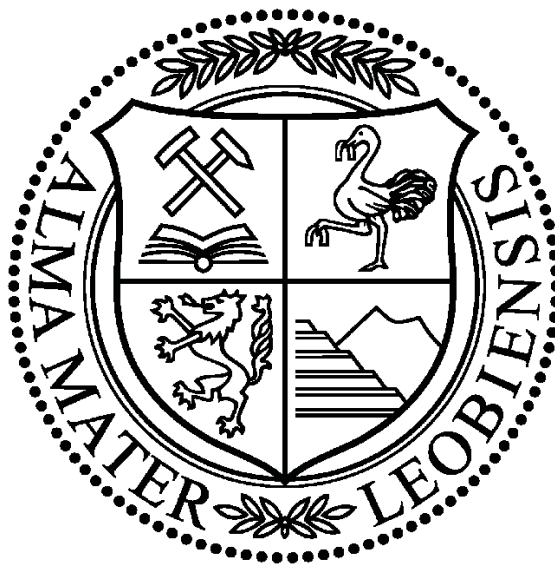


Masterarbeit

**Analyse und Reduktion von
sprenginduzierten Erschütterungen in
den Steinbrüchen der Jura-Cement-
Fabriken Möriken-Wildegg**



Vorgelegt von:
Andreas Kofler
0835057

Betreuer/Gutachter:
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Peter Moser
Univ.-Prof. Dipl.-Geophys. Dr.rer.nat. Florian Bleibinhaus

Leoben, 02.03.2016

Ehrenwörtliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche erkenntlich gemacht habe.

02.03.16

Datum

Andreas Kopf

Unterschrift

Danksagung

Großer Dank gebührt den Vorgesetzten und Kollegen der Jura-Cement-Fabriken, die durch ihre Unterstützung einen wesentlichen Beitrag zur Erstellung dieser Arbeit geleistet haben. Allen voran möchte ich mich bei Herrn Marcel Bieri danken, der immer ein offenes Ohr für Vorschläge hatte und jederzeit die Umsetzung dieser in Gang leitete. Besonderer Dank gilt ebenfalls Herrn Stefan Bryner, der mir auf humorvolle Art und Weise in allen Bereichen mit seiner Kompetenz zur Seite stand. Für die fachlichen Diskussionen im Bereich der Sprengtechnik und der Umsetzung der Sprengversuche möchte ich mich bei Herrn Rene Deubelbeiss und Herrn Peter Geissmann bedanken.

Für die Betreuung dieser Arbeit möchte ich mich herzlich bei Herrn Prof. Moser bedanken, der durch sein umfangreiches Wissen allzeit gute Vorschläge einbrachte und dennoch Platz für eigene Ideen ließ. Überdies gilt mein Dank ebenso Herrn Prof. Bleibinhaus, der mit beeindruckender, fachlicher Kompetenz Beistand leistete und die Beantwortung verschiedener geophysikalischer Fragestellungen förderte. Überdies gilt mein Dank an Frau Ass. Prof. Gegenhuber, die im Bereich Petrophysik eine große Unterstützung war.

Ferner möchte ich mich bei allen bedanken, die mir die Zeit in der wunderschönen Schweiz so angenehm gestalteten, mich bestens in ein neues Umfeld aufgenommen und eingebunden haben sowie jederzeit ein offenes Ohr hatten.

Keinesfalls unerwähnt möchte ich alle weiteren Arbeitskollegen, Freunde, Bekannte und Familienmitglieder lassen, die mich im Zuge dieser Arbeit und im gesamten Studium unterstützt haben.

Kurzfassung

Jurassische Kalk- und Mergelgesteine werden in den Steinbrüchen der Jura-Cement-Fabriken mittels Sprengungen gewonnen. Bei der Umsetzung des Sprengstoffes werden seismische Wellen induziert, die von den Anrainern als Erschütterungen wahrgenommen werden. Eine Minimierung der unvermeidbaren Emissionen wird angestrebt, sodass eine möglichst für Mensch und Umwelt schonende Durchführung des Sprengprozesses gewährleistet ist. Aus Messungen an verschiedenen Standorten geht hervor, dass es Bereiche mit erhöhten Schwinggeschwindigkeiten gibt. Als Ursache für das unterschiedliche Verhalten der Messstellen konnten geänderte Untergrundverhältnisse festgestellt werden. Die größten Amplituden entstehen dabei beim Übergang der seismischen Welle vom Festgestein zu den Lockersedimenten. Um die Zusammenhänge zwischen den Eingangsparametern und den Resultaten zu erforschen wurden verschiedene sprengtechnische Versuche durchgeführt. Auf Basis dieser Kenntnisse sollen Optimierungspotentiale aufgezeigt werden. Hinsichtlich der Auswertung von Seismogrammen nach den geltenden Normen wird die starke Vereinfachung einer komplexen Schwingung auf zwei Werte kritisiert.

Abstract

In the quarries of Jura-Cement-Fabriken Triassic limestone and marl is mined by blasting operations. The detonation of the explosives induces seismic waves, which are perceived as vibrations by the residents. The aim of the research study is to reduce those emissions by optimizing the blasting operations, in order to keep the negative effects on residents and environment as low as possible. Due to measurements of ground vibrations at several locations nearby the detonation, some areas show higher amplitudes in the maximum peak velocity. The crucial factor is the influence of the underground setting on the vibration characteristics. Thus, the higher amplitudes are related to the transmission of the seismic wave from bedrock to unconsolidated rock. Thus, several blasting tests were performed to analyse the relationship between the input parameters of the blasting engineering and the resulting emissions. Based on the analysis of those emissions, the optimization potential was evaluated. According to the analysis of the seismograms, based on the Swiss standard, the simplification of the complex oscillation of the blasting operations is seen controversial in the context of the maximum peak velocity and frequency.

Inhalt

| | |
|---------------------------------------|----|
| Ehrenwörtliche Erklärung | I |
| Danksagung | I |
| Kurzfassung | II |
| Abstract..... | II |
| 1. Einleitung | 1 |
| 1.1 Aufgabenstellung | 1 |
| 1.2 Geographische Lage | 2 |
| 2. Geologie..... | 4 |
| 2.1 Stratigraphische Übersicht | 4 |
| 2.2 Tektonische Großeinheiten | 10 |
| 2.3 Regionale Geologie..... | 11 |
| 2.4 Petrographische Beschreibung..... | 13 |
| 2.4.1 Obere Effinger Schichten | 14 |
| 2.4.2 Gerstenhübelkalk | 14 |
| 2.4.3 Untere Effinger Schichten | 15 |
| 2.4.4 Birnenstorfer Schichten | 16 |
| 2.4.5 Spatkalk | 16 |
| 2.4.6 Zigzag-Zone | 17 |
| 2.4.7 Hauptrogenstein..... | 17 |
| 2.5 Strukturgeologie | 19 |
| 2.5.1 Obere Effinger Schichten | 19 |
| 2.5.2 Gerstenhübelkalk | 20 |
| 2.5.3 Untere Effinger Schichten | 22 |
| 2.5.4 Birnenstorfer Schichten | 23 |
| 2.5.5 Spatkalk | 24 |
| 2.5.6 Zigzag-Zone | 25 |
| 2.5.7 Hauptrogenstein..... | 26 |

| | | |
|-------|--|----|
| 2.6 | Hydrogeologie | 29 |
| 3. | Petrophysikalische Formationscharakterisierung..... | 32 |
| 3.1 | Probenbeschreibung | 32 |
| 3.1.1 | Obere Effinger Schichten | 35 |
| 3.1.2 | Gerstenhübelkalk | 35 |
| 3.1.3 | Untere Effinger Schichten | 36 |
| 3.1.4 | Birmenstorfer Schichten | 36 |
| 3.1.5 | Spatkalk | 37 |
| 3.1.6 | Zigzag Schichten..... | 37 |
| 3.1.7 | Hauptrogenstein..... | 38 |
| 3.2 | Kennwertbestimmung..... | 39 |
| 3.3 | Evaluierung der Sprengbarkeit der Lithologien | 47 |
| 4. | Wellenausbreitung..... | 51 |
| 4.1 | Wellenausbreitung im elastischen Halbraum | 52 |
| 4.2 | Wellenausbreitung in nicht idealen Verhältnissen..... | 54 |
| 4.3 | Wellenreflexion und -brechung..... | 54 |
| 4.4 | Wellendämpfung | 56 |
| 5. | Bohr- und Sprengprozesse..... | 59 |
| 5.1 | Planung der Sprenganlage..... | 59 |
| 5.2 | Implementierung des Bohrplanes | 61 |
| 5.3 | Aktualisierung und Umsetzung des Sprengprozesses | 61 |
| 5.4 | Überwachung des Sprengprozesses | 62 |
| 5.5 | Prozessdokumentation mittels Datenbank..... | 63 |
| 6. | Sprengerschütterungen | 66 |
| 6.1 | Messtechnische Erfassung..... | 66 |
| 6.2 | Analyse der Sprengerschütterungen | 72 |
| 6.2.1 | Analyse der Maximalamplitude und der dominanten Frequenz nach SN640312a | 72 |
| 6.2.2 | Analyse der Seismogramme | 86 |
| 6.3 | Sprengtechnische Einflussparameter auf die Erschütterungen..... | 89 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 6.3.1 | Einfluss der Bruchwandorientierung | 89 |
| 6.3.2 | Einfluss der spezifischen Sprengstoffmenge | 91 |
| 6.3.3 | Einfluss der Brisanz des Sprengstoffes | 95 |
| 6.4 | Erschütterungsprognosen | 98 |
| 6.5 | Erschütterungsreduktion | 106 |
| 7. | Schlussfolgerungen und Empfehlungen | 107 |
| | Literaturverzeichnis | 109 |
| | Abbildungsverzeichnis | 113 |
| | Formelverzeichnis | 116 |
| | Tabellenverzeichnis | 117 |
| | Anhang | 118 |

1. Einleitung

Das Werk der Jura-Cement-Fabriken AG in Wildegg liefert einen wichtigen Beitrag zur Zementproduktion in der Schweiz. Rund 18% der schweizerischen Gesamtproduktion werden dort hergestellt.

Der Abbau der Rohmaterialien erfolgt im nahegelegenen Steinbruch. Mittels Sprengungen werden dabei Kalk- und Mergelgesteine aus dem Gebirgsverband gelöst. In der Vergangenheit kam es zum wiederholten Male zu Beschwerden der in unmittelbaren Umgebung ansässigen Bevölkerung. Dabei wurden die Emissionen hinsichtlich Lärm, Staub und Erschütterungen angesprochen.

Innerhalb der vergangenen Jahre wurde versucht jegliche Belästigung, die mit dem Abbau in Zusammenhang steht, auf ein absolutes Minimum zu reduzieren. Während der letzten Jahrzehnte ist jedoch die Sensibilität von Betroffenen bei Sprengimmissionen durch ein erhöhtes Umweltbewusstsein gestiegen. Da in Zukunft eine Erweiterung des Abbaus geplant ist und der Abbau in geringer Distanz zu den Wohngebäuden der Anrainer erfolgen soll, wird eine Reduktion der Immissionen angestrebt, wobei diese Arbeit in erster Linie von den sprengbezogenen Erschütterungen handelt.

1.1 Aufgabenstellung

Bereits im Jahre 2014 wurde eine Studie in Zusammenarbeit mit der Montanuniversität Leoben zum Thema „Untersuchung zu betrieblichen Emissionen“ durchgeführt. Als Ergebnis wurde auch die Prognose der Sprengerschütterungen angestrebt. Es stellte sich im Laufe der Untersuchungen dabei heraus, dass eine Detailprognose der Sprengerschütterungen nicht möglich ist, da die Sprengparameter und insbesondere die Erfassung der Bohr- und Sprengaufzeichnungen einen zu geringen Detaillierungsgrad aufweisen. Aus der wissenschaftlichen Arbeit im Jahre 2014 konnten bereits einige Feststellungen gewonnen werden (BRODTRAGER, 2014):

- Westlich und Südwestlich des Steinbruches treten deutlich geringere Erschütterungen auf als dies in den östlichen Gebieten der Fall ist.
- Erschütterungsarme Bereiche liegen tendenziell topographisch höher als erschütterungsreiche Zonen
- Die Zündrichtung der Sprenganlage in Richtung Osten bzw. Westen führt zu geringeren Erschütterungen als in Richtung Süden

Im Zuge dieses Projektes soll eine genaue Dokumentation aller relevanten Prozesse erfolgen, um die oben angeführten Befunde weitergehend zu untersuchen und die Gründe dafür aufzuzeigen. Dabei steht die Beantwortung zweier zentraler Fragestellungen im Mittelpunkt. So steht erstens die Untersuchung des Ausbreitungsverhaltens der seismischen Wellen, welche durch die Gewinnungssprengungen induziert werden, im Vordergrund. Ergänzend soll ein Prognosemodell zur Vorhersage der maximal auftretenden Schwinggeschwindigkeiten erarbeitet werden. In einem zweiten Schritt sollen die Zusammenhänge zwischen den bohr- und sprengtechnischen Parametern und den Erschütterungsmesswerten erforscht werden. Aufgrund dessen sollen Möglichkeiten zur Reduktion der maximal auftretenden Schwinggeschwindigkeiten aufgezeigt werden.

1.2 Geographische Lage

Zu den Jura-Cement-Fabriken gehören zwei Zementwerke in der Schweiz. Diese Arbeit beschränkt sich auf den Standort Möriken-Wildegg, der sich im Kanton Aargau in der Nordschweiz befindet. Das Zementwerk befindet sich rund 7,5 km in ostnordöstlicher Richtung von der Kantonshauptstadt Aarau entfernt.

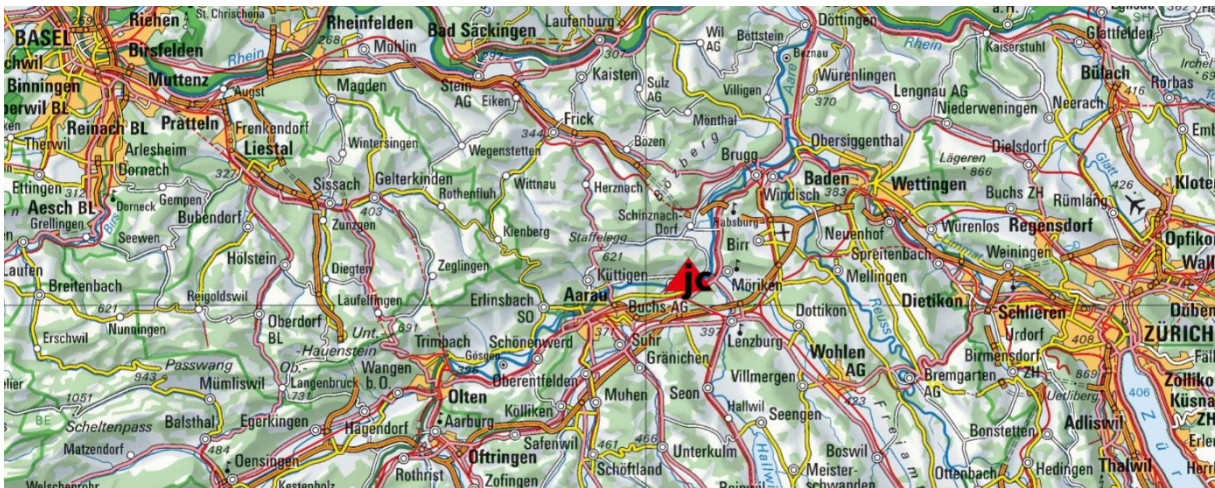


Abbildung 1: Lage der Jura-Cement-Fabriken Möriken-Wildegg

Die Kalk- und Mergelsteinbrüche liegen nördlich der Aare auf dem Gemeindegebiet von Veltheim und Auenstein (Abbildung 2). Die Abbaugelände lassen sich in vier Areale unterteilen, wobei im Norden in der Oberegg und Unteregg hauptsächlich Kalksteine gewonnen werden. Südlich davon schließen die Steinbitz und der Jakobsberg an, in denen Kalkstein und Mergel abgebaut werden.

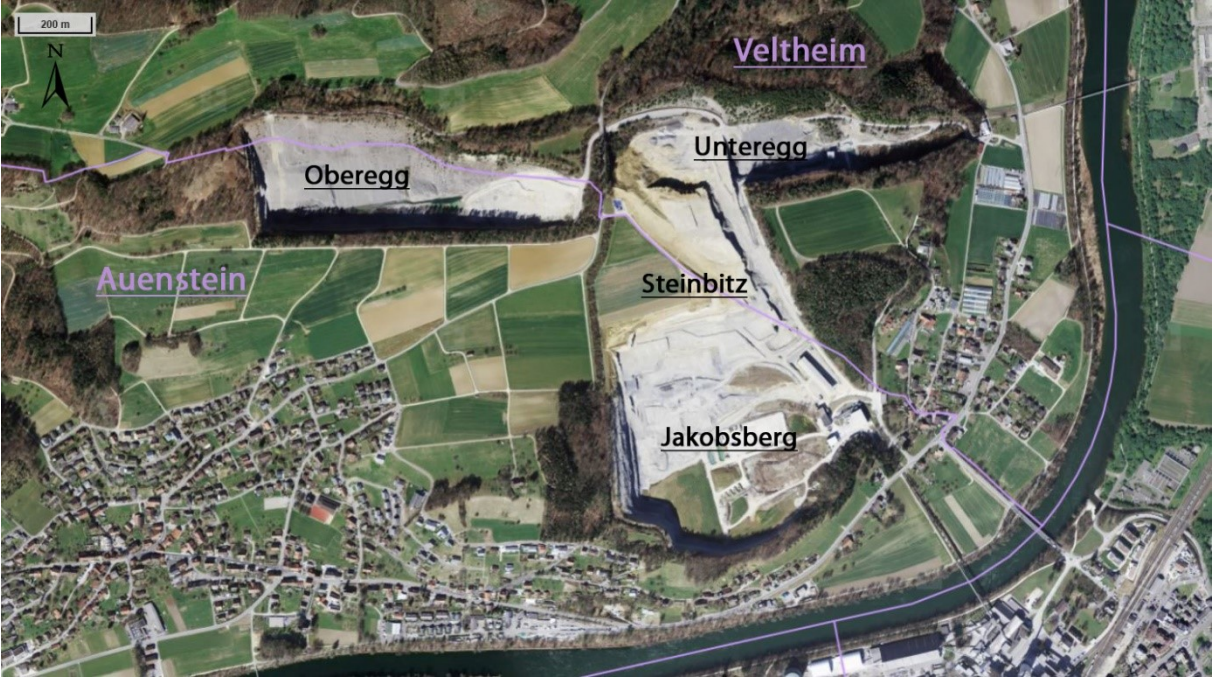


Abbildung 2: Lage und Unterteilung der Steinbrüche

2. Geologie

2.1 Stratigraphische Übersicht

Die Nordschweiz ist aus mehreren tektonischen Großeinheiten aufgebaut. Zu diesen zählt im Süden die mittelländische Molasse, welche aus neogenen und quartären Sedimenten besteht und nach Norden auskeilt. Gegen Norden schließen mesozoische Sedimente an, die gefaltet (Faltenjura) sowie weitgehend ungefaltet (Tafeljura) vorliegen, sowie das Kristallin des Schwarzwaldes im angrenzenden Süddeutschland (Abbildung 3).

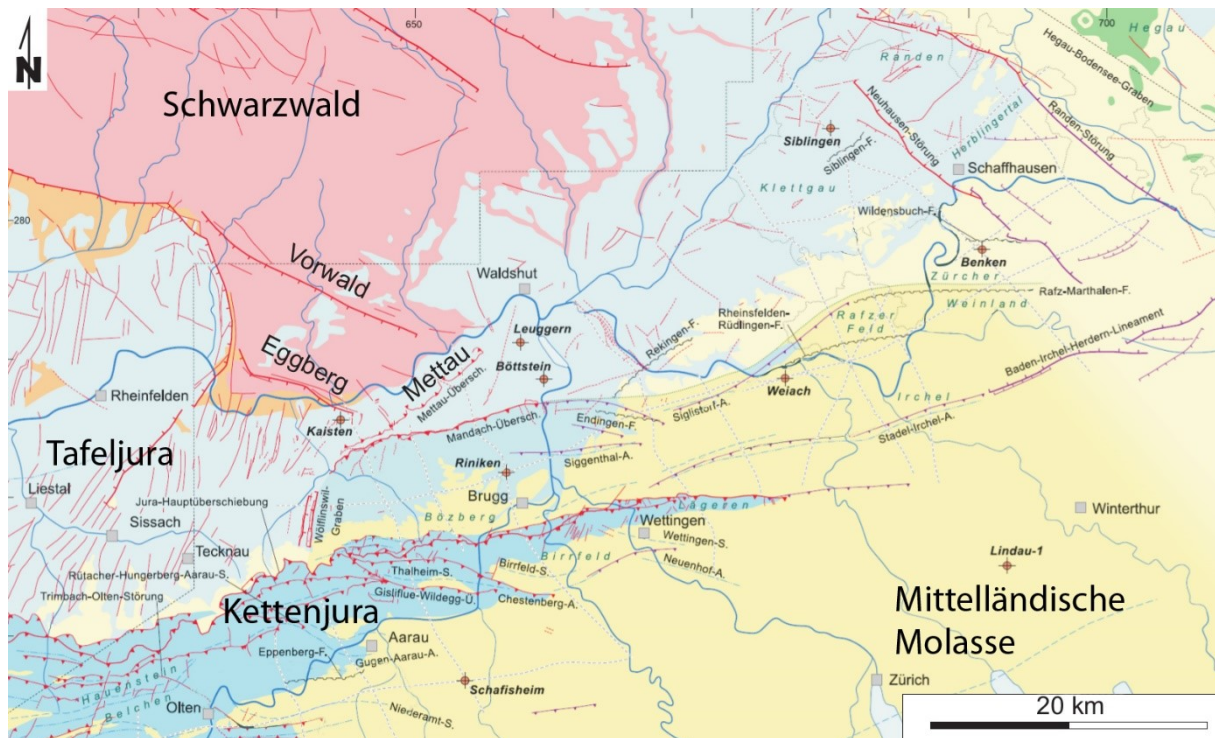


Abbildung 3: Tektonische Großeinheiten der Nordschweiz mit Störungssystemen; (NAGRA, 2008), modifiziert

Das Schwarzwaldkristallin ging aus der Kollision von Gondwana und Laurussia im Zuge der variszischen Orogenese, die zur Bildung Pangäas führte, im mittleren Paläozoikum hervor. Dabei wurden die beiden Kontinentalmassen entlang einer bei der Iberischen Halbinsel beginnenden und bis an den Rand Osteuropas reichenden Suturzone konsolidiert. Der Schwarzwald liegt somit im Kern des hochmetamorphen Gebirgsgürtels (HANN et al., 2000). Tektonischer Stress, welcher mit der variszischen Orogenese assoziiert ist, führte zur Anlage von tiefen Gräben, wie dem Nordschweizer Permokarbon-Trog. Diese Gräben wurden während dem Karbon und Perm mit dem erodierten Material des variszischen Gebirges verfüllt bis schließlich am Ende des Perms die Einebnung des Gebirges und der Grabenstrukturen abgeschlossen war. Im Perm begann die Sedimentation des Deckgebirges, mit dem Rotliegenden auf dem kristallinen Grundgebirge unter wüstenhaften Bedingungen. In der

frühen Trias blieben die semiariden Klimabedingungen auf dem Festland weitgehend erhalten. Über Flüsse wurden große Mengen Sande transportiert, die zur Bildung des Buntsandsteines führten. Durch großtektonische Prozesse kam es in der mittleren Trias zur Absenkung Mitteleuropas, sodass von Norden eine Meerestransgression erfolgte, die schließlich zur Verbindung mit der Tethys führte, welche sich mit dem Zerfall Pangäas öffnete (Abbildung 4). Die Meerestransgression führt zur Ablagerung des Muschelkalkes auf dem Buntsandstein in einem epikontinentalen, flachen Meer, wobei die Sedimente gegen Süden zum Vindelizischen Hoch hin auskeilen (SCHWARZ, 1975) (Abbildung 4). Durch die Abschnürung größerer, flacher, randmariner Bereiche des Germanischen Beckens in der mittleren Trias kommt es zur

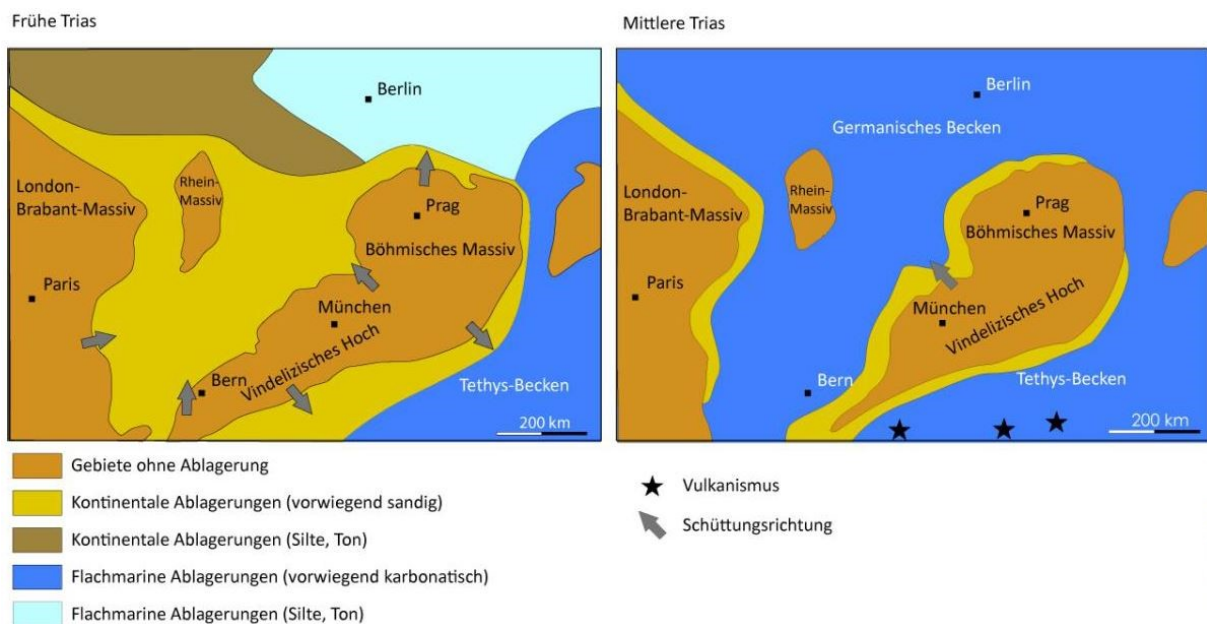


Abbildung 4: Paläogeographische Gegebenheiten in der frühen und mittleren Trias

Ablagerung von Evaporiten. Gegen Ende der Trias fand eine Meeresregression statt, die durch zyklische Meeresvorstöße unterbrochen war. Deshalb finden sich im Keuper marine, als auch terrestrische Sedimente, die in einem ariden Klima abgelagert wurden. Im Jura setzte mit einer erneuten Meerestransgression eine marine Sedimentation ein, die bis in den späten Jura ununterbrochen war. Die heutige Nordschweiz lag bis zum mittleren Jura im Bereich eines Randmeeres, das von der Tethys durch eine Schwelle getrennt war (TRÜMPY, 1980) und entwickelte sich während dem frühen Jura durch nicht kontinuierliche Subsidenz zu einer submarinen Schwelle, dem Allemannischen Land (Abbildung 5). Im mittleren Jura kam es zur Ausbildung mehrerer Faziesbereiche, wobei Land im Nordwesten sowie Lagune, Riff, Vorriff und offener Schelf im Südosten vorherrschend waren. Als Folge von Transgressions- und Regressionszyklen veränderten die Faziesbereiche ihre Lage Richtung Südosten bzw. Nordwesten (ALLENBACH, 2001). Im oberen Jura lag ein flaches Randmeer vor. Das tropische Klima begünstigte Verwitterungsprozesse auf dem Festland, sodass eisenreiche Sedimente ins Meer eingetragen wurden und die Entstehung von Eisenooliten bedingte

(FEHLMANN et al., 1962). Die siderolithischen Gesteine der Bohnerz-Formation aus dem Eozän (Abbildung 6), die meist als Kluffüllungen des Malmkalkes auftreten, gehören zu diesen. Während dem Oligozän und Miozän erfolgte südlich des Kettenjuras die Ablagerung der Molasse. Im Quartär erfolgten mehrere Vereisungsperioden mit mehrphasigen Eisvorstößen, die bis Kettenjura und teilweise auch darüber hinaus reichten und teils mehrere 100 m mächtige eiszeitliche und glazigene Schotter antransportierten (Jordan et al., 2011).



Abbildung 5: Paläogeographische Situation im Braunen Jura (ALLIA, 1996)

Im Weiteren folgt eine ausführlichere Beschreibung der aktuell abgebauten Formationen des Doggers und Malms, da in den Steinbrüchen der Jura-Cement-Fabriken Wildegg diese beiden stratigraphischen Einheiten Ziel des Bergbaues sind. Zu diesen gehören die Hauptrogenstein-Formation im Liegenden, die Ifenthal-Formation und die Wildegg-Formation als stratigraphisch höchste abgebaute Formation (Abbildung 6).

Der mittlere Jura (Dogger) weist im untersuchten Gebiet eine Mächtigkeit von rund 250 m auf und besteht gemäß (Abbildung 6) aus vier Formationen:

- Ifenthal-Formation
- Hauptrogenstein bzw. Klingnau-Formation
- Passwang-Formation
- Opalinus-Ton

Die Sedimentation des Opalinus-Tons erfolgte in einem seichten epikontinentalen Meer in Senken (WETZEL et al., 2003). Darüber liegt die Passwang-Formation, die lithologisch aus siliziklastisch-karbondischen Sedimenten besteht, deren Akkumulation in einem flachen mit der Tethys verbundenen Epikontinentalmeer erfolgte (BURKHALTER, 1996). Die Sedimentation des bis zu 95 m mächtigen Hauptrogenstein ereignete sich während dem Bajocien im offenmarinen Bereich. Nach GONZALEZ et al. (1996) zählt der Hauptrogenstein im Bereich der Steinbrüche zur Klingnau-Formation. Dort ereignete sich die Sedimentation in drei großen Coarsening-upward-Zyklen, an deren Basis Mergel und oolithischer Kalk und in den darüber liegenden Gesteinsschichten oolithischer Kalk mit Resten von Korallen und Echinodermen aus Hochenergiebereichen auftritt. Die drei Zyklen sind nach den Bezeichnungen von GONZALEZ et al. (1996) im Gelände folgendermaßen aufgeschlossen, wobei in den Steinbrüchen bei Auenstein die Oberen Acuminataschichten nicht vorhanden sind:

3. Zyklus: Movelier-Schichten, Ferrugineus-Oolith (Zigzag-Zone) und Spatkalk

2. Zyklus: Obere Acuminata-Schichten und Oberer Hauptrogenstein

1. Zyklus: Untere Acuminata-Schichten und Unterer Hauptrogenstein

Da die Gesteine der Ifenthal-Formation im Gebiet nicht auftreten folgen im Hangenden die Ablagerungen der Wildeggen-Formation aus dem Malm. Zu dieser ursprünglich rund 230 m mächtigen Gesteinsabfolge zählen zwei Schichtpakete, die in einer Bucht des epikontinentalen Meers unter tropischen Verhältnissen abgelagert wurde (ALLENBACH, 2001; WETZEL et al. 2003):

- Effinger Schichten
- Birnenstorfer Schichten

Die Birnenstorfer Schichten erreichen im Steinbruch geringe Mächtigkeiten bis ca. 4 m und bestehen aus einer glaukonitreichen Lage an der Basis, darüber mikritischer Mergelkalk und eine fossilreiche Lage. Darüber schließen die Effinger Schichten an, eine maximal 230 m mächtige Gesteinsabfolge, die in einem seichten, marinen Milieu abgelagert wurde (GYGI, 2000). Die Sedimentation erfolgte im Gegensatz zu den Birnenstorfer Schichten in relativ kurzer Zeit als von Nordwest eine terrigene Schüttung im oberen Oxfordien einsetzte

(ALLENBACH, 2001). Die Gesteine liegen als bröckelige, blau bis hellgraue, stark geklüftete Mergelbänke vor, die mit meist wenigen Dezimeter mächtigen Kalkbänken wechsellagern. Eine rund 12 m mächtige Gerstenhübelkalkbank unterteilt die die Effinger Schichten in eine obere und untere Serie. Zudem existieren in den oberen Effinger Schichten drei weitere Mergelkalkbänder, die wenige Meter Mächtigkeit aufweisen. In den fossilarmen Sedimenten der Effinger Schichten sind mehrere Winkeldiskordanzen und Anzeichen submariner Rutschungen zu erkennen (GYGI et al., 1986), die auf synsedimentäre tektonische Prozesse zurückzuführen sind (ALLENBACH, 2001; WETZEL et al., 2003). Darüber schließen im bearbeiteten Gebiet keine jüngeren Sedimente des Mesozoikums mehr an. Diese wurden entweder nie abgelagert oder bereits wieder erodiert. Im Quartär kam es durch Gletschervorstöße bis ins bearbeitete Gebiet zur Ablagerung glazialer und glazigener Sedimente. So stellen geringmächtige Ablagerungen der Beringen-Eiszeit dort die jüngsten Sedimente dar. Im Till wurden 2010 am Jakobsberg Mammutknochen gefunden. Überdies sind Lössvorkommen und erratische Blöcke im bearbeiteten Gebiet bekannt. Das Nährgebiet der eiszeitlichen Ablagerungen stellte das Aare-Rhonetal dar (JORDAN et al., 2011).

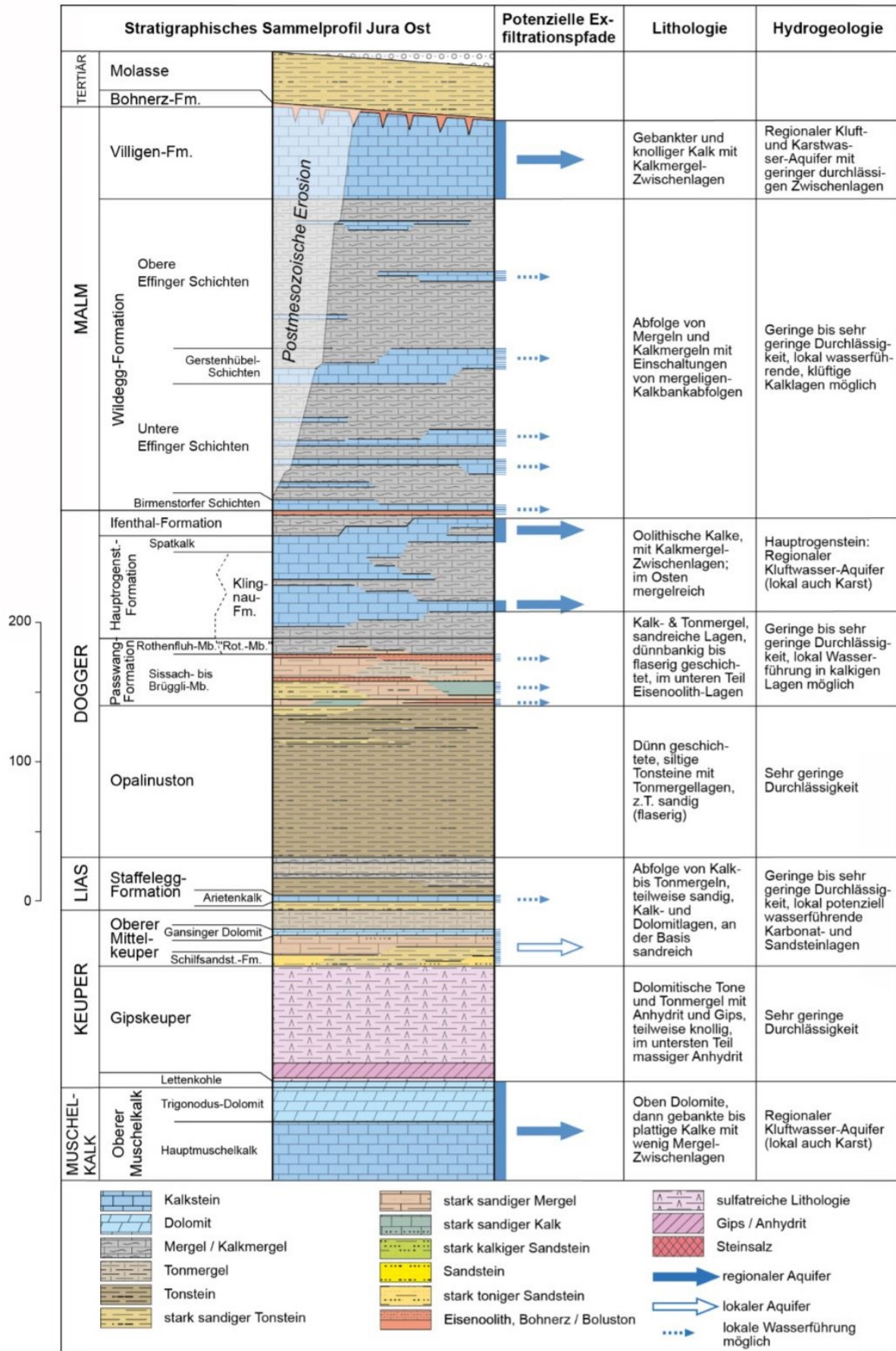


Abbildung 6: Stratigraphisches Profil im östlichen Jura (BIAGGI (2014): Arbeitsbericht NAB 13-31)

2.2 Tektonische Großeinheiten

Die geologisch-tektonischen Baueinheiten der Nordschweiz bestehen aus zwei tektonischen Stockwerken. Dieses umfasst einen Sockel, der aus einem variszischen Grundgebirge (plutonische Gesteine, metamorphe Gesteine, Ganggesteine), permokarbonen Sedimenten und jenen der unteren Trias bestehen. Der Sockel kann in drei tektonische Teile untergliedert werden. Im Zentrum befindet sich der WSW-ENE verlaufende Nordschweizer Permokarbon-Trog (NPT), der als Folge eines Transversalbruches in der späten variszischen Gebirgsbildung entstand. Im südlichen Teil des Schwarzwaldes schließt der Sockel nördlich des NPT an, im Süden befindet sich der Sockel südlich des NPT. Dem Sockel lagert das Deckgebirge auf, welches aus dem Tafel- und Kettenjura sowie der Molasse aufgebaut ist. Der Ablagerungsraum der mesozoischen Gesteine des Juragebirges erfolgte in einem küstennahen Flachmeer am nördlichen Rand der alpinen Tethys (WEISSERT, 2009). Die Anlage der beiden Stockwerke erfolgte in zwei Ereignissen durch Abscherung des mesozoisch-känozoischen Deckgebirges entlang der Basis der Anhydritgruppe des mittleren Muschelkalkes, welcher als Gleithorizont diente (Abbildung 7). In einem ersten Ereignis erfolgte das Abgleiten der mesozoischen Decksedimente nach Süden. Die treibende Kraft des Prozesses war das Aufsteigen des Schwarzwaldmassives im Norden, welches gemeinsam mit den Vogesen einen Kristallindom bildet (CLOETINGH et al., 2005). Dabei wurde der südliche Teil des Schwarzwaldes vor 40 – 10 Ma um ca. 600 – 1200 m angehoben. Während der letzten 10 Ma sind Hebungsbeiträge von ca. 0,04 – 0,1 mm/Jahr, in Summe rund 400 – 1000 m anzunehmen (ROLL, 1979). Die Sedimente wurden entlang der SE gerichteten Mettaufer Überschiebung auf das autochthone Deckgebirge aufgeschoben und gefaltet (Abbildung 3). Die Gesteine des unteren Muschelkalkes („Wellengebirge“), der liegende Buntsandstein und das kristalline Grundgebirge blieben von der Faltung verschont (WILDI, 1975). In einem zweiten Ereignis erfolgte der Transport des Deckgebirges Richtung Norden entlang der NNW gerichteten Störung mit gleichzeitiger Faltung und Überschiebung im Kettenjura (BUXTORF, 1916). Grund für die nordwärts gerichtete Bewegung war die alpidische Orogenese, die während dem Miozän und Pliozän ihren Höhepunkt erreichte. Das tektonische Ereignis formte nicht nur die Landschaft des Kettenjura sondern dessen Auswirkungen sind auch im nördlich angrenzenden Tafeljura sowie im südlich und östlich angrenzenden Molassegebiet erkennbar.

