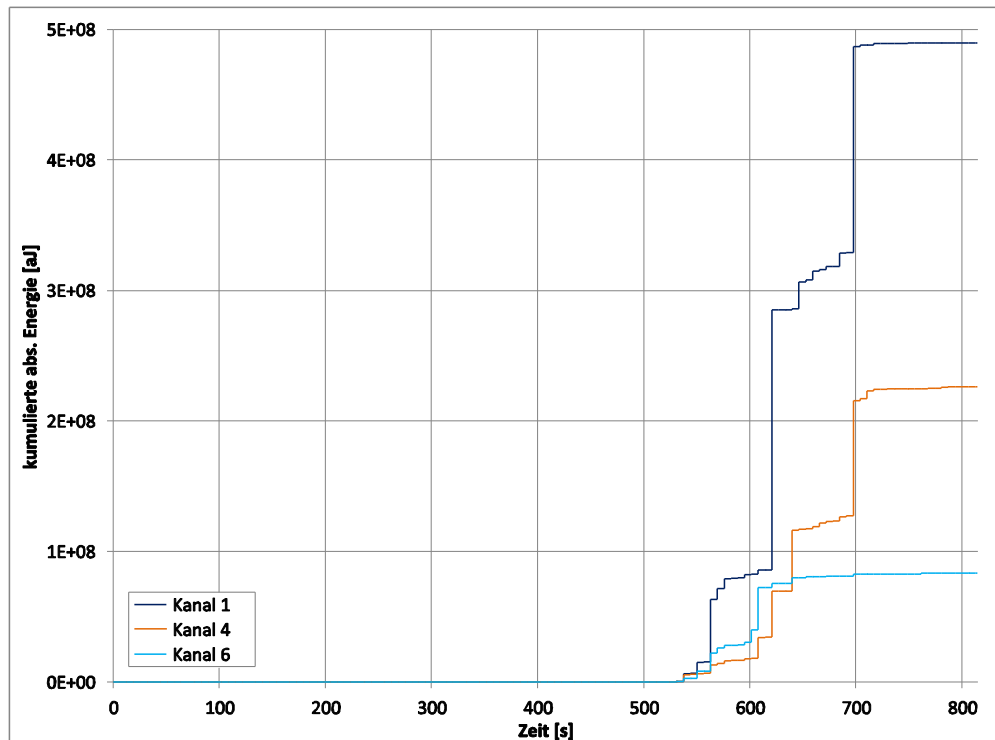


Abbildung 4.10: absolute Schallemissionsenergie

Die absolute Energie der SE-Signale erfasst durch Schallemissionskanal 1 betrug $4,9 \cdot 10^8 \text{ aJ}$ und jene von SE-Kanal 4 $2,3 \cdot 10^8 \text{ aJ}$. Obwohl beide SE-Sensoren eine gute Ankopplung aufwiesen, war die erfasste Energie des Kanals 1 mehr als doppelt so hoch. Dieser Umstand lässt vermuten, dass im oberen Bereich (SE-Sensor 1) stärkere Bruchereignisse stattfanden, als im unteren Bereich (SE-Sensor 4) der Gesteinsprobe.

Da der SE-Sensor 6 eine unzureichende Ankopplung aufwies, erfasste der zugehörige Kanal den geringsten Wert der absoluten Energie.

Die Abbildung 4.11 stellt den zeitlichen Verlauf der aufgebracht Druckspannung sowie die absolute Energierate der SE-Kanäle 1 und 4 dar.

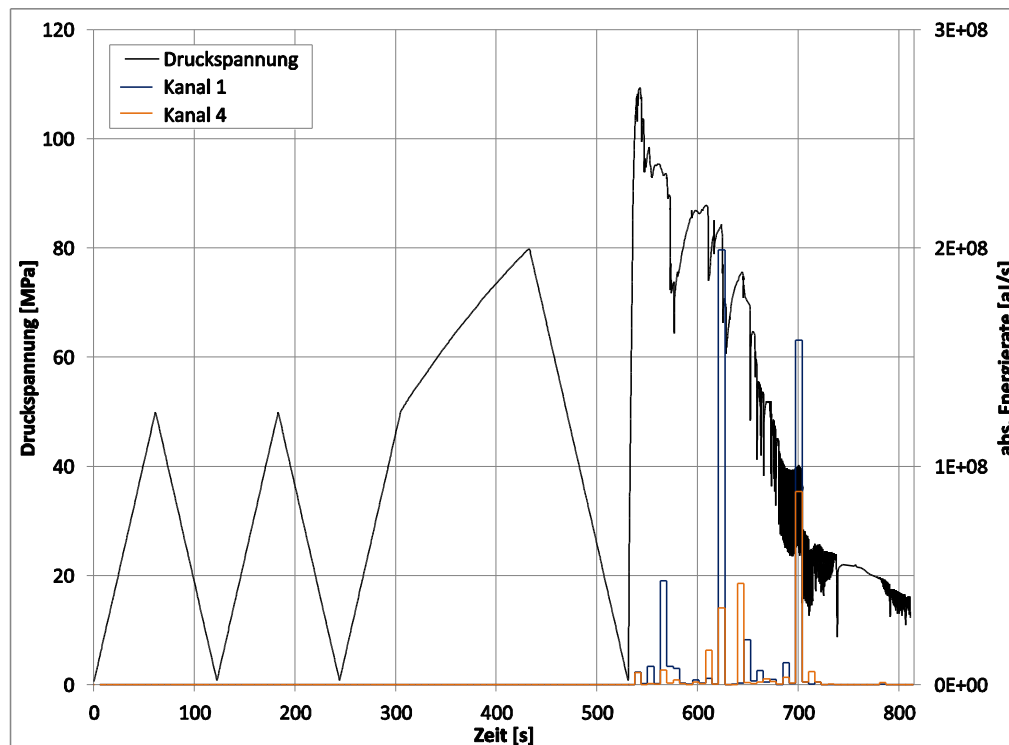


Abbildung 4.11: Schallemissionsaktivität

Es ist eine Korrelation zwischen Druckspannung und absoluter Schallemissionsenergie im Nachbruchbereich zu erkennen.

Die Belastung der Gesteinsprobe wurde im Nachbruchbereich mit einer Umfangs-Dehnungssteuerung geregelt. Bei der Entlastung bedingt durch die Bildung neuer Brüche, wurde ein Anstieg der absoluten Energie erfasst. Diese Bruchereignisse wurden durch die SE-Kanäle erfasst.

In Abbildung 4.12 ist die Hitrate nach der Signalamplitude der SE-Kanäle dargestellt.

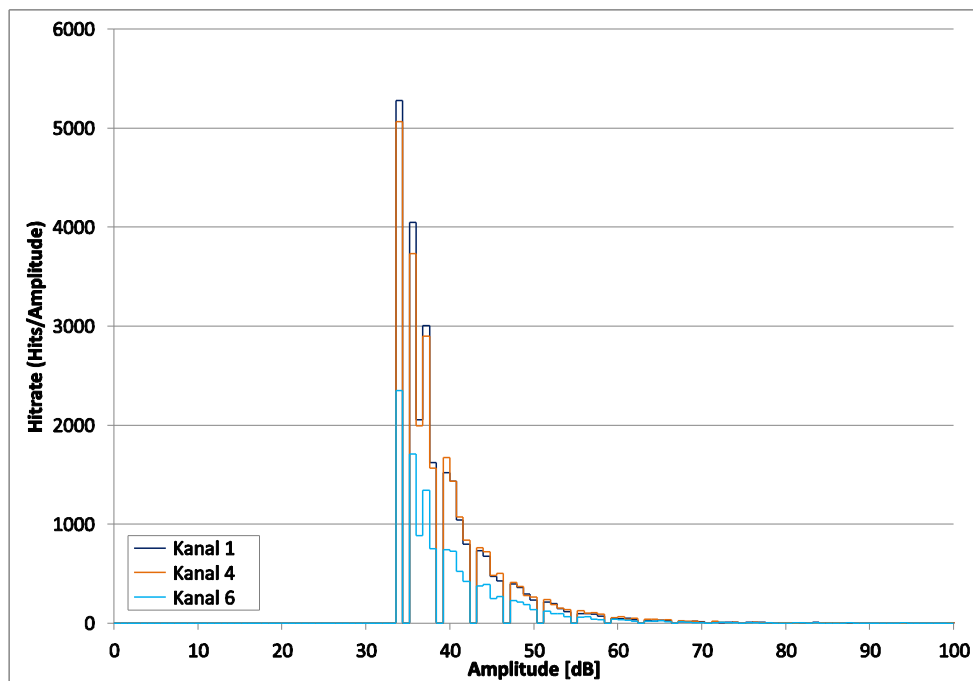


Abbildung 4.12: Hitintensität

Es wurden viele (schwache) SE-Ereignisse mit geringer Amplitude erzeugt. Die Kurve der Hitrate wurde bei 35 dB „abgeschnitten“, weil die Nachweisschwelle auf dieses Niveau festgelegt war.

Die Abbildung 4.13 zeigt die kumulierten Hits des ersten und zweiten Lastzyklus (siehe Abbildung 4.2), welche durch den SE-Kanal 1 erfasst wurden.

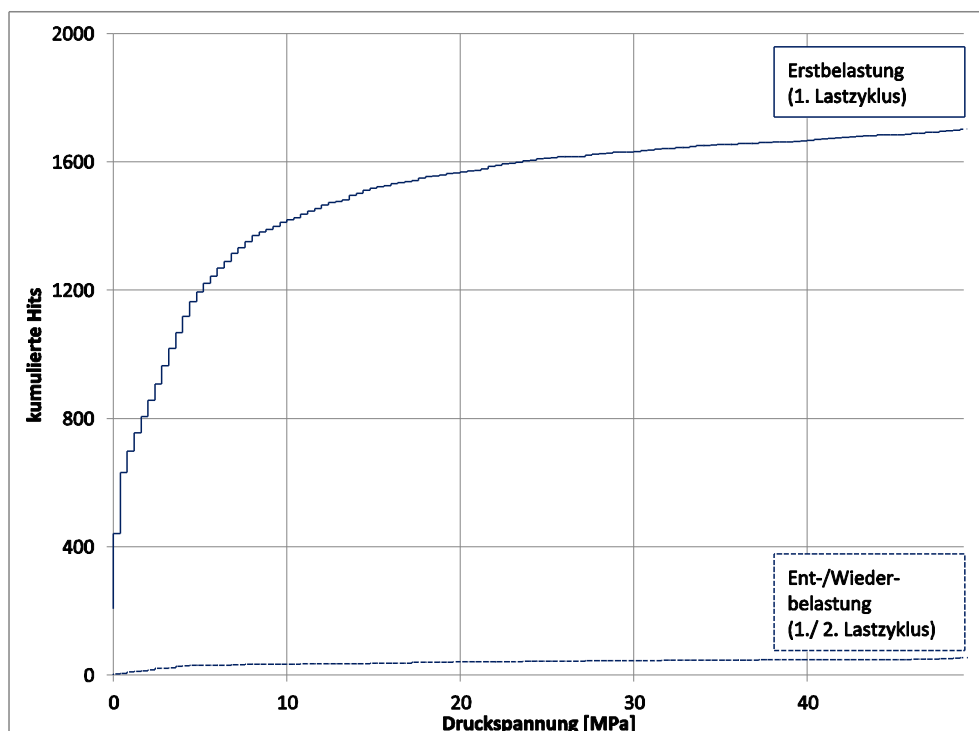


Abbildung 4.13: kumulierte Hits des 1. und 2. Lastzyklus (SE-Kanal 1)

Bei der Erstbelastung (1. Lastzyklus) wurden 1.701 Hits erfasst, die nachfolgende Ent- und Wiederbelastung (2. Lastzyklus) hatte einen geringfügigen Anstieg der Hits zufolge (54 Hits). Die anderen Schallemissionskanäle wiesen ein vergleichbares Verhalten bezüglich der erfassten Hits auf (Erstbelastung: 1.300-1.500 Hits; Ent-/Wiederbelastung: 19-50 Hits). Dieses Verhalten lässt sich auf den Kaisereffekt zurückführen (siehe Kapitel 2.5.3).

In Abbildung 4.14 sind exemplarisch die kumulierten Hits, welche durch SE-Kanal 1 bis zum Erreichen des maximalen Spannungsniveaus erfasst wurden, dargestellt. Die übrigen Schallemissionskanäle zeigten einen gleichartigen Verlauf der kumulierten Hits.

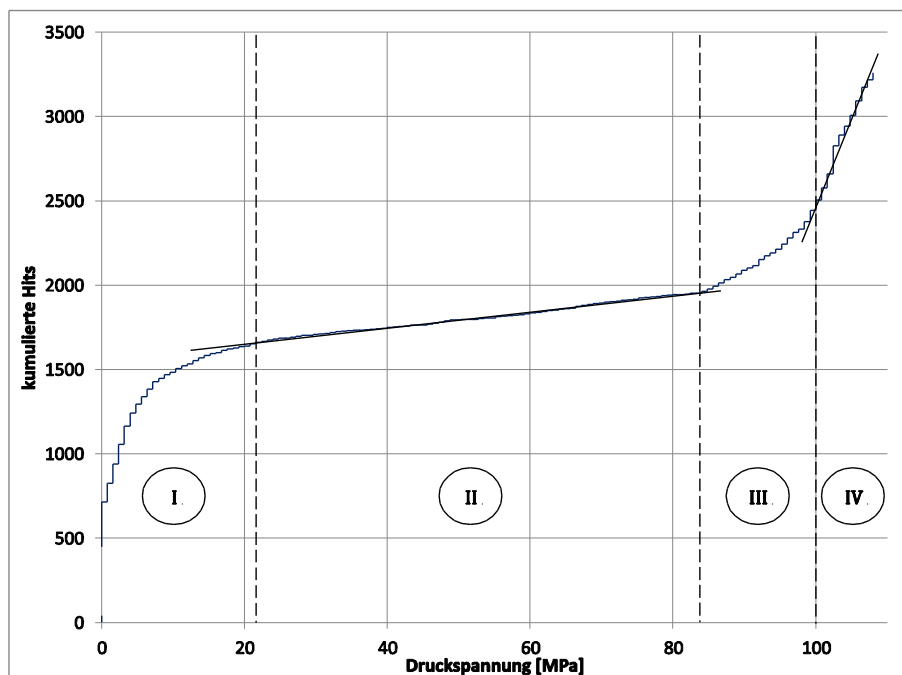


Abbildung 4.14: kumulierte Hits bis UCS (SE-Kanal 1)

Es sind die Phasen des Bruchprozesses zu erkennen (vgl. Kapitel 2.5.2, Abbildung 2.11 und Kapitel 2.5.3, Abbildung 2.12).