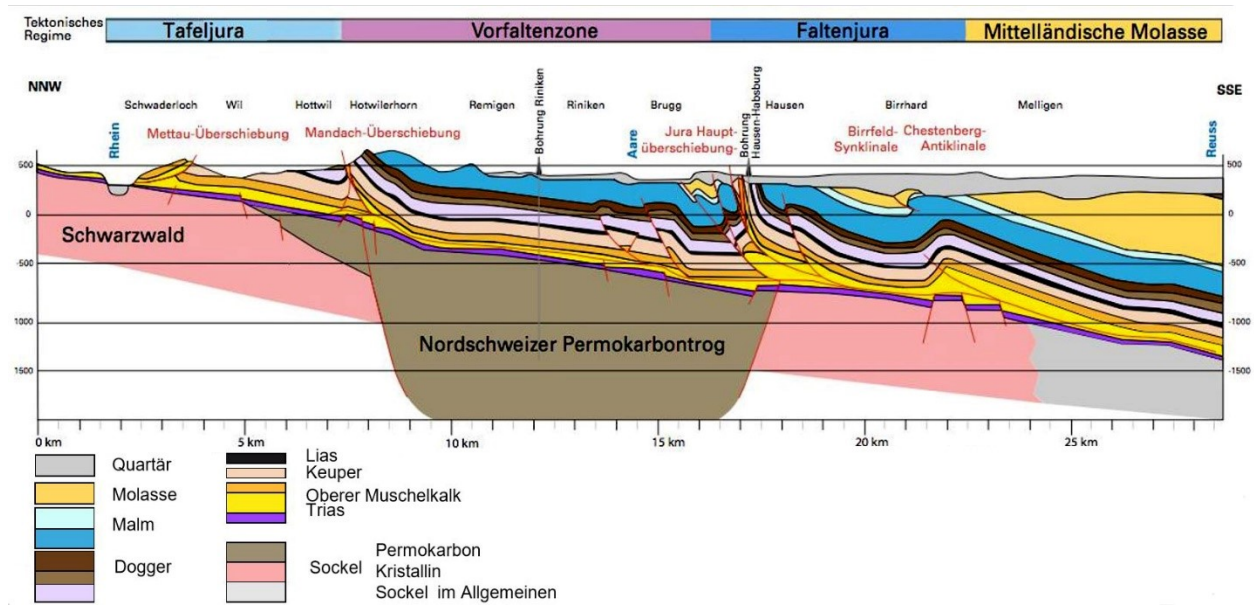


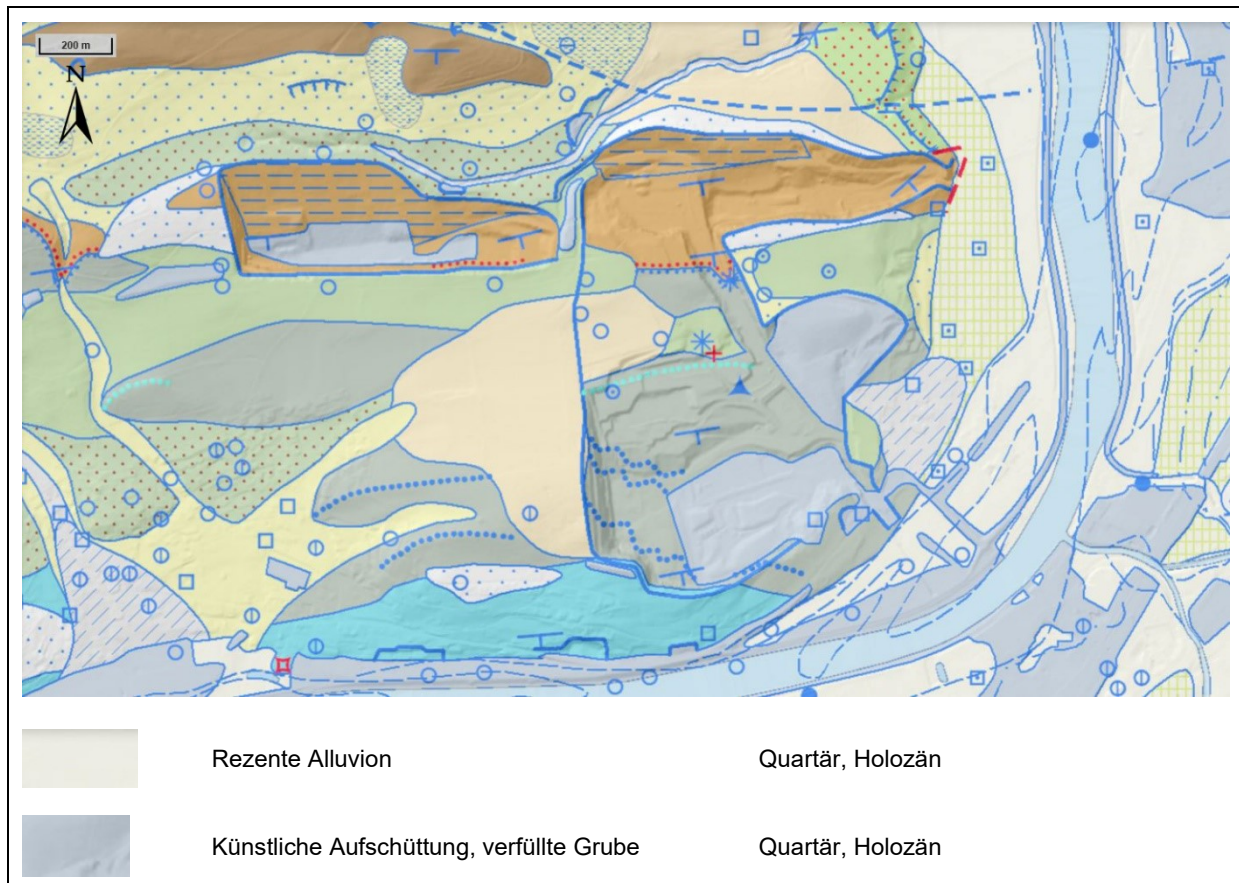
Abbildung 7: Tektonische Beziehung zwischen Sockel und Deckgebirge in der Nordschweiz (Medici et al., 1995; ergänzt nach NAGRA 08-04)

2.3 Regionale Geologie

In den Steinbrüchen der Jura-Cement-Fabriken Wildegg und in den umliegenden Gebieten treten jurassische Festgesteine zu Tage, die von quartären Lockersedimenten bedeckt sind. Wie aus der nachstehenden Abbildung 9 hervorgeht, treten die jurassischen Gesteine vor allem westlich und südlich der Steinbrüche zutage. Vor allem im südlichen Bereich der Abbildung sind die Festgesteine gut aufgeschlossen. Dabei beißen dort die Faltschenkel infolge der tektonischen Verformung des Gebirges an der Oberfläche aus. In den dazwischenliegenden Muldenstrukturen sind jüngere Sedimente der Eiszeiten abgelagert worden. Des Weiteren treten oberhalb der Aare Bachschuttkegel und Schwemmfächer auf. In der Flussebene treten mächtige fluviatile Sedimente auf. Der Flussverlauf wurde durch den Mensch reguliert. Die Seitenarme wurden künstlich aufgefüllt, wie aus historischem Kartenmaterial hervorgeht (Abbildung 8). Auch in den stillgelegten Arealen in den Steinbrüchen wurde Moränenmaterial, welches abgetragen wurde, um die Festgesteine abbauen zu können, deponiert. Östlich der Steinbitz wurde der ehemalige Abbau großflächig bis ca. 1970 aufgefüllt und bewaldet. Die Abgrenzung des Auffüllungsbereichs geht aus den Airborne-Laserscan-Daten gut hervor. Auf Grundlage dieser Daten und Geländebegehungen verläuft die Grenze des Auffüllungsbereiches im Süden etwas weiter nördlich als auf Abbildung 9.



Abbildung 8: Künstliche Verlegung des Flussverlaufes im Jahre 1844 (l. oben), 1881 (r. oben), 1963 (l. unten), 2013 (r. unten); Quelle: www.swisstopo.admin.ch
















| | | |
|---|---|---|
|  | Hanglehm, Schwemmlehm, Verwitterungslehm | Quartär, Pleistozän, Holozän |
|  | Hangschuttkegel, Trockenschuttkegel | Quartär, Pleistozän oder Holozän |
|  | Bachschuttkegel, Schwemmfächer | Quartär, Pleistozän oder Holozän |
|  | Rutschmasse | Quartär, Pleistozän oder Holozän |
|  | Verlehmteter Hangschutt, Solifluktionsschutt | Quartär, Pleistozän oder Holozän |
|  | Löss, Lösslehm | Pleistozän, Birrfeld-Eiszeit (Letzte Eiszeit) |
|  | Niederterrassenschotter (undifferenziert), Niederterrasse | Quartär, Pleistozän, Birrfeld-Eiszeit (Letzte Eiszeit) |
|  | Rundglazialer Schotter (Hochterrasse) | Quartär, Pleistozän, Beringen-Eiszeit (Vorletzte Eiszeit) |
|  | Till, glazigene Sedimente im Allgemeinen (Hochterrasse) | Quartär, Pleistozän, Beringen-Eiszeit (Vorletzte Eiszeit) |
|  | Kalk, Mergelkalk | Jura, Malm (Villigen-Formation, Crenularis- bis Letzi-Member) |
|  | Tonmergel bis Kalkmergel | Jura, Malm (Wildegg-Formation Effingen-Member) |
|  | Hauptrogenstein, Kalkoolith | Jura, Dogger (inkl. Frühes Oxfordien) |
|  | Mergel | Jura, Dogger inkl. Frühes Oxfordien (Klingnau Formation) |
|  | Tonstein, sandig-biodetritischer Kalk, Eisenoolith | Jura, Dogger inkl. Frühes Oxfordien (Passwang-Formation) |

Abbildung 9: Geologische Karte des Untersuchungsgebietes; (Bundesamt für Landestopografie swisstopo, <http://www.swisstopo.admin.ch>; aufgerufen am 9.1.2016), verändert

2.4 Petrographische Beschreibung

Im folgenden Kapitel erfolgt eine Beschreibung aller vorkommenden Lithologien, die Ziel des Abbaus im untersuchten Gebiet sind.

2.4.1 Obere Effinger Schichten

Die Oberen Effinger Schichten (Abbildung 10) sind im Gelände blaugrau gefärbt. Sie sind durch einen inhomogenen Aufbau gekennzeichnet und bestehen aus dünnbankigen Mergel- und Kalkmergellagen, zwischen denen beige, geringmächtige Kalkbänder liegen. Dazwischen können gelegentlich dünne, laminierte Lagen aus stark tonigen und mergeligen Material gefunden werden. Hauptmineralbestandteile sind mit rund 65 % Karbonate und 30 % Tonminerale, von denen Illit, Kaolinit und Illit-Smektit die häufigsten sind. Zudem tritt Quarz mit einem maximalen Anteil von 10 % auf (LAWS et al., 2007) und als Akzessorien sind Pyrit und Glaukonit vorhanden. Die Gesteine der Oberen Effinger Schichten verwittern im Gelände sehr schnell, da eine geringe Menge quellfähiger Tonminerale in ihnen vorhanden ist. Laut Literatur ist von einer oberflächlichen aber tiefgründigen Verwitterung der Schichten auszugehen (BIAGGI, 2014). Bezüglich der Gesteinsfestigkeiten sind hohe Werte anzunehmen.



Abbildung 10: Aufschluss der Oberen Effinger Schichten am Jakobsberg

2.4.2 Gerstenhübelkalk

Der rund 15 m mächtige Kalkstein des Gerstenhübelkalkes (Abbildung 11) liegt ockerfarben bis hellgrau vor. Zwischen den einzelnen Schichten sind einige wenige, laminierte Ton- und Mergellagen von wenigen Zentimetern Mächtigkeit in grauer Farbe vorhanden. Akzessorisch konnte im Kalkstein oxidiertes Pyrit gefunden werden, der dem Gestein rostbraune Überzüge verleiht. Im Gelände fällt besonders die starke Klüftung des Gesteines auf, die ihm sein backsteinartiges Aussehen verleiht. Entlang der Klüftflächen sind Wegsamkeiten für die Zirkulation von Fluiden vorhanden. Dies ist an den Oberflächen der Klüfthohlräume zu

erkennen, an denen stellenweise einige wenige Millimeter große Calcitkristalle gewachsen sind. Überdies sind häufig entlang der Klüfte raue, verkarstete Oberflächen zu finden. Aufgrund des Fluiddurchsatzes sind an den einzelnen Klüftkörpern nach Herstellung einer frischen Bruchfläche mehrere Zentimeter mächtige Verwitterungszonen erkennbar. Teilweise sind die Klüfte mittels Karbonaten zuzementiert. Besonderer Beachtung beim Herstellen und Laden der Bohrlöcher muss den gelegentlich auftretenden und zum Teil mehrere Kubikmeter fassenden Karsthohlräumen geschenkt werden, die bevorzugt im Gerstenhübelkalk auftreten.



Abbildung 11: Aufschluss des Gerstenhübelkalkes am Jakobsberg

2.4.3 Untere Effinger Schichten

Die Unteren Effinger Schichten (Abbildung 12) sind in petrographischer Hinsicht mit den Oberen Effinger Schichten identisch. Zwischen den Mergellagen treten wiederholt stark eisenhaltige Kalk- und Mergelkalklagen auf.



Abbildung 12: Aufschluss der Unteren Effinger Schichten in Steinbitz

2.4.4 Birnenstorfer Schichten

Die Birnenstorfer Schichten (Abbildung 13) treten in ähnlicher Farbe wie die Unteren und Oberen Effinger Schichten in Erscheinung. Sie bestehen aus einer Wechsellagerung von mikritischen Kalken und Mergel. Neben karbonatischen Bestandteilen tritt Quarz mit einem Volumenanteil von rund 5-10 % auf (BIAGGI et al., 2014). Überdies sind Tonminerale in stark variierendem Mengenanteil vorhanden, die zum Aufquellen neigen und somit den Verwitterungsprozess beschleunigen. Als Akzessorien treten Pyrit und Glaukonit auf. Die Birnenstorfer Schichten besitzen einen erstaunlichen Fossilienreichtum, unter anderem tellerförmige Schwämme und Ammoniten. Die Mächtigkeit im untersuchten Gebiet beträgt in etwa 5 m.

2.4.5 Spatkalk

Die Gesteine des Spatkalkes (Abbildung 13) treten in nur sehr geringen Mächtigkeiten von rund 2,5 m auf und sind beige gefärbt. Zwischen den Kalkgesteinen befinden sich dünne Mergellagen, die ebenfalls beige gefärbt sind. Des Weiteren sind wenige Zentimeter mächtige, bräunliche Eisenoolithe vorhanden. Der Quarzanteil wird ein etwa auf 2-15 % geschätzt (BIAGGI et al., 2014). Der Anteil an quellfähigen Tonmineralen wird in etwa auf 3-5 % geschätzt. Eine Empfindlichkeit gegen Wasser kann nicht nachgewiesen werden.

2.4.6 Zigzag-Zone

Die Gesteine der Zigzag-Zone (Abbildung 13) liegen als hellgraue, fein kondensierte Kalke vor, wobei deren Graufärbung auf einen geringen Anteil an Tonmineralen zurückzuführen ist. Im Handstück treten wiederholt kleine Calcitknollen auf, die durch das Auskristallisieren primärer Hohlräume in Hartschalen entstanden sind. Vereinzelt sind Ooide im Gesteinsverband auffindbar.



Abbildung 13: Aufschluss des Hauptrogensteines, Zigzag-Zone, Spatkalk- und Birnenstorfer Schichten (von links unten nach rechts oben) in Steinbitz

2.4.7 Hauptrogenstein

Innerhalb der ersten Meter liegt das Gestein an der Basis der Formation in dunkelgrauer Farbe vor. Dieses besteht aus Kalkooiden, die mit tonigen und siltigen Bestandteilen zementiert sind. Gegen das Hangende ist eine graduelle Abnahme der dunklen, silikatischen Komponenten zu verzeichnen, sodass der Fels in eine helle, leicht gelblich bis ockerne Farbe übergeht. Die Zwischenräume der runden, in stark bewegtem Wasser gebildeten Ooide sind mit Calcit aufgefüllt. Neben den Kalkareniten sind im Gestein Bioklastika von Echinodermen sowie Mollusken zu finden. Mineralogisch besteht der Hauptrogenstein fast zur Gänze aus Karbonaten (hauptsächlich Calcit, untergeordnet Dolomit, Aragonit). Akzessorisch tritt Quarz auf (BIAGGI et al., 2014). Der Anteil der Tonminerale unterliegt starken Schwankungen wobei er in den hellen, gelblichen Kalken 4 % nicht überschreitet.



Abbildung 14: Aufschluss des Hauptrogensteines in der Obereg

2.5 Strukturgeologie

Für die jeweiligen Formationen sind die vorhandenen Schwächezonen im Gestein, die synsedimentär oder postdiagenetisch durch tektonische Prozesse entstanden sind, von besonderem Interesse. Die strukturgeologischen Elemente wie Schichtungs- und Klufflächen wurden im Gelände mittels Geologenkompass an mehreren Aufschlüssen entlang den Bruchwänden aufgenommen und für Auswertungen herangezogen. Da die Aufschlussverhältnisse an den geringmächtigen Schichtpaketen keine Messungen zuließen oder nur unter sehr gefährlichen Bedingungen durchführbar waren, wurden anstatt der Feldmessungen Daten von Kernbohrungen aus einer geologisch-hydrogeologischen Untersuchung im Jahr 2014 herangezogen, die die jeweiligen Schichten durchteufen. Zusätzlich erfolgte der Vergleich der erhobenen Feldmessdaten mit jenen der Bohrungen, um auszuschließen, dass Trennflächengefüge, die eventuell durch die Sprengtätigkeiten erschaffen worden sind, aufgenommen werden und zur Verfälschung der Ergebnisse führen. Durch den Vergleich wurde aufgezeigt, dass kaum Daten von neu geschaffenen Trennflächen erhoben wurden. Zusätzlich wurde im Gelände der durchschnittliche Trennflächenabstand abgeschätzt, indem entlang von sich 5 m erstreckenden Profilen in den drei Raumlagen alle Klüfte der jeweiligen Scharen gezählt wurden. Die Auswertung erfolgte im Schmidtschen Netz, in dem die Großkreise mit Polpunkten sowie Rosendiagramme der Streichrichtungen geplottet wurden.

Grundsätzlich kann ein einheitliches Einfallen der Schichtgrenzen nach SSE in allen Formationen erfasst werden. Zudem können verschiedene Kluftscharen klassifiziert werden, von denen einige in mehreren Schichtpaketen auftreten. In den folgenden Abbildungen sind die Messwerte der Schichtflächen in blau, die jeweiligen Kluftscharen in rot, gelb, orange, braun, hell- sowie dunkelgrün dargestellt.

2.5.1 Obere Effinger Schichten

Die Oberen Effinger Schichten weisen neben dem flach nach SSE einfallenden Schichtflächen drei steil einfallende Kluftscharen auf (Abbildung 15):

S-Trennflächenschar (blau): Die sehr wenig streuenden, E – W streichenden Schichtflächen fallen mit rund 20° nach Süden ein.

K1-Trennflächenschar (rot): Die SE – NW streichenden Klüfte fallen steil nach NE ein.

K2-Trennflächenschar (hellgrün): Die NE – SW streichende Trennflächen fallen sehr steil mit NW sowie nach SE ein.

K3-Trennflächenschar (orange): Die Streichrichtung ist breit gestreut und in etwa N – S bis NE – SW gerichtet. Das Einfallen ist steil in Richtung NW.

In den Oberen Effinger Schichten sind hinsichtlich der Trennflächengefüge geringe Öffnungsweiten von wenigen Millimetern anzunehmen. Im Gelände sind einige der Klüfte mit Calcit verfüllt. Dies geht auch aus der Auswertung der Kernbohrungen hervor. Generell sind die Trennflächen glatt und Bewegungsindikatoren konnten nur selten festgestellt werden. Zudem sind nur selten kleinräumige Vernässungszonen erkennbar, was auf weitgehend trockene Bodenverhältnisse in den untersuchten Schichten schließen lässt.

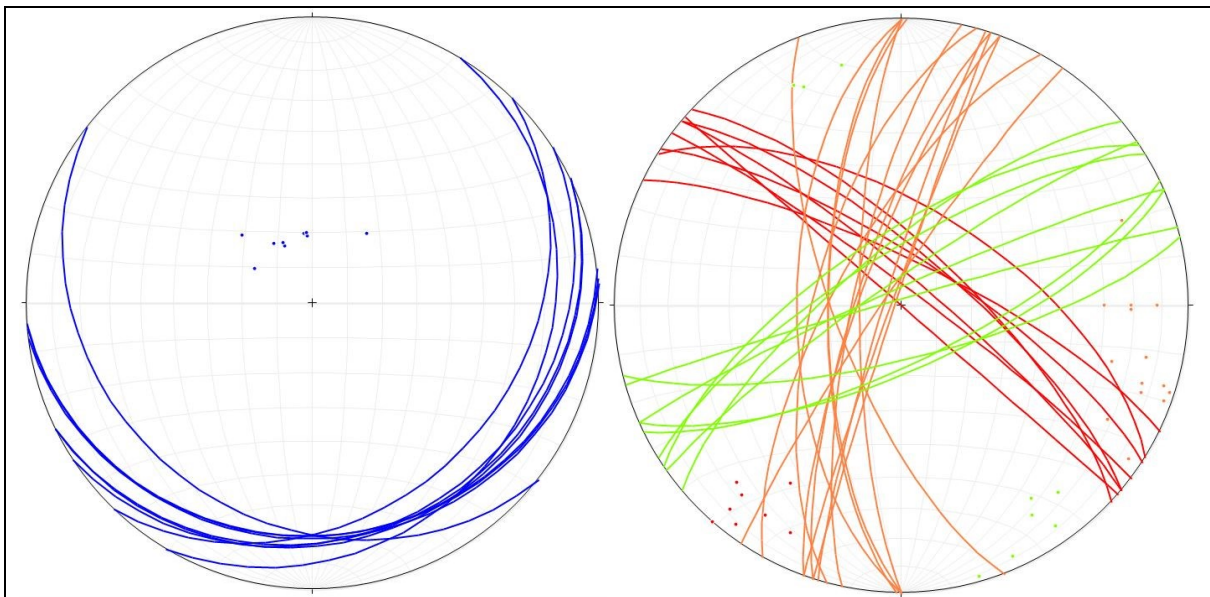


Abbildung 15: Trennflächenscharen der Oberen Effinger Schichten

| | | | |
|-----------------|--------|---|-------|
| Ø Messwerte S: | 161 21 | Ø Trennflächenabstand [m]: | 0,22 |
| Ø Messwerte K1: | 037 78 | Ø Trennflächenabstand [m]: | 0,12 |
| Ø Messwerte K2: | 259 76 | Ø Trennflächenabstand [m]: | 0,15 |
| Ø Messwerte K3: | 330 79 | Ø Trennflächenabstand [m]: | k. A. |
| | | Ø Klufkkörpervolumen [m ³): | 0,004 |

Klufkkörperform: meistens plattig, unregelmäßig blockig

2.5.2 Gerstenhübelkalk

Der Gerstenhübelkalk ist durch einen hohen Durchtrennungsgrad des Gebirges charakterisiert. Die Schichtflächen entsprechen weitgehend denen der Oberen Effinger Schichten. Auch die Klufsysteme K1 und K3 treten erneut auf. Eine zusätzliche Klufsysteme ist weniger deutlich ausgebildet (Abbildung 16):

S-Trennflächenschar (blau): Die Schichtflächen zeigen eine sehr geringe Streuung und fallen einheitlich relativ flach mit rund 20° nach Süden ein.

K1-Trennflächenschar (rot): Die Klufflächen zeigen ein breit streuendes ESE – WNW gerichtetes Streichen. Der Fallwinkel schwankt geringfügig und beträgt im Mittel 74°.

K3-Trennflächenschar (orange): Der Trend der N – S streichenden Klufflächen aus den Oberen Effinger Schichten setzt sich im Gerstenhübelkalk fort und weist steil stehende Einfallswinkel auf.

K4-Trennflächenschar (dunkelgrün): Die undeutlich ausgebildete Kluftschar streicht in Richtung NNW – SSE und steht nahezu senkrecht.

Der Vergleich der Messwerte mit den Bohrungen hat gezeigt, dass eine starke Durchtrennung der Formation vorliegt. Diese äußert sich durch eine Vielzahl an Klüften, in denen teilweise Rekristallisationen vorhanden sind. Die offenen Klüfte weisen Öffnungsweiten von wenigen Millimetern auf. Entlang den Klufflächen sind häufig beige Alterationsränder ersichtlich, die auf zirkulierende Lösungen zurückzuführen sind. Häufig treten entlang der Trennflächen verkarstete, raue Oberflächen auf. Zum Teil befinden sich mehrere Millimeter große Kalzitkristalle auf den Trennflächen. Zudem kann von sowohl im Gelände als auch in den Bohrungen ersichtlichen Styolithen berichtet werden. Bezüglich der mittleren Trennflächenabstände ist anzumerken, dass eine große Schwankungsbreite bei den verschiedenen Aufschlüssen auftritt.

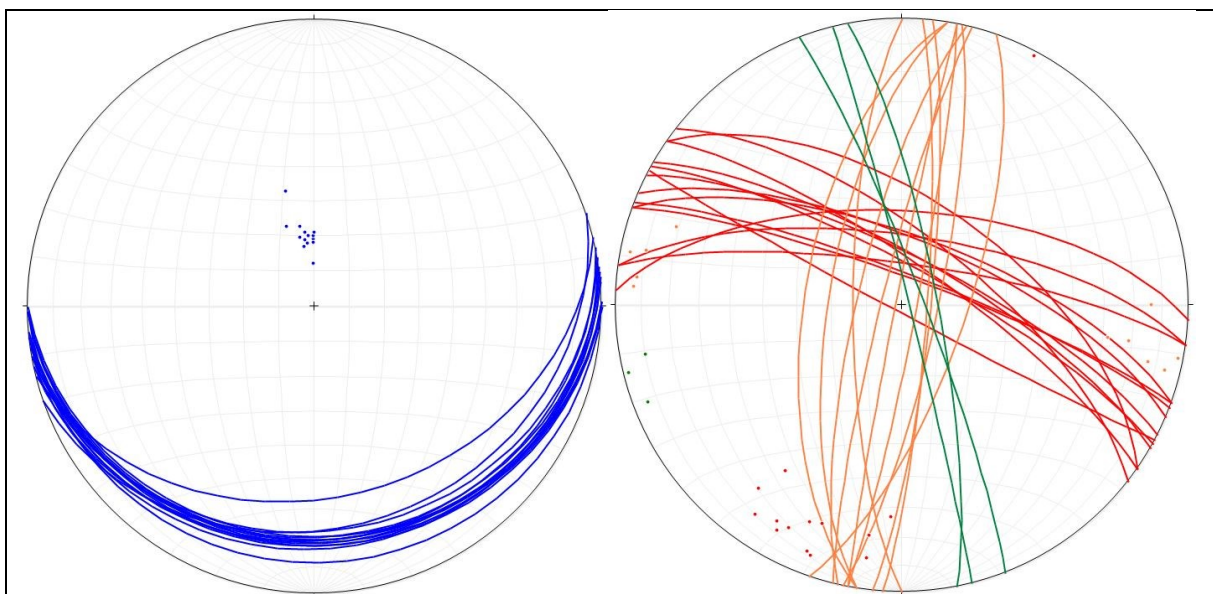


Abbildung 16: Trennflächenscharen des Gerstenhübelkalkes

Ø Messwerte S: 173|20

Ø Trennflächenabstand [m]: 0,24 – 0,43

| | |
|--------------------------|---|
| Ø Messwerte K1: 036 74 | Ø Trennflächenabstand [m]: 0,43 – 0,83 |
| Ø Messwerte K3: 279 76 | Ø Trennflächenabstand [m]: 0,52 |
| Ø Messwerte K4: 075 84 | Ø Trennflächenabstand [m]: k. A. |
| | Ø Kluftkörpervolumen [m ³]: 0,093 |
| Kluftkörperform: blockig | |

2.5.3 Untere Effinger Schichten

Die Unteren Effinger Schichten unterscheiden sich von den Oberen Effinger Schichten durch einen niedrigeren Durchtrennungsgrad sowie durch zu den bereits bestehenden Klufscharen K1 und K3 zwei zusätzliche Klufsysteme (Abbildung 17):

S-Trennflächenschar (blau): Die flach gelagerten Schichtflächen zeigen ein ähnliches Verhalten wie die beiden hangenden Formationen zuvor.

K1-Trennflächenschar (rot): Die NW – SE streichenden Kluffflächen fallen nach NE ein und sind durch mittelsteile Fallwinkel charakterisiert.

K3-Trennflächenschar (orange): Eine Varianz im Fallwinkel zeigen die nach NW einfallenden Kluffflächen. Im Vergleich zu den hangenden Schichten weisen sie eine NE – SW gerichtete Streichrichtung auf. Verhältnismäßig tritt die Klufschar nicht sehr oft auf.

K5-Trennflächenschar (braun): Die bisher noch nicht aufgetretene Klufschar zeichnet sich durch nach NNW streuende Flächen aus. Eine Schwankung der Fallwinkel ist zu verzeichnen. Durchschnittlich beträgt dieser rund 54°.

K6-Trennflächenschar (gelb): Die nach E einfallenden Trennflächen treten nur in dieser Formation auf und zeichnen sich durch einheitliches Verhalten aus. Das Klufsystem ist wenig deutlich ausgebildet.

Im Vergleich zu den Oberen Effinger Schichten weisen die Unteren Effinger Schichten mächtigere gebankte Mergelschichten auf. Die durchschnittlichen Trennflächenabstände sind weiter, was zu einem etwas geringeren Durchtrennungsgrad der Formation führt. Aus den Kernbohrungen geht hervor, dass der Großteil der Formation einen ausgezeichneten RQD-Wert aufweist. Nur wenige der Klüfte weisen eine geringe Öffnungsweite von wenigen Millimetern auf. Die meisten sind mittlerweile mit Kalzit verfüllt.

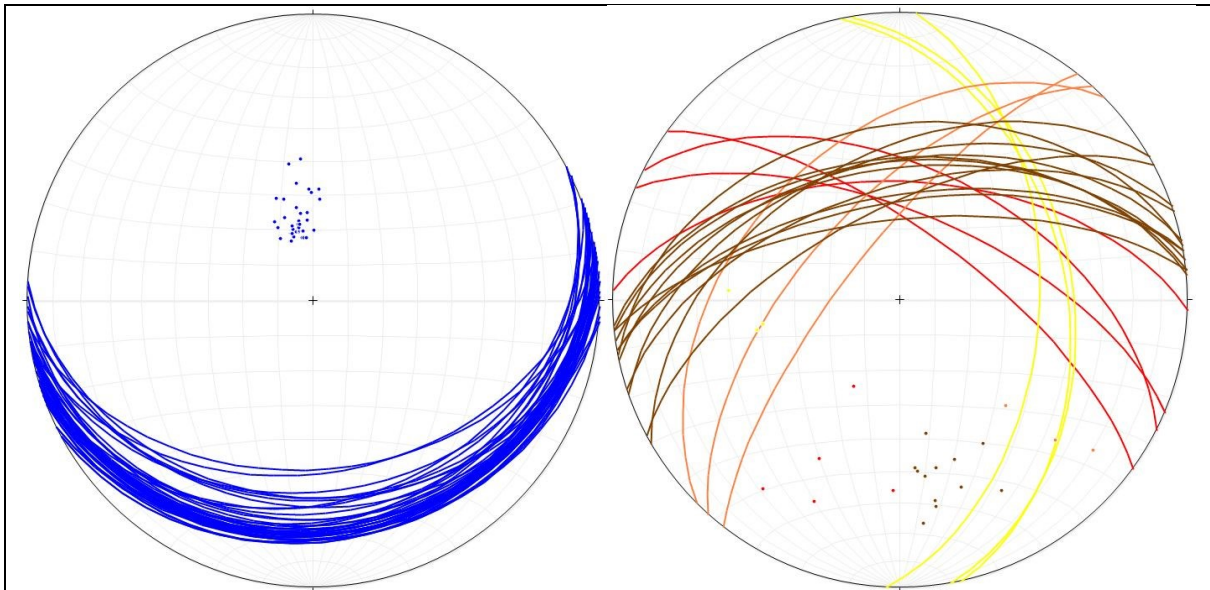


Abbildung 17: Trennflächenscharen der Unteren Effinger Schichten

| | | | |
|-----------------|--------|---|-------|
| Ø Messwerte S: | 168 24 | Ø Trennflächenabstand [m]: | 0,38 |
| Ø Messwerte K1: | 023 54 | Ø Trennflächenabstand [m]: | 0,32 |
| Ø Messwerte K3: | 312 60 | Ø Trennflächenabstand [m]: | 0,43 |
| Ø Messwerte K5: | 346 54 | Ø Trennflächenabstand [m]: | 0,24 |
| Ø Messwerte K6: | 084 44 | Ø Trennflächenabstand [m]: | 0,52 |
| | | Ø Kluftkörpervolumen [m ³]: | 0,065 |

Kluftkörperform: unregelmäßig blockig, polyedrisch

2.5.4 Birnenstorfer Schichten

Die folgenden Messwerte wurden von den Kernbohrungen abgeleitet, da eine Datenaufnahme im Gelände mangels erreichbarer Aufschlüsse nicht möglich war. Die Birnenstorfer Schichten weisen ähnliche strukturelle Elemente wie die darüber liegenden Schichten auf (Abbildung 18):

S-Trennflächenschar (blau): Erwartungsgemäß tritt eine flache nach S orientierte Lagerung der Schichtpakete unter einem Winkel von rund 23° auf.

K1-Trennflächenschar (rot): Ein Element der Kluftenschar konnte auch in der Bohrung gefunden werden.

Die Begutachtung der Bohrkerne aus dieser Formation zeugt von einer nahezu ungestörten Gesteinskörper mit einem ausgezeichneten RQD-Wert. Angaben über das durchschnittliche Kluftkörpervolumen können aus den erhobenen Daten nicht zuverlässig gemacht werden.

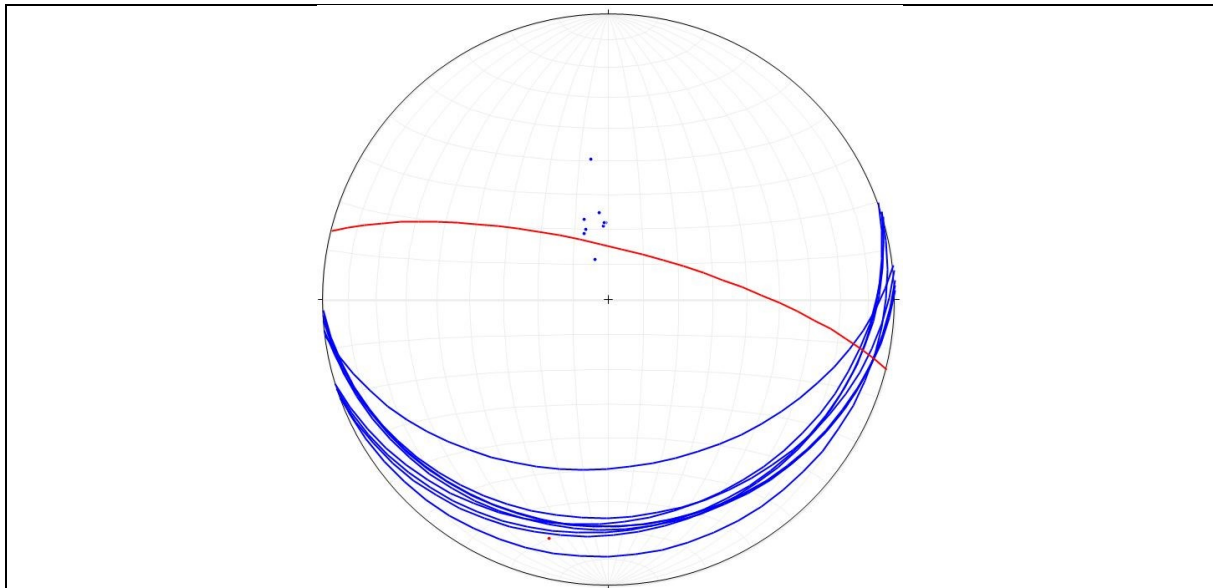


Abbildung 18: Trennflächenscharen der Birmenstorfer Schichten

Ø Messwerte S: 169|23

Ø Trennflächenabstand [m]: 0,2 – 0,6

Ø Messwerte K1: 014|75

Ø Trennflächenabstand [m]: 0,35

Ø Kluftkörpervolumen [m³]: k. A.

Kluftkörperform: k. A.

2.5.5 Spatkalk

Die Daten aus den Kernbohrungen offenbaren ähnliche Gegebenheiten hinsichtlich der Strukturgeologie wie in den zuvor untersuchten Formationen. Zusätzlich zur Schichtung treten die beiden Trennflächenscharen K1 und K3 im Spatkalk wiederholt auf (Abbildung 19):

S-Trennflächenschar (blau): Die nach Süden einfallenden Schichten zeigen lediglich in ihrer Neigung eine geringe Varianz.

K1-Trennflächenschar (rot): Die Kluftschar fällt unter einem steilen Winkel von rund 70° nach NNE ein. Die Streichrichtung zeigt einen WNW – ESE Trend mit geringfügigen Abweichungen.

K3-Trennflächenschar (orange): Die Kluftschar ist nur schwach ausgebildet und zeigt ein mittelsteiles Einfallen Richtung WNW.

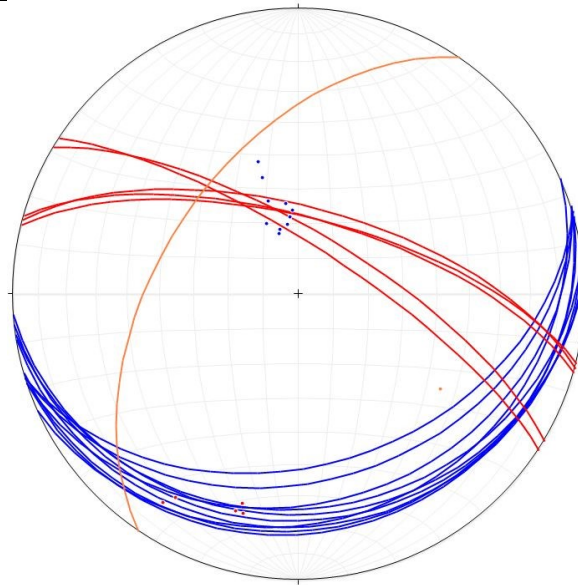


Abbildung 19: Trennflächenscharen des Spatkalkes

| | | | |
|-----------------|--------|---|-------|
| Ø Messwerte S: | 166 25 | Ø Trennflächenabstand [m]: | 0,32 |
| Ø Messwerte K1: | 022 70 | Ø Trennflächenabstand [m]: | 0,16 |
| Ø Messwerte K3: | 304 50 | Ø Trennflächenabstand [m]: | k. A. |
| | | Ø Klufkkörpervolumen [m ³): | k. A. |

Klufkkörperform: meist unregelmäßig blockig, plattig

2.5.6 Zigzag-Zone

Die strukturellen Elemente der Zigzag-Zone sind aus den Kernbohrungen ausgelesen worden. Dabei ist ersichtlich, dass die Schichtung und die Kluftschar K1 ausgebildet sind (Abbildung 20):

S-Trennflächenschar (blau): Die Schichtflächen zeigen im Vergleich mit den vorherigen Auswertungen Abweichungen bezüglich ihrer Einfallrichtung, welche nach SE ausgerichtet ist. Bezüglich des Fallwinkels mit durchschnittlich 23° ist eine Fortsetzung des Trends erkennbar.

K1-Trennflächenschar (rot): Die Trennflächenschar ist nur undeutlich ausgebildet und entspricht weitgehend dem Verlauf der vorigen Formationen.

Generell geht aus den Kernbohrungen hervor, dass die Formationen einen mittleren bis hohen RQD-Wert aufweisen, was auf einen geringen Durchtrennungsgrad schließen lässt. Offene Klüfte konnten in den Bohrkernen nicht festgestellt werden.

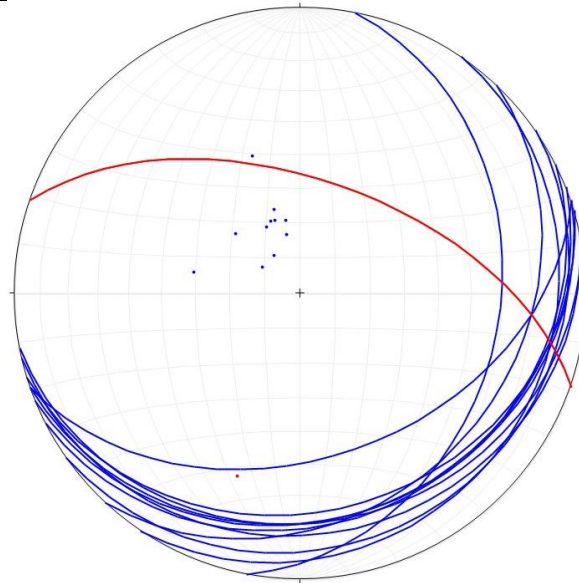


Abbildung 20: Trennflächenscharen der Zigzag-Zone

| | | | |
|-----------------|--------|---|-------|
| Ø Messwerte S: | 149 23 | Ø Trennflächenabstand [m]: | 0,75 |
| Ø Messwerte K1: | 019 57 | Ø Trennflächenabstand [m]: | k. A. |
| | | Ø Kluftkörpervolumen [m ³]: | k. A. |

Kluftkörperform: unregelmäßig blockig

2.5.7 Hauptrogenstein

Der Hauptrogenstein weist wie die Oberen Effinger Schichten und der Spatkalk zusätzlich zur Schichtung drei Kluftsysteme auf (Abbildung 21).

S-Trennflächenschar (blau): Die Schichtflächen weichen von einer generellen S-gerichteten Einfallsrichtung geringfügig ab und zeigen eine ENE – SWS gerichtete Streichrichtung. Zudem geht mit 35° eine steilere Neigung der Schichten aus den Messungen hervor.

K1-Trennflächenschar (rot): Die Kluftschär fällt steil nach NE unter einem Winkel von rund 73° ein. Die Öffnungsweiten betragen nur wenige Millimeter.

K3-Trennflächenschar (orange): Die N – S verlaufende Kluftschär tritt in der gesamten Formation auf. Die steil stehenden Flächen sind besonders gut zu erkennen, da sie große, glatte Flächen mit Harnischen an den Bruchwänden ausbilden. Sie haben Öffnungsweiten von mehreren Millimetern.

K5-Trennflächenschar (braun): Bereits in den Unteren Effinger Schichten konnte die Kluftschär gefunden werden. Im Westen der Formation fallen die Klufflächen unter einem steilen Winkel

nach NNW ein, wogegen im Osten eine geringfügig geänderte Abweichung nach NNE zu verzeichnen ist.

Aus den Auswertungen der Kernbohrungen geht hervor, dass der RQD-Wert starken Schwankungen unterlegen ist. Teils erreicht er mittlere Werte, sodass in diesen Bereichen von einem starken Durchtrennungsgrad ausgegangen werden muss. Zudem sind sowohl im Gelände als auch in den Bohrkernen im östlichen Bereich zahlreiche offene Klüfte mit einer Öffnungsweite bis 2 cm mit Calcitkristallen erkennbar. Zwischen dem Oolithen treten wiederholt wenige Zentimeter dünne Mergellagen auf. Zudem treten schichtparallel und senkrecht dazu viele Stylolithen auf.

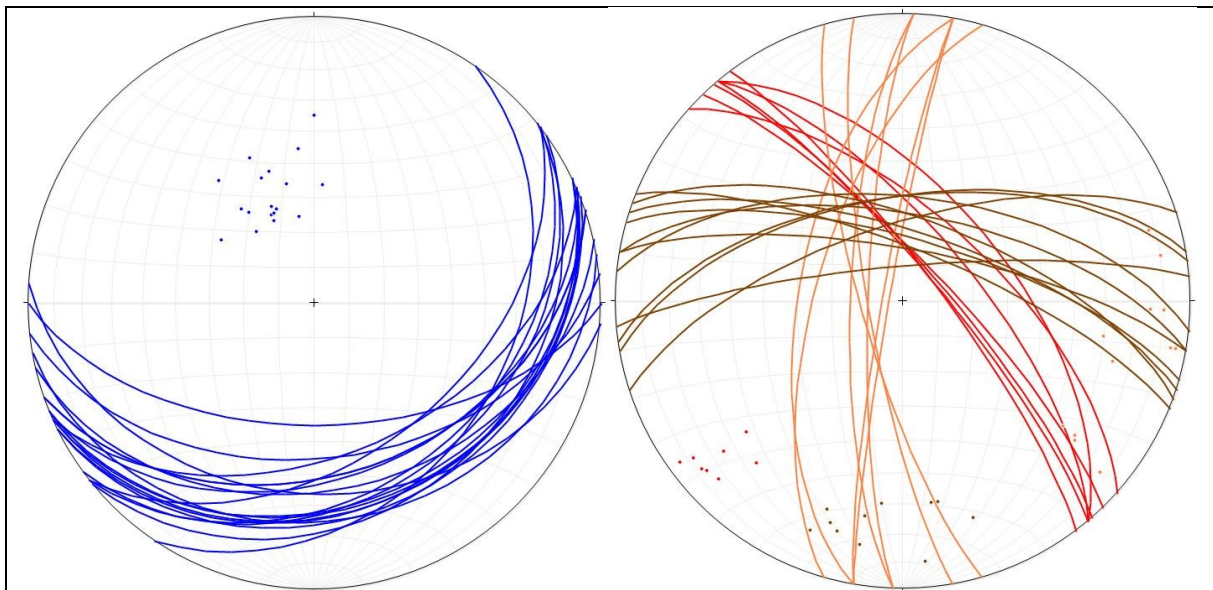


Abbildung 21: Trennflächenscharen des Hauptrogensteines

| | | | |
|-----------------|--------|---|-------------|
| Ø Messwerte S: | 157 35 | Ø Trennflächenabstand [m]: | 0,58 – 0,23 |
| Ø Messwerte K1: | 049 75 | Ø Trennflächenabstand [m]: | 0,20 – 0,35 |
| Ø Messwerte K3: | 285 73 | Ø Trennflächenabstand [m]: | 0,18 – 0,67 |
| Ø Messwerte K5: | 007 68 | Ø Trennflächenabstand [m]: | 0,18 – 0,75 |
| | | Ø Kluftkörpervolumen [m ³]: | 0,062 |

Kluftkörperform: plattig

Eine Übersicht der ausgewerteten Trennflächenscharen gibt Abbildung 22 wider.

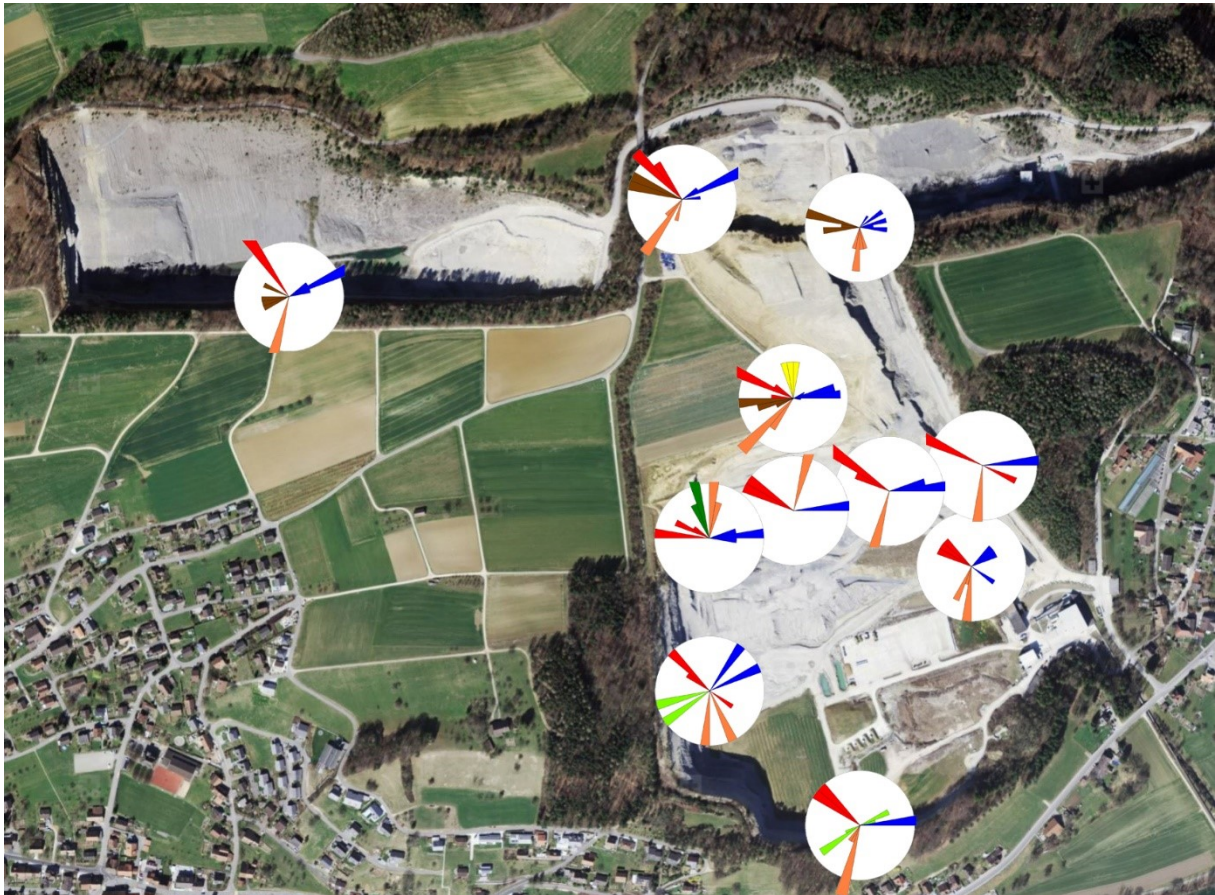


Abbildung 22: Trennflächenscharen mit Darstellung in Kluftrosendiagrammen

Die Auswertung der Daten hat ergeben, dass die Trennflächenscharen im gesamten Steinbruchareal einheitlich auftreten. Beim Vergleich des Durchtrennungsgrades der einzelnen Formationen konnte eine Varianz festgestellt werden. In den Oberen Effinger Schichten liegt eine starke Zerklüftung vor, woraus ein geringes Klufkörpervolumen resultiert. Die Kalksteine der Gerstenhübel- und Hauptrogensteinformation weisen einen geringeren Durchtrennungsgrad mit einem höheren Klufkörpervolumen auf. Die restlichen Formationen sind durch eine mittlere Zerklüftung charakterisiert. Eine signifikante Erhöhung der Porosität ist durch die geringen Trennflächenabstände nicht zu erwarten.

2.6 Hydrogeologie

Die Kluft- und Grundwasserspiegel werden seit mehreren Jahren über Wasserspiegelmessstellen erfasst und dokumentiert. Generell ist davon auszugehen, dass ein Grundwasserspiegel in den Lockergesteinen existiert, der mit einem Bergwasserspiegel zusammenhängt. Die hydrogeologischen Informationen werden Arbeitsberichten des Ingenieurbüros GEOTEST entnommen. Die Daten wurden über lange Zeiträume an mehreren Pegelmessstellen aufgenommen. Die geographische Lage der Messstellen geht aus Abbildung 23 hervor. Aus den langjährigen Aufzeichnungen ist bekannt, dass mit Ausnahme der Messstelle F03-6 keine signifikanten Spiegelschwankungen aufgetreten sind. Das Verhalten des Wasserspiegels im Bereich der Bohrung F03-6 kann durch eine neu errichtete Drainage im Jahre 2013 erklärt werden. Seitdem sind im Kluftwasserspiegel stärkere Schwankungen sowie ein Abfallen des Wasserspiegels auf die Abbausohle der alten Unteregg zu verzeichnen. Demnach kommt der Wasserspiegel auf Kote der Messstellen F03-1 und F03-2 zu liegen (SCHULER, 2015).



Abbildung 23: Messstellen zur Erfassung der Wasserpegel und Ausdehnung der grundwassergesättigten Lockersedimente (hellblaue Flächen)

Auf Grundlage der Aufzeichnungen aus den Berichten von Geotest konnte der durchschnittliche Kluft- und Grundwasserspiegel aus dem Jahr 2014 ermittelt werden, der für die jeweilige Bohrung in Tabelle 1 angeführt ist.

| Messstelle | RW | HW | Höhe der Messstelle [m ü. M.] | Ø Wasserspiegel 2014 [m ü. M.] | m unterhalb der Geländeoberfläche [m] |
|-----------------|--------|--------|-------------------------------------|--------------------------------------|---|
| F03-1 | 654272 | 252881 | 350,6 | 350,0 | 0,68 |
| F03-2 | 654123 | 252830 | 353,7 | 353,6 | 0,08 |
| F03-3 | 653719 | 252792 | 391,3 | | |
| F03-4 | 653496 | 252573 | 410,5 | 380,3 | 30,15 |
| F03-5 | 653869 | 252683 | 382,0 | | |
| F03-6 | 654123 | 252757 | 395,8 | 355,6 | 40,19 |
| B05-1 | 652645 | 252672 | 459,1 | 416,7 | 42,33 |
| B05-2 | 652631 | 252833 | 503,1 | 462,4 | 40,62 |
| Pumpwerk | 654396 | 252931 | 348,0 | 346,7 | 1,30 |

Tabelle 1: Durchschnittliche Kluft- und Grundwasserpegelstände 2014

Aus den Daten geht hervor, dass der Grundwasserspiegel östlich des Steinbruches im Bereich des Ortsteiles Au der Gemeinde Veltheim bei rund 350 m ü. M. liegt. Demnach liegt dieser im Einflussbereich der Aare und nur wenige Meter unter der Geländeoberfläche. Wie aus geologischen Karten hervorgeht, ist der Großteil der Gebäude östlich und südöstlich des Steinbruches im Bereich Veltheim-Au auf holozänen Lockersedimenten und künstlichen Auffüllungen gegründet. Der Uferbereich der Aare liegt nur wenige Meter über dem Wasserspiegel des Vorfluters. In diesem Bereich dürften die Sedimente generell wassergesättigt vorliegen, wodurch ihr petrophysikalisches Verhalten maßgeblich beeinflusst wird. Da die Lockersedimente im Ufernahen Gebiet kaum ein Gefälle und zudem eine gute Permeabilität aufweisen, kann davon ausgegangen werden, dass sich der Grundwasserspiegel dort in etwa auf dem Niveau des Pumpwerkes befindet. Jene Bereiche sind in Abbildung 23 mit den hellblauen Flächen hervorgehoben. Bei den nicht hellblau markierten Gebieten handelt es sich um Festgesteine mit fehlender oder nur geringer Überdeckung mit Lockersedimenten. Aufgrund der geringen Dichte an Pegelmessstellen sind keine zuverlässigen, flächendeckenden Aussagen über die hydrologischen Verhältnisse möglich. Da die Zirkulationswege für das Wasser unter anderem von der jeweiligen Formation beeinflusst werden, kann der Wasserpegel regional unterschiedlich sein. Aus den Messdaten in Tabelle 1 geht lediglich hervor, dass der Bergwasserspiegel mehrere 10-er Meter unterhalb der Geländeoberfläche liegt. Die meteorischen Niederschläge sickern dabei bis zur nächsten undurchlässigen Schicht durch und entwässern dem natürlichen Gefälle folgend. Innerhalb der Wildegge-Formation besteht nach GANDER (2004) eine nur geringe Wasserwegsamkeit, die an Trennflächen oder Karsthohlräumen gebunden ist. Die Durchlässigkeitsbeiwerte werden auf rund 10^{-4} m/s geschätzt. Im Steinbruch sind mehrere Tropfstellen sichtbar, was zumindest auf eine Teilsättigung der Schichten hinweist. Innerhalb der Hauptrogenstein-Formation ist die Wasserdurchlässigkeit auf Karsthohlräume und tektonischen sowie sedimentäre Trennflächen beschränkt. Zudem vermindern mergelige Zwischenlagen die vertikale Durchlässigkeit. Eine

Quelle mit einer Schüttung von mehreren Litern pro Sekunde tritt im Bereich Steinbitz am Übergang vom Hauptrogenstein zu den Birmenstorfer Schichten aus.

3. Petrophysikalische Formationscharakterisierung

In den Steinbrüchen der Jura-Cement-Fabriken wird das Rohmaterial aus verschiedenen Lithologien gewonnen. Für die Optimierung des Sprengprozesses und der damit verbundenen Erschütterungen ist eine petrophysikalische Charakterisierung sinnvoll.

3.1 Probenbeschreibung

Bei der Entnahme der Proben für die weiterführenden Tests konnte auf Kernbohrungen aus dem Jahre 2014 zurückgegriffen werden. Im Zuge dieser Bohrkampagne wurden fünf Kernbohrungen mit einer Gesamtlänge von 372,75 m abgeteuft und jede der verschiedenen Formationen angetroffen (Abbildung 24). Aus jeder der sieben verschiedenen Formationen wurden mindestens 2 Proben entnommen, die einen ersten Anhaltspunkt für die vorherrschenden Verhältnisse in den Steinbrüchen geben sollten. Dabei wurde darauf geachtet, dass diese - soweit die Möglichkeit bestand - in etwa aus denselben Tiefen entnommen wurden, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu erreichen. Aus den Kernen wurden 100 mm lange Zylinder (ausgenommen Probe GHK-2, deren Höhe 80 mm beträgt) herausgeschnitten. Mit Ausnahme der Bohrung Kb01/14 handelt es sich um vertikale Abteufungen. Die Schrägbohrung Kb01/14 wurde mit einer Neigung von 60° gegen die Horizontale errichtet. Der Durchmesser der Kerne beträgt 100 mm bis auf die Bohrung Kb02/14, bei dem dieser 120 mm beträgt. Die Details sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Petrophysikalische Formationscharakterisierung

| Probennummer | Formation | RW | HW | Bohrloch-ansatzpunkt [m ü.M.] | Durchmesser [mm] | Bohrmeter Oberkante | Bohrmeter Unterkante | Bohrung | Anmerkungen |
|--------------|---------------------------|--------|--------|-------------------------------|------------------|---------------------|----------------------|---------|---------------------|
| OES-1 | Obere Effinger Schichten | 653692 | 252302 | 372,23 | 100 | 19,30 | 19,40 | Kb04/14 | Vertikalbohrung |
| OES-2 | Obere Effinger Schichten | 654052 | 252369 | 361,80 | 100 | 21,40 | 21,50 | Kb05/14 | Vertikalbohrung |
| GHK-1 | Gerstenhübelkalk | 653692 | 252302 | 372,23 | 100 | 34,50 | 34,60 | Kb04/14 | Vertikalbohrung |
| GHK-2 | Gerstenhübelkalk | 654052 | 252369 | 361,80 | 100 | 37,40 | 37,50 | Kb05/14 | Vertikalbohrung |
| UES-1 | Untere Effinger Schichten | 653728 | 252530 | 402,68 | 100 | 30,40 | 30,50 | Kb03/14 | Vertikalbohrung |
| UES-2 | Untere Effinger Schichten | 653728 | 252530 | 402,68 | 100 | 44,50 | 44,60 | Kb03/14 | Vertikalbohrung |
| UES-3 | Untere Effinger Schichten | 653692 | 252302 | 372,23 | 100 | 53,50 | 53,60 | Kb04/14 | Vertikalbohrung |
| BDS-1 | Birmensdorfer Schichten | 653647 | 252678 | 415,38 | 120 | 22,70 | 22,80 | Kb02/14 | Vertikalbohrung |
| BDS-2 | Birmensdorfer Schichten | 653728 | 252530 | 402,68 | 100 | 64,85 | 64,95 | Kb03/14 | Vertikalbohrung |
| SK-1 | Spatkalk | 653647 | 252678 | 415,38 | 120 | 26,60 | 26,70 | Kb02/14 | Vertikalbohrung |
| SK-2 | Spatkalk | 653728 | 252530 | 402,68 | 100 | 68,90 | 69,00 | Kb03/14 | Vertikalbohrung |
| ZZS-1 | Zigzag Schichten | 653647 | 252678 | 415,38 | 120 | 31,40 | 31,50 | Kb02/14 | Vertikalbohrung |
| ZZS-2 | Zigzag Schichten | 653728 | 252530 | 402,68 | 100 | 69,65 | 69,75 | Kb03/14 | Vertikalbohrung |
| HRS-1 | Hauptrogenstein | 653830 | 252765 | 362,17 | 100 | 34,70 | 34,80 | Kb01/14 | Schrägbohrung (60°) |
| HRS-2 | Hauptrogenstein | 653647 | 252678 | 415,38 | 100 | 42,60 | 42,70 | Kb02/14 | Vertikalbohrung |
| HRS-3 | Hauptrogenstein | 653647 | 252678 | 415,38 | 100 | 70,50 | 70,60 | Kb02/14 | Vertikalbohrung |

Tabelle 2: Probenentnahme aus den Kernbohrungen

Petrophysikalische Formationscharakterisierung

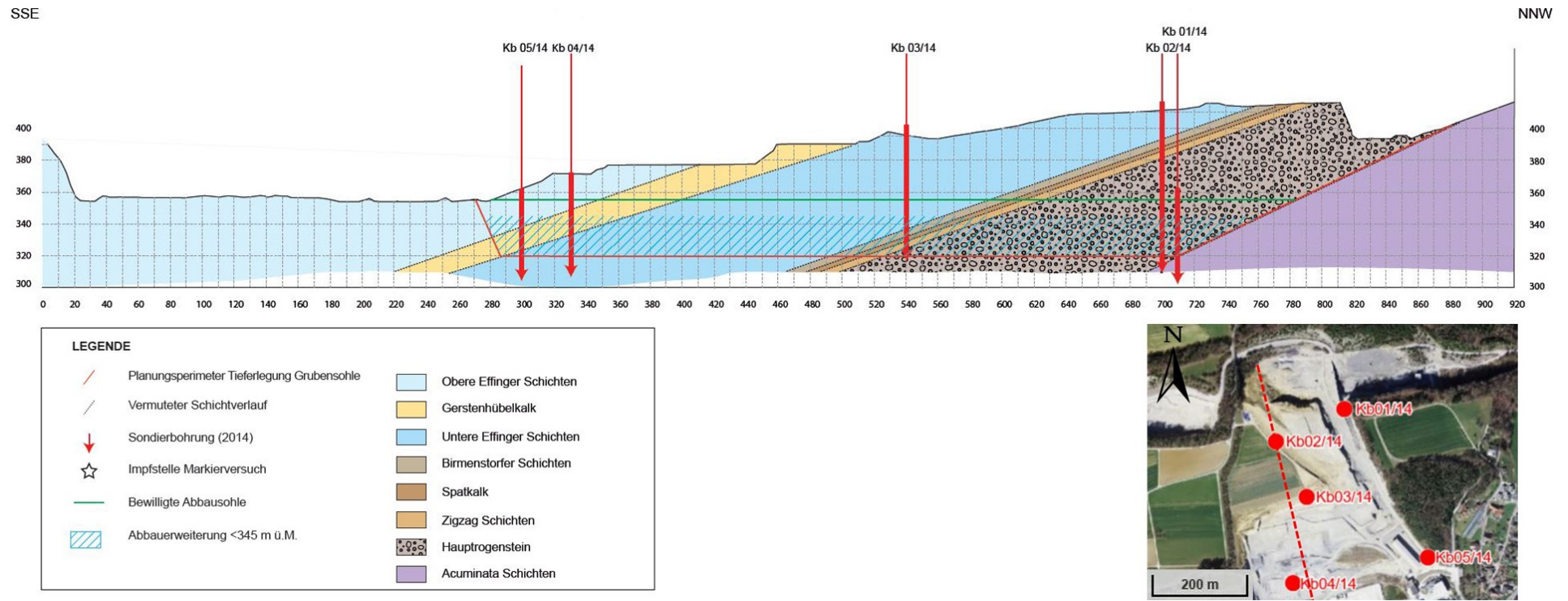


Abbildung 24: Darstellung der Kernbohrungen im NNW - SSE streichenden Profil (rote gestrichelte Linie im rechten Bild) und einem Satellitenbild

Aus den entnommenen Kernen müssen in weiterer Folge kleine Gesteinszylinder gebohrt werden, die eine zufriedenstellende Durchschallung mit Ultraschall erlauben, um so die gewünschten Kennwerte bestimmen zu können. Im Detail wurden folgende Bohrkerne repräsentativ für die weiterführenden Tests entnommen werden:

3.1.1 Obere Effinger Schichten

OES-1: Grauer, massiger Kalkmergel.

OES-2: Dunkelgrauer Mergel mit einzelnen Tonfasern.



Abbildung 25: Bohrkernabschnitte der Oberen Effinger Schichten zur Entnahme der Plugs

3.1.2 Gerstenhübelkalk

GHK-1: Hellgrauer, mikritischer Kalk mit Umlagerungsstrukturen mit schräg stehenden Styrolithen.

GHK-2: Hellgrauer, mikritischer Kalk mit Umlagerungsstrukturen mit vertikal stehenden Styrolithen.



Abbildung 26: Bohrkernabschnitte des Gerstenhübelkalkes zur Entnahme der Plugs

3.1.3 Untere Effinger Schichten

UES-1: Bioklastenführender, hellgrauer Kalkmikrit mit mergeligen Zwischenlagen.

UES-2: Beige-grauer Mergel mit knauerigen Einlagerungen von Kalkspatit. Vereinzelt sind Bioklasten in dunkelgrauer Farbe vorhanden.

UES-3: Dunkelgrauer Mergel.



Abbildung 27: Bohrkernabschnitte der Unteren Effinger Schichten zur Entnahme der Plugs

3.1.4 Birnenstorfer Schichten

BDS-1: Biopelmikrit mit Einlagerungen und Zwischenlagen von Mergel. Vertikale Stylolithen sind ersichtlich.

BDS-2: Dunkelgrauer Biopelmikrit mit hellgrauen Einlagerungen.



Abbildung 28: Bohrkernabschnitte der Birnenstorfer Schichten zur Entnahme der Plugs

3.1.5 Spatkalk

SK-1: Hellgrauer, ooidführender, Biopelmikrit mit feiner, dunkelgrauer Bänderung

SK-2: Hellgrauer, ooidführender, Biopelmikrit mit feiner, dunkelgrauer Bänderung



Abbildung 29: Bohrkernabschnitte der Spatkalk Schichten zur Entnahme der Plugs

3.1.6 Zigzag Schichten

ZZS-1: Hellgrauer Biopelmikrit mit dunkelgrauen, feinen Mergelbändern

ZZS-2: Grauer Bioplemikrit mit dunkelgrauen, feinen Zwischenlagen



Abbildung 30: Bohrkernabschnitte der Zigzag Schichten zur Entnahme der Plugs

3.1.7 Hauptrogenstein

HRS-1: Hellgrauer Oosparit mit schichtungsp parallelen Stylolithen.

HRS-2: Hellgrauer Oosparit mit Bioklasten und schichtungsp parallelen Stylolithen.

HRS-3: Hellgrauer bis hellbrauner Oosparit mit Bioklasten und schichtungsp parallelen sowie vertikalen Stylolithen.