Der Bereich I wurde mit einem Spannungsniveau von ca. 22 MPa ($0,2 * \sigma_{UCS}$) begrenzt. Die SE-Aktivität wurde auf das „Einregeln“ der Gesteinsprobe in der Prüfmaschine zurückgeführt, da ein Schließen von Mikrorissen im Spannungs-Dehnungsdiagramm nicht erkennbar war (siehe Abbildung 4.4). Die Signalamplituden betragen in dieser Phase bis zu 70 dB.

Im Bereich II, dem linearen Verhalten zwischen Spannung und Dehnung, traten bis zu einer Druckspannung von ca. 83 MPa ($0,76 * \sigma_{UCS}$) nur wenige Schallemissionen auf. Nach diesem Bereich stiegen die kumulierten Hits während des stabilen Risswachstums (Bereich III), aufgrund der Mikrorissbildung und des Risswachstums, an.

Der Übergang von Bereich III auf Bereich IV (stabiles auf instabiles Risswachstum) wurde

mit einer Druckspannung von 100 MPa ($0,9 * \sigma_{UCS}$) abgeschätzt. In Bereich IV wurde durch die zunehmende Steigung der kumulierten Hits die schnell voranschreitende Bruchfortpflanzung wahrgenommen.

Die Spannungsniveaus des stabilen und instabilen Risswachstums wurden zudem mit der Auswertung der Volumendehnung im Spannungs-Dehnungsdiagramm bestimmt (siehe Anhang (A), Abbildung 0.5). Der Beginn des Bereiches III wurde mit einer Druckspannung $\sigma_{III} = 80 \text{ MPa}$ ($0,73 * \sigma_{UCS}$) und der Übergang zu Bereich IV mit einer Druckspannung $\sigma_{IV} = 100 \text{ MPa}$ ($0,9 * \sigma_{UCS}$) abgeschätzt. Es zeigte sich eine Übereinstimmung bei den ermittelten Spannungsniveaus für beide Methoden.

Nachdem die einaxiale Druckfestigkeit erreicht wurde, erfassten die SE-Kanäle vorwiegend Signalamplituden im Bereich von 60-100 dB.

4.2.2 Gabbro

In Abbildung 4.15, links ist die eingebaute Gesteinsprobe mit angebrachten Schallemissionssensoren sowie Wegaufnehmern dargestellt. Die rechten Abbildungen zeigen die zerstörte Gesteinsprobe nach dem einaxialen Druckversuch.



Abbildung 4.15: eingebaute Gesteinsprobe in der Prüfmaschine (links);
zerstörte Gesteinsprobe nach dem einaxialen Druckversuch (rechts)

Bei der zweiten Abbildung von rechts war die Gesteinsprobe noch in der Versuchsmaschine eingebaut. Es waren Oberflächenrisse sowie einige Abplatzungen an der Gesteinsoberfläche erkennbar. Die erste Abbildung von rechts zeigt die Probe nach dem Ausbau und Abnehmen der Schallemissionssensoren. Nach dem Abnehmen der SE-Sensoren war die Zerstörung des Gesteins sichtbar.

4.2.2.1 Felsmechanische Kennwerte

Die Auswertung der dargestellten Spannungs-Dehnungslinie (Abbildung 4.16) ist im Anhang (B) angeführt.

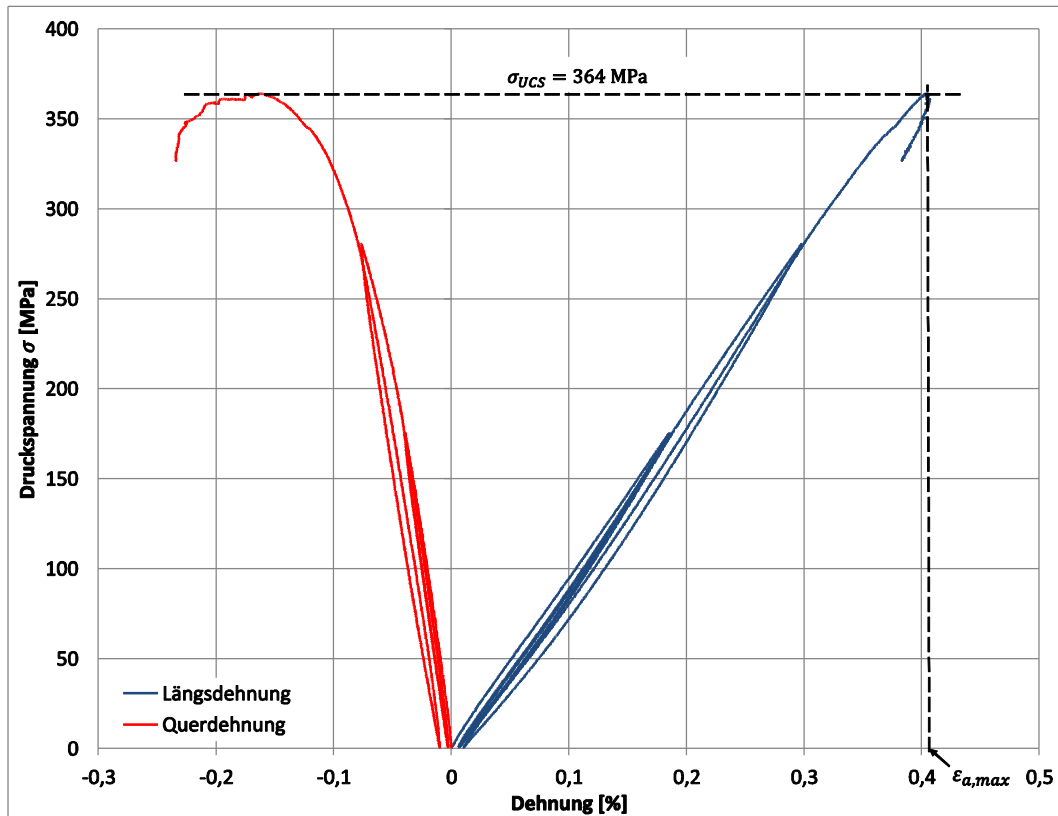


Abbildung 4.16: Spannungs-Dehnungsdiagramm

Es wurden die in Tabelle 4.2 dargestellten Kennwerte für den Gabbro ermittelt.

Tabelle 4.2: felsmechanische Kennwerte

Elastizitätsmodul E	97,3	GPa
Verformungsmodul V	94,3	GPa
Poissonzahl ν	0,19	
Einaxiale Druckfestigkeit σ_{UCS}	364	MPa
Bruchdehnung $\varepsilon_{a,max}$	0,41	%
Zerstörungsarbeit $W_{z,UCS}$	788	kJ/m ³
Zerstörungsarbeit $W_{z,Versuchsende}$	547	kJ/m ³

Es handelt sich um ein Class II Gestein, da die Zerstörungsarbeit zum Versuchsende geringer war als bei maximalen Spannungsniveau.

4.2.2.2 Auswertung der Schallemissionsdaten

Bei dieser Gesteinsprobe wurden vor dem Erreichen der einaxialen Druckfestigkeit vermehrt Schallemissionsereignisse geortet. Die einaxiale Druckfestigkeit wurde nach einer Versuchsdauer von 2.241 Sekunden erreicht. Bis zu diesem Zeitpunkt erfassten die sechs Schallemissionssensoren 382.775 Hits und das SE-System ortete 269 SE-Ereignisse (siehe Abbildung 4.17, links). Zu Versuchsende wurden insgesamt 1.089.064 Hits erfasst und 706 Schallemissionsereignisse geortet (Abbildung 4.17, rechts).

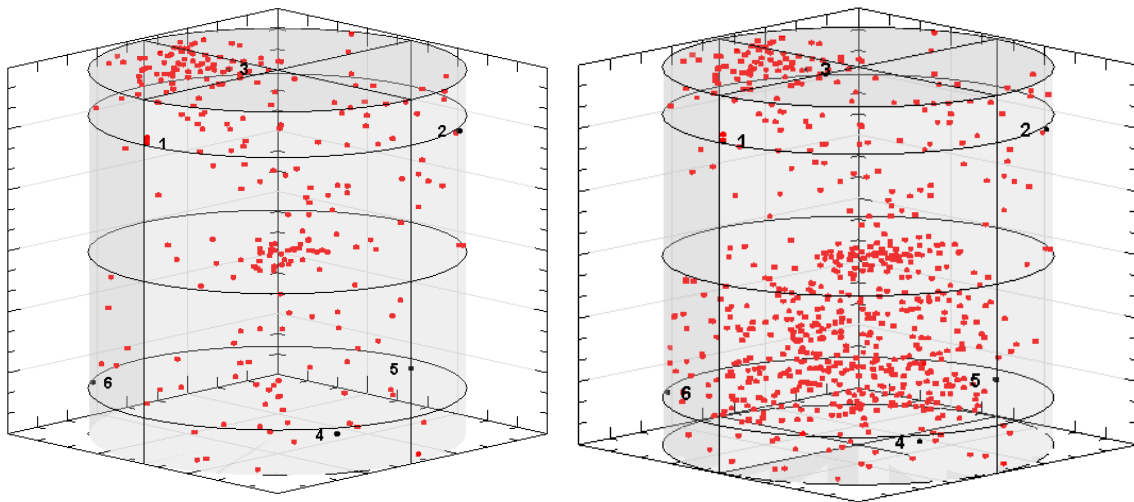


Abbildung 4.17: 3D Ansicht der georteten Bruchereignisse (rote Punkte).

vor dem Erreichen der einaxialen Druckfestigkeit (links); zu Versuchsende (rechts)

Die räumliche Verteilung der georteten Bruchereignisse nach den ersten zwei Lastzyklen war homogen. Mit dem Überschreiten des Spannungsniveaus dieser Zyklen konzentrierten sich die Schallemissionsereignisse zwischen den SE-Sensoren 1 und 3 (oberer Bereich) und im Inneren der mittleren Probenhöhe.

Nach dem Erreichen der einaxialen Druckfestigkeit wurden bis zum Versuchsende vorwiegend SE-Ereignisse im unteren Bereich der Gesteinsprobe geortet (vgl. Abbildung 4.17, links/ rechts). Diese Lokalisierung darf jedoch nicht für eine Analyse herangezogen werden, weil ab dem Zeitpunkt der einaxialen Druckfestigkeit drei SE-Sensoren keine gute Ankopplung besaßen. Um den Zeitpunkt der Entkopplung zu bestimmen, wird das in Abbildung 4.18 dargestellte Diagramm herangezogen.

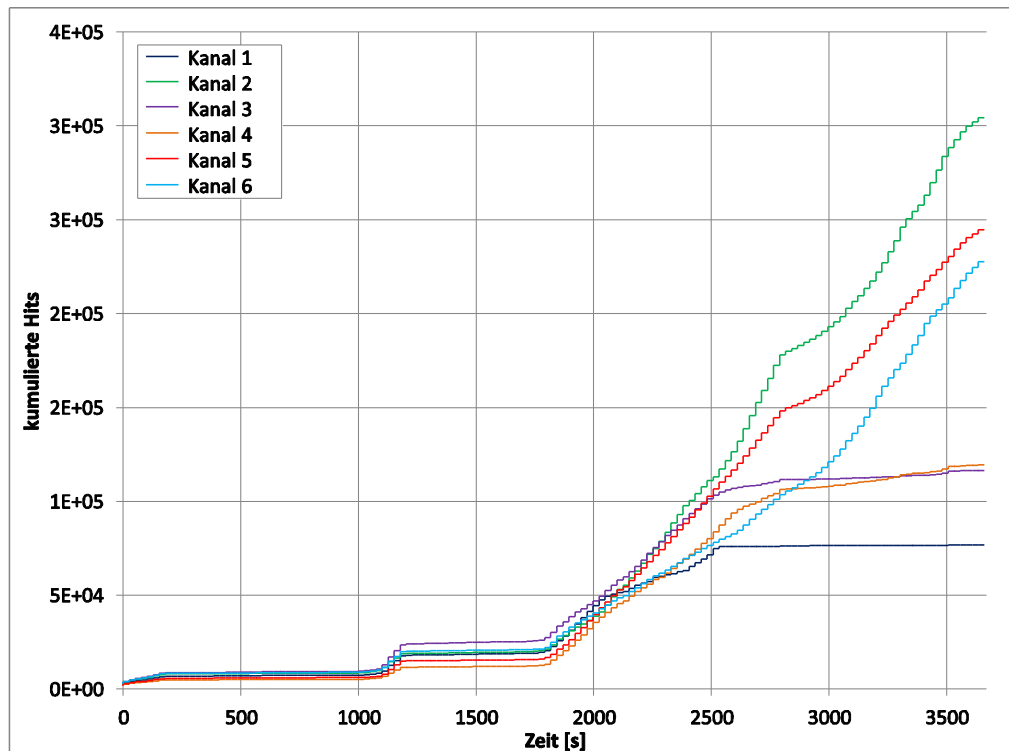


Abbildung 4.18: erfasste Hits über die Versuchsdauer

Der Schallemissionskanal 2 erfasste am meisten und der Schallemissionskanal 1 am wenigsten Hits. Es wurden zu Versuchsbeginn, nach der Überschreitung des vorhergehenden Spannungsniveaus der Lastzyklen, bis zum Erreichen der einaxialen Druckfestigkeit und darüber hinaus vermehrt Hits erfasst.

Mit dem Erreichen der einaxialen Druckfestigkeit (2.241 s) zeigte der SE-Kanal 1 bereits einen geringeren Zuwachs an erfassten Hits. Die Linie der kumulierten Hits der SE-Kanäle 3 und 4 verläuft ab ca. 2.500 Sekunden annähernd horizontal. Diese drei SE-Sensoren wiesen keine ausreichende Ankopplung über die gesamte Versuchsdauer auf.

Durch die Darstellung der absoluten Energierate je SE-Kanal kann die Zeit der Entkopplung exakter bestimmt werden (siehe Abbildung 4.19).

Der SE-Kanal 1 erfasste bei ca. 2.000 s den höchsten Wert der absoluten SE-Energie. Bei den SE-Kanälen 3 und 4 wurde dieser Zeitpunkt mit ca. 2.500 s bestimmt.