Abbildung 31: Bohrkernabschnitte des Hauptrogensteines zur Entnahme der Plugs

3.2 Kennwertbestimmung

Die Bestimmung der benötigten Größen erfolgte am Institut für Angewandte Geophysik der Montanuniversität Leoben unter der Leitung von Frau Dr. mont. Nina Gegenhuber. Neben den gesteinsdynamischen Messungen sind Kennwerte zur Beurteilung der Sprengbarkeit von Interesse. Zur Bestimmung der Messwerte mussten aus den Bohrkernen kleine Gesteinszylinder entnommen werden, die präzise Ergebnisse garantieren. Diese sollten eine Höhe von rund 20 mm und einen Durchmesser von rund 25 mm aufweisen. Da die Gesteine eine deutlich ausgeprägte Schichtung aufweisen, sind Anisotropieeffekte zu erwarten. Aufgründdessen erfolgte die Entnahme der Plugs aus den Bohrkernen jeweils in Schichtungsrichtung und normal dazu. Da die Dimensionen der Prüfkörper die Ergebnisse stark beeinflussen, wurden diese mit sehr hoher Genauigkeit erfasst und in den weiteren Berechnungen berücksichtigt. An den repräsentativen Proben wurde eine zerstörungsfreie Bestimmung der Parameter mit hoher Genauigkeit durchgeführt. Dabei wurden folgende Größen erfasst:

- Rohdichte
- Korndichte
- Effektive Porosität
- P-Wellengeschwindigkeiten der trockenen Probe
- P-Wellengeschwindigkeiten der wassergesättigten Probe
- S-Wellengeschwindigkeiten der trockenen Probe
- S-Wellengeschwindigkeiten der wassergesättigten Probe

Aus diesen Größen können in weiterer Folge nachkommende Kennwerte abgeleitet werden:

- akustische Impedanz
- Poissonzahl
- dynamischer Elastizitätsmodul
- Schubmodul

Die Ermittlung der Rohdichte erfolgt aus dem gemessenen Volumen und der gemessenen Masse des zylindrischen Probenkörpers. Die Korndichte und die effektive Porosität der Gesteine werden mittels Helium-Pyknometer (Ultrapyknometer 1000) der Firma Quantachrome Instruments gemessen. Dabei wird die Probe in eine luftdichte, zylindrische Kammer eingebracht und die darin vorhandene Luft durch Helium ersetzt. Die Menge des verwendeten Heliums wird gemessen und unter Anwendung des Boyle-Mariottschen

Gesetzes kann über die Masse und das Volumen der Probe die Korndichte ermittelt werden. Es erfolgt eine 3 – 5 malige Messung mit der Dauer von jeweils 3 Minuten. Daraus wird anschließend der Mittelwert gebildet. Die Porosität kann bei bekannter Trockenmasse über die folgende Formel berechnet werden:

$$\phi_{\text{Helium}} = \left(1 - \frac{\rho_{\text{trocken}}}{\rho_{\text{Korn,P}}} \right) * 100$$

ϕ_{Helium} ... mit Helium gefüllter Porenraum [%]

ρ_{trocken} ... Dichte der getrockneten Probe [g/cm^3]

$\rho_{\text{Korn,P}}$... Korndichte der Probe [g/cm^3]

Formel 3-1

Die Bestimmung der P- und S-Wellengeschwindigkeiten erfolgte ebenfalls im Labor mit einem Ultraschallmessgerät. Dabei wurden auch die Anisotropieeffekte der Gesteine untersucht, da davon auszugehen ist, dass sich die seismischen Wellen in Schichtungsrichtung und normal dazu unterschiedlich verhalten. Überdies wurden die Versuche mit wassergesättigten und trockenen Proben durchgeführt. Für die Messungen wurde ein Gerät der Firma Geotron verwendet, welches aus piezokeramischen Elementen besteht, mit dem sowohl die primären als auch sekundären Ausbreitungsgeschwindigkeiten gemessen werden können. Dazu werden die planparallelen Gesteinszylinder mit Ultraschallgel an den Kontaktflächen für eine optimale Ankopplung benetzt und unter 5 bar Druck zwischen dem Signalgeber und dem Empfänger eingespannt. Die Durchschallung erfolgt einmalig mit einem mechanischen Impuls mit einer Frequenz von 80 kHz, wobei dadurch eine hohe Messgenauigkeit garantiert ist. Am Empfänger erfolgt die Aufnahme des Signals durch einen Speicheroszilloskop, der das Signal an den Computer weiterleitet. Die Kompressionswellengeschwindigkeit kann über die Länge und die Zeit, welche die Welle benötigt, um die Probe zu durchlaufen, berechnet werden. Dabei ist zu beachten, dass die Zeit, welche die Welle braucht, um die Prüfköpfe zu durchdringen (Totzeit) von der gemessenen Zeit abgezogen wird. Über die nachstehende Formel kann die P-Wellengeschwindigkeit berechnet werden:

$$v_p = \frac{h}{(\Delta t - t_0)}$$

v_p ... P – Wellengeschwindigkeit [m/s]

h ... Höhe des Probenkörpers [m]

Δt ... gemessene Laufzeitdifferenz [s]

$$t_0 \dots \text{Totzeit [s]}$$

Formel 3-2

Die Ermittlung der S-Wellengeschwindigkeit funktioniert analog. Dabei ist besonders darauf zu achten, dass die Proben unter einem einheitlichen Druck fest eingespannt sind und ein guter Kontakt zu den Prüfkörpern sichergestellt ist. Die Messwerte sind in Tabelle 3 angeführt.

| Allgemein | | | Dichte | | Porosität | Geschwindigkeiten | | | |
|-----------|--------------|---------------------------|-----------------------------|---------------------------------|-----------|-------------------|----------------|----------|----------------|
| Probe | Orientierung | Formation | Dichte [g/cm ³] | Korndichte [g/cm ³] | [%] | Vp [m/s] | Vp (ges) [m/s] | Vs [m/s] | Vs (ges) [m/s] |
| OES-2 | | Obere Effinger Schichten | 2,56 | nicht messbar | | 4057 | 3629 | 2134 | 1590 |
| OES-2 | ⊥ | Obere Effinger Schichten | 2,54 | nicht messbar | | 3476 | | 3431 | |
| OES-1 | | Obere Effinger Schichten | 2,58 | nicht messbar | | 4410 | 4356 | | 1774 |
| OES-1 | ⊥ | Obere Effinger Schichten | 2,58 | nicht messbar | | 3867 | 4091 | 2007 | 1927 |
| GHK-2 | | Gerstenhübelkalk | 2,60 | nicht messbar | | 4681 | 4641 | 2336 | 1956 |
| GHK-2 | ⊥ | Gerstenhübelkalk | 2,59 | nicht messbar | | 4198 | 4198 | 2095 | |
| GHK-1 | | Gerstenhübelkalk | 2,66 | 2,74 | 3,23 | 5922 | 6162 | 2953 | 2508 |
| GHK-1 | ⊥ | Gerstenhübelkalk | 2,64 | 2,74 | 3,86 | 5513 | 6049 | 2786 | 2700 |
| UES-3 | | Untere Effinger Schichten | 2,49 | 2,70 | 7,68 | 3306 | | 1845 | |
| UES-3 | ⊥ | Untere Effinger Schichten | 2,53 | 2,71 | 6,78 | 2681 | | 1431 | |
| UES-1 | | Untere Effinger Schichten | 2,56 | 2,74 | 6,74 | 4121 | | 2376 | |
| UES-1 | | Untere Effinger Schichten | 2,53 | 2,74 | 7,34 | 4125 | 4157 | 2168 | 1755 |
| UES-1 | ⊥ | Untere Effinger Schichten | 2,54 | 2,74 | 7,11 | 3817 | | 2362 | |
| UES-1 | ⊥ | Untere Effinger Schichten | 2,56 | 2,73 | 6,11 | 3482 | 3636 | 2006 | 1710 |
| BDS-1 | | Birmensdorfer Schichten | 2,55 | 2,74 | 7,01 | 4519 | | 2602 | |
| BDS-1 | | Birmensdorfer Schichten | 2,55 | 2,74 | 6,90 | 3896 | | 2175 | |
| BDS-1 | ⊥ | Birmensdorfer Schichten | 2,58 | 2,74 | 6,04 | 3796 | 3907 | 2120 | 1744 |
| BDS-2 | | Birmensdorfer Schichten | 2,42 | 2,73 | 11,58 | 4363 | | 2177 | |
| BDS-2 | ⊥ | Birmensdorfer Schichten | 2,55 | 2,75 | 7,14 | 3423 | | 1709 | |
| SK-1 | | Spatkalk | 2,55 | 2,74 | 7,05 | 3909 | | | |
| SK-1 | ⊥ | Spatkalk | 2,60 | 2,75 | 5,49 | 3998 | | 2362 | |
| SK-2 | | Spatkalk | 2,62 | 2,78 | 5,76 | 5060 | 5186 | 2524 | 2312 |
| SK-2 | ⊥ | Spatkalk | 2,58 | 2,77 | 6,85 | 3513 | 4316 | | 1760 |
| ZZS-1 | | Zig Zag Schichten | 2,60 | 2,75 | 5,58 | 3279 | | 1637 | |
| ZZS-1 | ⊥ | Zig Zag Schichten | 2,62 | 2,77 | 5,48 | 3983 | | 1988 | |
| ZZS-2 | | Zig Zag Schichten | 2,44 | 2,73 | 10,79 | 2768 | | | |
| ZZS-2 | ⊥ | Zig Zag Schichten | 2,40 | 2,73 | 12,02 | 1341 | | | |
| HRS-1 | | Hauptrogenstein | 2,56 | 2,76 | 7,44 | 5133 | 5366 | 2624 | 2524 |
| HRS-1 | | Hauptrogenstein | 2,54 | 2,76 | 7,92 | 5200 | 5226 | 2699 | 2128 |
| HRS-1 | ⊥ | Hauptrogenstein | 2,57 | 2,77 | 7,25 | 5322 | 5349 | 2654 | 2179 |
| HRS-1 | ⊥ | Hauptrogenstein | 2,64 | 2,88 | 8,22 | 4974 | 5349 | 2481 | 2181 |

| | | | | | | | | | |
|-------|---|-----------------|------|---------------|-------|------|------|------|------|
| HRS-2 | | Hauptrogenstein | 2,43 | 2,77 | 12,54 | 3640 | 4605 | | |
| HRS-2 | ⊥ | Hauptrogenstein | 2,43 | 2,77 | 12,47 | 3596 | 4757 | 1920 | 1875 |
| HRS-3 | | Hauptrogenstein | 2,47 | nicht messbar | | 3893 | 4413 | 2077 | 1798 |
| HRS-3 | ⊥ | Hauptrogenstein | 2,41 | 2,77 | 13,06 | 4173 | 4376 | 2403 | 1782 |

Tabelle 3: Labormesswerte der beprobten Formationen

Die elastischen Eigenschaften der Gesteine werden nach SCHÖN (1983) von vier wesentlichen Einflussfaktoren bestimmt. Diese sind:

- Mineralsubstanz
- Verfestigungsgrad
- Klüftigkeit, Porosität und Porenfluide
- Druck und Temperatur

Als Haupteinflussfaktor gilt die Porosität. Nimmt diese zu, so resultiert dies in einer Abnahme der P-Wellengeschwindigkeiten. Diese ist besonders innerhalb der einzelnen Formationen gut zu sehen, wie aus der nachstehenden Abbildung 32 am Beispiel des Hauptrogensteines hervorgeht.

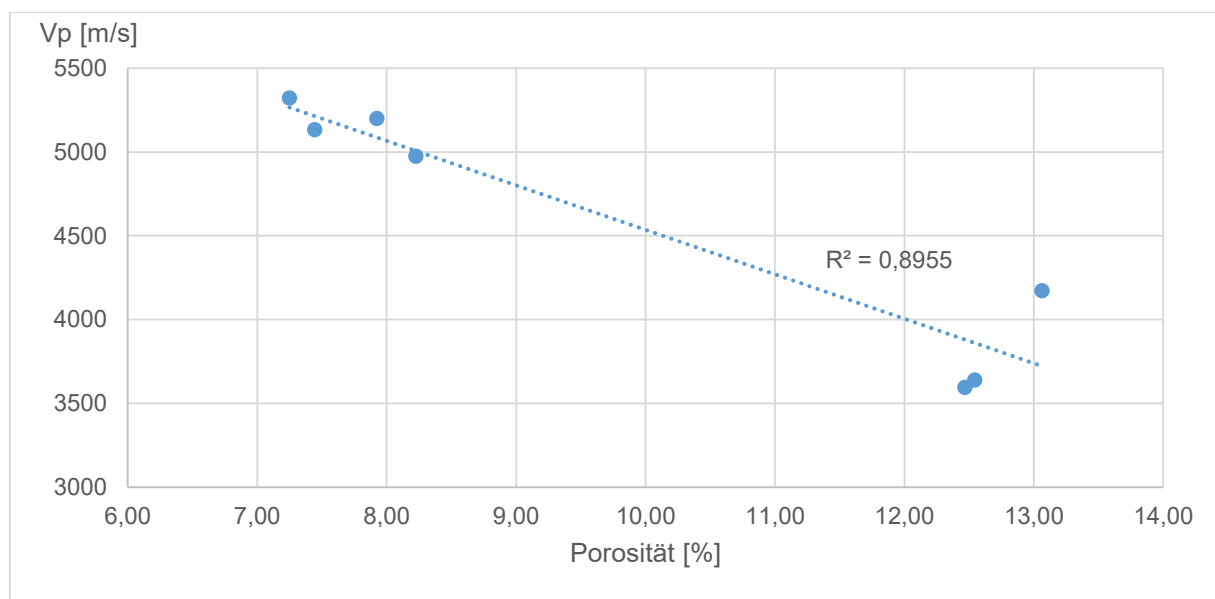


Abbildung 32: Abhängigkeit der P-Wellengeschwindigkeit von der Porosität am Beispiel des Hauptrogensteines

Die Abhängigkeit der elastischen Eigenschaften von Druck und Temperatur wurde ebenfalls experimentell nachgewiesen. Demzufolge ist nach SCHÖN (1983) ein höherer Einfluss des Druckes zu verzeichnen, je höher die Porosität und der Tongehalt in den Proben ist. Im Gegensatz zur Porosität tritt ein nichtlinearer Zusammenhang zwischen dem Druck und der P-Wellengeschwindigkeit auf. Einer weiteren Beobachtung zufolge ist eine Zunahme der Wellengeschwindigkeiten mit steigendem Druck zu verzeichnen, wobei sich diese jedoch für die P- und S-Wellen unterschiedlich verhalten. Mit zunehmender Abteufung des Abbaues ist ein steigender Überlagerungsdruck zu erwarten, der zur Erhöhung der seismischen

Wellengeschwindigkeiten führen wird. Insbesondere bei niedrigen Drücken von 2-3 MPa ist von einer deutlichen Erhöhung der Wellengeschwindigkeiten auszugehen. Bei deutlich höheren Drücken nimmt der Einfluss stark ab. Bei einer Druckentlastung, beispielsweise durch das Entfernen der darüber liegenden Gesteine im Zuge des Abbaus ist nur von einer relativ schwachen Abnahme der Ausbreitungsgeschwindigkeiten im Gestein auszugehen (SCHÖN, 1983). Bei einer geplanten Absenkung der Steinbrüche auf eine Sohle von 320 m ü. M. würde aufgrund der überlagernden Schichten eine maximale Druckzunahme von 2,5 MPa auftreten. Nach VOLAROVIC et al. (1977) sind experimentelle Werte für Kalkstein bekannt, wonach unter dem dort vorherrschenden Druckregime eine Erhöhung der P-Wellengeschwindigkeit von rund 300 m/s auszugehen ist. Eine weitere Beeinflussung der Wellengeschwindigkeiten ist durch das Vorhandensein von Porenfluiden gegeben. Demnach kann einerseits eine Veränderung der elastischen Eigenschaften durch den Porenhalt selbst, andererseits durch die Einwirkung des Porenfluides wie auf Kornkontakte erfolgen (SCHÖN, 1983). Da im Bereich des Grundwasserspiegels von einer nahezu vollständigen Wassersättigung ausgegangen werden kann, liefern die Labormesswerte der wassergesättigten Proben gute Anhaltswerte (V_p (ges), V_s (ges) in Tabelle 3). Aus diesen geht hervor, dass die Wellengeschwindigkeiten tendenziell ansteigen. An einigen Probenkörper der Oberen Effinger Schichten konnte eine Verminderung der Ausbreitungsgeschwindigkeiten festgestellt werden, wobei dieser Effekt vermutlich auf den Anteil der quellfähigen Tonminerale zurückzuführen ist. An einigen gesättigten Proben konnten die Tests aufgrund Wasserunbeständigkeit nicht durchgeführt werden.

Aus den gemessenen Größen können die gesteinsdynamischen Kennwerte und die Anisotropiekoeffizienten für die seismischen Geschwindigkeiten unter Anwendung der nachfolgenden Formeln abgeleitet werden. Der Geltungsbereich der Formeln liegt bei einem homogenen, isotropen Medium. Aus den Geländebegehungen und der Literaturrecherche kann dies näherungsweise für die einzelnen Formationen angenommen werden.

$$Av = \frac{v_{||} - v_{\perp}}{v_{\perp}}$$

$Av_{p,s}$... Anisotropiekoeffizient für P – bzw. S – Wellen

$v_{||}$... P – bzw. S – Wellengeschwindigkeit in Schichtungsrichtung

v_{\perp} ... P – bzw. S – Wellengeschwindigkeit normal zur Schichtung

Formel 3-3

$$Z = \rho_0 * v_p$$

Z ... akustische Impedanz [$kg/m^2 * s$]

ρ_0 ... Rohdichte [kg/m^3]

v_p ... P – Wellengeschwindigkeit [m/s]

Formel 3-4

$$\nu = \frac{\frac{1}{2} * \frac{v_p^2}{v_s^2} - 1}{\frac{v_p^2}{v_s^2} - 1}$$

ν ... Poissonzahl [–]

v_p ... P – Wellengeschwindigkeit [m/s]

v_s ... S – Wellengeschwindigkeit [m/s]

Formel 3-5

$$E = \rho_0 * v_p^2 * \frac{(1 - 2\nu) * (1 + \nu)}{(1 - \nu)}$$

E ... dynamischer E – Modul [$kg/m * s^2$]

ρ_0 ... Rohdichte [kg/m^3]

v_p ... P – Wellengeschwindigkeit [m/s]

ν ... Poissonzahl [–]

Formel 3-6

$$G = \rho_0 * v_s^2$$

G ... Schubmodul [$kg/m * s^2$]

ρ_0 ... Rohdichte [kg/m^3]

v_s ... S – Wellengeschwindigkeit [m/s]

Formel 3-7

Aus den Labormessungen in Tabelle 3 konnten folgende Größen berechnet werden:

Petrophysikalische Formationscharakterisierung

| Allgemein | | | Anisotropie | | Impedanz | Poisson- zahl | E-Modul | G-Modul |
|-----------|-------------------|---------------------------|-------------|------------|---|------------------|---|---|
| Probe | Orien- tierung | Formation | Avp [-] | Avs [-] | Z [10 ⁶ kg/m ² *s] | N [-] | E [10 ⁶ kg/m ² *s ²] | G [10 ⁶ kg/m ² *s ²] |
| OES-2 | | Obere Effinger Schichten | 0,17 | -0,61 | 10,4 | 0,309 | 7,51 | #NV |
| OES-2 | ⊥ | Obere Effinger Schichten | 0,17 | -0,61 | 8,8 | #NV | #NV | 10397,2 |
| OES-1 | | Obere Effinger Schichten | -0,86 | #NV | 11,4 | #NV | #NV | 11645,1 |
| OES-1 | ⊥ | Obere Effinger Schichten | 0,14 | #NV | 10,0 | 0,316 | 7,07 | 29879,9 |
| GHK-2 | | Gerstenhübelkalk | 0,12 | 0,1 | 12,1 | 0,334 | 8,07 | 14163,7 |
| GHK-2 | ⊥ | Gerstenhübelkalk | 0,12 | 0,1 | 10,9 | 0,334 | 7,23 | 11371,6 |
| GHK-1 | | Gerstenhübelkalk | 0,07 | 0,06 | 15,7 | 0,335 | 10,44 | 23156,6 |
| GHK-1 | ⊥ | Gerstenhübelkalk | 0,07 | 0,06 | 14,5 | 0,329 | 9,87 | 20479,4 |
| UES-3 | | Untere Effinger Schichten | 0,23 | 0,22 | 8,2 | 0,274 | 6,54 | 8484,8 |
| UES-3 | ⊥ | Untere Effinger Schichten | 0,23 | 0,22 | 6,8 | 0,301 | 5,02 | 5173,0 |
| UES-1 | | Untere Effinger Schichten | #NV | #NV | 10,5 | 0,251 | 8,76 | 14428,4 |
| UES-1 | | Untere Effinger Schichten | 0,08 | -0,09 | 10,5 | 0,309 | 7,56 | 11914,9 |
| UES-1 | ⊥ | Untere Effinger Schichten | 0,08 | -0,09 | 9,7 | 0,190 | 8,84 | 14176,9 |
| UES-1 | ⊥ | Untere Effinger Schichten | 0,18 | 0,16 | 8,9 | 0,252 | 7,41 | 10305,0 |
| BDS-1 | | Birmensdorfer Schichten | #NV | #NV | 11,5 | 0,252 | 9,57 | 11451,7 |
| BDS-1 | | Birmensdorfer Schichten | 0,03 | 0,03 | 9,9 | 0,274 | 7,88 | 7448,6 |
| BDS-1 | ⊥ | Birmensdorfer Schichten | 0,03 | 0,03 | 9,8 | 0,273 | 7,77 | 17274,9 |
| BDS-2 | | Birmensdorfer Schichten | 0,27 | 0,21 | 10,5 | 0,334 | 7,00 | 12055,8 |
| BDS-2 | ⊥ | Birmensdorfer Schichten | 0,27 | 0,21 | 8,7 | 0,334 | 5,81 | 11579,5 |
| SK-1 | | Spatkalk | -0,02 | #NV | 10,0 | #NV | #NV | 16662,1 |
| SK-1 | ⊥ | Spatkalk | -0,02 | #NV | 10,4 | 0,232 | 8,94 | #NV |
| SK-2 | | Spatkalk | -0,44 | #NV | 13,2 | 0,334 | 8,79 | #NV |
| SK-2 | ⊥ | Spatkalk | 0,44 | #NV | 9,1 | #NV | #NV | 14502,1 |
| ZZS-1 | | Zig Zag Schichten | -0,18 | -0,21 | 8,5 | 0,334 | 5,67 | #NV |
| ZZS-1 | ⊥ | Zig Zag Schichten | -0,18 | -0,21 | 10,4 | 0,334 | 6,93 | #NV |
| ZZS-2 | | Zig Zag Schichten | 1,06 | #NV | 6,7 | #NV | #NV | 6964,3 |
| ZZS-2 | ⊥ | Zig Zag Schichten | 1,06 | #NV | 3,2 | #NV | #NV | 10339,3 |
| HRS-1 | | Hauptrogenstein | 0,03 | 0,05 | 13,1 | 0,323 | 9,08 | 17607,8 |
| HRS-1 | | Hauptrogenstein | 0,03 | 0,05 | 13,2 | 0,316 | 9,38 | 18533,2 |
| HRS-1 | ⊥ | Hauptrogenstein | -0,02 | 0,02 | 13,7 | 0,334 | 9,07 | 18080,5 |
| HRS-1 | ⊥ | Hauptrogenstein | -0,02 | 0,02 | 13,1 | 0,334 | 8,72 | 16261,2 |
| HRS-2 | | Hauptrogenstein | 0,01 | #NV | 8,8 | #NV | #NV | #NV |
| HRS-2 | ⊥ | Hauptrogenstein | 0,01 | #NV | 8,7 | 0,301 | 6,47 | 8944,6 |
| HRS-3 | | Hauptrogenstein | 0,07 | -0,16 | 9,6 | 0,301 | 7,11 | 10644,3 |
| HRS-3 | ⊥ | Hauptrogenstein | 0,07 | -0,16 | 10,1 | 0,252 | 8,35 | 13909,7 |

Tabelle 4: Berechnete Kennwerte aus den Labormessungen

Aus den Labordaten ist zu erkennen, dass eine Varianz hinsichtlich der Messergebnisse existiert, die auch innerhalb der einzelnen Formationen vorhanden ist. Tendenziell kann das

Auftreten hoher Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten für die kompetenten Kalksteine der Haupttrogenstein- und Gerstenhübelkalk-Formation beobachtet werden. Zudem kann erwartungsgemäß von richtungsabhängigen Ausbreitungsgeschwindigkeiten berichtet werden, wobei bis auf wenige Ausnahmen die höheren Werte bei schichtungsparalleler Ausbreitung der seismischen Wellen zustande kommen (Abbildung 33). Negative Werte der Anisotropiekoeffizienten kommen zustande wenn die schichtungsparallelen Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten niedriger sind als jene normal zur Schichtung. Die größten Anisotropieeffekte sind in den Mergelgesteinen der Oberen- und Unteren Effinger Schichten vorhanden.

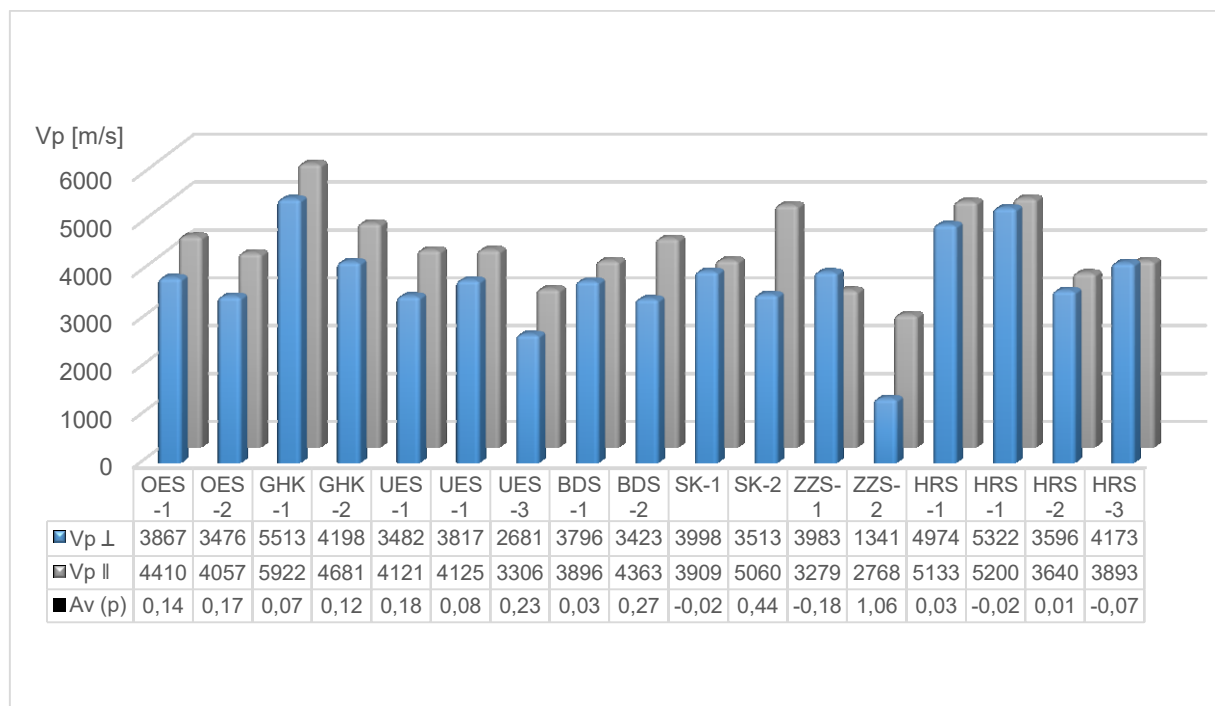


Abbildung 33: Anisotropie der seismischen P-Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten der trockenen Prüfkörper (normal und parallel zur Schichtung)

Hinsichtlich der akustischen Impedanzen resultieren aus den Berechnungen höhere Werte für die Kalksteine der Gerstenhübel- und Haupttrogensteinformation. Die Zigzag-Schichten unterliegen großen Schwankungen und weisen sowohl mittelhohe als auch niedrige Werte auf, wohingegen sich die übrigen Formationen im Mittelfeld bewegen. Als Konsequenz davon ergeben sich in den genannten Schichten auch erhöhte Werte für die Elastizitätsmoduln, da diese unter anderem von der Dichte und den Wellengeschwindigkeiten abhängen.

3.3 Evaluierung der Sprengbarkeit der Lithologien

Für die Sprengbarkeit der verschiedenen Lithologien sind zwei Faktoren maßgeblich, nach denen eine Klassifikation erfolgen kann. Dabei handelt es sich um den Durchtrennungsgrad, der bereits im vorigen Kapitel behandelt wurde sowie die akustische Impedanz der Gesteine. Für die Klassifizierung der einzelnen Formationen wurde das nachstehende Diagramm (Abbildung 34) MÜLLER et. al (2007) verwendet. In dieses wurden die akustische Impedanz und die Trennflächenabstände für die jeweiligen Gesteine eingetragen. Überdies lässt sich die Erschütterungsempfindlichkeit des Gebirges anhand der Grafik abschätzen. Demnach sind für Gesteine niedriger Impedanz sehr hohe Erschütterungen zu erwarten.

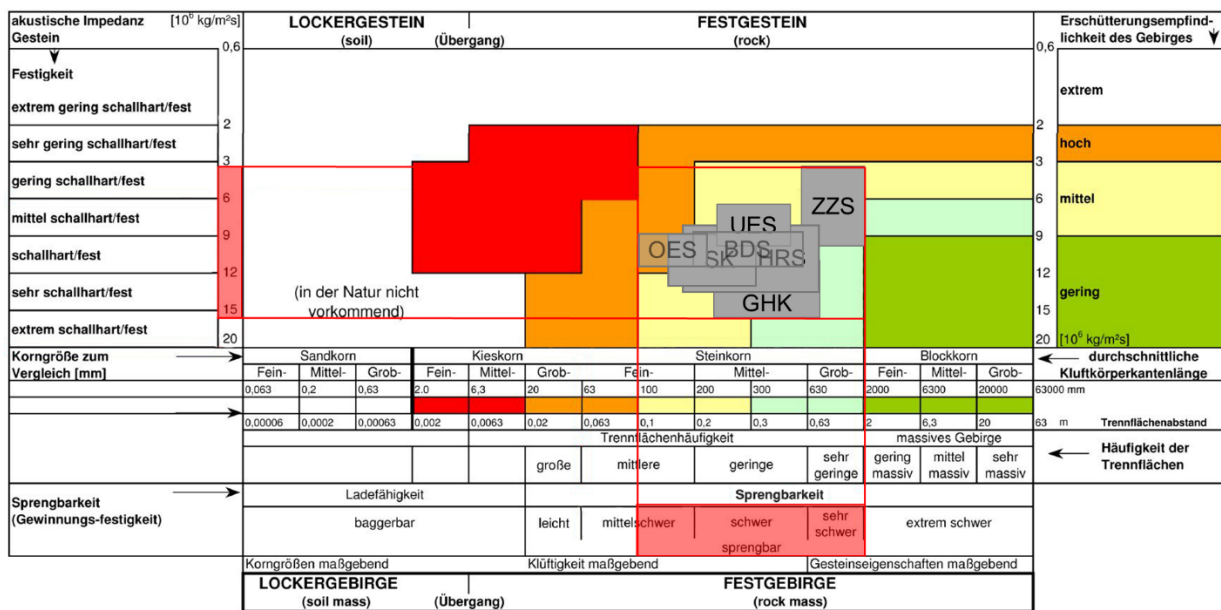


Abbildung 34: Klassifizierung der Sprengbarkeit der Formationen nach MÜLLER et al. (2007); entnommen aus MÜLLER et al. (2009); verändert

Aufgrund der erhobenen Daten kann für alle Formationen eine mittelschwere bis sehr schwere Lösbarkeit mittels Sprengungen prognostiziert werden. Die akustischen Impedanzen zeigen eine Schwankungsbreite von 3,2 – 15,7*10⁶ kg/m²*s. Auf deren Basis beruht eine Beurteilung der Erschütterungsempfindlichkeit des Gebirges. Nach Abbildung 34 resultiert eine Einteilung der Formationen in vier Gruppen:

1. Mittelschwere Sprengbarkeit mit hoher Erschütterungsempfindlichkeit
 - Obere Effinger Schichten
2. Mittelschwere – schwere Sprengbarkeit mit hoher - mittlerer Erschütterungsempfindlichkeit
 - Spatkalk
3. Schwere Sprengbarkeit mit mittlerer Erschütterungsempfindlichkeit
 - Gerstenhübelkalk

- Untere Effinger Schichten
 - Birmenstorfer Schichten
 - Haupttrogenstein
4. Sehr schwere Sprengbarkeit mit mittlerer Erschütterungsempfindlichkeit
- Zigzag Schichten

Hinsichtlich der Erschütterungsempfindlichkeit der verschiedenen Lithologien gibt es theoretische Überlegungen diese über das Verhältnis der Detonationsgeschwindigkeit des Sprengstoffes und den P- und S-Wellengeschwindigkeiten zu reduzieren. ROSSMANITH et al. (1997b) sowie UENISHI & ROSSMANITH (1998) unterscheiden drei mögliche Fälle:

- Supersonischer Fall
Im supersonischen Fall übersteigt die Detonationsgeschwindigkeit jene der P- und S-Wellengeschwindigkeit des Festkörpers. Dadurch kommt es für beide Wellentypen zur Entstehung von zwei kegelförmigen Machfronten. Diese können sich nur dann bilden, wenn die Detonationsgeschwindigkeit die Wellengeschwindigkeiten im Gestein übersteigen. Die Machfronten breiten sich unter supersonischen Verhältnissen hinter der Detonationsfront aus. An der freien Oberfläche kommt es demnach zu einer Wellenüberlagerung von der Scherwelle und der reflektierten PP-Welle sowie der PS-Welle, die in einer optimalen Gesteinszertrümmerung mit niedrigen Erschütterungen resultiert.
- Transsonischer Fall
Die Detonationsgeschwindigkeit übersteigt im transsonischen Fall die S-Wellengeschwindigkeit, liegt aber unter jener der P-Wellen. Infolgedessen entsteht bei den S-Wellen eine Machfront, die eine zertrümmernde Einwirkung auf das Gestein hat.
- Subsonischer Fall
Der subsonische Fall ist durch eine niedrige Detonationsgeschwindigkeit charakterisiert, die sowohl unter der P- als auch S-Wellengeschwindigkeit liegt. Aufgrund der fehlenden Machfronten treten ungünstige Begleiterscheinungen hinsichtlich der Erschütterungen und der Zertrümmerungswirkung auf. Ursache für die erhöhten Erschütterungswerte sind Oberflächenwellen, die bei der Reflexion der Scherwelle an der freien Fläche entstehen.

Die Labordaten der Gesteine wurden zur Untersuchung der jeweiligen Formationen herangezogen. Für das Herauslösen der Gesteine werden bislang drei verschiedene wassergelatinierte Sprengstoffe (Tovex T, Tovex A, Tovex S extr) des Schweizer Herstellers Société Suisse des Explosifs verwendet. Diese zeichnen sich durch ihre unterschiedliche Brisanz aus, welche ein Produkt der Detonationsgeschwindigkeit, Ladedichte und der

spezifischen Energie ist. Die Kennwerte der Sprengstoffe sind in der nachstehenden Tabelle 5 zusammengefasst:

| | Tovex T | Tovex A | Tovex S extr |
|-----------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Energie | 2.81 MJ/kg | 3.5 MJ/kg | 4.9 MJ/kg |
| Dichte | 1.10 g/cm ³ | 1.20 g/cm ³ | 1.25 g/cm ³ |
| Detonationsgeschwindigkeit | 3700 m/s | 3800 m/s | 4000 m/s |

Tabelle 5: Kennwerte der verwendeten Sprengstoffe

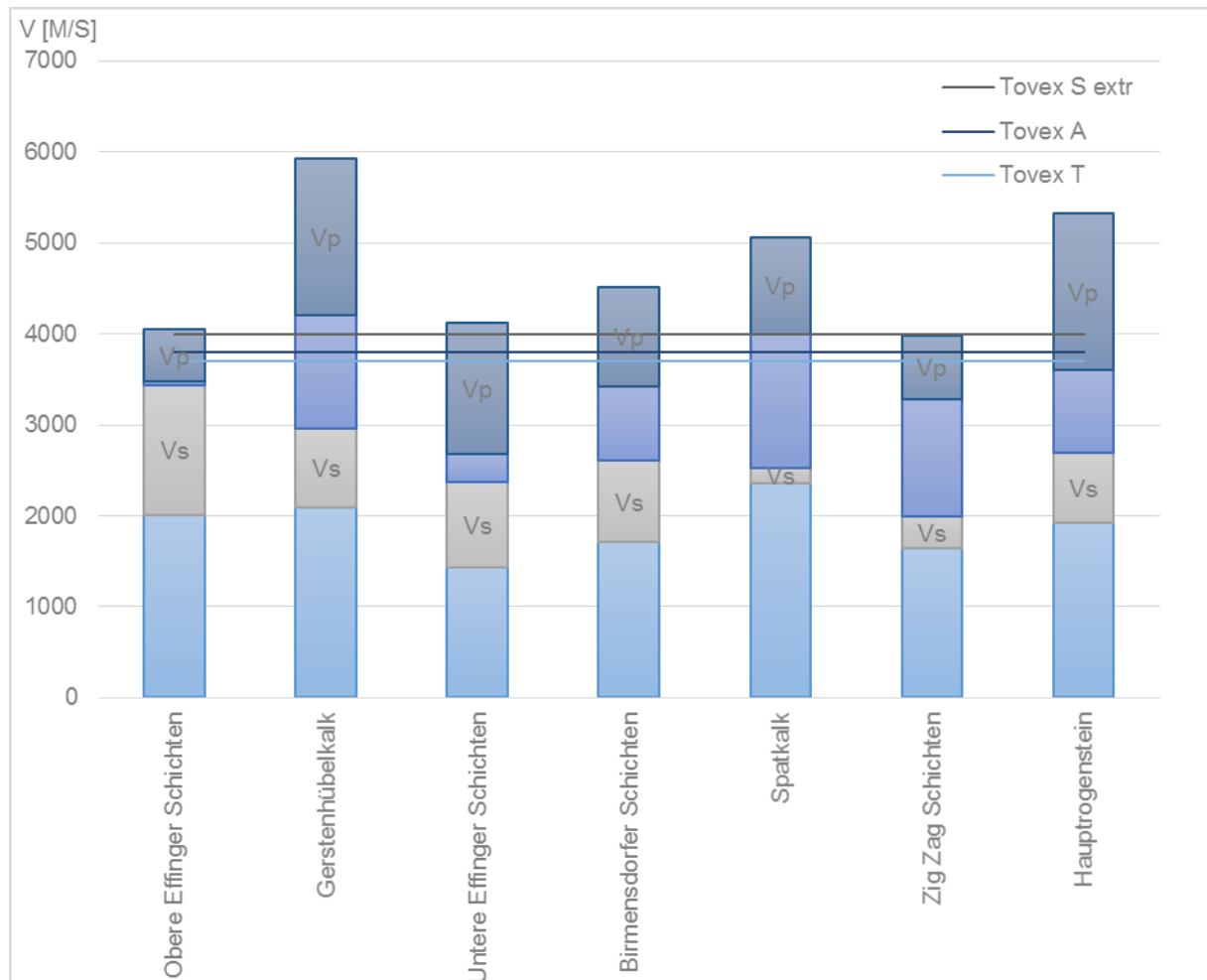


Abbildung 35: Wellengeschwindigkeiten der Formationen und Detonationsgeschwindigkeiten der verwendeten Sprengstoffe

In Abbildung 35 sind die Wellengeschwindigkeiten der getesteten Formationen sowie die Detonationsgeschwindigkeiten der Sprengstoffe eingetragen. Aus dem Diagramm geht hervor, dass unter der Verwendung der angeführten Sprengstoffe in allen Formationen die Detonationsgeschwindigkeit deutlich über der S-Wellengeschwindigkeit liegt. Unter dem Einsatz der oben angeführten Sprengstoffe werden die Sprengungen unter transsonischen Verhältnissen durchgeführt. Durch die etwas höhere Detonationsgeschwindigkeit von Tovex

S extra tritt in den Oberen Effinger Schichten sowie in den Zig Zag Schichten nahezu der supersonische Fall ein, welcher ein Optimum hinsichtlich den Erschütterungen darstellt. Laut MÜLLER et al. (2009) empfiehlt sich die Verwendung von Sprengstoffen, die eine einheitliche oder ähnliche Detonationsgeschwindigkeit besitzen, welche zwischen oder idealerweise über den P- und S-Wellengeschwindigkeiten der Festgesteine liegen. Durch die Entstehung von Machfronten wird das Zertrümmerungsergebnis positiv beeinflusst wobei die Erschütterungen gering gehalten werden. Hinsichtlich der beiden Empfehlungen könnte ein Verbesserungspotential unter Verwendung eines brisanteren Sprengmittels mit einer noch höheren Detonationsgeschwindigkeit, die über der P-Wellengeschwindigkeit liegt, vorhanden sein. Vor allem in den Kalksteinformationen, die generell höhere Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten aufweisen, könnte die Umstellung des Sprengstoffes das Optimierungspotential ausschöpfen.

4. Wellenausbreitung

Bei einer Sprengung werden seismische Wellen induziert, die sich in alle drei Raumrichtungen ausbreiten. Dabei kann der Boden als ideal viskoelastisches Medium betrachtet werden, solange nur geringe Dehnungen auftreten. Die Detonation des Sprengstoffes im Gesteinskörper führt zur Anlage von verschiedenen Wirkungszonen um das Bohrloch. Zu diesen zählt im proximalen Bereich die Zermalmungszone, welche je nach Gesteinsart sowie Sprengstoffart und -menge den rund 2- bis 10-fachen Ladungsdurchmesser aufweist. Mit zunehmendem Abstand zur Sprengladung geht die Zermalmungszone in die Risszone über. Ihre Ausdehnung entspricht in etwa dem 100- bis 120-fachen Bohrlochdurchmesser. Außerhalb der Risszone befindet sich die Erschütterungszone, in der das Gebirge keine weitere Zerlegung infolge der Energieeinwirkung erfährt (LEINS et al., 1973). Die in dieser Arbeit eingesetzten Messgeräte zur Erfassung der Bodenschwingungen und Frequenzen befinden sich weit abseits der Zermalmungs- und Bruchzone. Dort treten nur noch sehr kleine Amplituden auf, weshalb von einem elastischen Materialverhalten des Bodens ausgegangen wird. Dieses kann näherungsweise mit der elastischen Wellentheorie beschrieben werden. Im Zuge der Sprengungen kommt es zur Entstehung von verschiedenen Wellentypen (Abbildung 36). Zu diesen zählen die Primärwellen, die Longitudinalwellen sind. Dabei erfahren die Körner des Bodens eine Auslenkung in Ausbreitungsrichtung. Zum zweiten, wichtigen Wellentyp zählen Sekundärwellen, die durch eine Verschiebung der Bodenteilchen quer zur Fortpflanzungsrichtung charakterisiert sind. Sekundärwellen können durch eine scherende Einwirkung auf den Fels entstehen, wie beispielsweise dem Herabstürzen der gesprengten Felsfragmente. Die P- und S-Wellen breiten sich in einem homogenen Medium kugelförmig aus. Neben den beiden Raumwellen können zwei weitere Wellentypen auftreten, welche sich an der Oberfläche entlang ausbreiten. Dabei handelt es sich um Love- und Rayleigh-Wellen. Love-Wellen sind horizontal polarisierte Scherwellen und entstehen in einem geschichteten Medium durch Interferenz von mehrfach reflektierten S-Wellen. Zur Entstehung von Rayleigh-Wellen kommt es, wenn P- und S-Wellen an die Oberfläche reflektiert werden. Die Rayleigh-Wellen zeigen ein ähnliches Verhalten wie Wasserwellen, dabei bewegen sich die Partikel an der Grenzfläche retrograd (STUDER, 2008).

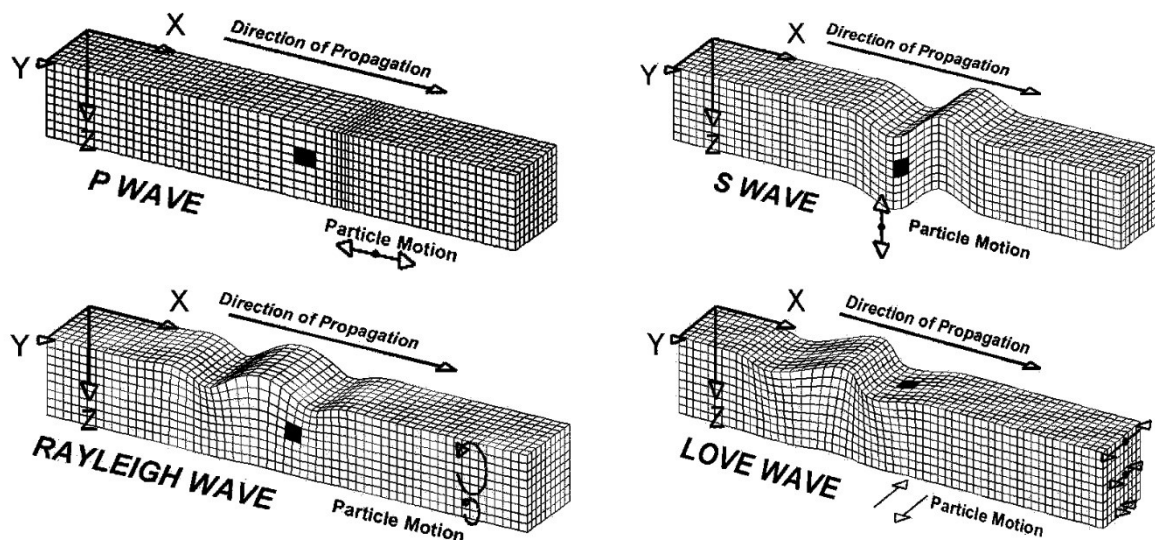


Abbildung 36: Seismische Wellentypen (BRAILE, 2010)

4.1 Wellenausbreitung im elastischen Halbraum

Der Einfluss der Oberflächenwellen, die zusätzlich im Halbraum auftreten, nimmt mit der Tiefe stark ab. Die Wellengeschwindigkeit der Rayleigh-Wellen erreicht abhängig von der Poissonzahl im Lockergestein näherungsweise die S-Wellengeschwindigkeit. Aus experimentellen Untersuchungen ist bekannt, dass die Rayleigh-Wellengeschwindigkeit maximal 10 % geringer sein kann als die Scherwellengeschwindigkeit (RICHART, 1979). Demnach erreichen die Rayleigh-Wellen im Lockergestein rund 97 % der Ausbreitungsgeschwindigkeit von S-Wellen (Abbildung 37). Überdies zeigen sie nach RICHART et al. (1979) eine starke Abnahme der Amplituden mit zunehmender Tiefe, wie aus Abbildung 38 hervorgeht. Die Abnahme der Amplituden wird vor allem vom Verhältnis der Tiefe zur Wellenlänge beeinflusst. Im Allgemeinen treten hochfrequente Schwingungen oberflächennah auf, wohingegen sich die niederfrequenten Schwingungen aufgrund größerer Wellenlänge bis in tiefere Bereiche fortpflanzen können. Liegen geschichtete Untergrundverhältnisse vor, so sind Reflexionen der Wellen zu erwarten. Infolge dieser können die Wellen bis an die Oberfläche vordringen, an der eine totale Reflexion erfolgt. Durch Wiederholung des Prozesses kommt es zur Entstehung einer horizontal polarisierten Oberflächenwelle, die Love-Welle genannt wird. Diese kann sich nur ausbilden, wenn die Scherwellengeschwindigkeit der obersten Schicht niedriger ist als die darunterliegende. Ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit liegt zwischen den Scherwellengeschwindigkeiten der angrenzenden Schichten (STUDER et al., 2008). Eine wichtige Charakteristik der Oberflächenwellen ist ihre Dispersion. Demnach ist eine starke Abhängigkeit ihrer

Fortpflanzungsgeschwindigkeit von der Frequenz gegeben. In den Steinbrüchen der Jura-Cement-Fabriken liegt eine ausgeprägte Schichtung mit wechselnden Lithologien vor, weshalb davon auszugehen ist, dass alle vier Wellentypen auftreten.

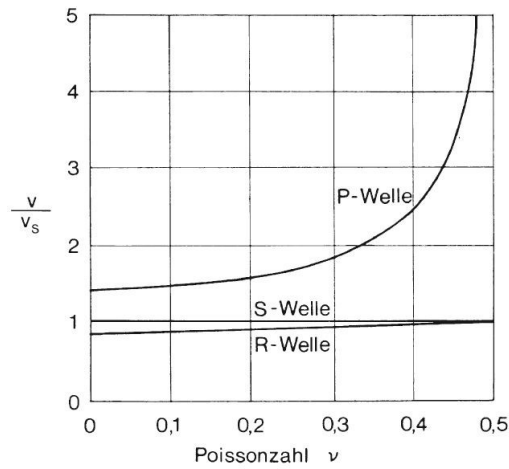


Abbildung 37: Verhältnis der Wellengeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Poissonzahl (RICHART et al., 1979)

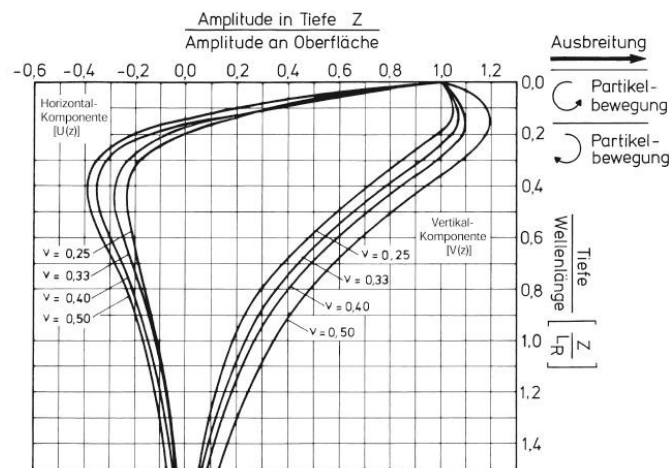


Abbildung 38: Amplituden der Horizontal- und Vertikalkomponenten der Rayleighwellen in Abhängigkeit der Tiefe (RICHART et al., 1979)

4.2 Wellenausbreitung in nicht idealen Verhältnissen

Von nicht idealen Verhältnissen spricht man, wenn ein inhomogener Aufbau des Untergrundes vorliegt. Der Bodenaufbau kann in guter Näherung durch ein Dreiphasengemisch beschrieben werden, welches aus dem Korngerüst, dem Porenfluid sowie dem luftgefüllten Porenraum besteht. Je nach Zusammensetzung der jeweiligen Bestandteile wird das elastische Verhalten des Bodens bestimmt. Einen wesentlichen Einfluss auf das Ausbreitungsverhalten seismischer Wellen nimmt die Schichtung. Aufgrund der verschiedenen Steifigkeiten werden die Wellen an den Schichtgrenzen reflektiert und refraktiert sowie teils konvertiert, sodass ein sehr komplexes Wellenmuster entsteht. Die Laboruntersuchungen der verschiedenen Lithologien im vorigen Kapitel haben gezeigt, dass eine breite Varianz hinsichtlich der Elastizitätsmoduln innerhalb der Festgesteine existiert. Mit steigendem Wassergehalt im Boden kommt es zu einer leichten Erhöhung der P-Wellengeschwindigkeiten, wobei diese bei fast vollständiger Sättigung einen sprunghaften Anstieg verzeichnen. In einem vollständig gesättigten Medium, in dem das Wasser in den Poren frei zirkulieren kann, kommt es zur Entstehung von zwei Kompressionswellen, die jeweils durch das Korngerüst und der Flüssigkeit übertragen werden. Als Grund für die Ausbildung von zwei P-Wellen sind die stark unterschiedlichen Kompressionsmoduln der Flüssigkeit und des Feststoffes anzuführen. Im Untersuchungsgebiet wurde im Festgestein Kluftwasser und im Lockersediment Grundwasser festgestellt. Die Wasserspiegel beeinflussen die Wellenausbreitung insofern, dass von einem geschichteten Untergrund ausgegangen werden kann, in dem wie eingangs erwähnt Wellenreflexion und –refraktion auftreten (STUDER et al., 2008).

4.3 Wellenreflexion und -brechung

An den Grenzflächen zweier unterschiedlicher Materialien treten sowohl Reflexions- als Brechungseffekte der seismischen Wellen auf. Diese beiden Effekte verlangen Unterschiede in den Impedanzen. Der Reflexionskoeffizient zweier verschiedener Schichten kann über die nachstehende Formel für den senkrechten Welleneinfall ermittelt werden (CLAUSER, 2014):

$$R = \frac{\rho_2 * v_2 - \rho_1 * v_1}{\rho_2 * v_2 + \rho_1 * v_1} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{A_R}{A_I}$$

$$\rho_1 \dots \text{Dichte des Mediums 1} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

$$\rho_2 \dots \text{Dichte des Mediums 2} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

$$v_1 \dots \text{Wellengeschwindigkeit des Mediums 1} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

$$v_2 \dots \text{Wellengeschwindigkeit des Mediums 2} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

$$Z_1 \dots \text{seismische Impedanz des Mediums 1} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{s}} \right]$$

$$Z_2 \dots \text{seismische Impedanz des Mediums 2} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{s}} \right]$$

$$A_R \dots \text{Amplitude der reflektierten Welle} [\text{mm}; \text{mm/s}]$$

$$A_I \dots \text{Amplitude der einfallenden Welle} [\text{mm}; \text{mm/s}]$$

Formel 4-1

Bei der Reflexion einer Kompressionswelle wird zusätzlich zur reflektierten Welle eine Scherwelle erzeugt, die ebenfalls eine Reflexion erfährt. Der Großteil der seismischen Welle wird transmittiert. Der nachstehenden Formel zufolge kann der Transmissionskoeffizienten für den ebenen Welleneinfall folgendermaßen berechnet werden (CLAUSER, 2014):

$$T = \frac{2\rho_1 * v_1}{\rho_2 * v_2 + \rho_1 * v_1} = \frac{2Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{A_T}{A_I}$$

$$A_T \dots \text{Amplitude der transmittierten Welle} [\text{mm}; \text{mm/s}]$$

Formel 4-2

Aufgrund der Erhaltung der Amplituden ergibt die Summe der beiden Koeffizienten 1. Diesen Überlegungen gehorchend soll folgendes Szenario kurz beleuchtet werden: In den Mergelgesteinen der Oberen Effinger Schichten wird eine Sprengung vollstreckt. Die durchschnittliche P-Wellengeschwindigkeit und Dichte ist aus den petrophysikalischen Untersuchungen bekannt. Sie wurde mit 3952,5 m/s und 2560 kg/m³ bestimmt. In unmittelbarer Umgebung befinden sich die Häuser der Gemeinde Veltheim-Au, welche auf einem Bachschuttkegel errichtet wurden. Für die seismische Geschwindigkeit der Lockersedimente wird eine mittlere Geschwindigkeit von rund 800 m/s angenommen. Die

Dichte wird auf rund 2000 kg/m^3 geschätzt. Unter Anwendung der Formel 4-1 und Formel 4-2 kann die Veränderung der Amplituden der reflektierten und transmittierten Welle berechnet werden:

$$R = \frac{2000 * 800 - 2560 * 3592,5}{2000 * 800 + 2560 * 3592,5} = -0,70$$

$$T = \frac{2 * 2560 * 3592,5}{2560 * 3592,5 + 2000 * 800} = 1,70$$

Trifft die seismische Welle bei senkrechtem Einfall vom Festgestein auf das Lockergestein so erhöht sich die Amplitude der transmittierten Welle um rund 70 %, wohingegen sich die reflektierte Amplitude um 70 % abschwächt.

4.4 Wellendämpfung

Elastische Wellen verlieren bei ihrer Ausbreitung in einem Medium Energie und die Amplituden werden kleiner mit zunehmender Entfernung von der Quelle. Zur Erklärung können drei Faktoren herangezogen werden (CLAUSER, 2014):

1. Sphärische Divergenz: Die Energie einer Punktquelle breitet sich in einem homogenen und isotropen Halbraum auf Halbkugelflächen aus (Abbildung 39). Dabei verteilt sich ihre Energie auf einer stetig größer werdenden Fläche. Der Energieerhaltung folgend nimmt die Energie pro Flächeneinheit somit ab. Oberflächenwellen hingegen breiten sich näherungsweise unter Berücksichtigung einer geringen Eindringtiefe auf der Mantelfläche eines Zylinders aus. Die Energiedichte der Raumwelle nimmt dadurch mit zunehmender Entfernung um $\frac{1}{r^2}$ ab, wohingegen die Abnahme der Energiedichte von Oberflächenwellen mit $\frac{1}{r}$ angegeben wird. Analog dazu kann die Reduktion der Amplituden mit $\frac{1}{r}$ für Raumwellen und $\frac{1}{\sqrt{r}}$ für Oberflächenwellen angenommen werden. Demnach erfahren Raumwellen eine stärkere Abnahme als Oberflächenwellen, wodurch die letzteren meist energiereicher sind.
2. Intrinsische Dämpfung: Energieverluste entstehen durch Umwandlung der elastischen Energie in andere Energieformen wie Wärme oder Reibungsverluste.
3. Streudämpfung: Die Umlenkung von Teilen der Wellenenergie an kleinskaligen Heterogenitäten führt zur Abnahme der Amplituden.

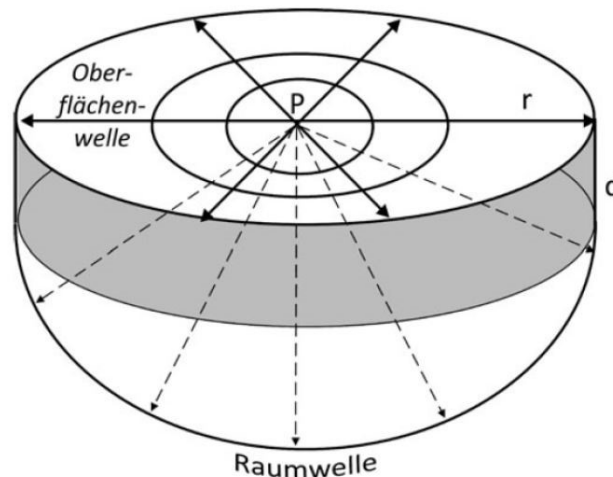


Abbildung 39: Geometrie der Wellenausbreitung

In einem isotropen, homogenen Medium kann die Dämpfung der Amplitude über folgende Gleichung beschrieben werden (SCHÖN, 2011):

$$A(x) = A(x_0) * \left(\frac{x_0}{x}\right)^n * e^{-\alpha(x-x_0)}$$

$A(x)$... Amplitude in der Entfernung x [-]

$A(x_0)$... Amplitude an der Referenzentfernung x_0 (oder an der Quelle) [-]

$\left(\frac{x_0}{x}\right)^n$... Amplitudenabnahme infolge der geometrischen Divergenz [-]

($n = 1$ für kugelförmige Wellenausbreitung bzw. $n = 0$ für ebene Wellen)

α ... Dämpfungsfaktor [m^{-1}]

Formel 4-3

In einigen Fällen ist die Angabe des elastischen Energieverlustes mittels dimensionslosen Qualitätsfaktor üblich. Dieser kann wie folgt berechnet werden (SCHÖN, 2011):

$$Q^{-1} = \alpha * \frac{v}{\pi * f}$$

Q ... Qualitätsfaktor [-]

Q^{-1} ... Anteil der Amplitudendämpfung pro Schwingungszyklus [-]

v ... Wellengeschwindigkeit [$\frac{m}{s}$]

f ... Frequenz [s^{-1}]

Formel 4-4

Wenn der Qualitätsfaktor hohe Werte erreicht wird die Schwingung nur schwach gedämpft. Im Allgemeinen weisen Festkörper mit einem kleinen Schubmodul G eine hohe Dämpfung

auf. Da beispielsweise Lockersedimente einen kleinen Schubmodul im Vergleich zu den Festgesteinen aufweisen unterscheiden sich die Dämpfungswerte von diesen deutlich (CLAUSER, 2014). Unter Anwendung des Qualitätsfaktors kann die Amplitude nach n Schwingungszyklen durch folgende Gesetzmäßigkeit berechnet werden (AKI, 2009):

$$A_n = A_0 * \left(1 - \frac{\pi}{Q}\right)^n$$

A_n ... Amplitude nach n Schwingungszyklen [–]

A_0 ... Anfangsamplitude [–]

n ... Anzahl der Schwingungszyklen [–]

Formel 4-5

Generell ist eine nahezu lineare, frequenzabhängige Absorption der Schwingungen festzustellen. Demzufolge erfahren hohe Frequenzen mit kleinen Wellenlängen eine stärkere Dämpfung als niedrige Frequenzen mit langen Wellenlängen. Dadurch wird das Frequenzspektrum im Zuge der Ausbreitung von seismischen Wellen laufend verändert was der Wirkung eines Tiefpassfilters entspricht (CLAUSER, 2014). Zudem kann von einer stärkeren Dämpfungswirkung unter einer Zunahme der Porosität ausgegangen werden. Porenfluide und der Sättigungsgrad beeinflussen ebenfalls die Dämpfung. Mit einem zunehmenden Anteil von Tonmineralen erhöht sich ebenfalls die Dämpfung (SCHÖN, 2011).

5. Bohr- und Sprengprozesse

Für die Errichtung einer Sprenganlage ist als erster Schritt die Herstellung von Bohrlöchern notwendig, die mit dem Sprengstoff gefüllt werden. Die präzise Ausführung der Bohr- und der sprengtechnischen Arbeiten stellt einen wichtigen Beitrag für optimale Ergebnisse bezüglich der Emissionen dar. Im Rahmen dieses Projektes wird deshalb auf eine gute Dokumentation dieser Arbeitsschritte geachtet.

5.1 Planung der Sprenganlage

Die Planung der Sprenganlage beginnt mit der Auswahl der Sprengstelle. Die Auswahl des geeigneten Gesteins erfolgt je nach Bedarf unter Berücksichtigung der jeweiligen Qualitätsanforderungen. Aufgrund der verschiedenen Gesteinsabfolgen in den Steinbrüchen wechseln die Sprengorte recht häufig. Je nach den platztechnischen Gegebenheiten und der Berücksichtigung von den resultierenden Emissionen erfolgt die Dimensionierung der Sprenganlagen. Nach Festlegung des geeigneten Standortes und den optimalen Maßen erfolgt die Festlegung der sprengtechnischen Größen wie Vorgabe und Seitenabstand. In einem nächsten Schritt wird eine Vermessung der geplanten Sprenganlage angestrebt. Stichprobenartig wurde dies im Rahmen des Projektes für ausgewählte Sprengungen durchgeführt. Durch die Vermessung soll eine Optimierung der Sprenganlage erreicht und ein eventuelles Verbesserungspotential zur Gänze ausgeschöpft werden. Zur Vermessung wurde das Bruchwandprofilierungs- und 3D Laserscanning-System der Firma Pulsar verwendet. Dieser arbeitet mit einer Genauigkeit von $\pm 2,5$ cm und einer maximalen Auflösung von 1 mm. Die Verarbeitung der Daten erfolgt am PC über die Software Quarry6, die die Berechnung aller sprengtechnisch relevanten Parameter ermöglicht. So können nach dem digitalen Prozessieren der Daten die Bohrlöcher in dem Modell mit den entsprechenden Parametern wie Vorgabe, Seitenabstand, Bohrlochdurchmesser, -länge, und Neigung gesetzt und beliebig angepasst werden. Abbildung 40 zeigt beispielhaft den digitalen Scan der Bruchwand und die geplanten Bohrlöcher in blauer Farbe. Bei der Planung können jederzeit die Profile der jeweiligen Bohrlöcher begutachtet werden und Optimierungen aufgrund dessen ausgeführt werden. Abbildung 41 zeigt ein Beispiel eines Profils eines geplanten Bohrloches.

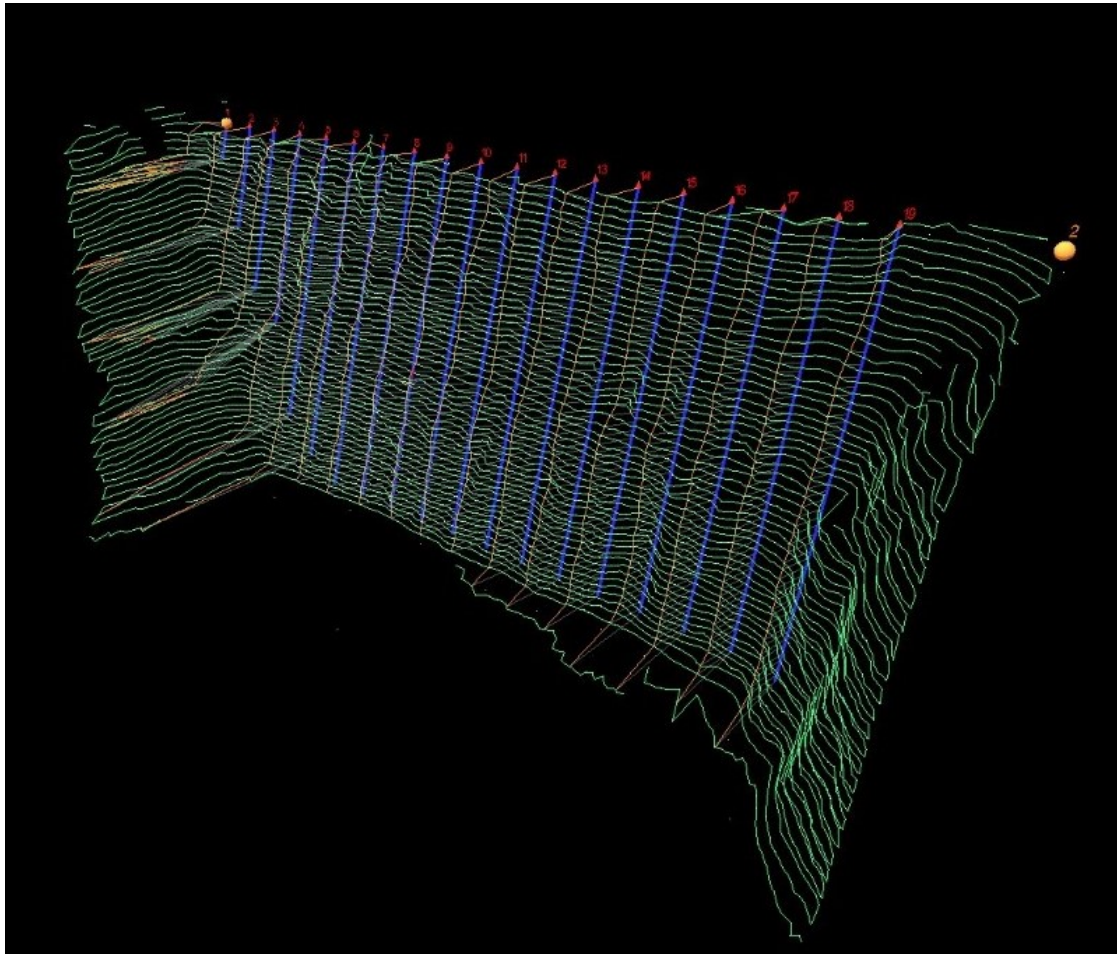


Abbildung 40: Digitaler Scan der Bruchwand (grün) mit geplanten Bohrlöchern (blau); maximale geplante Bohrlöchlänge: 29,3 m

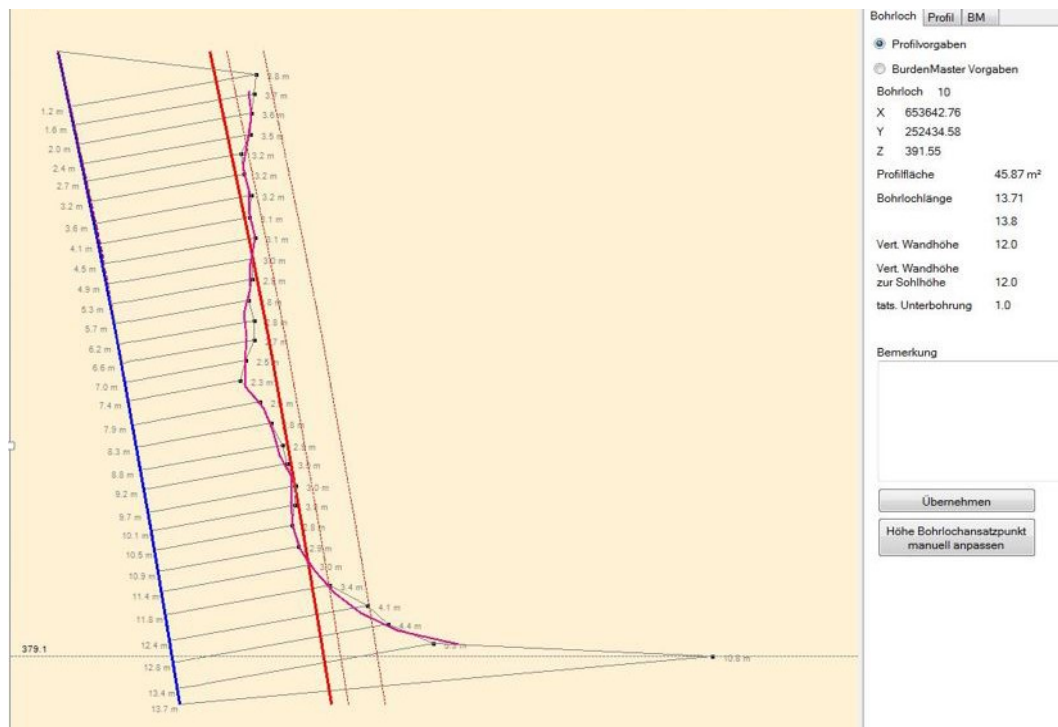


Abbildung 41: Profil eines geplanten Bohrloches; blau: geplanter Bohrlochverlauf, pink: gescannte Bruchwand, rot: kritische Vorgabe, rot gestrichelt: überkritische Vorgabe

5.2 Implementierung des Bohrplanes

Nach vollendeter Planung der Sprenganlage erfolgt das Einmessen der Bohrlochansatzpunkte im Gelände mittels GNSS-Navigation. Anschließend erfolgt das Bohren der Löcher unter Einhaltung einer möglichst hohen Bohrgenauigkeit. Die präzise Ausführung der Arbeiten ist aus mehreren Gründen wichtig. In dieser Arbeit steht die Reduktion der Sprengerschütterungen im Vordergrund. Durch eingespannte Verhältnisse bei zu hohen Vorgaben können diese unnötig erhöht werden. Überdies können Abweichungen zu Sicherheits- und wirtschaftlichen Problemen führen. Die Bohrgenauigkeit wird durch geologische Faktoren, wie Trennflächengefüge und Gesteinsfestigkeiten beeinflusst. Zudem kann eine Kursabweichung durch eine zu hohe Vorschub- und Andruckkraft entstehen.

5.3 Aktualisierung und Umsetzung des Sprengprozesses

Eine Kontrolle der ausgeführten Arbeiten ist mittels Vermessung unter Zuhilfenahme einer Bohrlochsonde möglich und sinnvoll. Dazu wurde eine die Sonde Blasthole Probe Mk3 des Herstellers Pulsar verwendet. Diese ermöglicht das Einmessen der Richtung, Neigung und Länge des Bohrloches. Die Daten können zur Aktualisierung des digitalen Modells der Sprenganlage in die Software importiert werden. Das aktuelle Modell liefert schlussendlich die wahren Bohrlochverläufe und zeigt die Abweichungen vom geplanten Bohrlochverlauf im 3D-Modell und den jeweiligen Profilen an (Abbildung 42). Mehrere Messungen verschiedener Bohrlöcher größerer Länge in verschiedenen Formationen haben gezeigt, dass nur kleine laterale Abweichungen auftreten und die Arbeiten von den Bohristen mit hoher Präzision ausgeführt werden. Hinsichtlich der Bohrlochlänge werden die Löcher bewusst etwas zu tief gebohrt, wobei diese vor dem Laden der Löcher mit Bohrmehl oder Kies aufgefüllt werden, sodass ebenfalls sehr hohe Genauigkeiten erreicht werden. Unter Zuhilfenahme der aktualisierten Profile kann eine optimale Beladung der Bohrlöcher erfolgen, sodass eine hohe Sicherheit, Wirtschaftlichkeit und Umweltfreundlichkeit gewährleistet ist.

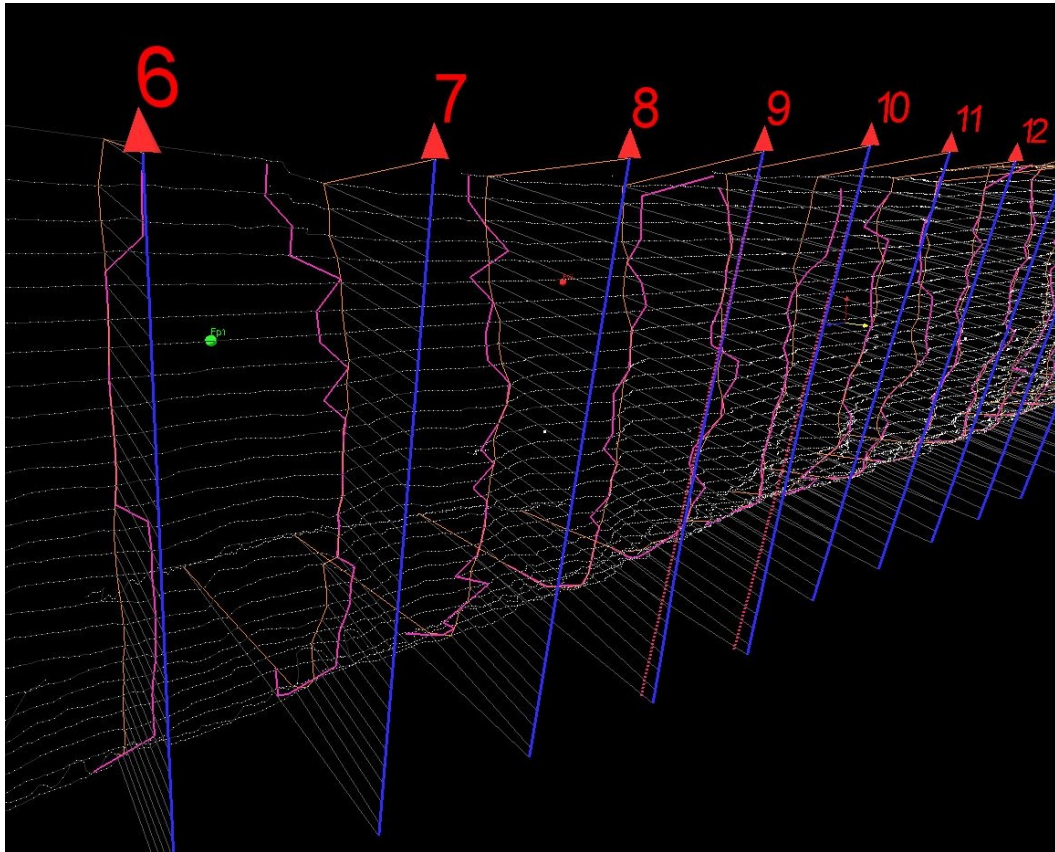


Abbildung 42: Aktualisiertes 3D-Modell der Sprenganlage; blau: geplante Bohrlöcher, rot gestrichelt: wahrer Verlauf der Bohrlöcher 9 und 10, weiß punktiert: Bruchwandscan

5.4 Überwachung des Sprengprozesses

Die Überwachung des Sprengprozesses erfolgt dauerhaft durch Erschütterungsmessungen über Seismometer an verschiedenen Standorten. Die aufgezeichneten Daten der jeweiligen Geräte werden zentral abgespeichert und können mittels Software ausgewertet werden. Nach der Schweizer Norm SN640312a wird das Seismogramm auf eine maximal aufgetretene Schwinggeschwindigkeit einer der drei Komponenten und ihrer dominanten Frequenz reduziert (Kapitel 6.1). Im Rahmen dieses Projektes wurden die Sprengungen zusätzlich mittels Foto und Video dokumentiert. So können aus Zeitlupenaufnahmen zusätzliche Informationen über den Erfolg einer Sprengung gewonnen werden und daraus Verbesserungsvorschläge abgeleitet werden. Da mit der Detonation des Sprengstoffes der Schall sich auch über die Luft ausbreitet und dies als Lärm wahrgenommen wird, wurden vereinzelt auch Schallpegelmessungen durchgeführt, um Gesetzmäßigkeiten zu erkennen und eventuelle Optimierungen vornehmen zu können.

5.5 Prozessdokumentation mittels Datenbank

Um den Einfluss verschiedener Eingangsparameter auf die unvermeidbaren Emissionen der einzelnen Sprengungen zu untersuchen, wurde eine möglichst detaillierte Dokumentation dieser angestrebt. Dazu wurde ein Sprengprotokoll angefertigt, welches von den Sprengbefugten ausgefüllt wurde und anschließend in eine Excel-basierte Datenbank eingetragen wurde. Folgende Parameter werden hinsichtlich des Bohr- und Sprengvorganges erfasst, die anschließend zur Auswertung auf Basis der Erschütterungsaufzeichnungen verwendet werden können:

Allgemeine Daten

- Nummer der Sprengung
- Sprengdatum
- Sprengzeit
- Steinbruchareal
- Typ der Sprengung (Wand-, Flächen-, Auflockerungssprengung)
- Sprengbefugter
- Witterungsverhältnisse
- Bodenverhältnisse
- Windrichtung
- Vermessungsdatum

Geologie

- Formation
- Lithologie

Geometrische und bohrtechnische Parameter

- Koordinaten der Sprengstelle
- Geographische Höhe
- Durchschnittliche Bruchwandhöhe
- Abschlagsbreite
- Abschlagslänge
- Kubatur
- Einfallrichtung der Bruchwand
- Einfallswinkel der Bruchwand
- Einspannung

- Vorgabe
- Seitenabstand
- durchschnittliche Bohrlochlänge
- Bohrlochneigung
- Länge der Unterbohrung
- Bohrlochdurchmesser
- Anzahl der Bohrlochreihen
- Anzahl der Bohrlöcher in jeder Reihe
- Endbesatzlänge
- Zwischenbesatzlänge

Sprengstoffbezogene Parameter

- Handelsname und Dimensionen des verwendeten Sprengstoffes
- Sprengstofftyp
- Gesamte Sprengstoffmenge
- Sprengstoffdichte (niedrigster Wert bei Verwendung mehrerer Sprengstoffe)
- Gesamtlänge der Sprengschnüre 12 g/m
- Gesamte Sprengstoffmenge aller verwendeten Sprengschnüre
- Gesamte Sprengstoffmenge der Sprenganlage
- Maximale Sprengstoffmenge in einem Bohrloch
- Maximale Lademenge pro Zündzeitstufe
- Spezifischer Sprengstoffverbrauch

Zündtechnische Daten

- Zündreihenfolge (symmetrisch, asymmetrisch)
- Zündrichtung
- Zündverfahren (elektrisch, nichtelektrisch, elektronisch)
- Anzahl der Zeitzündstufen elektrisch
- Anzahl der Zeitzündstufen nichtelektrisch
- Anzahl der Zeitzündstufen elektronisch
- Anzahl der Bohrlöcher je Zeitzündstufe
- Oberflächenverzögerungszeit zwischen den Bohrlochreihen
- Oberflächenverzögerungszeit zwischen den Bohrlöchern einer Reihe
- Verzögerungszeit zwischen Oberflächenzünder und Bohrlochzünder

Sonstiges

- Schalldruckpegel
- Distanz der Schalldruckpegelmessstelle zur Sprengstelle
- Steinflug
- Versager

Die Ergebnisse der messtechnischen Erfassung der Schwinggeschwindigkeiten und Frequenzen werden ebenfalls in die Datenbank eingetragen. Für die Auswertungen werden folgende Eingangswerte verwendet:

Messtechnische Daten

- Standort
- Koordinaten
- Geographische Höhe
- Distanz der Messstelle zur Sprengstelle
- Skalierte Distanz
- Maximale Schwinggeschwindigkeit (mm/s)
- Schwinggeschwindigkeit der x-Komponente (mm/s)
- Schwinggeschwindigkeit der y-Komponente (mm/s)
- Schwinggeschwindigkeit der z-Komponente (mm/s)
- Frequenz der maximalen Schwinggeschwindigkeit (Hz)
- Frequenz der x-Komponente (Hz)
- Frequenz der y-Komponente (Hz)
- Frequenz der z-Komponente (Hz)

Die aufgenommenen Daten befinden sich in der Tabelle im Anhang.