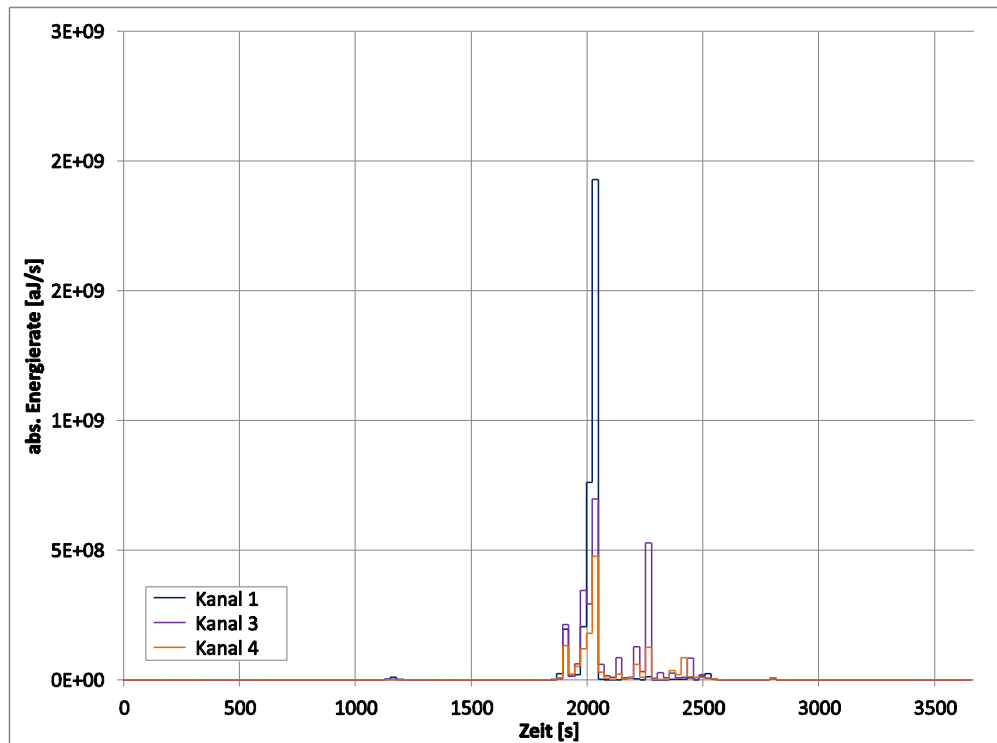


Abbildung 4.19: Schallemissionsaktivität

Es wurde jeweils ein SE-Ereignis in der Nähe der drei Schallemissionssensoren geortet (siehe Abbildung 4.20 oranges Viereck). Das Bruchereignis bei SE-Sensor 1 wurde nach ca. 1900 s geortet. Es waren Brüche in der Nähe dieser Sensoren an der Gesteinsprobe (siehe Abbildung 4.21, oranges Viereck) und eine Konzentration der georteten SE-Ereignisse in diesem Bereich (siehe Abbildung 4.17, rechts) zu erkennen.

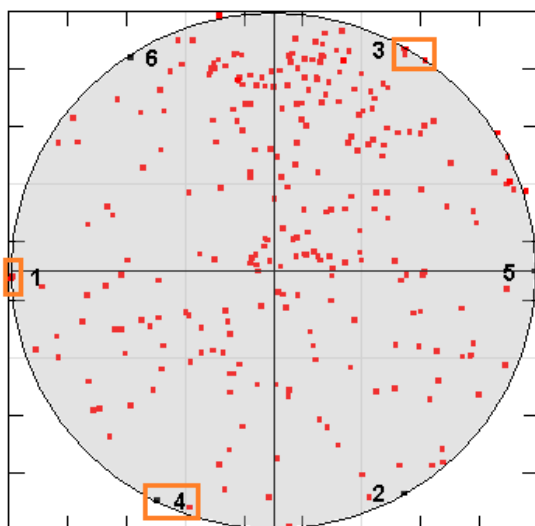


Abbildung 4.20: Draufsicht georteter Bruchereignisse (rote Punkte)



Abbildung 4.21: Bruch in der Nähe von Sensoren 3/ 1 (oben) und Sensor 4 (unten)

In weiterer Folge wird der Einfluss der unzureichenden Kopplung bei der Auswertung der SE-Daten aufgezeigt. Für die Vergleiche wird der SE-Kanal 1 (obere Sensorreihe),

SE-Kanal 2 (schlechte Ankopplung) und SE-Kanal 5 (untere Sensorreihe) herangezogen.

In Abbildung 4.22 ist die kumulierte absolute Energie der SE-Signale, welche von den SE-Kanälen erfasst wurden, dargestellt.

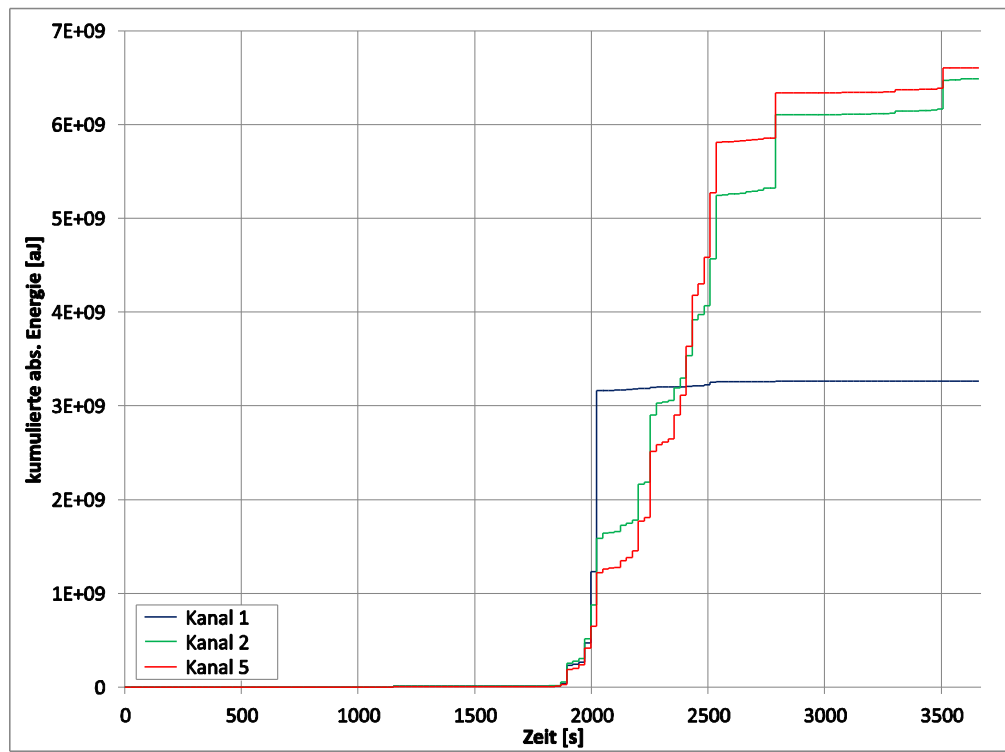


Abbildung 4.22: absolute Schallemissionsenergie

Der SE-Kanal 2 erfasste eine absolute Energie von $6,5 \cdot 10^9 \text{ aJ}$ und der SE-Kanal 5 $6,6 \cdot 10^9 \text{ aJ}$. Es ist der Zeitpunkt zu welchem ein SE-Ereignis in der Nähe des SE-Sensors 1 stattfand durch den Anstieg in der Energiekurve ersichtlich (ca. 2.000 s). Zugleich erfassten die anderen SE-Kanäle eine geringere Energie. Dies lässt auf ein starkes Bruchereignis in der Nähe des SE-Sensors 1 schließen.

Die Abbildung 4.23 stellt den zeitlichen Verlauf der aufgebracht Druckspannung sowie die absolute Energierate der SE-Signale, erfasst durch die SE-Kanäle 2 und 5, dar.

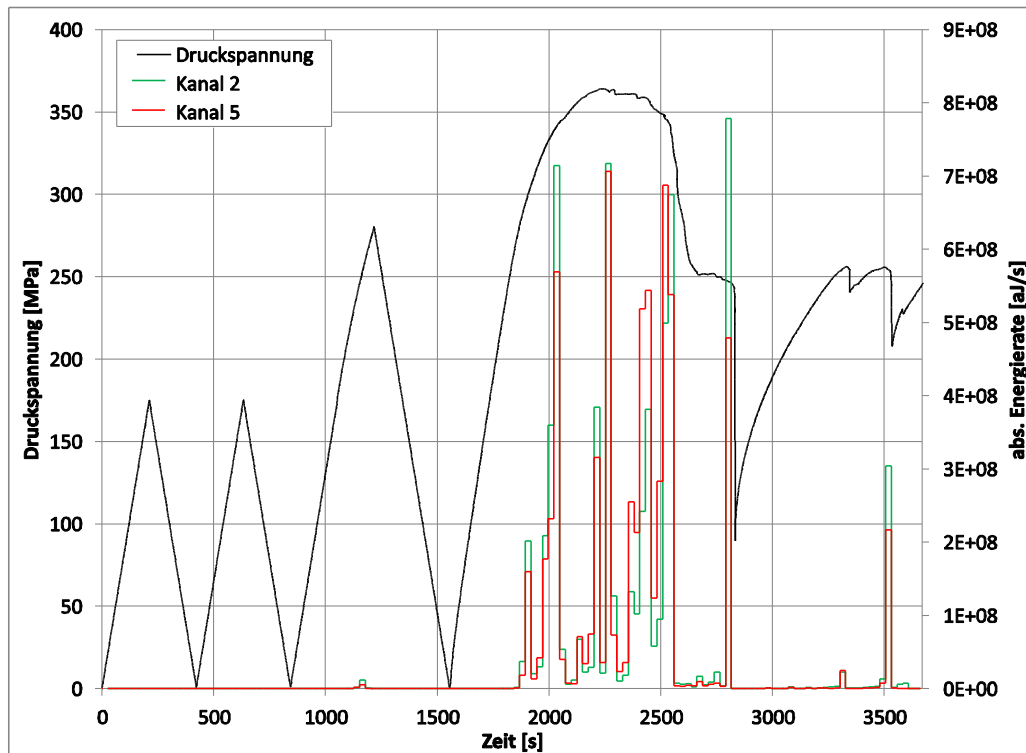


Abbildung 4.23: Schallemissionsaktivität

Die Verläufe zeigen eine Korrelation zwischen Druckspannung und absoluter Schallemissionsenergie im Nachbruchbereich.

Aufgrund der Umfangsdehnungssteuerung im Nachbruchbereich, erfolgte die Entlastung der Gesteinsprobe bei der Bildung neuer Brüche. Gleichzeitig wurden die Bruchereignisse durch den Anstieg der absoluten Energie der SE-Kanäle erfasst.

In Abbildung 4.24 ist die Hitrate nach der Signalamplitude der SE-Kanäle dargestellt.

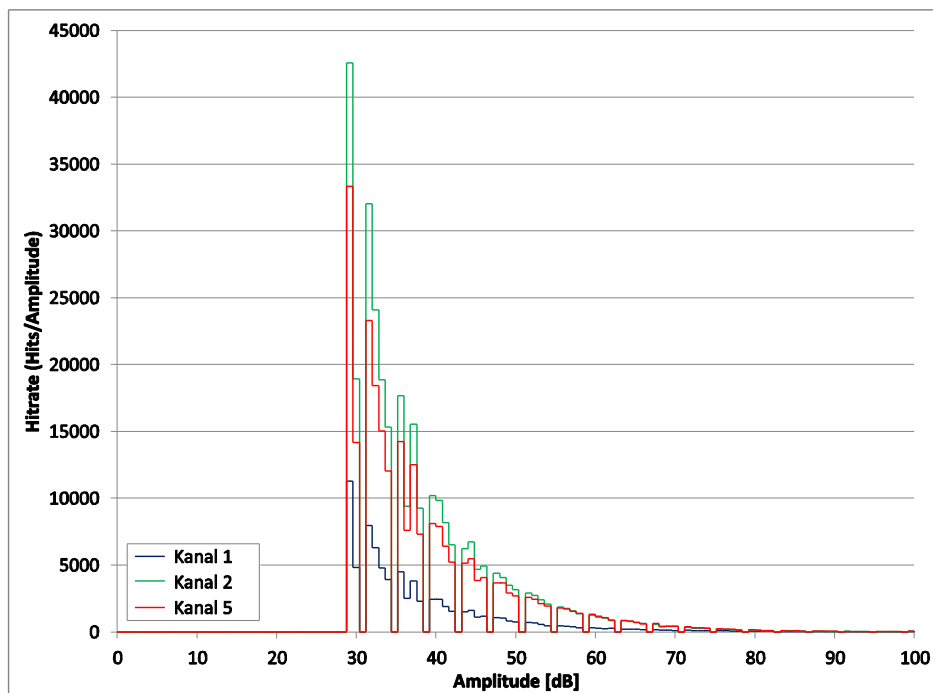


Abbildung 4.24: Hitintensität

Es wurden viele (schwache) SE-Ereignisse und einige (starke) SE-Ereignisse mit einer Signalamplitude über 80 dB erzeugt. Da das Niveau der Nachweisschwelle mit 30 dB festgelegt war, wurde die Verteilung bei diesem Wert „abgeschnitten“.

Die Abbildung 4.25 stellt die kumulierten Hits des ersten und zweiten Lastzyklus dar (siehe Abbildung 4.2), welche durch den SE-Kanal 5 erfasst wurden.

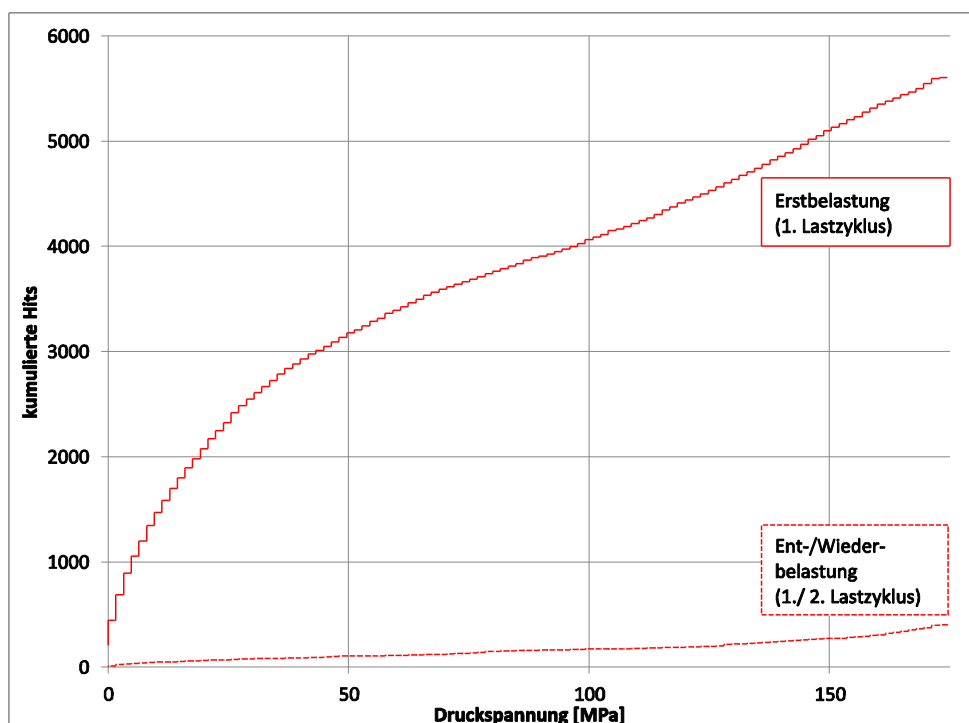


Abbildung 4.25: kumulierte Hits des 1. und 2. Lastzyklus (SE-Kanal 5)

Bei der Erstbelastung (1. Lastzyklus) wurden 5.603 Hits erfasst, die darauffolgende Ent- und Wiederbelastung (2. Lastzyklus) hatte 400 Hits zur Folge. Die anderen Schallemissionskanäle wiesen ein vergleichbares Verhalten bezüglich der erfassten Hits auf (Erstbelastung: 4.700-8.300 Hits; Ent-/Wiederbelastung: 200-600 Hits).