6. Sprengerschütterungen

6.1 Messtechnische Erfassung

Für die messtechnische Erfassung der Sprengerschütterungen wurden seitens der Jura-Cement-Fabriken mehrere Seismometer angeschafft. Seit mehreren Jahren sind nun Messgeräte der Firma GeoSIG im Einsatz. Es handelt sich dabei um Messgeräte aus der Reihe GMS^{plus}, die eine Aufzeichnung rund um die Uhr gewährleisten (Abbildung 43). In den Instrumenten sind triaxiale Sensoren mit der Bezeichnung VE-33 zur Erfassung der Schwinggeschwindigkeiten eingebaut. Mit diesen kann eine Frequenzbandbreite von 4,5 – 315 Hz erfasst werden. Bei Stromausfall kann auf eine integrierte Stromversorgung zurückgegriffen werden, um eine Fortsetzung der Aufzeichnungen zu gewährleisten. Die Daten werden über das Mobilfunknetz zu einem zentralen Server übermittelt und dort abgespeichert. Überschreitet die Schwinggeschwindigkeit einen festgelegten Triggerwert wird eine zusätzliche Datei mit dem entsprechenden Ausschnitt aus dem Seismogramm hinterlegt. Ein Softwarepaket bietet neben der Fernsteuerung der Seismometer die Begutachtung und Auswertung der Seismogramme an.



Abbildung 43: GeoSIG GMSplus Messsystem zur Erfassung der Schwinggeschwindigkeiten und Frequenzen der Erschütterungen; Quelle: geosig.com

Während der Datenaufnahme für dieser Arbeit waren insgesamt neun dieser Geräte im Einsatz. Von diesen sind sieben stationär eingerichtet und zwei davon werden für temporäre Standorte genutzt. Die Seismometer sind in Gebäuden von Anrainern der benachbarten Gemeinden Auenstein und Veltheim-Au aufgebaut. Die Gerätestandorte gehen aus



Abbildung 44: Gerätestandorte aller Messungen während der Datenaufnahme; Bildbreite \approx 2400 m

| MST | Haushalt | stationär/temporär | RW | HW | m ü. M. |
|-------|-------------------|--------------------|--------|--------|---------|
| CH427 | Ungricht | stationär | 654228 | 252646 | 379 |
| CH428 | Aellig | stationär | 654242 | 252287 | 352 |
| CH607 | Frei | stationär | 652933 | 252400 | 407 |
| CH609 | Weber | stationär | 654206 | 252517 | 364 |
| CH610 | Brugger | stationär | 654147 | 252507 | 370 |
| CH611 | Schärer | stationär | 653551 | 251999 | 400 |
| CH612 | Flach | stationär | 653712 | 251865 | 358 |
| CH608 | Garage Steinbruch | temporär | 654140 | 252343 | 361 |
| CH608 | Gössi | temporär | 653135 | 251977 | 384 |
| CH608 | Aare Blumen | temporär | 654400 | 252763 | 364 |

Tabelle 6: Messstellenbezeichnung und Koordinaten der Standorte

Der Aufbau wurde, soweit möglich, den geltenden Richtlinien der ÖNORM S 9001 entsprechend durchgeführt. Demnach wird eine Aufstellung des Messgerätes auf dem Fundament des Gebäudes empfohlen, sodass die maximalen Amplituden erfasst werden. Dies würde eine kraftschlüssige Verbindung des Messgerätes mit dem Untergrund bedingen. Zudem sollte nach Möglichkeit das Messinstrument in der Fundamentmitte platziert werden, da dort die maximale Vertikalschwingung zu erwarten ist. Eine gleiche Orientierung der Messeinheiten wurde ebenfalls angestrebt, um vergleichbare Messergebnisse für weiterführende Analysen zu erhalten. So wurde die x-Komponente der triaxialen Sensoren

eingenordet. Die y-Komponente des Messgerätes ist in Längsrichtung des Messgerätes orientiert und zeichnet somit die Schwinggeschwindigkeiten in E-W Richtung auf. Auf eine kraftschlüssige Verbindung mit den Betonfundamenten musste bei allen Geräten verzichtet werden, weil dazu Bohrlöcher benötigt werden und dies seitens der Anwohner auf wenig Begeisterung stößt. Versuchsweise wurden zwei Messgeräte nebeneinander am selben Ort am Fundament platziert, wobei eines davon mittels Schrauben kraftschlüssig mit dem Fundament verbunden wurde. Der Vergleich der aufgezeichneten Schwinggeschwindigkeiten zeigte nur geringfügige Abweichungen, wobei jene des fixierten Gerätes den Erwartungen entsprechend leicht erhöhte Werte aufwies. Nach Rücksprache mit dem Hersteller kann bei den derart geringen Schwinggeschwindigkeiten, die an den Messstandorten auftreten, von der Fixierung abgesehen werden. Messungenauigkeiten könnten bei großen Amplituden, bei denen eine Entkopplung des Messgerätes zu erwarten ist, auftreten. Mit dem Verrutschen ist erst ab einer Schwingbeschleunigung von $1,96 \text{ m/s}^2$ zu rechnen, was einer Schwinggeschwindigkeit von $3,1 \text{ mm/s}$ bei einer Frequenz von 100 Hz bzw. $6,2 \text{ mm/s}$ bei 50 Hz entspricht (ISEE Field Practice Guidelines for Blasting Seismographs, 2009).

Gemäß der Schweizer Norm SN640312a erfolgt die Auswertung und Dokumentation von Schwingungen über die maximal aufgetretene Amplitude einer Komponente und dem dazugehörigen, dominanten Frequenzbereich. In Abbildung 45 ist das Seismogramm einer Sprengung dargestellt. Es stellt den zeitlichen Verlauf der gemessenen Schwinggeschwindigkeiten für die jeweiligen Komponenten und den aus den Komponenten berechneten Absolutbetrag der Verschiebung im oberen Fenster (Input Data) dar. Im unteren Fenster ist der mittels FFT analysierte Frequenzbereich (Processed Data) abgebildet. Dem Beispiel aus Abbildung 45 folgend würde die Maximalamplitude aus der Resultierenden der drei Komponenten (gelbe Kurve) hervorgehen. Die maximale Schwinggeschwindigkeit der drei Komponenten tritt in vertikaler Richtung auf (violette Kurve). Dieser wird die dominante Frequenz zugeordnet. Demzufolge wird die Schwingung über die beiden Werte $v_R = 1,489 \text{ mm/s}$ und $f_Z = 114,26 \text{ Hz}$ angegeben. Bei der Reduktion einer komplexen Schwingung auf diese beiden Werte erfolgt somit eine sehr starke Vereinfachung der wahren Verhältnisse. Diese Vereinfachung wird in Abschnitt 6.2.2 noch ausführlicher diskutiert.

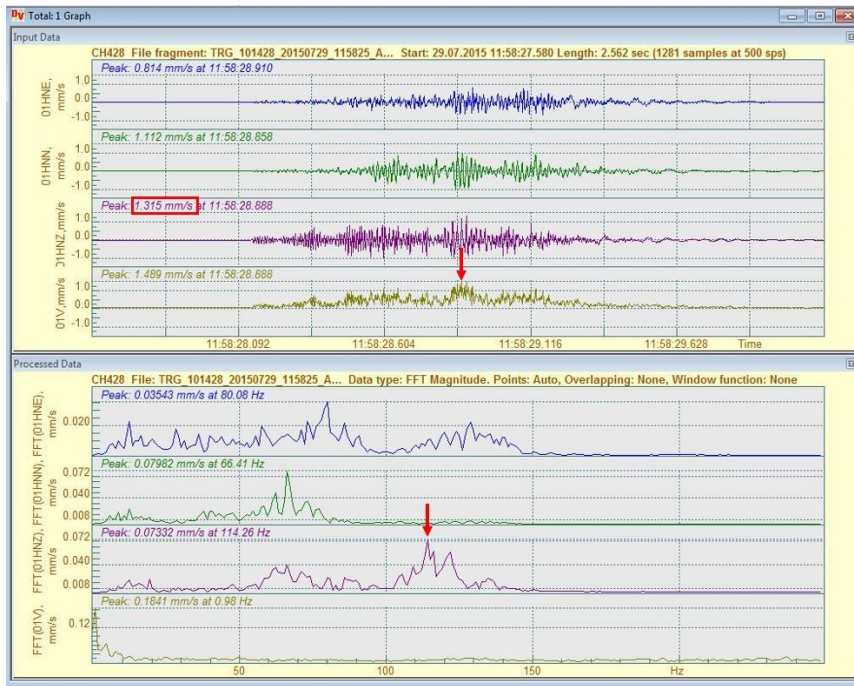


Abbildung 45: Auswertung von Schwingungen nach der Schweizer Norm SN640312a

Für die Analyse der Erschütterungen spielen die geologischen Untergrundverhältnisse eine entscheidende Rolle, weshalb im Folgenden eine kurze Beschreibung der jeweiligen Stationen erfolgt.

| MST CH427 | |
|-------------------------|--|
| Standort | Im 1. Obergeschoß auf der Terrasse |
| Unterlage | Fliesenboden der Terrasse |
| Geologischer Untergrund | Übergang vom Festgestein der Unteren Effinger Schichten zu glazialen Lockersedimenten (Hochterrasse) |
| Befestigung | Unbefestigt, Nivellierung mittels dreier Schrauben |




Abbildung 46: Gerätestandort CH427;
Bild: BRODRAGER (2014)

| MST CH428 | |
|-------------------------|--|
| Standort | Kellereingang |
| Unterlage | Betonfundament |
| Geologischer Untergrund | Lockersedimente |
| Befestigung | Unbefestigt, Nivellierung mittels dreier Schrauben |




Abbildung 47: Gerätestandort CH428;
Bild: BRODRAGER (2014)

| MST CH607 | |
|-------------------------|--|
| Standort | Aussparung im Kellerfundament |
| Unterlage | Direkt auf Festgestein der Unteren Effinger Schichten |
| Geologischer Untergrund | Festgestein der Unteren Effinger Schichten (Gerstenhübelkalk?) |
| Befestigung | Unbefestigt, Nivellierung mittels dreier Schrauben |




Abbildung 48: Gerätestandort CH607;
Bild: BRODRAGER (2014)

| MST CH609 | |
|-------------------------|--|
| Standort | Im 1. Obergeschoß |
| Unterlage | Betonfundament |
| Geologischer Untergrund | Lockersedimente |
| Befestigung | Unbefestigt, Nivellierung mittels dreier Schrauben |




Abbildung 49: Gerätestandort CH609;
Bild: BRODRAGER (2014)

| MST CH610 | |
|-------------------------|--|
| Standort | Garage |
| Unterlage | Betonfundament der Garage |
| Geologischer Untergrund | Lockersedimente |
| Befestigung | Unbefestigt, Nivellierung mittels dreier Schrauben |




Abbildung 50: Gerätestandort CH610;
Bild: BRODRAGER (2014)

| MST CH611 | |
|-------------------------|--|
| Standort | Im Keller an der Wand |
| Unterlage | Betonfundament des Kellers |
| Geologischer Untergrund | Festgestein der Oberen Effinger Schichten (Mergel) |
| Befestigung | Unbefestigt, Nivellierung mittels dreier Schrauben |

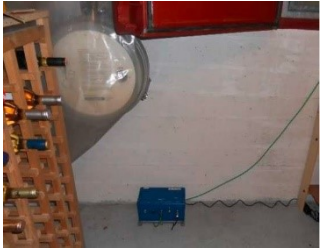


Abbildung 51: Gerätestandort CH611;
Bild: BRODRAGER (2014)

| MST CH612 | |
|-------------------------|--|
| Standort | Außerhalb des Gebäudes auf Fels |
| Unterlage | Festgestein der Oberen Effinger Schichten |
| Geologischer Untergrund | Festgestein der Oberen Effinger Schichten (Mergelkalk) |
| Befestigung | Unbefestigt, Nivellierung mittels dreier Schrauben |




Abbildung 52: Gerätestandort CH612;
Bild: BRODTRAGER (2014)

| MST CH608 | |
|-------------------------|--|
| Standort | Am Fundament an der Wand (Aare Blumen) |
| Unterlage | Betonfundament |
| Geologischer Untergrund | Lockersedimente |
| Befestigung | Unbefestigt, Nivellierung mittels dreier Schrauben |




Abbildung 53: Gerätestandort CH608

| MST CH608 | |
|-------------------------|---|
| Standort | In der Garage des Steinbruches |
| Unterlage | Betonfundament der Garage |
| Geologischer Untergrund | Übergang vom Festgestein der Oberen Effinger Schichten zu glazialen Lockersedimenten (Hochterrasse) |
| Befestigung | Unbefestigt, Nivellierung mittels dreier Schrauben |

| MST CH608 | |
|-------------------------|--|
| Standort | Garage bei Herrn Gössi |
| Unterlage | Betonfundament der Garage |
| Geologischer Untergrund | Festgestein der Oberen Effinger Schichten (Mergel) |
| Befestigung | Unbefestigt, Nivellierung mittels dreier Schrauben |

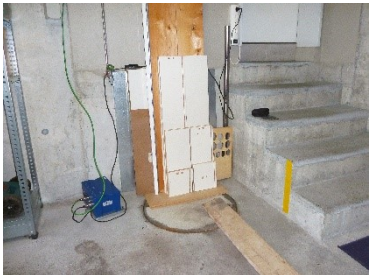


Abbildung 54: Gerätestandort CH608

6.2 Analyse der Sprengerschütterungen

6.2.1 Analyse der Maximalamplitude und der dominanten Frequenz nach SN640312a

Die folgende Tabelle 6 beinhaltet alle aufgezeichneten maximalen Schwinggeschwindigkeiten, die im Zuge des Projektes messtechnisch begleitet wurden. Bei den Daten wurden noch keine Entfernungen oder Lademengen berücksichtigt. Sie soll nur auf den ersten Blick das unterschiedliche Verhalten der Messstationen hervorheben. Die Messstelle CH608 wechselte ihren Standort im Untersuchungszeitraum mehrmals, weshalb ihre Daten in weiterer Folge gesondert betrachtet werden müssen. Bis zur Sprengung 2015_08_04_01 befand sie sich am Standort Aare Blumen. Anschließend wurde sie in der Garage des Steinbruches bis zur Sprengung 2015_09_22_01 betrieben und schlussendlich ab 2015_10_22_01 in einer Garage in Auenstein aufgebaut.

| ALLGEMEINES | CH607 | CH428 | CH609 | CH608 | CH427 | CH610 | CH611 | CH612 |
|---------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| NR. SPRENGUNG | V _{max} [mm/s] | V _{max} [mm/s] | V _{max} [mm/s] | V _{max} [mm/s] | V _{max} [mm/s] | V _{max} [mm/s] | V _{max} [mm/s] | V _{max} [mm/s] |
| 2015_07_15_01 | 0,124 | 0,914 | 0,840 | 0,421 | 0,859 | 1,704 | 0,169 | 0,134 |
| 2015_07_16_01 | 0,128 | 0,675 | 0,416 | 0,158 | 0,531 | 0,506 | 0,163 | 0,197 |
| 2015_07_17_01 | 0,283 | 1,707 | 0,747 | 0,939 | 2,088 | 2,275 | 0,270 | 0,219 |
| 2015_07_23_01 | 0,182 | 1,003 | 0,696 | 0,204 | 0,643 | 1,299 | 0,219 | 0,290 |
| 2015_07_29_01 | 0,140 | 1,489 | 0,964 | 0,659 | 1,323 | 3,047 | 0,379 | 0,263 |
| 2015_07_31_01 | 0,075 | 1,091 | 0,790 | 0,286 | 0,931 | 1,922 | 0,162 | 0,189 |
| 2015_08_04_01 | 0,213 | 0,155 | 0,115 | 0,157 | 0,252 | 0,322 | 0,082 | 0,070 |
| 2015_08_06_01 | 0,127 | 1,562 | 0,692 | | 1,468 | 2,559 | 0,319 | 0,272 |
| 2015_08_11_01 | 0,119 | 1,589 | 0,965 | 1,672 | 0,855 | 1,454 | 0,204 | 0,179 |
| 2015_08_13_01 | 0,122 | 1,747 | 0,979 | 1,814 | 0,837 | 1,410 | 0,216 | 0,192 |
| 2015_08_17_01 | 0,252 | 0,719 | 0,428 | 0,980 | 0,577 | 1,099 | 0,282 | 0,209 |
| 2015_08_19_01 | 0,311 | 1,923 | 0,959 | 1,092 | 1,976 | 2,061 | 0,406 | 0,277 |
| 2015_08_20_01 | 0,173 | 0,872 | | 1,588 | 0,552 | 1,027 | | 0,204 |
| 2015_08_24_01 | 0,130 | 1,385 | | 1,763 | 1,038 | 1,406 | 0,183 | 0,189 |
| 2015_08_27_01 | 0,367 | 1,177 | | 2,342 | 0,916 | 1,784 | 0,527 | 0,581 |
| 2015_08_27_02 | 0,367 | 1,177 | | 2,342 | 0,916 | 1,784 | 0,527 | 0,581 |
| 2015_08_31_01 | 0,107 | 1,020 | | 1,043 | 0,501 | 1,336 | 0,127 | 0,121 |
| 2015_09_01_01 | 0,083 | 1,050 | 0,616 | 0,988 | 0,457 | 1,161 | 0,126 | 0,134 |
| 2015_09_04_01 | 0,114 | 0,900 | 0,658 | 1,498 | 0,638 | 1,456 | 0,222 | 0,189 |
| 2015_09_04_02 | 0,469 | 0,773 | 0,658 | 1,140 | 1,744 | 0,939 | 0,421 | 0,238 |
| 2015_09_08_01 | 0,115 | 0,856 | 0,455 | 0,782 | 0,367 | 0,851 | 0,154 | 0,129 |
| 2015_09_10_01 | 0,126 | 0,726 | 0,498 | 1,086 | 0,451 | 1,060 | 0,188 | 0,148 |

Sprengerschütterungen

| | | | | | | | | |
|-------------------|--------------|--------------|--------------|-------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 2015_09_14_01 | 0,139 | 0,893 | 0,517 | 0,821 | 0,589 | 1,070 | 0,158 | 0,148 |
| 2015_09_16_01 | 0,216 | 0,876 | 0,590 | 1,157 | 0,604 | 1,554 | 0,224 | 0,326 |
| 2015_09_17_01 | 0,119 | 0,538 | 0,476 | 0,773 | 0,390 | 0,956 | 0,248 | 0,183 |
| 2015_09_18_01 | 0,372 | 0,543 | 0,476 | 0,719 | 1,107 | 0,727 | 0,444 | 0,245 |
| 2015_09_22_01 | 0,256 | 1,083 | 0,531 | 1,192 | 0,669 | 1,641 | 0,296 | 0,273 |
| 2015_09_28_01 | 0,358 | 0,386 | 0,300 | | 0,967 | 0,722 | 0,458 | 0,224 |
| 2015_10_02_01 | 0,529 | 1,472 | 0,807 | | 0,906 | 1,662 | 0,586 | |
| 2015_10_14_01 | 0,275 | 0,768 | 0,416 | | 0,577 | 0,792 | 0,348 | 0,233 |
| 2015_10_15_01 | 0,216 | 0,810 | 0,558 | | 0,658 | 0,986 | 0,234 | 0,208 |
| 2015_10_20_01 | 0,205 | 0,766 | 0,434 | | 0,556 | 0,740 | 0,268 | 0,222 |
| 2015_10_22_01 | | 0,250 | 0,249 | 0,181 | 0,329 | 0,346 | 0,253 | 0,221 |
| 2015_10_27_01 | | | | | | | | 0,259 |
| 2015_10_28_01 | 0,244 | 1,231 | 0,647 | 0,321 | 1,317 | 1,157 | 0,430 | 0,318 |
| 2015_10_28_02 | 0,163 | 0,274 | 0,143 | 0,184 | 0,187 | 0,313 | 0,195 | 0,204 |
| 2015_11_03_01 | 0,233 | 0,690 | 0,346 | 0,272 | 0,432 | 1,009 | 0,252 | 0,214 |
| 2015_11_06_01 | 0,172 | 0,558 | 0,259 | 0,183 | 0,610 | 0,869 | 0,167 | 0,158 |
| MITTELWERT | 0,212 | 0,963 | 0,570 | | 0,806 | 1,270 | 0,275 | 0,228 |
| MIN | 0,075 | 0,155 | 0,115 | | 0,187 | 0,313 | 0,082 | 0,070 |
| MAX | 0,529 | 1,923 | 0,979 | | 2,088 | 3,047 | 0,586 | 0,581 |
| MEDIAN | 0,178 | 0,893 | 0,545 | | 0,643 | 1,157 | 0,241 | 0,209 |

Abbildung 55: Maximale Schwinggeschwindigkeiten aller erfassten Sprengungen an den jeweiligen Messstationen

Die Lage der Sprengstellen geht aus Abbildung 56 hervor und zeigt, dass die Orte der Sprengungen variieren. Die Punktgröße hängt dabei von der maximal gezündeten Sprengstoffmenge je Zündzeitstufe ab. Vor allem im Bereich des Jakobsbergs wurden im Untersuchungszeitraum viele Sprengungen vollzogen, wobei jeweils relativ geringe Sprengstoffmengen pro Zündzeitstufe detonierten. Im nördlichen Bereich wurden größere Sprenganlagen gezündet, die aufgrund längerer Bohrlöcher höhere Sprengstoffmengen pro Zündzeitstufe erfordern.

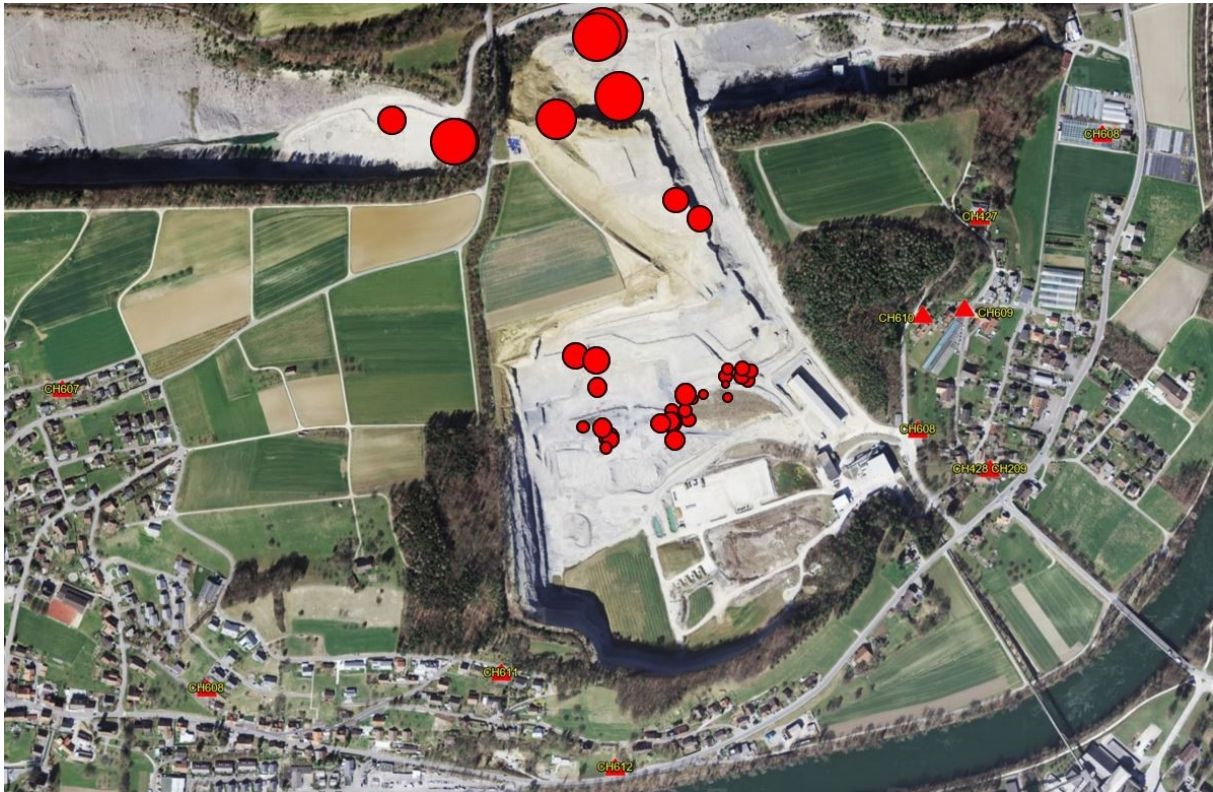


Abbildung 56: Lage der Sprengstellen; Punktgröße korreliert mit der maximalen Sprengstoffmenge pro Zündzeitstufe; Bildbreite ≈ 1700 m

Aus der obenstehenden Tabelle und der Abbildung ist ersichtlich, dass trotz breiter Variation der Sprengstellen einige Messinstrumente Großteils sehr niedrigen Erschütterungen ausgesetzt sind wohingegen einige mittlere und hohe Werte aufzeichnen. Vor allem im Gemeindegebiet von Auenstein sind niedrigere Werte zu verzeichnen. Im Gegensatz dazu sind die größten Amplituden im Bereich Veltheim-Au registriert worden. Aufgrund dieser Beobachtungen wurde eine Einteilung in erschütterungsarme und erschütterungsreiche Messstellen erstellt. Dabei zeigt sich, dass alle Messungen in Auenstein deutlich unter 1 mm/s Schwinggeschwindigkeit liegen (Abbildung 57). Der Mittelwert aller Messwerte liegt dabei unter $0,5 \text{ mm/s}$.



Abbildung 57: Erschütterungscharakteristik der Messstationen in Auenstein

Die Seismometer in Veltheim-Au weisen ein unterschiedliches Verhalten auf, wobei die maximalen Amplituden deutlich höher sind (Abbildung 58). Die Durchschnittsmesswerte einer Station liegen dabei unter 0,5 mm/s, zwei weisen erhöhte Werte auf, die im Schnitt unter 1,0 mm/s liegen und drei davon zeigen im Schnitt höhere Werte als 1,0 mm/s an.

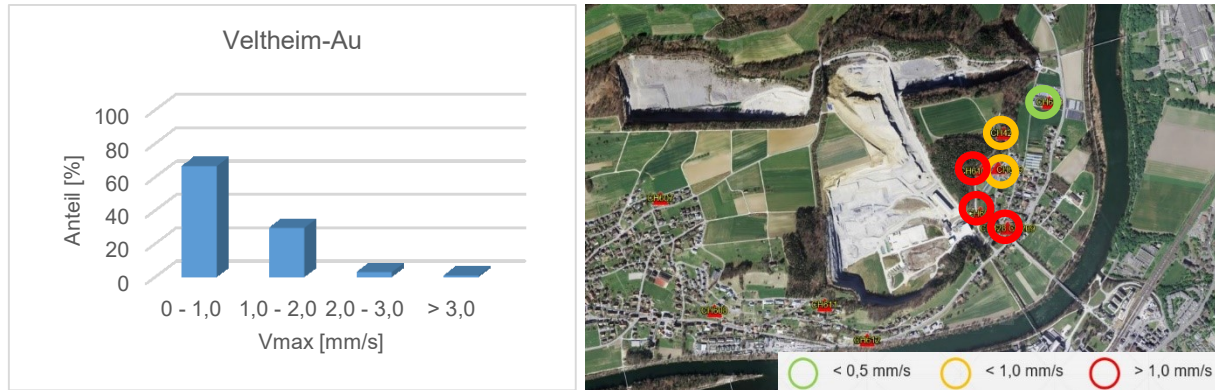


Abbildung 58: Erschütterungscharakteristik der Messstationen in Veltheim-Au

Das unterschiedliche Verhalten der Messstationen kann anhand des geologischen Untergrundes erklärt werden. Jene Seismometer, die auf Fundamenten stehen, welche auf Festgesteinen gegründet sind, zeigen sehr niedrige Werte an. Dies betrifft laut der obenstehenden Beschreibung der Messstellenstandorte alle Geräte in Auenstein. Jene Stationen, die auf den Fundamenten jener Gebäude stehen, die auf dem Lockergestein gegründet sind, zeigen tendenziell höhere Werte an. Dies betrifft alle Messstationen im Gemeindegebiet von Veltheim. Die niedrigeren Erschütterungsmesswerte im Osten von Veltheim (siehe Abbildung 58) können durch die größere Entfernung zu den Sprengstellen erklärt werden. Die Zunahme der Erschütterungen beim Übergang einer seismischen Welle vom Festgestein in das Lockergestein kann petrophysikalisch erklärt werden. Seismische Wellen breiten sich als Spannungen sowohl im Fest- als auch im Lockergestein aus. Die beiden Materialien weisen unter dynamischer Einwirkung ein recht unterschiedliches elastisches Verformungsverhalten auf. Wird eine Spannung an einen Körper angelegt, so verformt sich dieser in Abhängigkeit vom Elastizitätsmodul. Dieses nimmt mit dem Widerstand, welcher ein Körper seiner elastischen Verformung entgegensetzt, zu. Demnach ist das E-Modul für ein Festgestein um ein Vielfaches größer als für Lockergesteine. Dem Hook'schen Materialgesetz gehorchend führt die angelegte Spannung zu einer Dehnung oder Stauchung des Bodenelements. Beim Übergang der seismischen Welle von einem Medium ins andere bleibt dabei die Spannung unter Vernachlässigung der Streuungs- und Dämpfungseffekte gleich. Aufgrund des sich ändernden E-Moduls kommt es unter Anwendung des Materialgesetzes zu einer stärkeren Verformung des Körpers.

$$\sigma = E * \varepsilon$$

$$\sigma \dots \text{Spannung} \left[\frac{N}{m^2} \right]$$

$$E \dots \text{Elastizitätsmodul} \left[\frac{N}{m^2} \right]$$

$$\varepsilon \dots \text{Dehnung} [-]$$

Formel 6-1

Das unterschiedliche Verhalten der Maximalamplituden kann auch in den nachstehenden Diagrammen nachvollzogen werden. In Abbildung 59 erfolgte die Auswertung der Schwinggeschwindigkeiten auf Basis der Entfernung von der Sprengstelle zum Messgerät. Die Darstellung erfolgte in einem doppellogarithmischen Diagramm. Regressionsanalysen ermöglichen eine grobe Trendvorhersage der zu erwartenden Erschütterungen. Im nachstehenden Diagramm sind starke Schwankungen der Messergebnisse ersichtlich, weshalb nur sehr schlechte Regressionskoeffizienten erreicht werden. Dies basiert vor allem auf der fehlenden Berücksichtigung der sehr komplexen Verhältnisse wie Inhomogenitäten des Untergrundes.

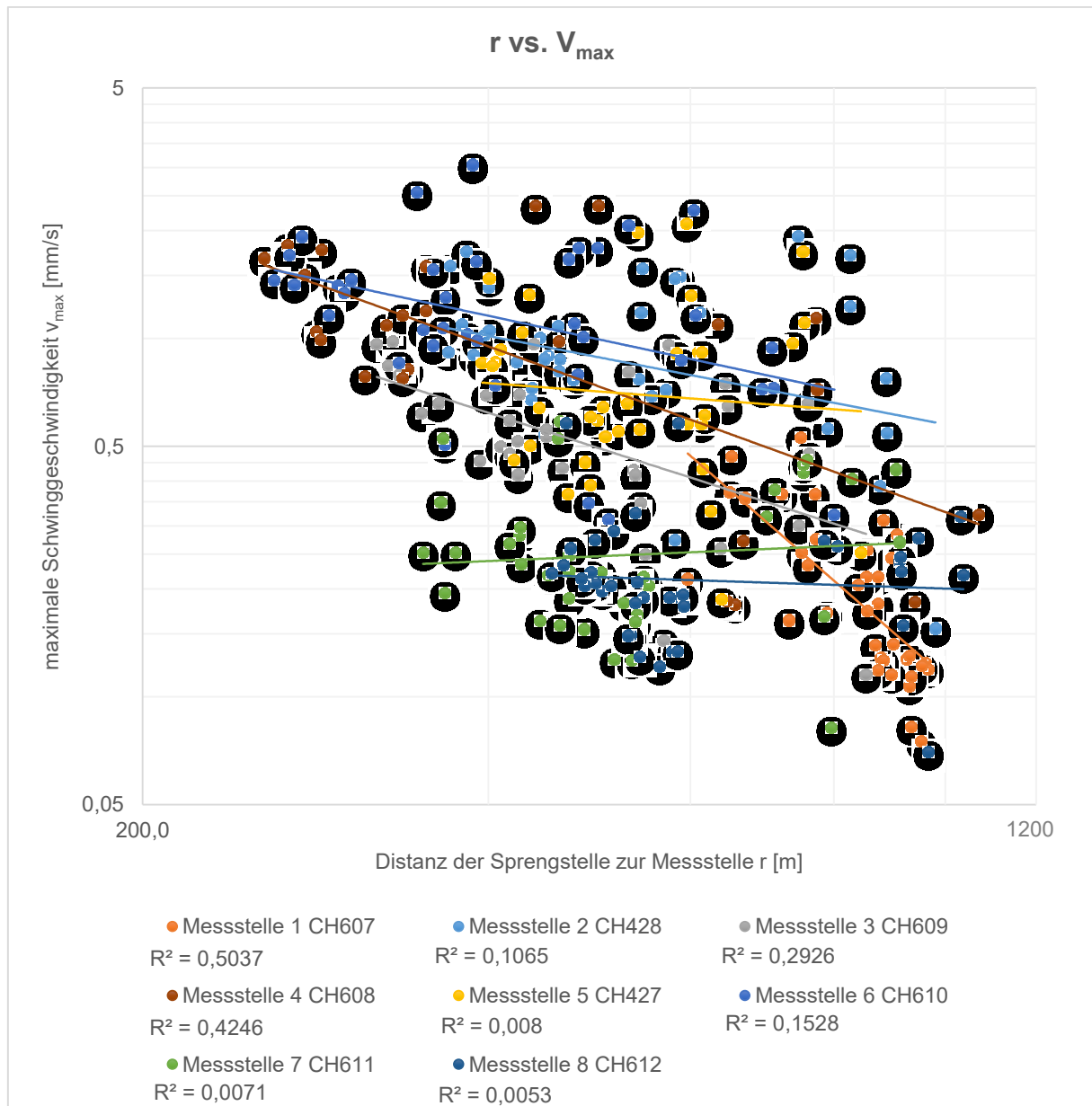


Abbildung 59: Auswertung der maximalen Schwinggeschwindigkeiten auf Basis der Distanz

Für eine bessere Korrelation der Ergebnisse eignet sich die nachstehende Formel besser. Eine wesentliche Beeinflussungsgröße für die maximalen Schwinggeschwindigkeiten stellt die maximale Sprengstoffmenge je Zündzeitstufe dar. Da bei den verschiedenen Sprenganlagen eine breite Varianz hinsichtlich der maximalen Menge an Sprengstoff pro Zündzeitstufe zu verzeichnen ist, ist die Auswertung der Messergebnisse über die skalierte Distanz geeigneter. Diese berücksichtigt die Stärke des Quellsignals über folgende Beziehung (SCHILLINGER et al., 2014):

$$SD = \frac{D}{L^{0,5}}$$

SD ...Skalierte Distanz

D ...Distanz der Spreng – zur Messstelle [m]

L ...Maximale Lademenge pro Zündzeitstufe in kg

Formel 6-2

In Abbildung 60 sind die Ergebnisse der Analyse über die skalierte Distanz dargestellt. Generell konnten bessere Linearisierungen erzielt werden, wobei dennoch eine relativ große Schwankungsbreite der Messwerte ersichtlich ist. Ein Grund für die relativ niedrigen Korrelationskoeffizienten liegt bestimmt darin, dass die Formel keine Inhomogenitäten und Anisotropieeffekte des Untergrundes berücksichtigt. Die Korrelationskoeffizienten erreichen an vier Messstellen relativ gute Werte. Drei der vier Geräte (CH427, CH607, CH611) befinden sich in Gebäuden, deren Fundamente direkt auf dem Fels gegründet sind. Das Seismometer CH608 am Standort Aare Blumen auf Lockersedimenten weist ebenfalls ein hohes Bestimmtheitsmaß auf. Auffallend dabei ist, dass sich dieses sehr weit von den Sprengungen entfernt befindet (siehe Abbildung 56).