In Abbildung 4.26 sind exemplarisch die kumulierten Hits dargestellt, welche durch den SE-Kanal 5 bis zum Erreichen des maximalen Spannungsniveaus erfasst wurden. Die übrigen Schallemissionskanäle zeigten einen gleichartigen Verlauf.

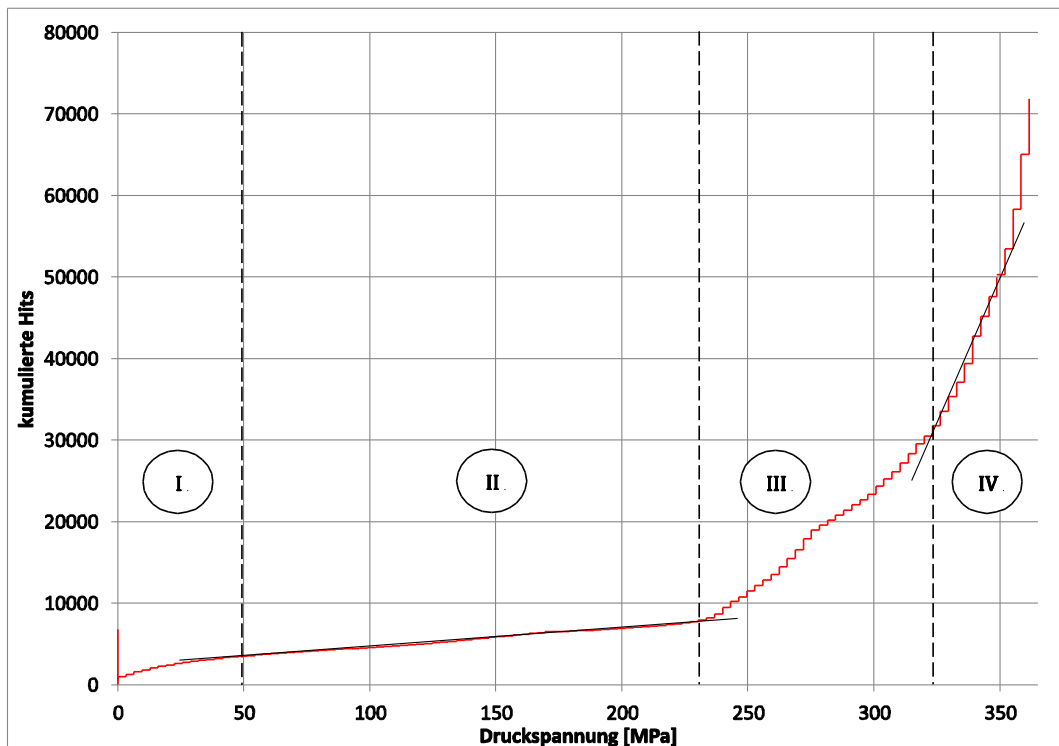


Abbildung 4.26: kumulierte Hits bis UCS (SE-Kanal 5)

Es sind die Phasen des Bruchprozesses zu erkennen (siehe Kapitel 2.5.2, Abbildung 2.11 und Kapitel 2.5.3, Abbildung 2.12).

Der Bereich I wurde mit dem Spannungsniveau von ca. 50 MPa ($0,14 * \sigma_{UCS}$) begrenzt. Da im Spannungs-Dehnungsdiagramm kein Schließen von Mikrorissen sichtbar war (siehe Abbildung 4.16), wurde die SE-Aktivität auf das „Einregeln“ der Gesteinsprobe in der Prüfmaschine zurückgeführt. Die Signalamplituden betragen in dieser Phase bis zu 70 dB.

Der Übergang von der Phase der linear elastischen Verformung (Bereich II) zu der Phase des stabilen Risswachstums (Bereich III) wurde durch den Anstieg der kumulierten Hits mit der Druckspannung von ca. 234 MPa ($0,64 * \sigma_{UCS}$) begrenzt.

Der Übergang von stabilen auf instabiles Risswachstum (Bereiches IV) war nicht eindeutig festzulegen. Der Beginn der schnell voranschreitenden Bruchfortpflanzung wurde mit einem Spannungsniveau von ca. 320 MPa ($0,88 * \sigma_{UCS}$) abgeschätzt.

Die Druckspannung für den Beginn von Bereich III wurde mit $\sigma_{III} = 280 \text{ MPa}$ ($0,77 * \sigma_{UCS}$) und für Bereich IV mit $\sigma_{IV} = 320 \text{ MPa}$ ($0,88 * \sigma_{UCS}$) durch die Auswertung der Volumendehnung im Spannungs-Dehnungsdiagramm ermittelt (siehe Anhang (B), Abbildung 0.9). Für Bereich III wurde eine Abweichung der ermittelten Druckspannung für beide Methoden festgestellt. Bei Bereich IV stimmte das Spannungsniveau überein.

Bis zum Erreichen der einaxialen Druckfestigkeit sowie im Nachbruchbereich wurden Signalamplituden zwischen 70 dB und 100 dB von den SE-Kanälen erfasst.

4.3 Gegenüberstellung der Ergebnisse

Die Ergebnisse zeigten, dass sich die Schallemissionsaktivität während des Laborversuchs für die untersuchten Gesteine unterschied. In Tabelle 4.3 sind die Hits, welche von allen SE-Kanälen erfasst wurden, sowie die georteten SE-Ereignisse zusammengefasst.

Tabelle 4.3: Vergleich der erfassten Hits und georteten SE-Ereignisse

		Kalkstein	Gabbro
1. Belastung bis $0,5 * \sigma_{UCS}$	Hits	9.000	40.300
	SE-Ereignisse	5	37
2. Belastung bis $0,5 * \sigma_{UCS}$	Hits	9.150	44.050
	SE-Ereignisse	6	51
3. Belastung bis $0,8 * \sigma_{UCS}$	Hits	9.800	102.550
	SE-Ereignisse	6	156
4. Belastung bis σ_{UCS}	Hits	16.450	382.800
	SE-Ereignisse	12	269
5. Versuchsende	Hits	123.450	1.089.050
	SE-Ereignisse	217	706

Die SE-Aktivität des Kalksteins war geringer als jene des Gabbros zwischen Versuchsbeginn und Erreichen des maximalen Spannungsniveaus.

Beim Gabbro wurden mit den Lastzyklen, jeweils nach dem Überschreiten des vorhergehenden Spannungsniveaus Hits mit Signalamplituden zwischen 60-100 dB erfasst. Aufgrund dieser Intensität war eine Ortung von SE-Ereignissen möglich. Im Gegensatz dazu erfassten die Schallemissionskanäle zwischen den Lastzyklen des Kalksteins Signalamplituden mit ca. 50 dB.

Mit dem Überschreiten der einaxialen Druckfestigkeit wurden bei beiden Gesteinen vermehrt Hits mit Signalamplituden zwischen 60-100 dB erfasst. Damit war eine Lokalisierung von SE-Ereignissen möglich, welche jedoch unter dem Einfluss von entkoppelten SE-Sensoren stattfand. Diese hohen Signalamplituden weisen entweder auf energiereiche Ereignisse oder auf ein schnelles instabiles Risswachstum hin.

Bezogen auf die Anzahl der erfassten Hits zum Zeitpunkt der maximalen Druckspannung steigerten sich die Hits bis zum Versuchsende um 750% beim Kalkstein und um 280% beim Gabbro. Dabei ist anzumerken, dass der Laborversuch des Kalksteins länger im Nachbruchbereich gefahren wurde, wodurch die Werte nicht direkt vergleichbar sind.

In Tabelle 4.4 sind die Spannungsniveaus der Bruchphasen angeführt, welche durch die Auswertung der kumulierten Hits ermittelt wurden. Die Prozentsätze beziehen sich auf die einaxiale Druckfestigkeit (UCS).

Tabelle 4.4: Vergleich der Spannungsniveaus der Phasen des Bruchprozesses

Bruchphase		Kalkstein	Gabbro
Bereich I-II	Druckspannung [MPa]	22	50
	bezogen auf UCS [%]	20	14
Bereich II-III	Druckspannung [MPa]	83	234
	bezogen auf UCS [%]	76	64
Bereich III-IV	Druckspannung [MPa]	100	320
	bezogen auf UCS [%]	91	88

Dieser Vergleich zeigte, dass die Phasen des Bruchprozesses bei dem Gabbro bei einem geringeren Spannungsniveau (bezogen auf die einaxiale Druckfestigkeit) einsetzen als beim Kalkstein. Bakhshaiesh [1] hat bei seinen Untersuchungen von Granit und Gabbro dieses geringere Spannungsniveau auf die geringere Porosität des Gabbros zurückgeführt.

Dieser Zusammenhang lässt sich ebenso für die untersuchten Gesteine aufstellen. Bei Kalkstein handelt es sich um ein feinkörniges Gestein mit einer größeren Porosität. Im Gegensatz dazu ist Gabbro grobkörnig und besitzt folglich eine geringere Porosität [37].

Zudem zeigte sich eine Abweichung zu dem ermittelten Spannungsniveau für den Beginn der stabilen Bruchfortpflanzung durch die Auswertung der Volumendehnung im Spannungs-Dehnungsdiagramm.

Die erfasste Energie eines SE-Kanals nach dem Laborversuch des Gabbros war um 7,5% höher als die des Kalksteins. Aufgrund der unterschiedlichen Gesteinsarten (Korngröße) erscheint dieses Ergebnis plausibel (siehe Kapitel 2.3.7).

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die theoretischen Grundlagen der Schallemissionstechnik erläutert, die Vorgehensweise der Kalibrierung des SE-Systems aufgezeigt und für drei Gesteinsarten getestet. In weiterer Folge wurden zwei Laborversuche mit Aufzeichnung der Schallemissionsdaten durchgeführt und ausgewertet.

Zunächst werden die wesentlichen Ergebnisse der kalibrierenden Tätigkeiten und der Laborversuche zusammengefasst sowie interpretiert. Abschließend wird ein Ausblick über Verbesserungspotentiale für zukünftige Untersuchungen gegeben.

5.1 Zusammenfassung und Interpretation

Eine ausschlaggebende Rolle bei der Erfassung der elastischen Welle durch den Schallemissionssensor spielt dessen Ankopplung. Wenn diese unsauber durchgeführt wird, kann der SE-Sensor die Verformung der Oberfläche nicht sinngemäß erfassen.

Bei den untersuchten Gesteinen stellte sich die Platzierung und nachfolgende Überprüfung der Kopplung unterschiedlich dar. Die erfassten Amplituden der SE-Kanäle bei dem Versuch des Kalksteins lagen sofort über der Mindestanforderung. Bei den Versuchen des Gabbros und des Magnesits mussten einzelne SE-Sensoren aufgrund zu kleiner Signalamplituden abgenommen und erneut angebracht werden. Allerdings war keine merkbare Verbesserung der Ankopplung zu erzielen. Die Probleme bei der Platzierung mittels Silikonkleber könnten auf die geringere Saugfähigkeit der Gesteinsoberfläche (geringere Porosität) dieser Gesteine zurückzuführen sein.

Die Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeit (P-Wellengeschwindigkeit) und die Überprüfung der Lokalisierungsgenauigkeit erfolgte durch Bleistiftminenbrüche an der Gesteinsoberfläche. Hier bedarf es einer sauberen Ausführung der Brüche, damit die SE-Kanäle nicht zu „späte“ Hitankunftszeiten aufgrund einer geringeren Signalamplitude erfassen.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der homogenen Gesteinsproben wurde für eine angeregte SE-Welle nahe der Oberfläche und durch den Prüfkörper ermittelt. Für die Rückrechnung wurde eine direkte Wellenausbreitung angenommen. Der Wert der Geschwindigkeit in der Nähe der Oberfläche war kleiner als der durch den Prüfkörper. Höchstwahrscheinlich wurde die Wellenausbreitung nahe der Oberfläche durch

unterschiedliche Wellentypen und Reflexionen beeinflusst (siehe Kapitel 2.4.2). Aufgrund dieser Einflüsse wird die SE-Welle vom SE-Sensor „später“ erfasst, was eine „spätere“ Hitankunftszeit an dem SE-Kanal zur Folge hat. Mit gleichbleibendem Weg der Schallemissionswelle aber „späterer“ Ankunftszeit wird die rückgerechnete Geschwindigkeit zwangsläufig kleiner.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der geschichteten Gesteinsprobe wurde für eine SE-Welle, welche normal und parallel zur angenommenen Orientierung der Schichtung generiert wurde, berechnet. Der rückgerechnete Wert der Geschwindigkeit parallel zur Schichtung war größer als jener normal auf die Schichtung. Dieses Verhältnis wurde erwartet. Im Gegensatz dazu wies die Durchschallungsgeschwindigkeit ein gegengleiches Verhalten auf. Vermutlich wurde die Orientierung der Schichtung nicht korrekt angenommen.

Für die homogenen Gesteine waren die Geschwindigkeiten ermittelt durch Bleistiftminenbrüche größer als die Durchschallungsgeschwindigkeit. Es konnte kein direkter Zusammenhang zwischen diesen Geschwindigkeiten hergestellt werden.

Die Geschwindigkeitsrückrechnung des Magnesits an verschiedenen Positionen ergab unterschiedliche Werte für die Schichtpakete und eine Streuung der Werte. Dies ist einerseits auf die „Verschmierung“ der Berechnung über die Schichten, andererseits auf die mineralische Zusammensetzung des Gesteins zurückzuführen.