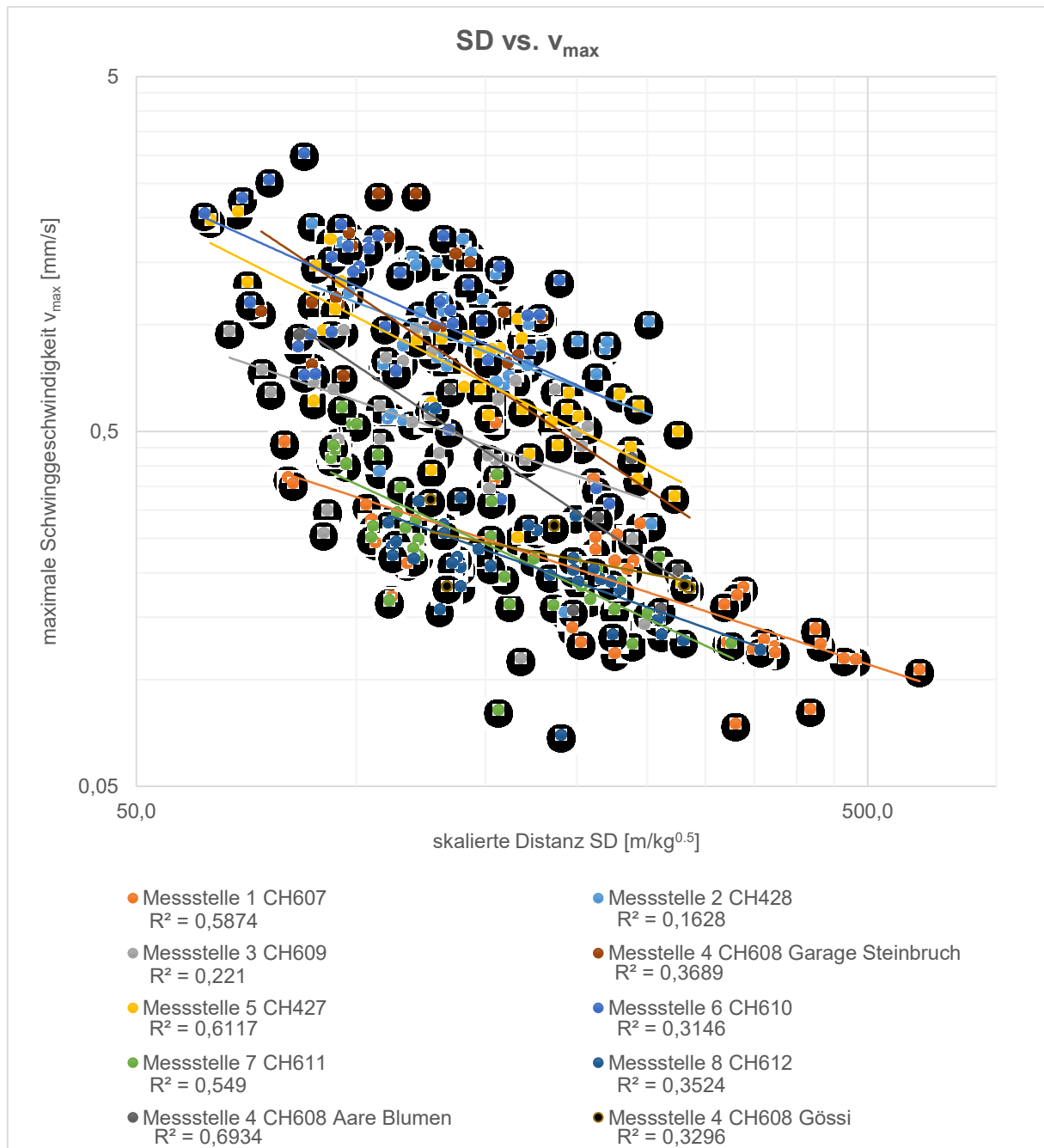


Abbildung 60: Auswertung der maximalen Schwinggeschwindigkeiten auf Basis der skalierten Distanz

Auch die jeweiligen Komponenten der einzelnen Messstationen zeigen bei der Analyse ein ähnliches Verhalten. Tendenziell zeigen die Vertikalkomponenten beim Vergleich der nachfolgenden Diagramme leicht erhöhte Werte (Abbildung 61, Abbildung 62, Abbildung 63). Nachfolgend soll die Ursache für die etwas erhöhten Schwinggeschwindigkeiten erforscht werden. Dabei soll der Einfluss der Höhendifferenz erforscht werden, da oftmals die Sprengstellen auf einem unterschiedlichen Niveau im Vergleich zu den Messstellen liegen. Unter der Annahme einer sphärischen Kompressionswelle könnte eine in Bezug auf die

Messstellen tiefer liegende Sprengstelle eine Erhöhung der Vertikalkomponenten bewirken. Deren Einfluss soll im Folgenden untersucht werden:

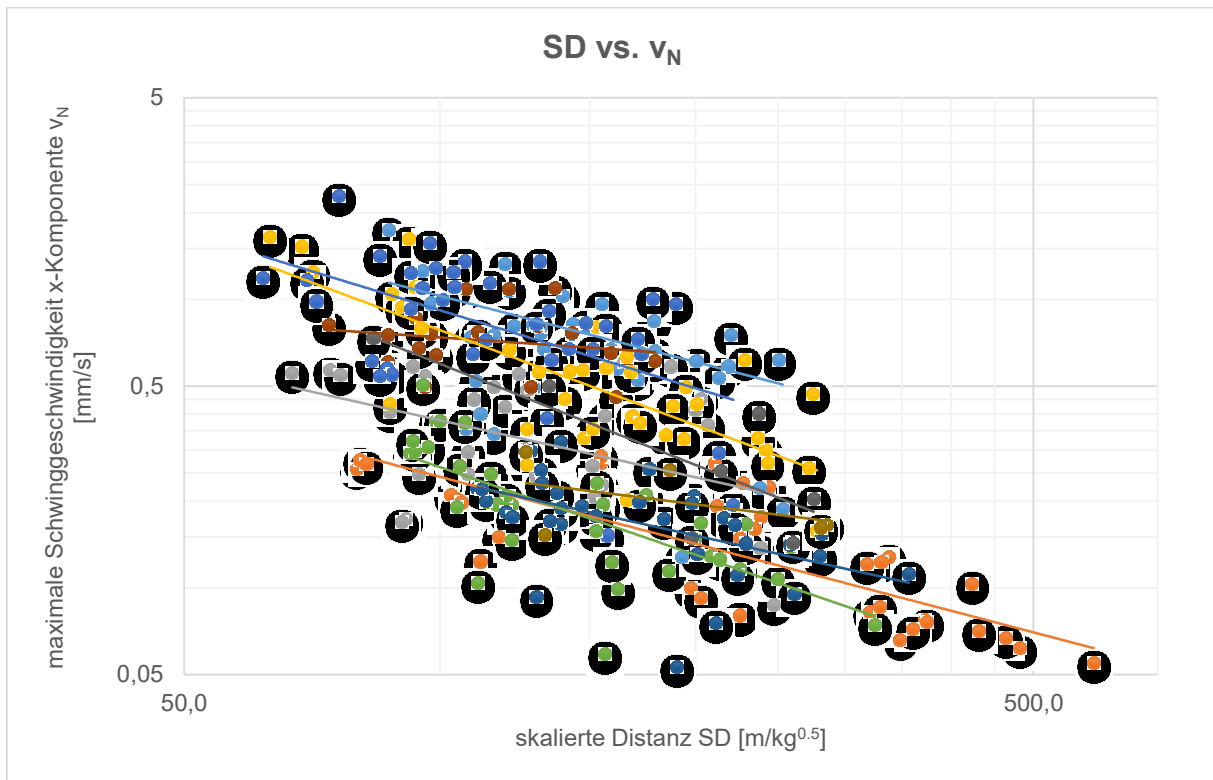


Abbildung 61: Auswertung der x-Komponente auf Basis der skalierten Distanz

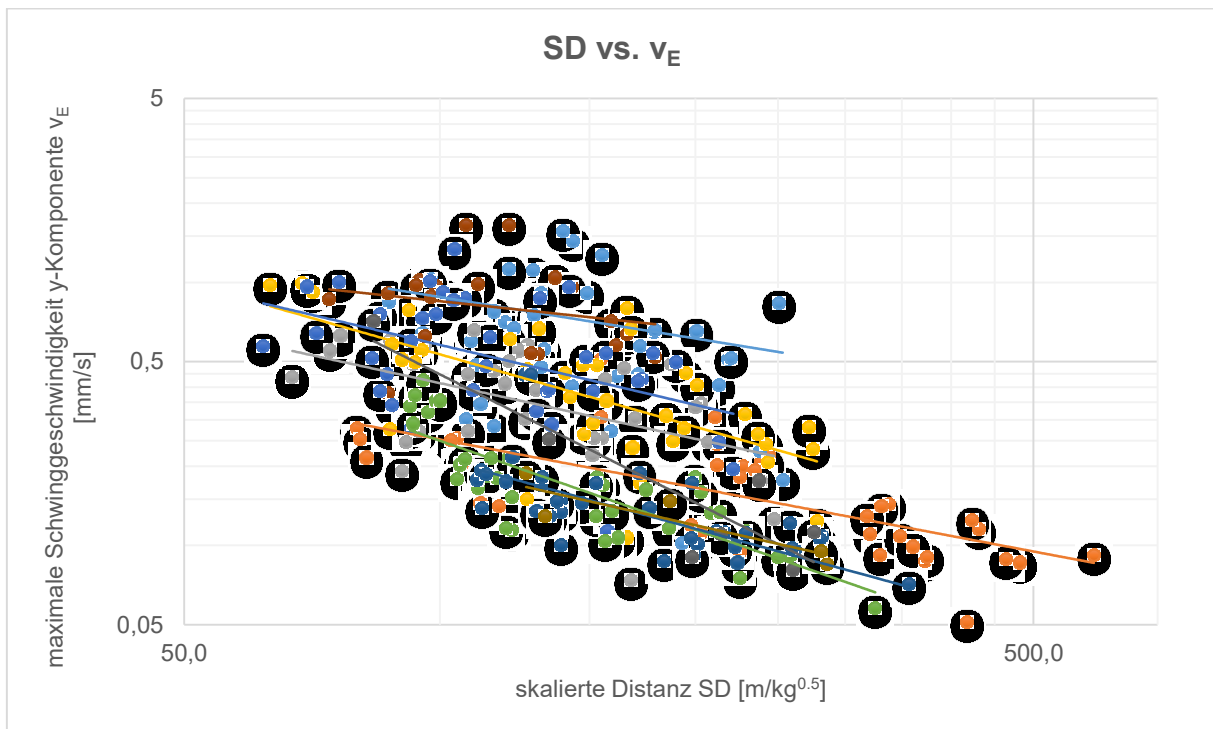


Abbildung 62: Auswertung der y-Komponente auf Basis der skalierten Distanz

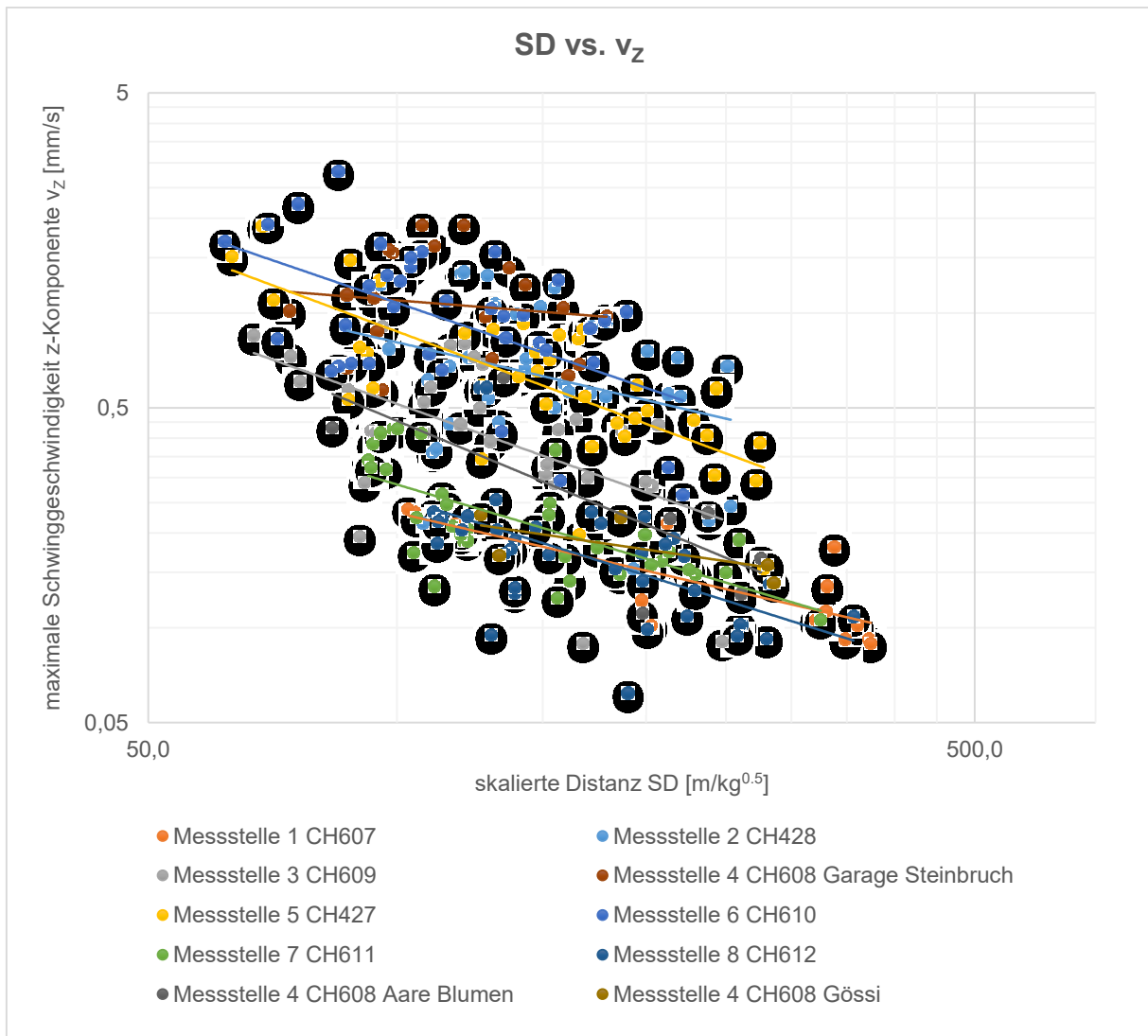


Abbildung 63: Auswertung der z-Komponente auf Basis der skalierten Distanz

Zu diesem Zweck wurden die Vertikalkomponenten von jeweils zwei Seismometern auf Fest- (Abbildung 64) und Lockergesteinen (Abbildung 65) gegen die Höhendifferenz zwischen Spreng- und Messort in einem Blasendiagramm aufgetragen. Die Analyse erfolgt wiederum über die skalierte Distanz. Die Blasengröße steigt mit der maximalen Amplitude an. Die Diagramme zeigen, dass es keinen signifikanten Einfluss der Höhendifferenz auf die Amplituden der Vertikalkomponenten gibt. Würde dieser vorhanden sein müssten die Blasen im Bereich der Ordinate ein Minimum erreichen. Bei zunehmender Entfernung der Punkte im Blasendiagramm, was im Feld einem größeren Niveauunterschied entspricht, sollten die Werte demnach größer werden. Die Punktgröße zeigt eine Abnahme mit zunehmender Entfernung von der Sprengstelle infolge der Energieverteilung.

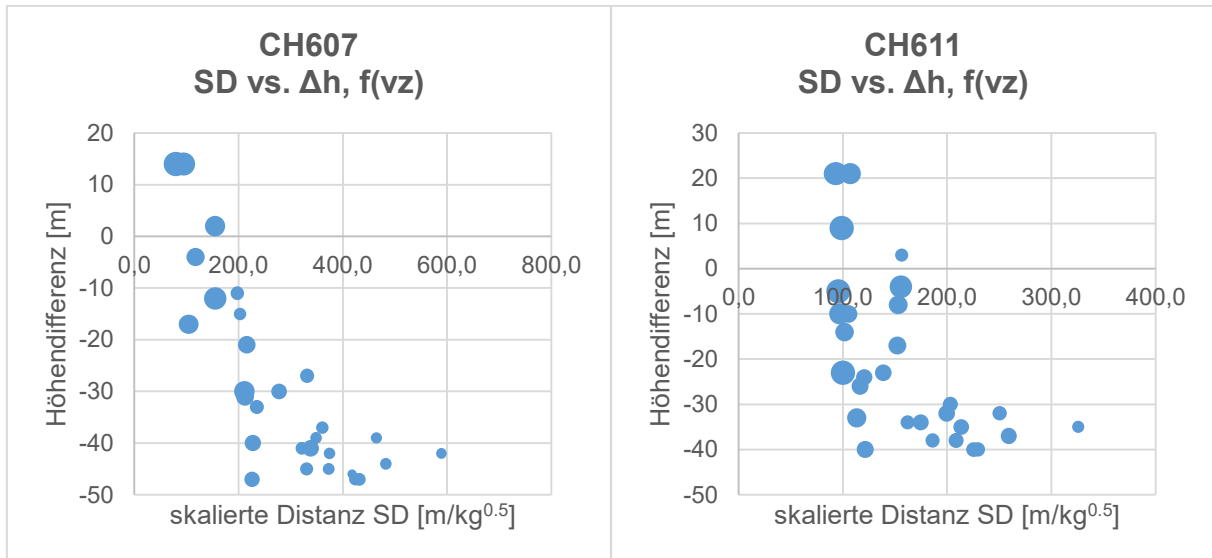


Abbildung 64: Auswertung der Vertikalkomponenten gegen Höhendifferenzen auf Basis der skalierten Distanz für Messstellen auf dem Festgestein

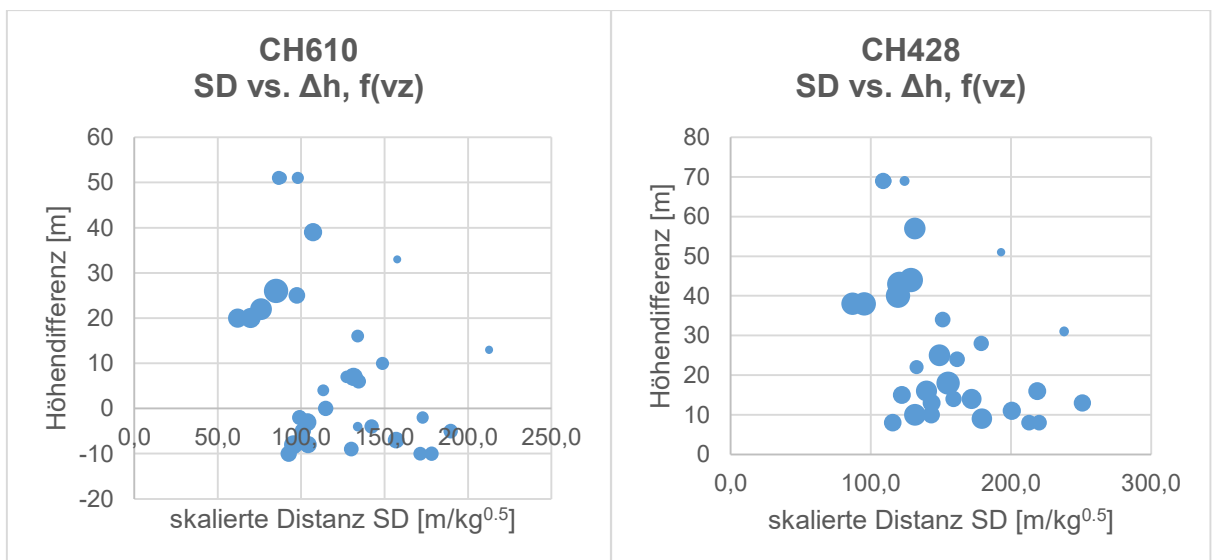


Abbildung 65: Auswertung der maximalen Schwinggeschwindigkeit in Vertikalrichtung gegen Höhendifferenzen auf Basis der skalierten Distanz für Messstellen auf dem Lockergestein

Eine Beobachtung, die aus den Messergebnissen hervor geht, ist die Abnahme der Frequenzen mit zunehmender Entfernung von der Sprengstelle, da der Untergrund als Tiefpassfilter wirkt (Kapitel 4.4). Dies ist anhand der Trendlinien in den nachstehenden Abbildung 66 – 69 zu sehen. Aufgrund der Reduktion eines Frequenzspektrums auf einen Wert gelingt allerdings keine gute Linearisierung der Punkte, sodass die Korrelationskoeffizienten nur niedrige Werte erreichen. Das scheinbare Ansteigen der Frequenzen an einigen Messstellen ist auf eine extrem schlechte Korrelation oder geringe Streuung der Werte zurückzuführen und dürfte nicht den wahren Verhältnissen entsprechen.

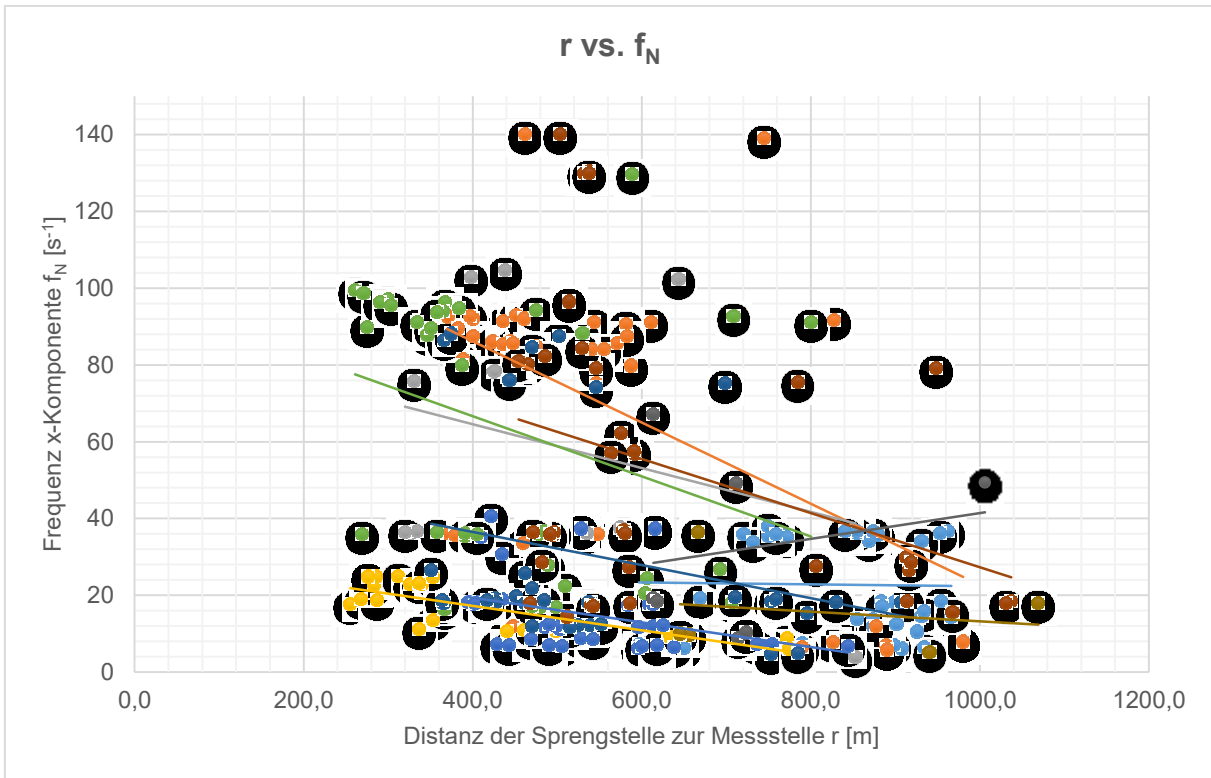


Abbildung 66: Auswertung der dominanten Frequenz der x-Achse in Abhängigkeit von der Entfernung zur Sprengstelle

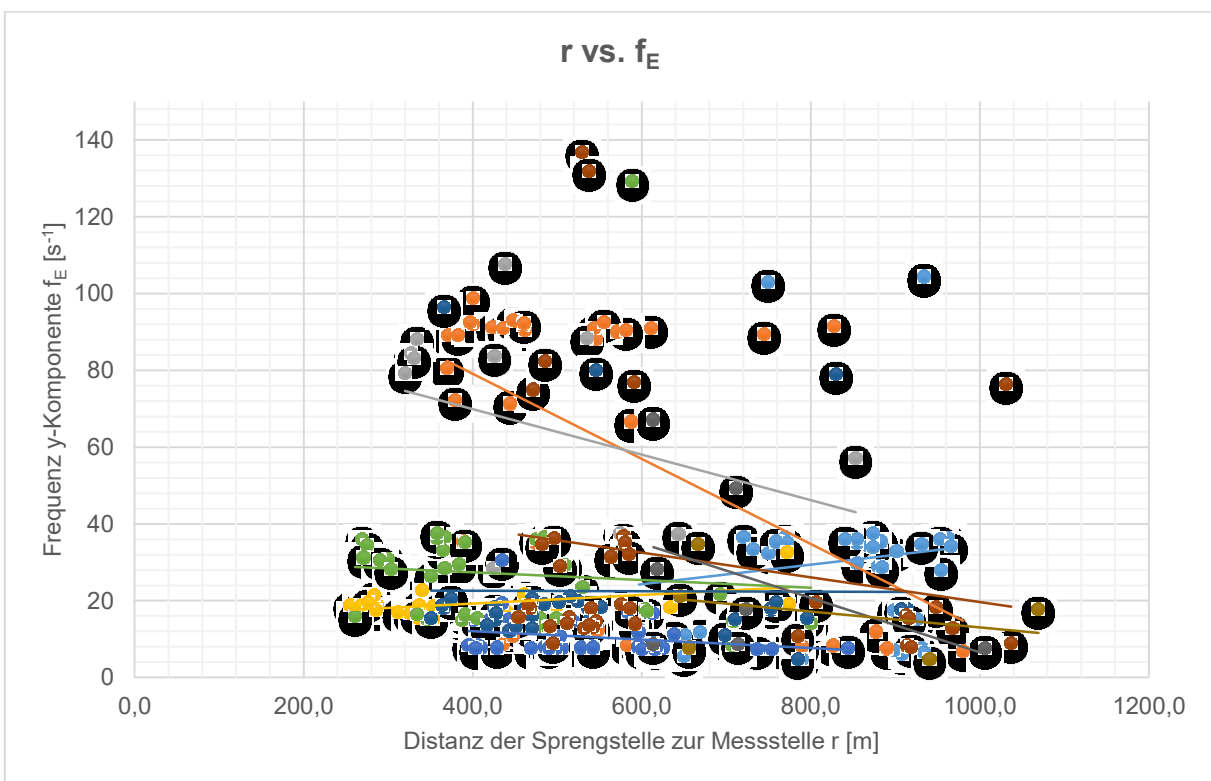


Abbildung 67: Auswertung der dominanten Frequenz der y-Achse in Abhängigkeit von der Entfernung zur Sprengstelle

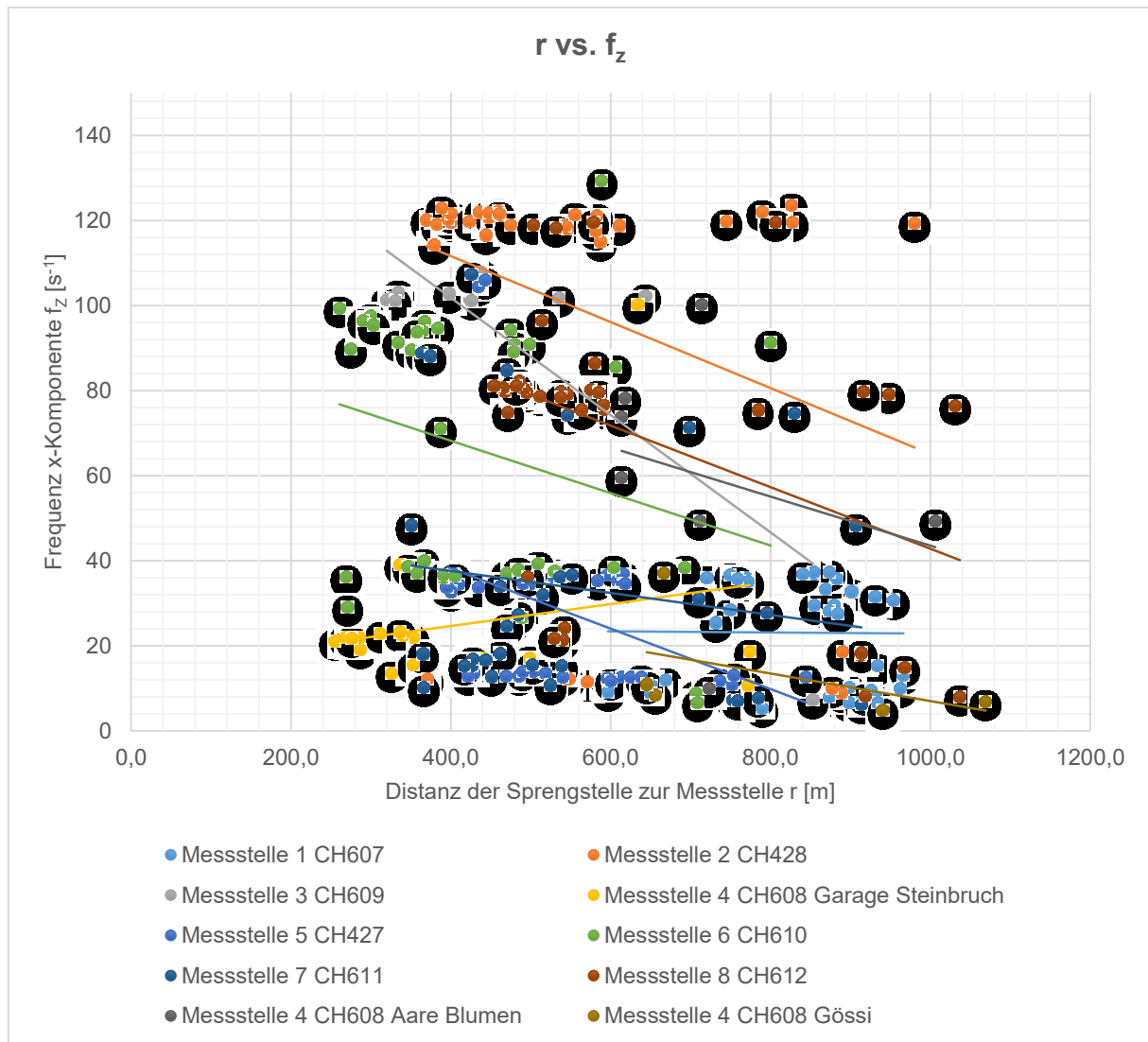


Abbildung 68: Auswertung der dominanten Frequenz der z-Achse in Abhängigkeit von der Entfernung zur Sprengstelle

Die Analyse der dominanten Frequenzen für die jeweiligen Messstellen zeigt, dass die Schwingungen in allen drei Raumrichtungen im Frequenzspektrum unter 40 Hz bzw. im Bereich von 70 – 120 Hz liegen. Der Haupteinflussfaktor der Frequenz ist, wie bereits zuvor erwähnt, die Entfernung. Ein Vergleich der Frequenzen von den Messstellen auf den Festgesteinen zeigt, dass diese mit Ausnahme des Seismometers CH612 recht niedrige Werte aufweisen, wobei die Gründe dafür unbekannt sind. Bei den Messstellen auf den Lockersedimenten treten tendenziell hohe, dominante Frequenzen auf. Lediglich die Messstationen CH427 zeigt eine breite Varianz der Ergebnisse. Meist liegen dort die Frequenzen unter 40 Hz, oftmals sogar unter 20 Hz. Die Messstation CH608 weist am Standort Aare Blumen ebenfalls teilweise niedrige, dominante Frequenzen auf, was vermutlich auf die Tiefpassfilterwirkung bei großen Entfernungen zurückzuführen ist.

Mit Zunahme der Schwinggeschwindigkeiten kann aufgrund einer sehr schlechten Korrelation der Ergebnisse kein Trend in Bezug auf die dominanten Frequenzen erkannt werden wie aus den beiden Abbildung 69 und Abbildung 70 ersichtlich ist.

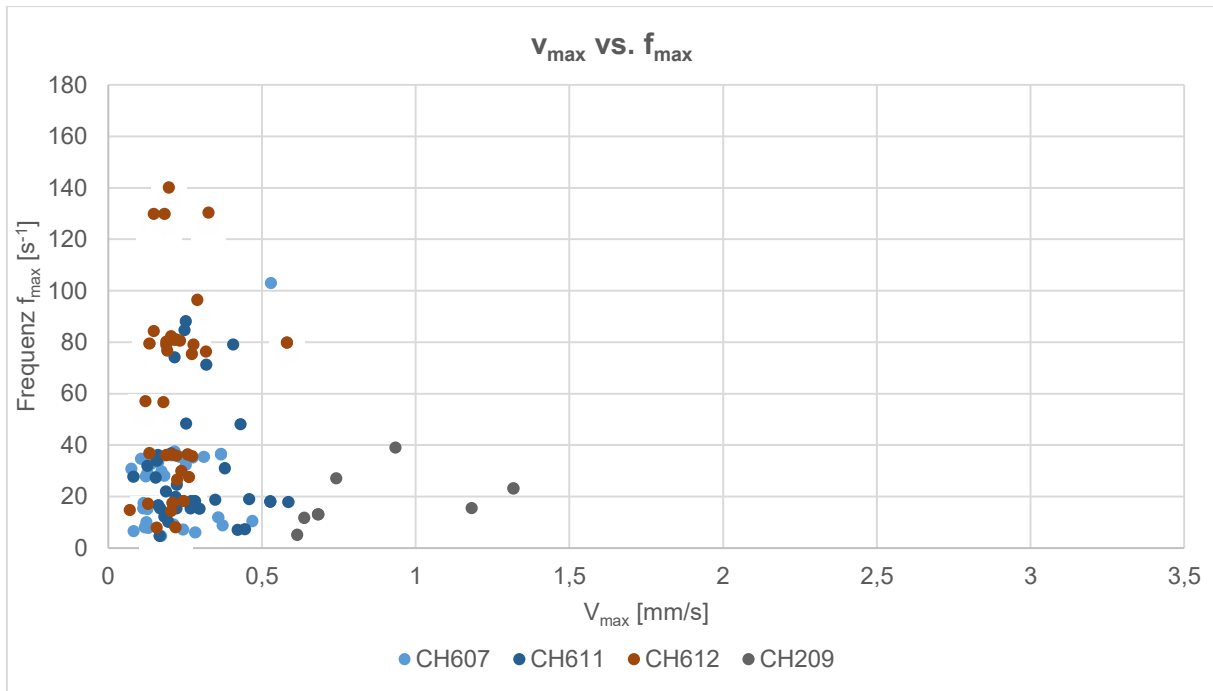


Abbildung 69: Abhängigkeit der Frequenz von der Schwinggeschwindigkeit für Festgesteine

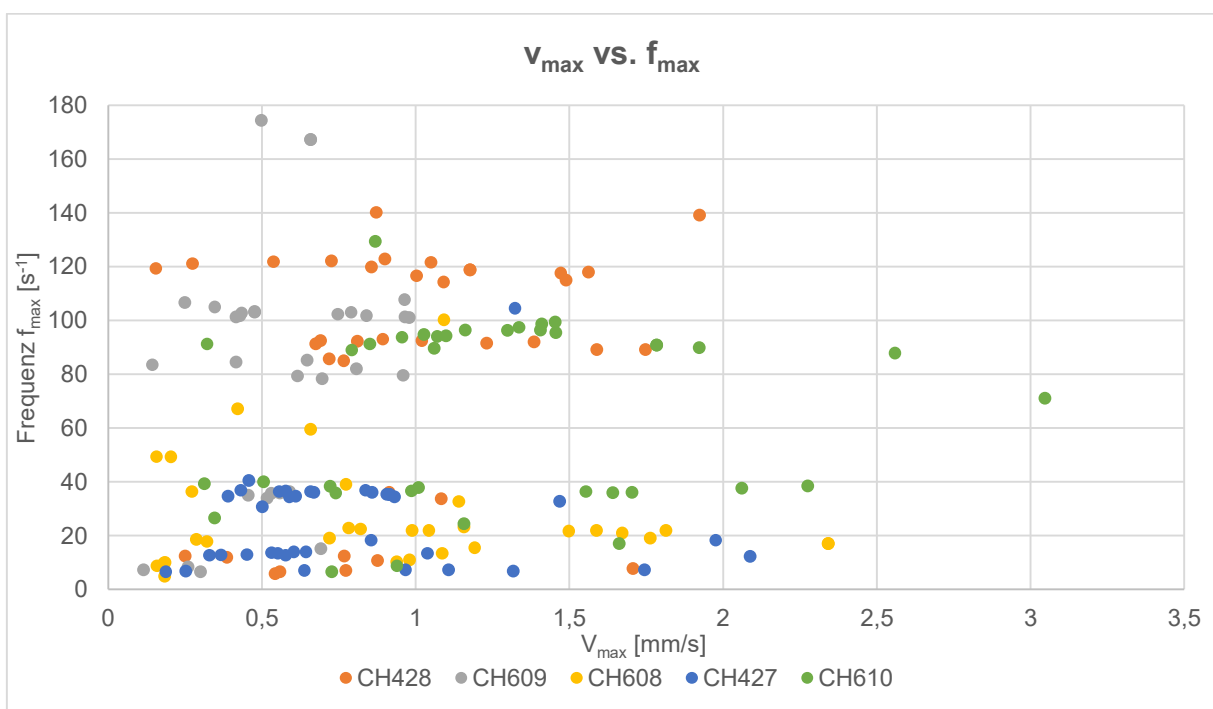


Abbildung 70: Abhängigkeit der Frequenz von der Schwinggeschwindigkeit für Lockergesteine

6.2.2 Analyse der Seismogramme

Die Begutachtung der aufgezeichneten Daten erfolgt über das GeoSIG Data Acquisition System. Mit der Software steht die Möglichkeit einfacher Bearbeitungen und Auswertungen der Seismogramme zur Verfügung, jedoch können keine tiefgehenden, statistischen Auswertungen gemacht werden. Vertiefende Analysen müssten mittels einer alternativen Software erfolgen. Aus Zeitgründen konnte dies nicht mehr berücksichtigt werden, weshalb die folgenden Analysen mit dem Herstellereigenen Programm bewerkstelligt wurden.

Die Auswertung einer komplexen Schwingung mittels Reduktion auf zwei Werte wurde bereits in Kapitel 6.2.1 kritisch erwähnt. Durch die starke Vereinfachung wird die Schwingung auf eine linear polarisierte Welle reduziert. Da die Sprengerschütterungen jedoch eine dreidimensionale Schwingung darstellt, sollte das Analyseverfahren angezweifelt werden. Hinsichtlich des Maximalwertes der Schwinggeschwindigkeit wäre eine Zuordnung der Frequenz hilfreich, um die Aussagekraft des Wertes zu steigern. Nach einer Analyse des Seismogramms aus Abbildung 45 geht hervor, dass der Maximalausschlag bei einer Frequenz von 62,5 Hz erfolgte. Zur Auswertung wurde das Seismogramm auf ein kleineres Zeitfenster reduziert und die hohen Frequenzen mit einem Tiefpassfilter (Cut-off = 100 Hz) bearbeitet. Die Frequenzen konnten anschließend durch eine Fast-Fourier-Transformation ermittelt werden.