Bei der Überprüfung und Optimierung der Lokalisierungsgenauigkeit stellten sich neben den potentiellen Fehlerquellen (siehe Kapitel 2.4.3.4: Nachweisschwelle und Ausbreitungsgeschwindigkeit) die Einstellungen der „AE Timing Parameter“ als maßgebende Einflussfaktoren heraus:

Es wurde gezeigt, dass geortete SE-Ereignisse mit einem geringeren Niveau der Nachweisschwelle eine geringere Abweichung von den tatsächlichen Positionen der Bruchereignisse aufwiesen. Mit der Nachweisschwelle wird die Hitankunftszeit bestimmt und je geringer diese gewählt wird, desto eher wird das SE-Signal zur tatsächlichen Zeit erfasst. Da die Lokalisierung durch Bestimmung der Laufzeitdifferenzen erfolgt, ist es erforderlich die Ankunftszeiten korrekt zu erfassen.

Auch die Einstellungen der SE-Parameter beeinflussen die Erfassung der Ankunftszeit und die maximale Signalamplitude eines SE-Ereignisses [26].

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit wird ebenso für die Berechnung des Lokalisierungsverfahrens herangezogen. Der Einfluss auf das Ortungsergebnis wurde durch eine Variation der Geschwindigkeit untersucht. Für geringere Werte der Geschwindigkeit wurden die SE-Ereignisse weiter auseinander geortet, bei höheren Werten rückten die

georteten SE-Ereignisse weiter zusammen.

Für die homogenen Gesteinsproben (Kalkstein, Gabbro) wurde mit der Variation und Anpassung der aufgezeigten Einflussfaktoren die Lokalisierung erheblich verbessert. Bei der geschichteten Gesteinsprobe (Magnesit) war keine Optimierung der 3D-Ortung zu erzielen. Die Bruchereignisse, welche normal auf die Schichtung ausgelöst wurden, wiesen eine größere Abweichung auf als geortete Bruchereignisse in Schichtungsrichtung.

Dies zeigte die Grenzen der 3D-Ortung mittels AEwin Software, welches ein homogenes, isotropes Material voraussetzt. Für die geschichtete Probe dürfen die Einflussfaktoren auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit, aufgrund der mineralischen Zusammensetzung, nicht vernachlässigt werden. Außerdem ist mit einer Abschwächung der SE-Signale durch Dämpfung, unterschiedliche Wellenmoden und Modenumwandlung zu rechnen (siehe Kapitel 2.4.1 und Kapitel 2.4.2) und gegebenenfalls zu berücksichtigen.

Bei den durchgeführten Laborversuchen wiesen die Gesteinsproben ein unterschiedliches Verhalten der Schallemissionsaktivität auf. Es wurde eine geringere SE-Aktivität, SE-Energie und Intensität der Bruchereignisse bei dem Kalkstein im Vergleich zum Gabbro erfasst. Aufgrund der unterschiedlichen Gesteinsstruktur (Porosität) war dieses Ergebnis zu erwarten. Der Kalkstein weist eine größere Porosität auf, womit die Dämpfung der SE-Signale größer ist. Dies hat eine Abschwächung der Signale zur Folge.

Die räumliche Positionsbestimmung der Schallemissionen zeigte eine Übereinstimmung zwischen georteten SE-Ereignissen und Bruch auf der Gesteinsoberfläche. Gleichmaßen stimmte der Zeitpunkt der entkoppelten SE-Sensoren mit dem Zeitpunkt der georteten Ereignisse überein, welches plausibel scheint. Diese Entkopplung von Sensoren ist allerdings als kritisch anzusehen, weil die Lokalisierungsgenauigkeit dadurch abnimmt.

Die Gültigkeit des Kaisereffektes wurde bei beiden Gesteinen für die ersten Lastzyklen (Phase der linear elastischen Verformung) beobachtet.

Zudem wurde eine Korrelation zwischen der maschinengesteuerten Entlastung im Nachbruchbereich und gleichzeitigem Anstieg der Schallemissionsaktivität aufgezeigt.

Die Phasen des Bruchprozesses wurden durch die Auswertung der Volumendehnung und der Schallemissionsdaten ermittelt. Für die Phase der stabilen Bruchfortpflanzung unterschieden sich die ermittelten Spannungsniveaus. In diesem Bereich war eine eindeutige Auswertung mittels SE-Daten nicht möglich.

5.2 Ausblick

Wie aufgezeigt wurde, konnte die Platzierung der Schallemissionssensoren mittels Silikonkleber nicht bei allen untersuchten Gesteinen einwandfrei durchgeführt werden. Der Kontakt lässt sich möglicherweise durch Wahl eines anderen Kopplungsmittels oder durch die zusätzliche Fixierung mittels Gummiband verbessern. Die Variante mit einem Gummiband könnte während des Laborversuches der Entkopplung von einzelnen Sensoren entgegenwirken.

Die Versuchsdurchführung ist beispielsweise durch eine Aufzeichnung mittels Videokamera zu unterstützen. Dadurch lässt sich der zeitliche Verlauf der Bruchereignisse mit der Lokalisierung vergleichen und die Genauigkeit besser abschätzen.

Die Hitankunftszeit wird von der verwendeten Software automatisch erfasst, wenn das SE-Signal die Nachweisschwelle überschreitet. Für die Ersteinsatzbestimmung stehen auch andere Verfahren (z.B. AIC Picker) zur Verfügung [18]. Damit könnte eine weitere Verbesserung der Lokalisierungsgenauigkeit erzielt werden [38].

Für die 3D-Ortung von Schallemissionen in geschichteten Gesteinen ist ein Lokalisierungsverfahren erforderlich, welches die Einflüsse der Schichtung berücksichtigt. Hier sind Tests an künstlichen Proben und die Programmierung eines MATLAB Skriptes denkbar.

Literatur

- [1] Bakhshaiesh, K. 2009. *Contribution to experimental study of mechanical and thermal damage in crystalline hard rocks*. Thèse. Terre, Univers & Environnement. Université Joseph Fourier - Grenoble I.
- [2] Bienawski, Z.T. 1967. Mechanisms of brittle fracture of rock, part II - experimental studies. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 4, (1967), 407–423.
- [3] Bienawski, Z.T., Denkhaus, H.G. and Vogler, U.W. 1969. Failure of fractured rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 6, (1969), 323–341.
- [4] Brückl, E. et al. 2005. Seismik. *Geophysik*. K. Knödel, H. Krummel, and G. Lange, eds. Springer Berlin Heidelberg. 425–726.
- [5] Chang, S.-H. and Lee, C.-I. 2004. Estimation of cracking and damage mechanisms in rock under triaxial compression by moment tensor analysis of acoustic emission. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 41, 7 (2004), 1069–1086.
- [6] Chang, S.-H., Lee, C.-I. and Lee, Y.-K. 2007. An Experimental Damage Model and Its Application to the Evaluation of the Excavation Damage Zone. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 40, 3 (2007), 245–285.
- [7] Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung 2014. *DGZfP Fachausschuss Schallemissionsprüfverfahren - Richtlinie SE 02 - Verifizierung von Schallemissionssensoren und ihrer Ankopplung im Labor*. DGZfP e.V.: Berlin.
- [8] Feldmann, J. 2010. Körperschall-Messtechnik. *Messtechnik der Akustik*. M. Möser, ed. Springer Berlin Heidelberg.
- [9] Feng, G.-L., Feng, X.-T., Chen, B., Xiao, Y.-X. and Yu, Y. 2014. A Microseismic Method for Dynamic Warning of Rockburst Development Processes in Tunnels. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. (2014), 1–16.
- [10] Geiger, L. 1910. Herdbestimmung bei Erdbeben aus den Ankunftszeiten. *Nachrichten von der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen*. 4 (1910), 331–349.
- [11] Grosse, C.U. and Ohtsu, M. 2008. *Acoustic Emission Testing*. Springer Berlin Heidelberg.
- [12] Gutenberg, B. and Richter, C.F. 1942. Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 32, 3 (1942), 163–191.
- [13] Hardy, H.R.J. 2003. *Acoustic Emission / Microseismic Activity, Volume 1: Principles, Techniques and Geotechnical Applications*. A. A. Balkema, Lisse.
- [14] Havskov, J., Bormann, P. and Schweitzer, J. 2002. IS 11.1: Earthquake location. *New Manual of Seismological Observatory Practice*. GeoForschungszentrum Potsdam. 1–28.
- [15] Hellier, C. 2012. Chapter 10: Acoustic Emission Testing. *Handbook of Nondestructive Evaluation, Second Edition*. McGraw-Hill Professional, US. 10.1–10.39.

- [16] He, M.C., Miao, J.L. and Feng, J.L. 2010. Rock burst process of limestone and its acoustic emission characteristics under true-triaxial unloading conditions. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 47, 2 (2010), 286–298.
- [17] Kim, J.-S., Lee, K.-S., Cho, W.-J., Choi, H.-J. and Cho, G.-C. 2015. A Comparative Evaluation of Stress–Strain and Acoustic Emission Methods for Quantitative Damage Assessments of Brittle Rock. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 48, 2 (2015), 495–508.
- [18] Kurz, J.H. 2006. *Verifikation von Bruchprozessen bei gleichzeitiger Automatisierung der Schallemissionsanalyse an Stahl- und Stahlfaserbeton*. Dissertation. Institut für Werkstoffe im Bauwesen. Universität Stuttgart, Deutschland.
- [19] Lavrov, A. 2003. The Kaiser effect in rocks: principles and stress estimation techniques. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 40, 2 (2003), 151–171.
- [20] Lehtonen, A., Cosgrove, J.W., Hudson, J.A. and Johansson, E. 2012. An examination of in situ rock stress estimation using the Kaiser effect. *Engineering Geology*. 124, (2012), 24–37.
- [21] Linkov, A.M. 1996. Rockbursts and Instability of Rock Masses. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 33, 7 (1996), 727–732.
- [22] Lockner, D. 1993. The role of acoustic emission in the study of rock fracture. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 30, 7 (1993), 883–899.
- [23] Lockner, D.A. and Byerlee, J.D. 1978. Velocity anomalies: an alternative explanation based on Data from Laboratory Experiments. *Pageoph*. 116 (1978), 765–772.
- [24] MISTRAS Group 2011. 2/4/6 Preamplifier. Datenblatt. Physical Acoustics Corporation, Princeton Junction NJ, USA.
- [25] MISTRAS Group 2011. Nano30 Sensor. Datenblatt. Physical Acoustics Corporation, Princeton Junction NJ, USA.
- [26] MISTRAS Group 2007. *PCI-2 Based AE System User's Manual Rev 3*. Benutzerhandbuch. Physical Acoustics Corporation, Princeton Junction NJ, USA.
- [27] Mutschler, T. 2004. Neufassung der Empfehlung Nr. 1 des Arbeitskreises "Versuchstechnik Fels" der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e. V.: Einaxiale Druckversuche an zylindrischen Gesteinsprüfkörpern. *Bautechnik*. 81, 10 (2004), 825–834.
- [28] ÖNORM B3124-9 1986. *Prüfung von Naturstein - Mechanische Gesteinseigenschaften - Elastizitätsmodul, Arbeitslinie, Verformungsmodul und Querdehnzahl bei einaxialer Druckbelastung*. Österreichisches Normungsinstitut: Wien.
- [29] ÖNORM EN 1330-9 2009. *Zerstörungsfreie Prüfung - Terminologie; Teil 9: Begriffe der Schallemissionsprüfung*. Österreichisches Normungsinstitut: Wien.
- [30] ÖNORM EN 13477-1 2001. *Zerstörungsfreie Prüfung - Schallemissionsprüfung - Gerätecharakterisierung; Teil 1: Gerätebeschreibung*. Österreichisches Normungsinstitut: Wien.
- [31] ÖNORM EN 13477-2 2011. *Zerstörungsfreie Prüfung - Schallemissionsprüfung - Gerätecharakterisierung; Teil 2: Überprüfung der Betriebskenngrößen*. Österreichisches Normungsinstitut: Wien.

- [32] ÖNORM EN 13554 2011. *Zerstörungsfreie Prüfung - Schallemissionsprüfung - Allgemeine Grundsätze*. Österreichisches Normungsinstitut: Wien.
- [33] Prikryl, R., Lokajícek, T., Li, C. and Rudajev, V. 2003. Acoustic Emission Characteristics and Failure of Uniaxially Stressed Granitic Rocks: the Effect of Rock Fabric. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 36, 4 (2003), 255–270.
- [34] Rao, M.V.M.S. 2012. *Acoustic Emission Signatures of Microcrack Damage in Rock - Laboratory investigations*. LAP Lambert Academic Publishing, Saarbrücken.
- [35] Roch, K.-H. 1987. Über die Bedeutung dynamisch ermittelter Parameter für die Bestimmung von Gesteins- und Gebirgseigenschaften. *Geowissenschaftliche Mitteilungen*. 30 (1987), 15–17.
- [36] Schubert, W. 2007. *Skriptum Felsmechanik und Tunnelbau*. Vorlesungsunterlagen. Institut für Felsmechanik und Tunnelbau, Technische Universität Graz, Österreich.
- [37] Sebastian, U. 2012. *Gesteinskunde: ein Leitfaden für Einsteiger und Anwender*. 2. erw. und verb. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg.
- [38] Stoeckhert, F., Molenda, M., Brenne, S. and Alber, M. 2015. Fracture propagation in sandstone and slate – Laboratory experiments, acoustic emissions and fracture mechanics. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 7, 3 (2015), 237–249.
- [39] Tensi, H.M. 2004. The Kaiser-effect and its scientific background. *Journal of Acoustic Emission*. 22, (2004), S1–S16.
- [40] Thuro, K. 1998. *Bohrbarkeit beim konventionellen Sprengvortrieb; Geologisch-felsmechanische Untersuchungen anhand sieben ausgewählter Tunnelprojekte*. Münchner Geologische Hefte, Reihe B: Heft 1: Angewandte Geologie. Elektronische Publikation.
- [41] Tufar, W., Siewers, U. and Weber, C. 2008. Zur Genese der paläozoischen Spatmagnetit-Lagerstätte Breitenau am Hochlantsch (Grazer Paläozoikum, Steiermark, Österreich). *Joannea Mineralogie*. 4, (2008), 5–52.
- [42] Wang, J.A. and Park, H.D. 2001. Comprehensive prediction of rockburst based on analysis of strain energy in rocks. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 16, 1 (2001), 49–57.
- [43] Wasantha, P.L.P., Ranjith, P.G. and Shao, S.S. 2014. Energy monitoring and analysis during deformation of bedded-sandstone: Use of acoustic emission. *Ultrasonics*. 54, 1 (2014), 217–226.
- [44] Wawersik, W.R. and Fairhurst, C. 1970. A study of brittle rock fracture in laboratory compression experiments. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 7, (1970), 561–575.
- [45] Zang, A. 1997. *Akustische Emissionen beim Sprödbbruch von Gestein*. Scientific Technical Report STR 97/19. GeoForschungsZentrum Potsdam.

Anhang

Ermittlung des elektronischen Rauschens

Das Eigenrauschen wurde mit dem Niveau von 10 dB festgestellt. Über einen Zeitraum von 00:01:20 wurden 31.271 Hits mit einer Signalamplitude von ca. 20-23 dB erfasst (siehe Abbildung 0.1).

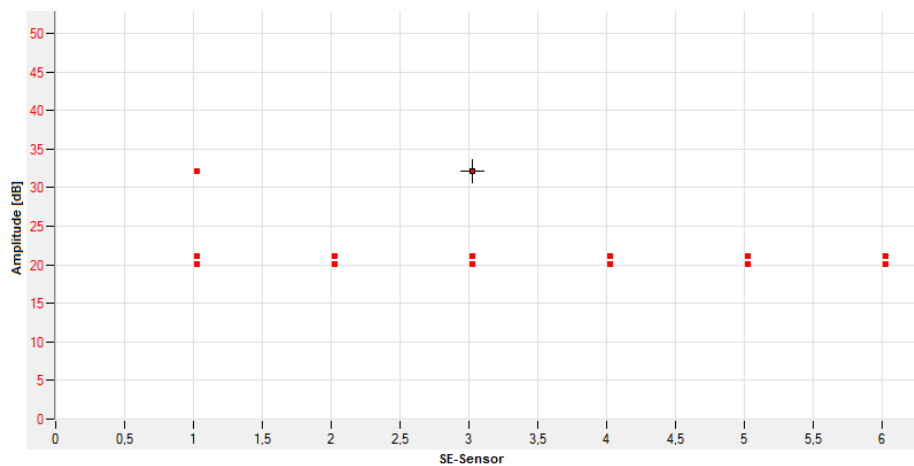


Abbildung 0.1: elektronisches Rauschen der SE-Sensoren

A. Kalkstein

Ermittlung der Ausbreitungsgeschwindigkeit

Die direkten Wege $ds = s_{1-5}; s_{2-6}; s_{3-5}$ in Tabelle 0.1 sind nach Formel (3.2) zu berechnen. Die Koordinaten der SE-Sensoren werden der Tabelle 3.4 entnommen.

$$\begin{aligned}
 ds_{1-5} &= \sqrt{(y_1 - y_5)^2 + (x_1 - x_5)^2 + (z_1 - z_5)^2} = \\
 &= \sqrt{(91,9 - 10)^2 + (1,5 - 0)^2 + (25,6 - (-25,6))^2} = 96,6 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 ds_{3-5} &= \sqrt{(y_3 - y_5)^2 + (x_3 - x_5)^2 + (z_3 - z_5)^2} = \\
 &= \sqrt{(90,9 - 10)^2 + (-22,2 - 0)^2 + (-12,8 - (-25,6))^2} = 84,9 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 ds_{2-6} &= \sqrt{(y_2 - y_6)^2 + (x_2 - x_6)^2 + (z_2 - z_6)^2} = \\
 &= \sqrt{(91,4 - 12)^2 + (21,9 - (-21,9))^2 + (-13,2 - 13,3)^2} = 94,5 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Die Zeitdifferenz dt in Tabelle 0.1 ist für jede generierte SE-Welle nach Formel (3.1) zu berechnen. Es werden die aus der AEWin Software ausgelesenen Hitankunftszeiten t_i der Kanäle herangezogen.

$$dt_{1-5} = t_5 - t_1$$

$$dt_{3-5} = t_5 - t_3$$

$$dt_{2-6} = t_6 - t_2$$

Anmerkung: Auslesen der Hitankunftszeiten

In der AEwin Software ist das Diagramm „Amplitude vs. Channel“ nach dem Abspielen einer Datei anzuwählen. Mit dem „Aera Hit“ Werkzeug sind die Punkte (Hits der SE-Kanäle) auszuwählen, bei welchen die Ankunftszeiten ausgelesen werden sollen. In dem nächsten Fenster ist der Button „View all Hits“ anzuklicken. Die Liste zeigt unter anderem die Hitankunftszeit an dem SE-Kanal und die zugehörige Signalamplitude.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit v wird für jede generierte SE-Welle nach Formel (3.3) berechnet.

Tabelle 0.1: Ausbreitungsgeschwindigkeiten der SE-Welle in drei Ausbreitungsrichtungen ausgelesene SE-Daten (AEwin)

Hitankunftszeit t	Kanal	Ampl. [dB]	dt [s]	ds [mm]	v [mm/s]
00:00:18.0133957	1	100			
00:00:18.0134153	5	87	1,96E-05	96,6	4.928.571
00:00:26.5292093	1	100			
00:00:26.5292290	5	89	1,97E-05	96,6	4.903.553
00:00:22.1967000	3	100			
00:00:22.1967187	5	89	1,87E-05	84,9	4.540.107
00:00:47.6828730	5	100			
00:00:47.6828910	3	92	1,8E-05	84,9	4.716.667
00:00:04.6512940	2	97			
00:00:04.6513130	6	88	1,9E-05	94,5	4.973.684
00:00:18.6962613	2	97			
00:00:18.6962803	6	89	1,9E-05	94,5	4.973.684

Berechnungsblätter zur Rückrechnung der Ausbreitungsgeschwindigkeit

Tabelle 0.2: Berechnungsblatt Ausbreitungsgeschwindigkeit (Variante 1)

		Koordinaten der Sensoren					
		1	2	3	4	5	6
x_i [mm]		1,5	21,9	-22,2	22,9	0,0	-21,9
y_i [mm]		91,9	91,4	90,9	11,0	10,0	12,0
z_i [mm]		25,6	-13,2	-12,8	11,5	-25,6	13,3

Koordinaten Position 3	
x_j [mm]	0,0
y_j [mm]	50,0
z_j [mm]	25,6

	Hitankunftszeit t_i [s]	Anfangszeit t_0 [s]	rel. Zeitdiff. $\Delta t_{i,rel}$ [s]	Referenzsensor	... Ankunftszeit des ersten Hits
Sensor 1	16,08427750	8,921E-06	8,921E-06	1	
Sensor 2	16,0842805		1,192E-05		
Sensor 3	16,0842805		1,192E-05		
Sensor 4	16,0842785		9,921E-06		
Sensor 5	16,0842810		1,242E-05		
Sensor 6	16,08427770		9,121E-06		

	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Sensor 5	Sensor 6
$x_i \pm x_j$ [mm]	1,5	21,9	22,2	-22,9	0,0	21,9
$y_i \pm y_j$ [mm]	41,9	41,4	40,9	39,0	40,0	38,0
$z_i \pm z_j$ [mm]	0,0	38,8	38,4	-14,1	51,2	-12,3
s_i [mm]	41,9	60,8	60,3	47,4	65,0	45,6
v_i [mm/s]	4 700 000	5 103 651	5 061 332	4 775 832	5 231 033	4 994 302

Probenradius [mm]	25,6
v [mm/s]	4 700 000

Eingabe erforderlich

Tabelle 0.3: Berechnungsblatt Ausbreitungsgeschwindigkeit (Variante 2)

		Koordinaten der Sensoren					
		1	2	3	4	5	6
x_i [mm]		1,5	21,9	-22,2	22,9	0,0	-21,9
y_i [mm]		91,9	91,4	90,9	11,0	10,0	12,0
z_i [mm]		25,6	-13,2	-12,8	11,5	-25,6	13,3

Koordinaten Position 3	
x_j [mm]	0,0
y_j [mm]	50,0
z_j [mm]	25,6

	Hitankunftszeit t_i [s]	Anfangszeit t_0 [s]	rel. Zeitdiff. $\Delta t_{i,rel}$ [s]	Referenzsensor	... Ankunftszeit des ersten Hits
Sensor 1	16,08427750	9,545E-06	9,545E-06	1	
Sensor 2	16,0842805		1,254E-05		
Sensor 3	16,0842805		1,254E-05		
Sensor 4	16,0842785		1,054E-05		
Sensor 5	16,0842810		1,304E-05		
Sensor 6	16,08427770		9,745E-06		

	Sensor 1	Sensor 2	Sensor 3	Sensor 4	Sensor 5	Sensor 6
$x_i \pm x_j$ [mm]	1,5	21,9	22,2	-22,9	0,0	21,9
$y_i \pm y_j$ [mm]	41,9	41,4	40,9	39,0	40,0	38,0
$z_i \pm z_j$ [mm]	0,0	38,8	38,4	-14,1	51,2	-12,3
s_i [mm]	41,9	60,8	60,3	47,4	65,0	45,6
v_i [mm/s]	4 392 621	4 849 694	4 809 480	4 493 113	4 980 714	4 674 379

Probenradius [mm]	25,6
v [mm/s]	4 700 000

Eingabe erforderlich

Zielwertsuche	0
---------------	---

Ermittlung des elektronischen Rauschens mit aufgebrachtter Vorlast

Das Rauschverhalten wurde über einen Zeitraum von 00:01:16 mit der Nachweisschwelle von 30 dB beobachtet.

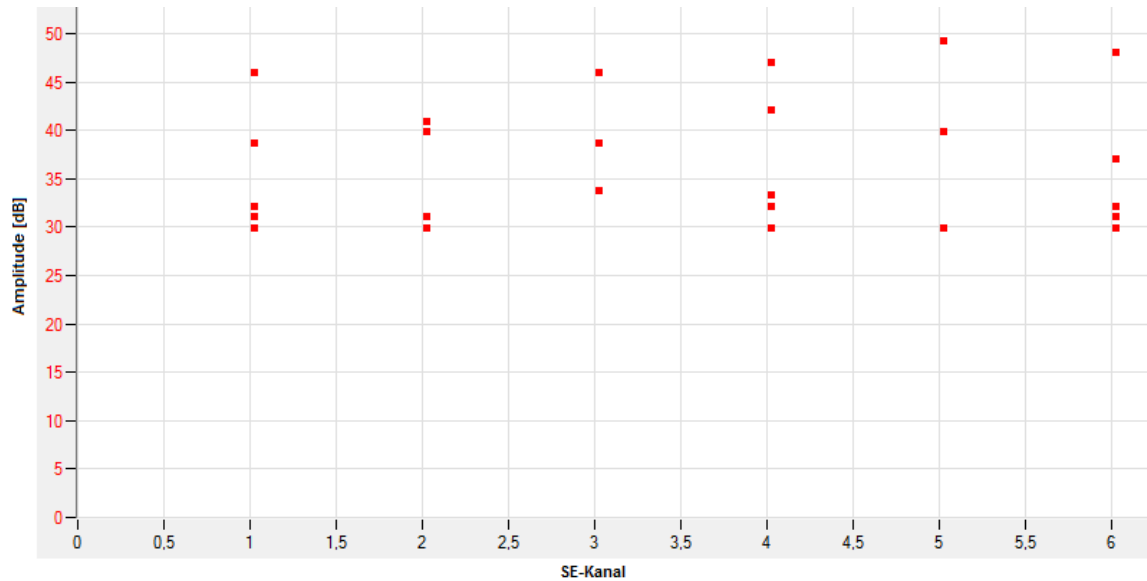


Abbildung 0.2: Rauschen unter Vorlast

Auswertung der Spannungs-Dehnungslinie

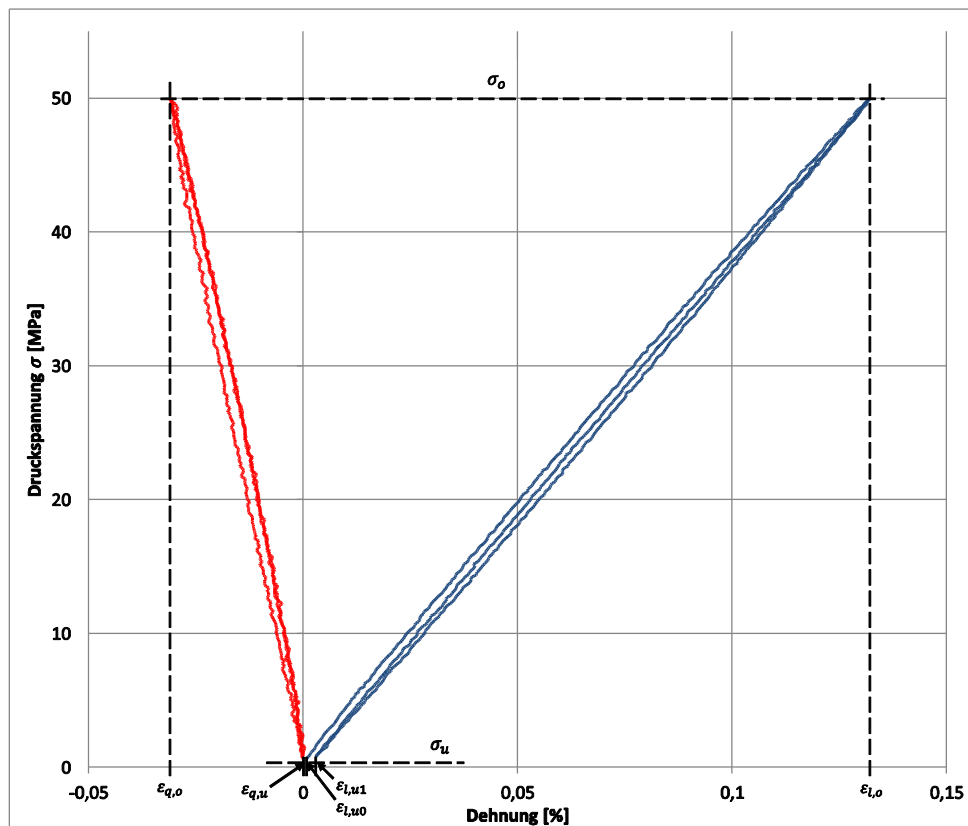


Abbildung 0.3: Spannungs-Dehnungsdiagramm (1. Lastzyklus)

Die felsmechanischen Parameter berechnen sich laut ÖNORM B 3124-9 [28] mit:

$$V = \frac{\Delta\sigma_{\text{Erstbelastung}}}{\Delta\varepsilon_{l,\text{Erstbelastung}}} = \frac{\sigma_o - \sigma_u}{\varepsilon_{l,o} - \varepsilon_{l,u0}} = \frac{49,9 - 0,8}{(0,13 - 0,001) \cdot 10^{-2}} \cdot 10^{-3} = 37,7 \text{ GPa}$$

$$E = \frac{\Delta\sigma_{\text{Entlastung}}}{\Delta\varepsilon_{l,\text{Entlastung}}} = \frac{\sigma_o - \sigma_u}{\varepsilon_{l,o} - \varepsilon_{l,u1}} = \frac{49,9 - 0,8}{(0,13 - 0,003) \cdot 10^{-2}} \cdot 10^{-3} = 38,2 \text{ GPa}$$

$$\vartheta = -\frac{\Delta\varepsilon_{q,\text{Entlastung}}}{\Delta\varepsilon_{l,\text{Entlastung}}} = -\frac{\varepsilon_{q,o} - \varepsilon_{q,u}}{\varepsilon_{l,o} - \varepsilon_{l,u1}} = -\frac{[-0,03 - (-0,0)]}{(0,13 - 0,003)} = 0,22$$

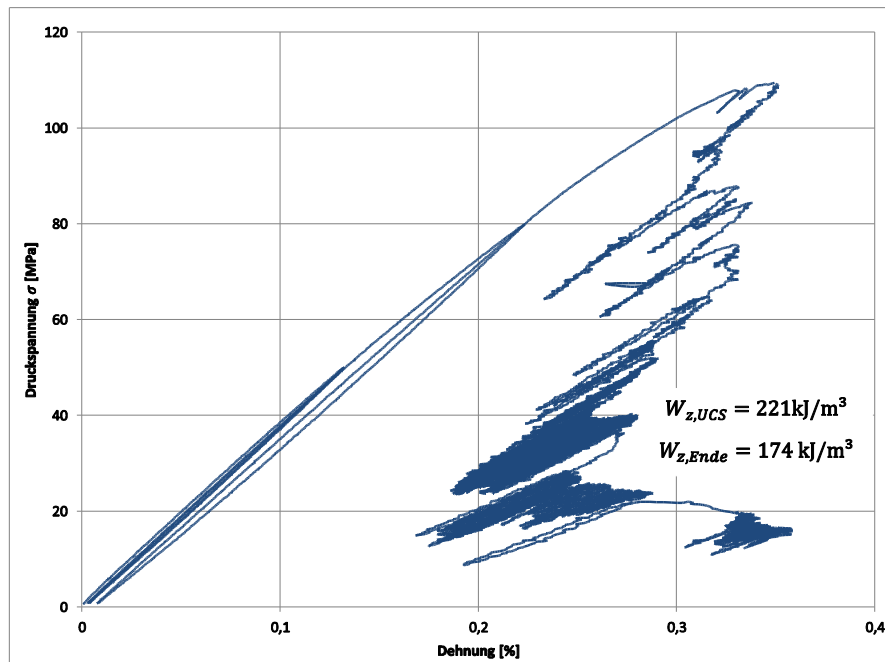


Abbildung 0.4: Zerstörungsarbeit

Auswertung der Volumendehnung (Bruchphasen)

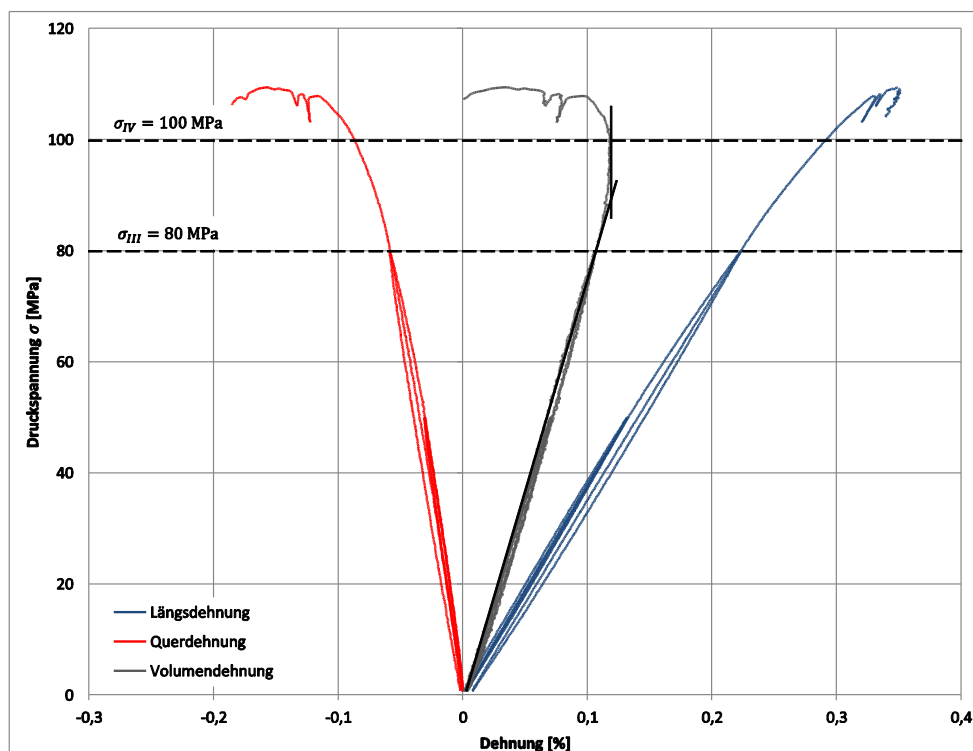


Abbildung 0.5: Spannungs-Dehnungsdiagramm (inkl. Volumendehnung)

B. Gabbro

Ermittlung der Ausbreitungsgeschwindigkeit

Die direkten Wege $ds = s_{2-6}; s_{1-6}; s_{3-6}$ in Tabelle 0.4 sind nach Formel (3.2) zu berechnen. Die Koordinaten der SE-Sensoren werden der Tabelle 3.14 entnommen.

$$ds_{2-6} = \sqrt{(y_2 - y_6)^2 + (x_2 - x_6)^2 + (z_2 - z_6)^2}$$

$$= \sqrt{(89,5 - 12)^2 + (21,9 - (-21,1))^2 + (-12,7 - 13,9)^2} = 90,9 \text{ mm}$$

$$ds_{1-6} = \sqrt{(y_1 - y_6)^2 + (x_1 - x_6)^2 + (z_1 - z_6)^2} =$$

$$= \sqrt{(89,5 - 12)^2 + (0,5 - (-21,1))^2 + (25,3 - 13,9)^2} = 81,3 \text{ mm}$$

$$ds_{3-6} = \sqrt{(y_3 - y_6)^2 + (x_3 - x_6)^2 + (z_3 - z_6)^2}$$

$$= \sqrt{(90,5 - 12)^2 + (-21,9 - (-21,1))^2 + (-12,7 - 13,9)^2} = 82,9 \text{ mm}$$

Die Zeitdifferenz dt in Tabelle 0.4 ist für jede generierte SE-Welle nach Formel (3.1) zu berechnen. Es werden die aus der AEWin Software ausgelesenen Hitankunftszeiten t_i der Kanäle herangezogen.

$$dt_{2-6} = t_6 - t_2$$

$$dt_{1-6} = t_6 - t_1$$

$$dt_{3-6} = t_6 - t_3$$

Damit lässt sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit v für jede generierte SE-Welle nach Formel (3.3) berechnen.

Tabelle 0.4: Ausbreitungsgeschwindigkeiten der SE-Welle in drei Ausbreitungsrichtungen ausgelesene SE-Daten (Aewin)

Hitankunftszeit	Kanal	Ampl. [dB]	dt [s]	ds [mm]	v [mm/s]
00:00:15.9048003	2	97			
00:00:15.9048143	6	90	1,4E-05	90,9	6 492 857
00:01:02.8573905	2	100			
00:01:02.8574043	6	93	1,38E-05	90,9	6 586 957
00:00:18.9517875	1	97			
00:00:18.9518007	6	88	1,32E-05	81	6 136 364
00:00:22.4683617	1	96			
00:00:22.4683750	6	89	1,33E-05	81	6 090 226
00:00:22.2378510	3	100			
00:00:22.2378643	6	89	1,33E-05	82,9	6 233 083
00:00:26.7790263	3	100			
00:00:26.7790395	6	92	1,32E-05	82,9	6 280 303

Ermittlung des elektronischen Rauschens mit aufgebrachtter Vorlast

Das Rauschverhalten wurde über einen Zeitraum von 54 s mit einem Niveau der Nachweisschwelle von 30 dB beobachtet.

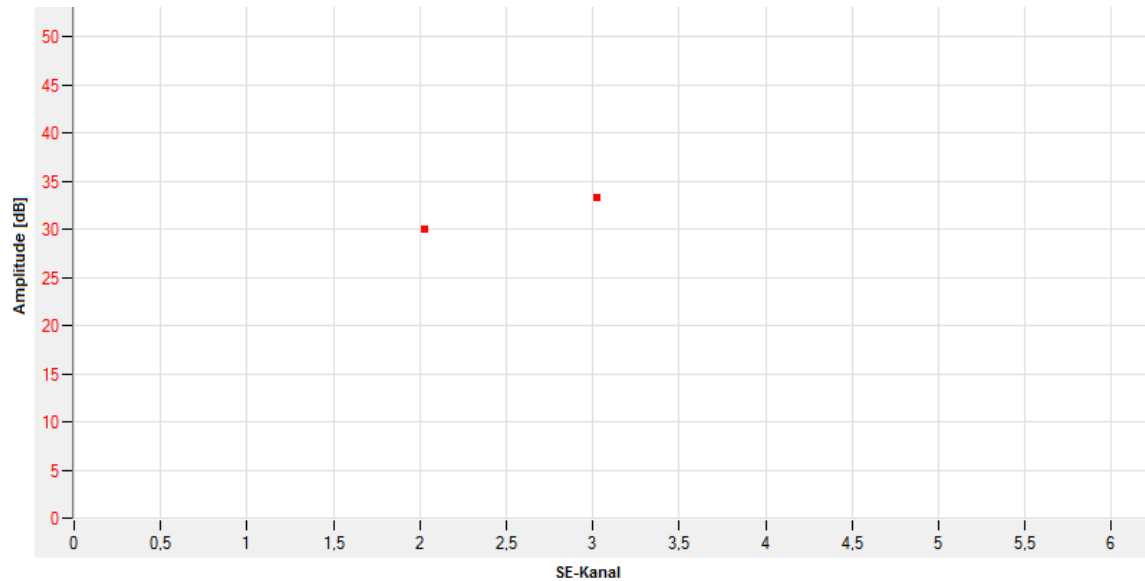


Abbildung 0.6: Rauschen unter Vorlast

Auswertung der Spannungs-Dehnungslinie

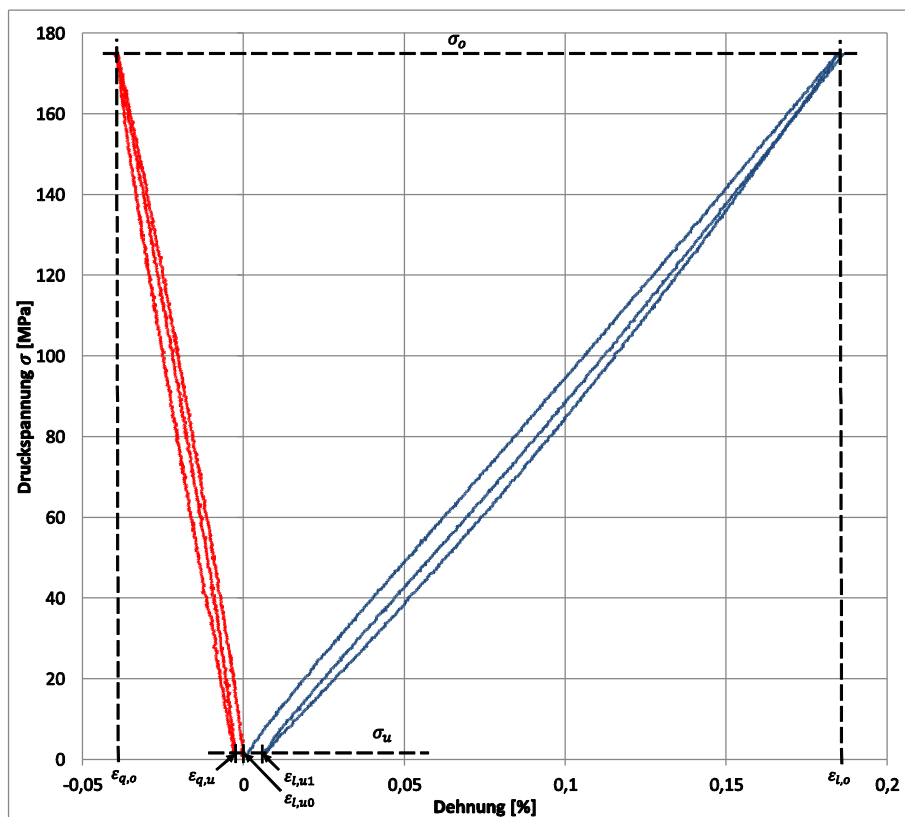


Abbildung 0.7: Spannungs-Dehnungsdiagramm (1. Lastzyklus)

Die felsmechanischen Parameter berechnen sich laut ÖNORM B 3124-9 [28] mit:

$$V = \frac{\Delta\sigma_{\text{Erstbelastung}}}{\Delta\varepsilon_{l,\text{Erstbelastung}}} = \frac{\sigma_o - \sigma_u}{\varepsilon_{l,o} - \varepsilon_{l,u0}} = \frac{175,0 - 0,6}{(0,19 - 0,0) \cdot 10^{-2}} \cdot 10^{-3} = 94,3 \text{ GPa}$$

$$E = \frac{\Delta\sigma_{\text{Entlastung}}}{\Delta\varepsilon_{l,\text{Entlastung}}} = \frac{\sigma_o - \sigma_u}{\varepsilon_{l,o} - \varepsilon_{l,u1}} = \frac{175,0 - 0,6}{(0,18 - 0,006) \cdot 10^{-2}} \cdot 10^{-3} = 97,3 \text{ GPa}$$

$$\vartheta = -\frac{\Delta\varepsilon_{q,\text{Entlastung}}}{\Delta\varepsilon_{l,\text{Entlastung}}} = -\frac{\varepsilon_{q,o} - \varepsilon_{q,u}}{\varepsilon_{l,o} - \varepsilon_{l,u1}} = -\frac{[-0,04 - (-0,003)]}{(0,18 - 0,006)} = 0,20$$

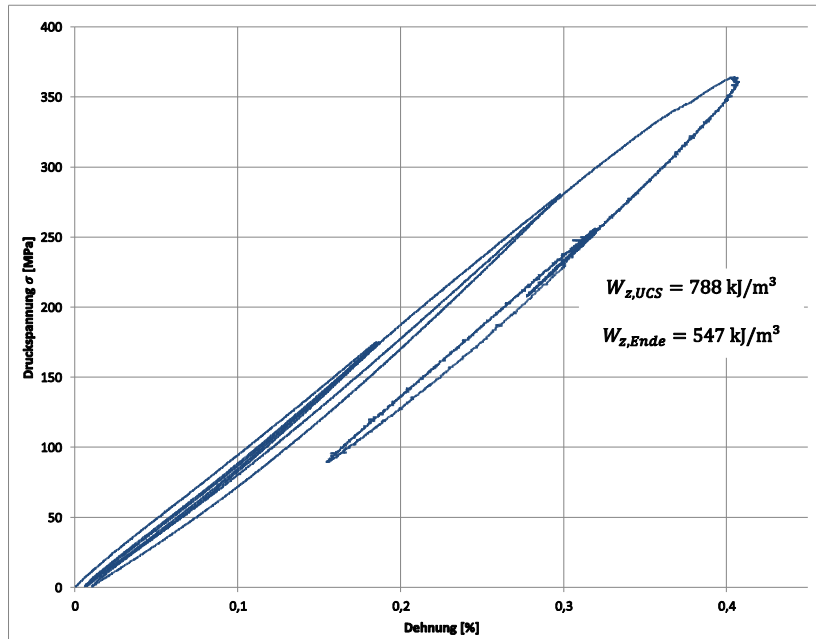


Abbildung 0.8: Zerstörungsarbeit

Auswertung der Volumendehnung (Bruchphasen)

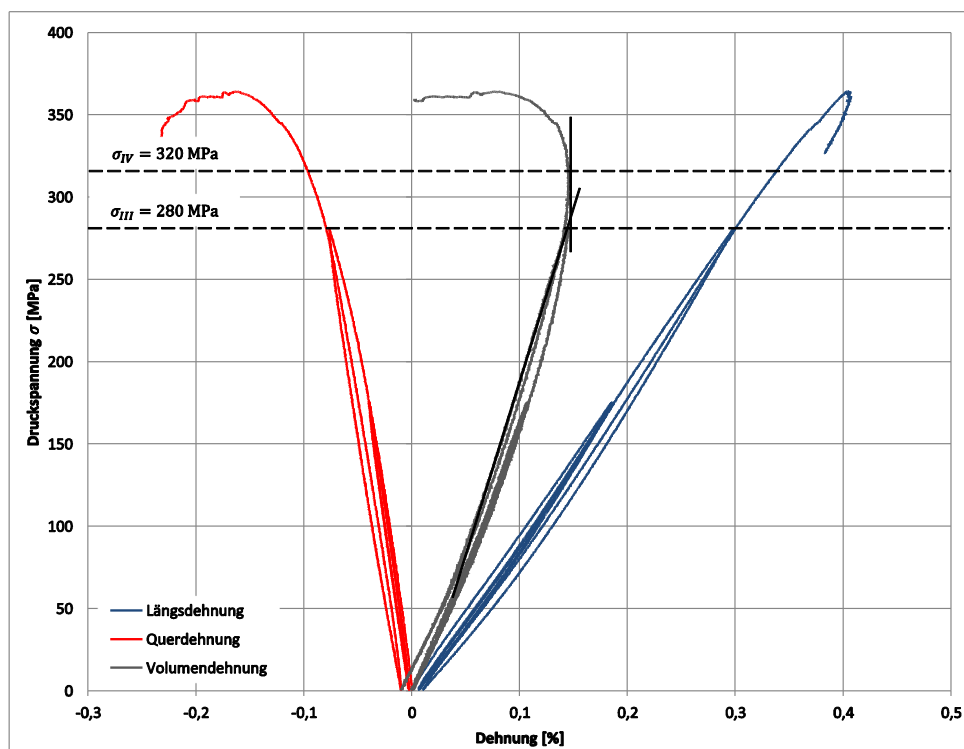


Abbildung 0.9: Spannungs-Dehnungsdiagramm (inkl. Volumendehnung)

Vorversuche Februar 2015

Tabelle 0.5: Zusammensetzung des Messsystems

Sensorpos.	SE-Sensor	Vorverstärker	SE-Kanal	Anordnung
2	FY85	599	2	Obere Sensorreihe
3	FY84	600	3	
4	FY83	601	4	
1	FX80	598	1	Untere Sensorreihe
5	FY67	602	5	
6	FY60	603	6	

Tabelle 0.6: Koordinaten der SE-Sensoren

Sensorposition	X	Y (Höhe)	Z	Anordnung
2	21,0	90,0	13,0	Obere Sensorreihe
3	-22,5	90,5	-9,5	
4	0,0	89,5	25,3	
1	-21,0	13,0	14,5	Untere Sensorreihe
5	21,5	12,0	14,0	
6	1,0	12,0	-25,0	

Tabelle 0.7: Überprüfung der Kopplung

SE-Kanal	Signalamplitude [dB]		
1	100	99	99
2	97	98	97
3	99	100	99
4	99	94	99
5	96	96	96
6	100	99	99

C. Magnesit

Versetzte Platzierung der Schallemissionssensoren

Tabelle 0.8: Überprüfung der Kopplung

SE-Kanal	Signalamplitude [dB]		
1	98	99	100
2	97	97	97
3	97	99	99
4	96	97	97
5	98	99	99
6	98	99	100

Tabelle 0.9: Koordinaten der Schallemissionssensoren

Sensorposition	X	Y (Höhe)	Z	Anordnung
1	1,0	90,9	25,6	Obere Sensorreihe
2	22,2	90,4	-12,8	
3	-21,7	90,9	-13,7	
4	22,7	10,0	11,9	Untere Sensorreihe
5	0,5	12,0	-25,6	
6	-21,9	12,5	13,2	

Tabelle 0.10: Ausbreitungsgeschwindigkeiten der SE-Welle in drei Ausbreitungsrichtungen

ausgelesene SE-Daten (Aewin)

Hitankunftszeit	Kanal	Ampl. [dB]	dt [s]	ds [mm]	v [mm/s]
00:00:12.7167960	2	97			
00:00:12.7168113	6	82	93,2	1,53E-05	6 091 503
00:00:42.5202027	2	96			
00:00:42.5202185	6	82	93,2	1,58E-05	5 898 734
00:00:50.2461770	2	96			
00:00:50.2461920	6	82	93,2	1,5E-05	6 213 333
00:00:07.8717790	1	98			
00:00:07.8717925	5	89	94,1	1,35E-05	6 970 370
00:00:22.0477110	1	99			
00:00:22.0477253	5	85	94,1	1,43E-05	6 580 420
00:00:37.6523515	1	97			
00:00:37.6523655	5	85	94,1	1,4E-05	6 721 429

00:00:16.1874945	3	99			
00:00:16.1875093	4	86	95,8	1,48E-05	6 472 973
00:00:23.2515897	3	99			
00:00:23.2516043	4	87	95,8	1,46E-05	6 561 644
00:01:02.6945947	3	100			
00:01:02.6946085	4	85	95,8	1,38E-05	6 942 029

Die direkten Wege $ds = s_{2-6}; s_{1-5}; s_{3-4}$ in Tabelle 0.10 wurden nach Formel (3.2) berechnet.

$$ds_{2-6} = \sqrt{(y_2 - y_6)^2 + (x_2 - x_6)^2 + (z_2 - z_6)^2}$$

$$= \sqrt{(90,4 - 12,5)^2 + (22,2 - (-21,9))^2 + (-12,8 - 13,2)^2} = 93,2 \text{ mm}$$

$$ds_{1-5} = \sqrt{(y_1 - y_5)^2 + (x_1 - x_5)^2 + (z_1 - z_5)^2} =$$

$$= \sqrt{(90,9 - 12)^2 + (1,5 - 0,5)^2 + (25,6 - (-25,6))^2} = 94,1 \text{ mm}$$

$$ds_{3-4} = \sqrt{(y_3 - y_4)^2 + (x_3 - x_4)^2 + (z_3 - z_4)^2}$$

$$= \sqrt{(90,9 - 10)^2 + (-21,7 - 22,7)^2 + (-13,7 - 11,9)^2} = 95,8 \text{ mm}$$

Tabelle 0.11: untersuchte Varianten der Parameter PDT/HDT/HLT

„AE Timing Parameter“	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4	Variante 5 WEG
Peak Definition Time (PDT)	200	50 μs	50 μs	50 μs	100 μs
Hit Definition Time (HDT)	500	100 μs	100 μs	200 μs	500 μs
Hit Lockout Time (HLT)	100	500 μs	100 μs	100 μs	100 μs

Angepasste Platzierung der Schallemissionssensoren

Tabelle 0.12: Überprüfung der Kopplung

SE-Kanal	Signalamplitude [dB]		
1	96	97	97
2	97	98	97
3	97	100	100
4	95	96	98
5	97	98	98
6	99	99	100

Tabelle 0.13: Koordinaten der Schallemissionssensoren

Sensorposition	X	Y (Höhe)	Z	Anordnung
2	-22,2	90,4	-12,8	Obere Sensorreihe
3	21,7	90,4	-13,7	
4	13,7	92,4	21,7	
1	-13,7	9,5	-21,7	Untere Sensorreihe
5	13,7	10,5	21,7	
6	21,9	12,5	-13,2	

Tabelle 0.14: Ausbreitungsgeschwindigkeiten der SE-Welle in drei Ausbreitungsrichtungen

ausgelesene SE-Daten (Aewin)						
Hitankunftszeit	Kanal	Ampl. [dB]	dt [s]	ds [mm]	v [mm/s]	
00:00:13.6004957	2	99				
00:00:13.6005113	6	86	93,2	1,56E-05	5 974 359	
00:00:42.6446517	2	98				
00:00:42.6446670	6	84	93,2	1,53E-05	6 091 503	
00:01:01.2062440	2	97				
00:01:01.2062585	6	84	93,2	1,45E-05	6 427 586	
00:00:17.7153460	4	98				
00:00:17.7153607	1	81	97,5	1,47E-05	6 632 653	
00:00:36.5622187	4	98				
00:00:36.5622330	1	84	97,5	1,43E-05	6 818 182	
00:01:02.0403883	4	98				
00:01:02.0404015	1	86	97,5	1,32E-05	7 386 364	

Die direkten Wege $ds = s_{2-6}; s_{1-4}$ in Tabelle 0.14 wurden nach Formel (3.2) berechnet.

$$ds_{2-6} = \sqrt{(y_2 - y_6)^2 + (x_2 - x_6)^2 + (z_2 - z_6)^2}$$

$$= \sqrt{(90,4 - 12,5)^2 + (-22,2 - 21,9)^2 + (-12,8 - 13,2)^2} = 93,2 \text{ mm}$$

$$ds_{1-4} = \sqrt{(y_1 - y_4)^2 + (x_1 - x_4)^2 + (z_1 - z_4)^2} =$$

$$= \sqrt{(92,4 - 9,5)^2 + (13,7 - (-13,7))^2 + (21,7 - (-21,7))^2} = 97,5 \text{ mm}$$

Berechnungsblätter zur Rückrechnung der Ausbreitungsgeschwindigkeit

Tabelle 0.15: Berechnungsblatt Ausbreitungsgeschwindigkeit normal zur Schichtung

	Koordinaten der Sensoren								
	1	2	3	4	5	6			
x_i [mm]	-13,7	-22,2	21,7	13,7	13,7	21,9			
y_i [mm]	9,5	90,4	90,4	92,4	10,5	12,5			
z_i [mm]	-21,7	-12,8	-13,7	21,7	21,7	-13,2			
Koordinaten Positionen		Probenradius [mm]							
x_j [mm]	-13,7	25,3							
y_j [mm]	10-90								
z_j [mm]	-21,7								
y_j [mm]	10	20	30	40	50	60	70	80	90
s_3 [mm]	95,0	86,7	78,8	71,4	64,7	59,0	54,6	51,7	50,6
s_6 [mm]	50,7	51,2	53,5	57,6	63,0	69,4	76,6	84,4	92,6
$s_3 - s_6$ [mm]	44,3	35,5	25,3	13,8	1,8	-10,4	-22,0	-32,7	-42,0
t_3 [s]	0,2335163	0,3622960	0,3272545	0,5162117	0,9905137	0,4754963	0,2801350	0,5739930	0,5112045
t_6 [s]	0,2335077	0,3622890	0,3272495	0,5162100	0,9905143	0,4754990	0,2801397	0,5739995	0,5112135
$t_3 - t_6$ [s]	8,6E-06	7E-06	5E-06	1,7E-06	-6,00E-07	-2,7E-06	-4,7E-06	-6,5E-06	-9E-06
v_{normal} [mm/s]	5 155 320	5 077 865	5 050 686	8 134 064	-2 947 738	3 841 473	4 688 576	5 031 120	4 661 600

Tabelle 0.16: Berechnungsblatt Ausbreitungsgeschwindigkeit parallel zur Schichtung

	Koordinaten der Sensoren								
	1	2	3	4	5	6			
x_i [mm]	-13,7	-22,2	21,7	13,7	13,7	21,9			
y_i [mm]	9,5	90,4	90,4	92,4	10,5	12,5			
z_i [mm]	-21,7	-12,8	-13,7	21,7	21,7	-13,2			
Koordinaten Positionen		Probenradius [mm]							
x_j [mm]	-13,7	25,3							
y_j [mm]	10-90								
z_j [mm]	-21,7								
y_j [mm]	10	20	30	40	50	60	70	80	90
s_4 [mm]	96,7	88,3	80,3	72,8	66,0	60,1	55,3	52,1	50,7
s_5 [mm]	50,7	51,0	53,2	57,0	62,3	68,6	75,7	83,4	91,6
$s_4 - s_5$ [mm]	46,0	37,3	27,2	15,8	3,7	-8,5	-20,4	-31,3	-40,9
t_4 [s]	0,9840075	0,5997690	0,0259195	0,1357155	0,5652455	0,9830470	0,5641773	0,6982530	0,2324975
t_5 [s]	0,9839995	0,5997633	0,0259153	0,1357130	0,5652450	0,9830493	0,5641813	0,6982590	0,2325060
$t_4 - t_5$ [s]	8E-06	5,7E-06	4,2E-06	2,50E-06	5E-07	-2,3E-06	-4E-06	-6E-06	-8,5E-06
$v_{parallel}$ [mm/s]	5 745 115	6 550 689	6 470 698	6 326 548	7 484 135	3 696 436	5 090 167	5 217 620	4 811 371