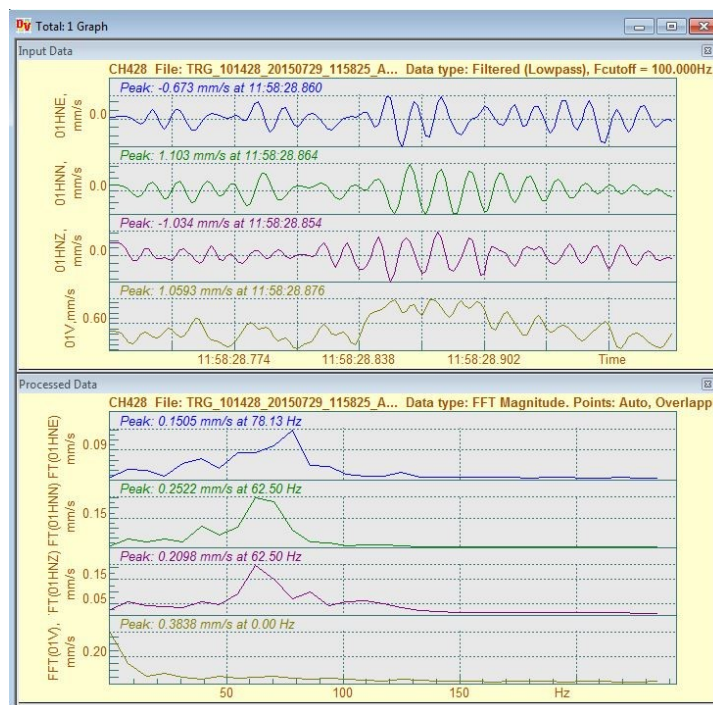


Abbildung 71: Frequenzspektrum nach Filterung des Seismogrammausschnittes von der Sprengung vom 29.7.2015

Der Vergleich der Seismogramme von den einzelnen Messstellen hat gezeigt, dass es Unterschiede zwischen jenen auf den Fest- und Lockergesteinen gibt. Repräsentativ wurden

Sprengerschütterungen

dafür zwei die beiden Seismogramme in Abbildung 72 und Abbildung 73 herangezogen, die das charakteristische Verhalten für Messstellen auf dem Fest- und Lockergestein zeigen. Sehr deutliche Unterschiede gehen beim Vergleich der einzelnen Frequenzspektren hervor. Diese zeigen, dass jene Geräte auf dem Festgestein auch unter Berücksichtigung der Entfernungsabhängigkeit weitaus tiefere Frequenzen aufweisen. Die Messstelle CH611 bildet dabei eine Ausnahme und ist durch höhere Frequenzen charakterisiert. Im Gegensatz dazu werden bei den übrigen Messgeräten auf Lockersedimenten höhere Frequenzen registriert.

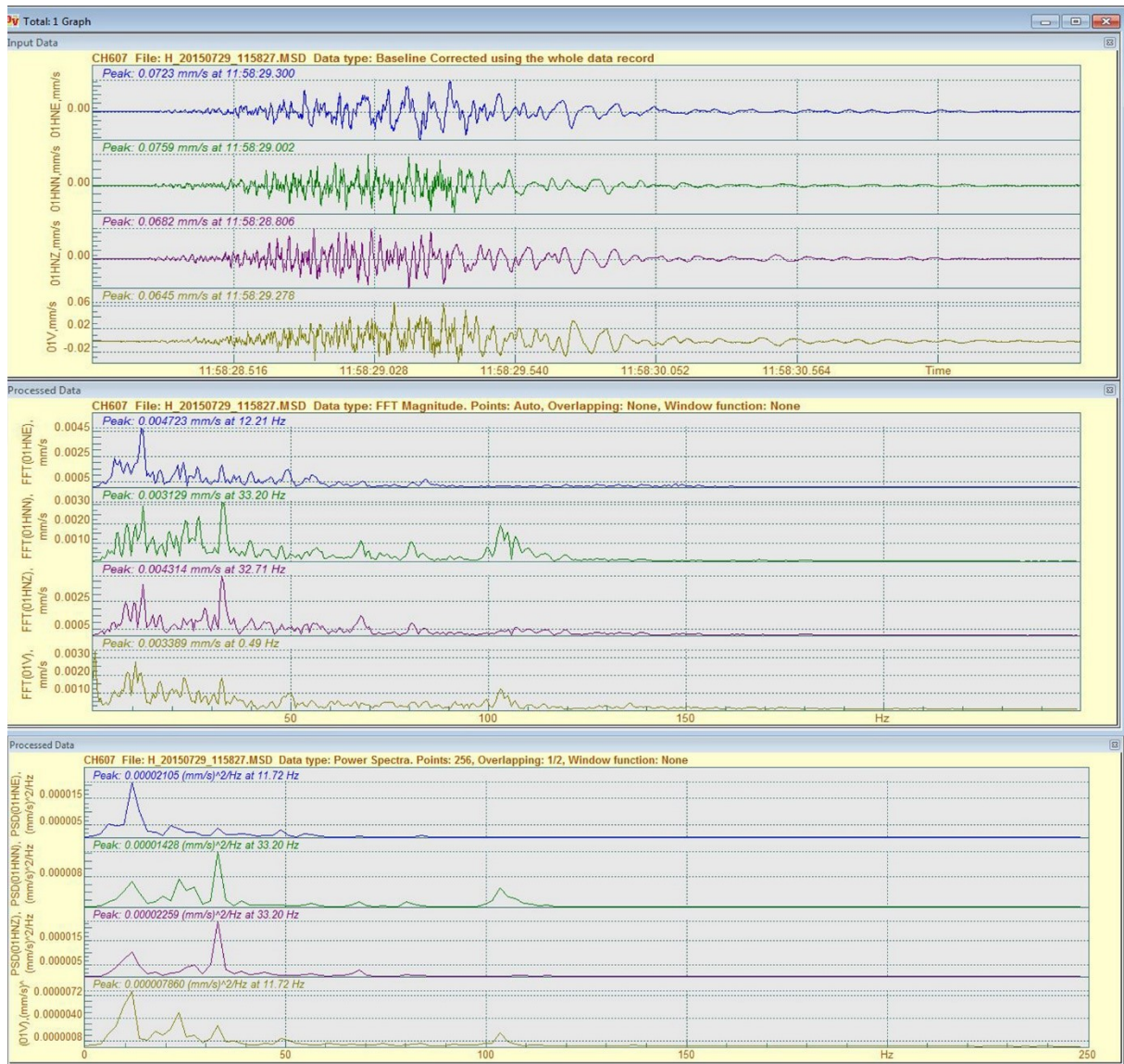


Abbildung 72: Charakteristisches Seismogramm mit FFT und dem Leistungsdichtespektrum einer Messstellen auf dem Festgestein (Sprengung vom 29.7.2015; 4 s - Ausschnitt)

Sprengerschütterungen

Ein weiterer signifikanter Unterschied tritt bezüglich der Schwingungsdauer auf. Dabei dauern die Auslenkungen der Bodenteilchen im Festgestein ungefähr 1,5 Mal länger als auf dem Lockersediment. Dies ist einerseits durch den unterschiedlichen Untergrund als auch durch verschiedene Entfernungen zu den Sprengstellen, durch die es zu einer Separation der unterschiedlichen Wellentypen kommt, zu begründen. Ebenso wurde das Leistungsdichtespektrum der beiden Diagramme untersucht. Wie aus den untersten Kurven in den Abbildung 72 und Abbildung 73 ersichtlich ist, erreicht die Leistungsdichte bei den tieffrequenten Schwingungen die höchsten Werte.

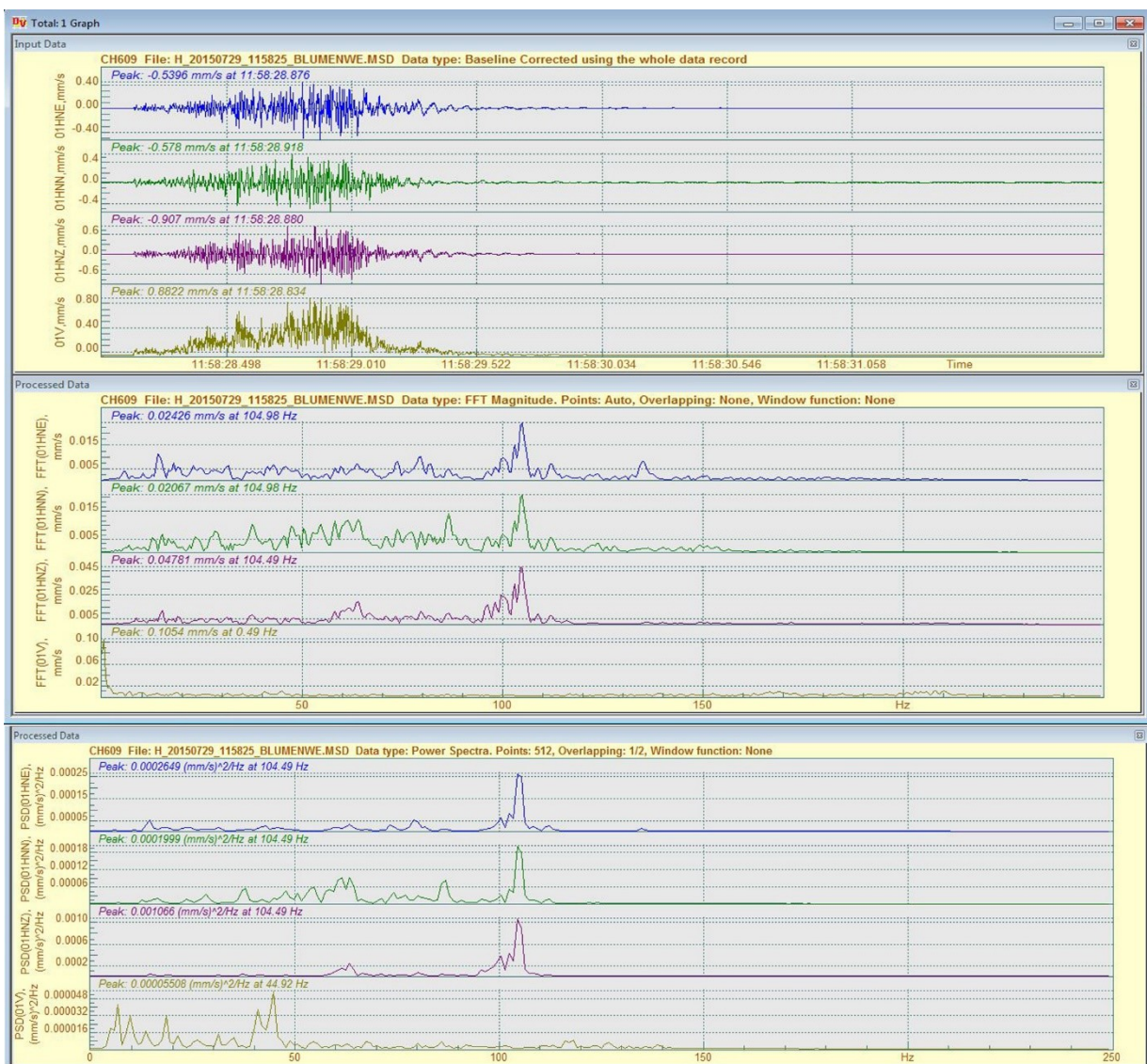


Abbildung 73: Charakteristisches Seismogramm mit FFT und dem Leistungsdichtespektrum einer Messstellen auf dem Lockersediment (Sprengung vom 29.7.2015; 4 s - Ausschnitt)

6.3 Sprengtechnische Einflussparameter auf die Erschütterungen

Auf Basis der Datenbank konnten verschiedene Auswertungen in Bezug auf die Erschütterungen realisiert werden. Zur Auswertung wurden die Maximalwerte der Schwinggeschwindigkeiten und die dominanten Frequenzen herangezogen.

6.3.1 Einfluss der Bruchwandorientierung

Durch expandierende Gase, die bei der Umsetzung des Sprengstoffes entstehen, werden die zertrümmerten Gesteinsmassen von der Wand weg bewegt. Einer theoretischen Überlegung zufolge müsste das wegschleudernde Gestein ähnlich wie eine Geschosskugel einen Rückstoß auf den Gebirgsverband bewirken. Diesem Ansatz zufolge sollten die Erschütterungen hinter der Bruchwand höher sein als davor. Zur Klärung dieser Fragestellung wurden mehrere Sprengungen miteinander verglichen. Um eine gute Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten wurden nur Wandsprengungen aus dem Bereich Jakobsberg herangezogen, die im Kalkstein des Gerstenhübelkalkes durchgeführt wurden. Die Sprengstellen befinden sich in etwa an der gleichen Stelle. Abweichungen werden über die skalierte Distanz korrigiert. Die maximale Lademenge pro Zündzeitstufe war in etwa bei allen Sprengungen gleich. Zur Auswertung wurden die Messstellen CH607, CH611 und CH612 (siehe Abbildung 44) hinter den ENE- bzw. neben und vor den SSE-einfallenden Bruchwänden herangezogen. Diese weisen ein ähnliches Verhalten auf und eignen sich daher gut. Die Position und die Streichrichtungen der jeweiligen Bruchwände gehen aus Abbildung 74 hervor.



Abbildung 74: Position und Raumlage der ausgewerteten Bruchwände im Satellitenbild und Schmidtschen Netz

Die Auswertung auf Basis der Maximalwerte der Amplituden und der skalierten Distanz konnte zeigen, dass bei einer ENE-einfallenden Bruchwand leicht erhöhte Werte bei den untersuchten Messstellen hinter der Bruchwand auftreten. Dies geht aus dem Vergleich der Messwerte in Abbildung 75 hervor. Dabei gehören die rot umrahmten Messwerte den nach SSE ausgerichteten Wänden und die blau umrahmten jenen der nach ENE orientierten Wänden an. Angesichts der logarithmischen Skalierung des Diagrammes in Abbildung 75 ist nur von einem geringen Einfluss der Bruchwandorientierung auf die Erschütterungscharakteristik auszugehen.

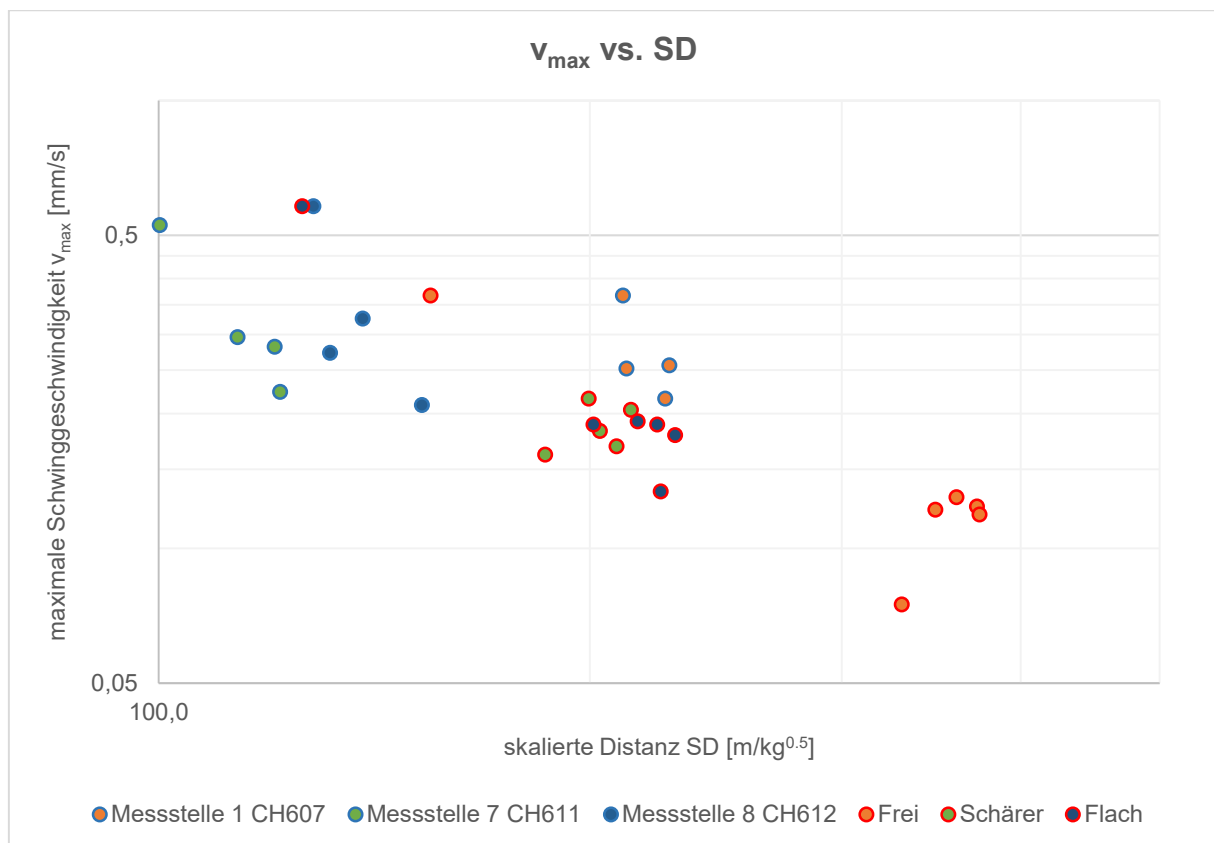


Abbildung 75: Auswertung des Einflusses der Bruchwandorientierung auf die Erschütterungscharakteristik auf Basis der maximalen Schwinggeschwindigkeiten und der skalierten Distanz

Zusätzlich zur oben stehenden Abbildung wurde anhand der Seismogramme eine Auswertung durchgeführt, um Auskunft über die Gesamtleistung der seismischen Wellen zu erhalten. Die Information kann mittels Integral über das Leistungsdichtespektrum gewonnen werden. Dies wurde anhand mehrerer Seismogramme ausgeführt. Stellvertretend sind die beiden nachstehenden Diagramme ausgewählt worden. Es handelt sich dabei um Sprengungen mit einer Gesamtsprengstoffmenge von 350 (Abbildung 77) bzw. 195 kg (Abbildung 76). Die Bruchwand der Sprengung 2015_09_16_01 ist nach ENE ausgerichtet wobei die jene der Sprengung 2015_07_31_01 nach SSE ausgerichtet ist. Die Sprengstellen befinden sich in einem Abstand von 874 m bzw. 953 m zu Messstelle CH607. Der Vergleich aller Gesamtleistungen aller drei Komponenten zeigt rund 20-fach höhere Werte bei der Sprengung

der nach ENE orientierten Wand, wobei sich das Messgerät direkt hinter dieser befindet. Auch unter Berücksichtigung der Abnahme der Energie pro Fläche aufgrund der dreidimensionalen Ausbreitung im Halbraum (Kapitel 4.4) zeigen die Werte eine signifikante Erhöhung, die die Ergebnisse der Abbildung 75 verifizieren.

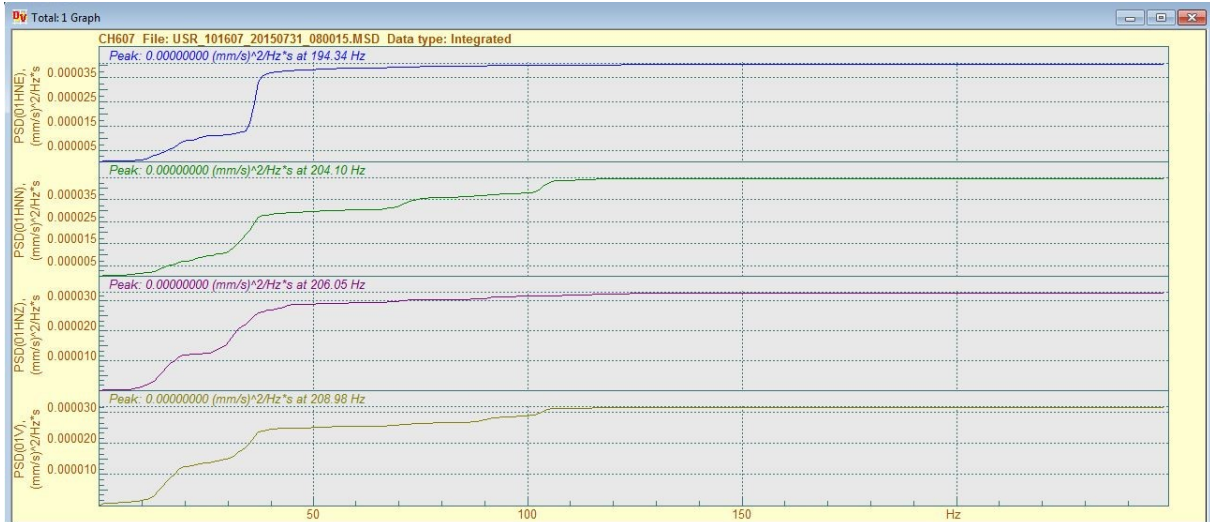


Abbildung 76: Gesamtleistung der Sprengung 2015_07_31_01 (SSE einfallende Bruchwand) an der Station CH607

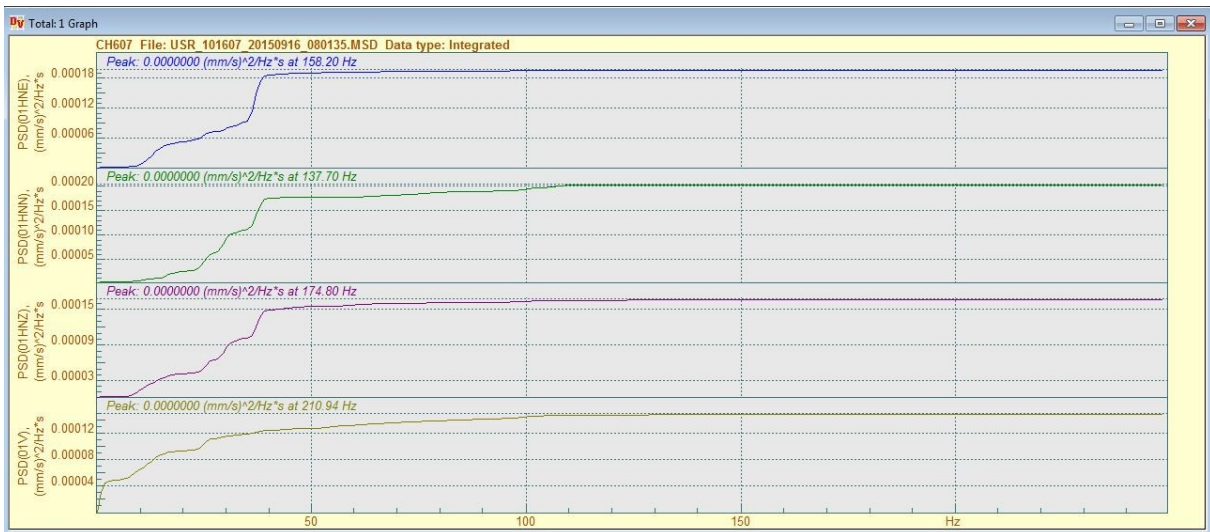


Abbildung 77: Gesamtleistung der Sprengung 2015_09_16_01 (ENE einfallende Bruchwand) an der Station CH607

6.3.2 Einfluss der spezifischen Sprengstoffmenge

Aus der Praxis ist bekannt, dass die spezifische Sprengstoffmenge einen bedeutenden Einfluss auf die Maximalamplituden der Schwinggeschwindigkeiten nimmt. Eine zu geringe spezifische Sprengstoffmenge kann in einer Erhöhung der Erschütterungen resultieren. Ein zu hoher spezifischer Sprengstoffeinsatz führt zu hohen Sicherheitsrisiken und erhöhten Kosten.

Sprengungen des Gerstenhübelkalksteines am Jakobsberg

Der Einfluss der spezifischen Lademenge sollte deshalb anhand von zwei Versuchen untersucht werden. Dabei wurden Auflockerungssprengungen in den Kalkgesteinen des Gerstenhübelkalkes ausgewählt, um vergleichbare Bedingungen zu garantieren. Zudem wurde darauf Acht genommen, dass die Einspannungsverhältnisse identisch sind. An den beiden Versuchsarealen wurden die Sprenganlagen laut Planung mit einer Bohrlochtiefe von 2,5 m eingerichtet und mit Patronen des Sprengstoffes Tovex A des Herstellers Société Suisse des Explosifs geladen.

Erster Teilversuch: Sprengung 2015_08_31_01 mit spezifischer Sprengstoffmenge von 160 g/m³

Die Dimension der Sprenganlage beträgt für den ersten Versuch 25,0 m x 12,5 m. Es wurden insgesamt 50 Bohrlöcher in 5 Reihen gebohrt. Die Ladung erfolgte in allen Bohrlöchern mittels einer Patrone Tovex A (ø 60 mm, Länge 800 mm). Aus den gemessenen Längen konnte das gesprengte Festgesteinsvolumen auf 781,25 m³ geschätzt werden. Aus der eingesetzten Sprengstoffmenge von insgesamt 125 kg ergibt sich demnach eine spezifische Sprengstoffmenge von 160 g pro Kubikmeter Festgestein. Die Verzögerungszeiten von Bohrloch zu Bohrloch betragen je 25 ms, zwischen den Reihen wurde ein Verzögerungsintervall von 42 ms ausgewählt.

Zweiter Teilversuch: Sprengung 2015_09_01_01 mit spezifischer Sprengstoffmenge von 224,4 g/m³

Die Dimensionen der zweiten Versuchsanlage beträgt 32,5 m x 8,5 m, was bei gleich bleibender Bohrlochlänge eine Kubatur von 690 m³ ergibt. Auch hier konnten die Bohrlochtiefen aller 41 Löcher eingehalten und Abweichungen vermieden werden. Sprengstoff wurde der gleiche wie zuvor verwendet, jedoch wurde dieses Mal die spezifische Sprengstoffmenge auf 224,4 g pro Kubikmeter Festgestein erhöht. Insgesamt wurden 155 kg Sprengstoff verbraucht. Das angewandte Zündschema blieb ebenfalls unverändert.

Die Auswertung der nach SN640312a reduzierten Messergebnisse erfolgte in Abbildung 78.

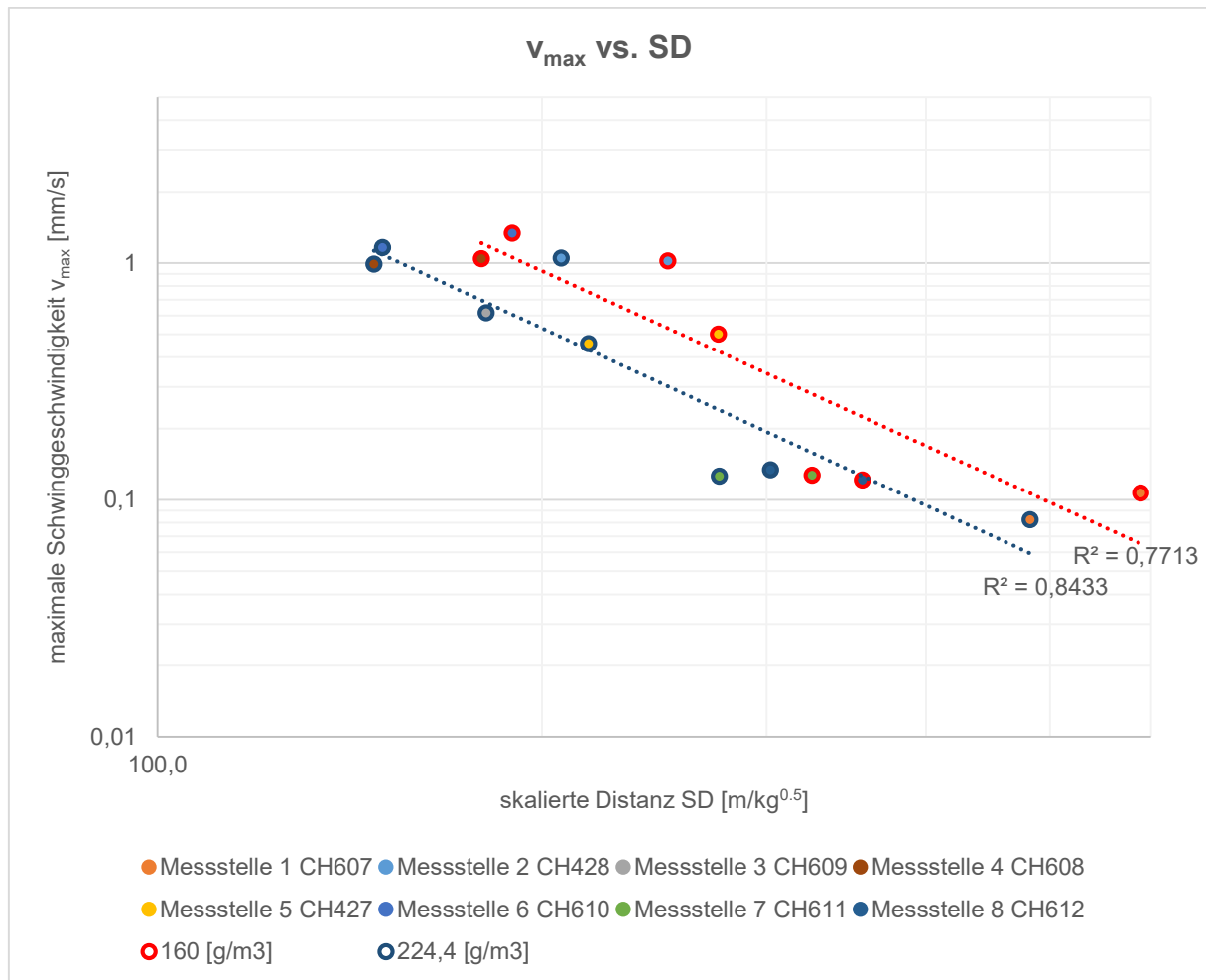


Abbildung 78: Auswertung der spezifischen Sprengstoffmenge hinsichtlich der Erschütterungscharakteristik im Gerstenhübelkalk auf Basis der maximalen Schwinggeschwindigkeiten und der skalierten Distanz

Die Sprengversuche mit unterschiedlichen spezifischen Sprengstoffmengen führten zu der Erkenntnis, dass die erhöhte Sprengstoffmenge zu keinem signifikanten Anstieg der Erschütterungen führt. An einzelnen Messstellen konnten geringfügig bessere Werte unter dem Einsatz von mehr Sprengstoff erzielt werden. Die blaue Regressionsgerade in Abbildung 78 zeigt beim Vergleich mit der roten Gerade einen leichten Versatz nach unten, was auf geringere maximal aufgetretene Schwinggeschwindigkeiten zurückzuführen ist. Zudem ist die blaue Regressionsgerade nach links verschoben, was mit einer höheren Lademenge pro Zündzeitstufe und einer leicht geänderten geographischen Position der Sprengstelle zu begründen ist. Die visuelle Begutachtung des Haufwerkes vermittelt den Eindruck, dass unter höherem Sprengstoffaufwand durchaus ein höherer Zerkleinerungsgrad erreicht wurde.

Sprengungen des Hauptrogensteines in der Unteregg

Anhand von drei Sprenganlagen in der Unteregg konnten wertvolle Ergebnisse über den optimalen spezifischen Sprengstoffverbrauch in dieser Lithologie gewonnen werden. Für diese Auswertung wurden die Messergebnisse der Sprengungen 2015_07_17_01, 2015_08_19_01 und 2015_10_28_01 herangezogen, die eine optimale Vergleichbarkeit der einzelnen Sprengungen gewährleisten. Dass diese gegeben ist, zeigt auch ein Vergleich der jeweiligen Seismogramme, die sehr ähnliche Muster sowohl bei den Auslenkungen als auch bei den Frequenzen aufweisen. Die Sprengungen wurden als einreihige Wandsprengungen ausgelegt, wobei alle Anlagen exakt dieselben Geometrien aufweisen. Die Bruchwände wurden fortlaufend erstellt, weshalb nur geringe Unterschiede bezüglich der Distanzen zu den einzelnen Messstellen existieren. Die durchschnittlichen Bohrlochlängen betragen rund 25 m. Gebohrt wurden jeweils 45 Löcher, die mit demselben Sprengstoff (Tovex A, Tovex T) mit unterschiedlichen Lademengen gefüllt wurden. Aufgrund der sehr tiefen Bohrungen erfolgte eine Zweiteilung der Ladesäule zur Erschütterungsminimierung, sodass maximal 75 kg Sprengstoff pro Zeitzündstufe zur Detonation gebracht wurden. Dabei ergaben sich spezifische Lademengen von 312, 345 und 390 g Sprengstoff pro Kubikmeter Festgestein. Aus Abbildung 79 ist aufgrund der Trendlinien ersichtlich, dass eine spezifische Sprengstoffmenge von rund 345 g/m³ ein optimales Ergebnis mit den minimalsten Erschütterungen liefert.

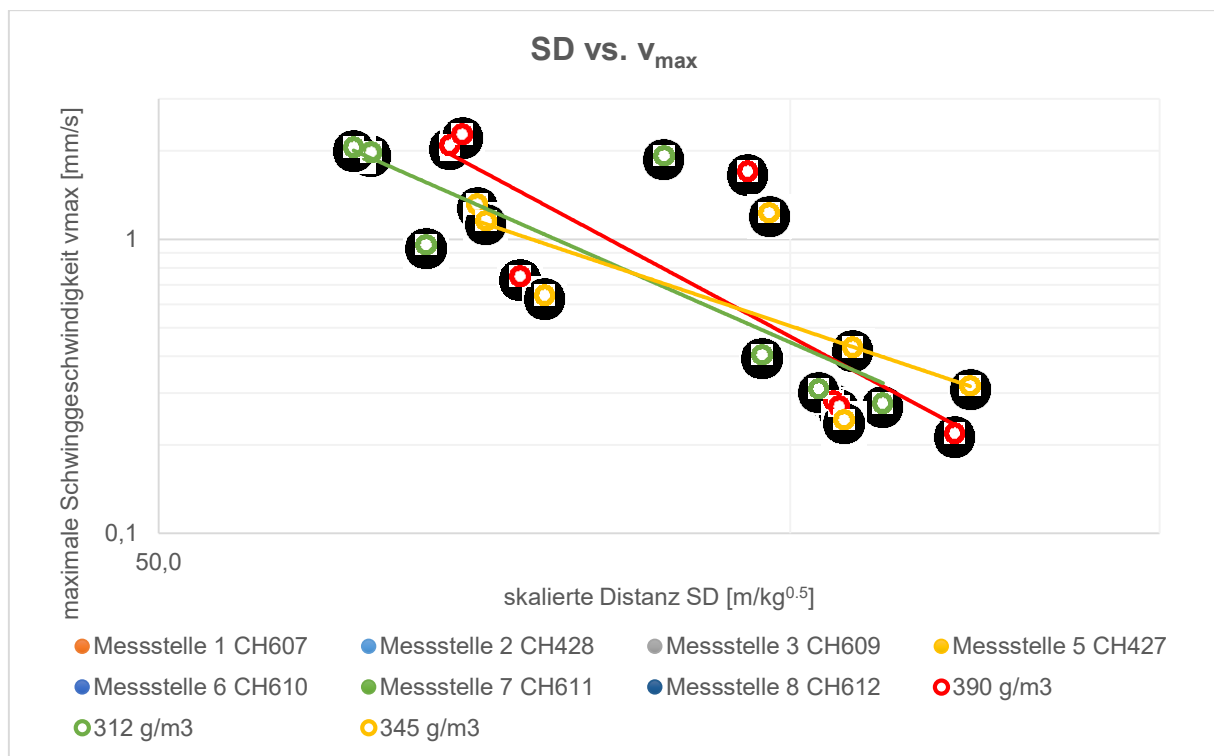


Abbildung 79: Auswertung der spezifischen Sprengstoffmenge hinsichtlich der Erschütterungscharakteristik im Hauptrogenstein auf Basis der maximalen Schwinggeschwindigkeiten und der skalierten Distanz

6.3.3 Einfluss der Brisanz des Sprengstoffes

Unter der Brisanz eines Sprengstoffes versteht man die Zertrümmerungswirkung auf seine unmittelbare Umgebung. Die Berechnung erfolgt aus dem Produkt der Detonationsgeschwindigkeit, der Dichte und der spezifischen Energie (KÖHLER et al. 1998). Zur Untersuchung des Einflusses der Sprengstoffbrisanz auf das Erschütterungsverhalten wurden Sprengversuche geplant. Da ein brisanterer Sprengstoff auch eine höhere Detonationsgeschwindigkeit aufweist, ist davon auszugehen, dass dieser laut den Überlegungen in Kapitel 3.3 zu verminderten Maximalamplituden führen sollte.

Für die Versuche wurden unter Berücksichtigung einer guten Reproduzierbarkeit vier verschiedene Sprengstellen eingerichtet. Bohrtechnisch sollen die Sprenganlagen durch kurze, vertikale Bohrlöcher mit einer geplanten Länge von 2,5 m verwirklicht werden. Die Vorgabe und der Seitenabstand der Bohrlöcher zueinander sollen ebenfalls je 2,5 m betragen. Verglichen werden sollen die Auswirkungen zweier verschiedener Sprengstoffe des Herstellers Société Suisse des Explosifs. Dabei handelt es sich um Patronen, die unter dem Handelsnamen Tovex A und Tovex S extra vertrieben werden. Alle Versuche sollen mit exakt derselben spezifischen Sprengstoffmenge von 240 g/m^3 durchgeführt werden. Anfangs sollen je Bohrloch 1,5 Patronen Tovex A (3,75 kg) gezündet werden. Anschließend sollen dieselben Versuche mit der äquivalenten Sprengstoffmenge Tovex S extra (3,75 kg) durchgeführt werden. Dazu sind aufgrund der höheren Sprengstoffdichte 1,33 Patronen notwendig. Die Zündschemata und Geometrien aller Versuchsreihen sind identisch. Geologisch liegen die Sprenganlagen am Übergangsbereich der Mergelgesteine und Kalkgesteine der Oberen Effinger Schichten.

Erste Teilversuchsreihe: Tovex A

Die Ladung der ersten zwei Sprenganlagen Nr. 2015_09_04_01 und 2015_09_08_01 mittels eineinhalb Patronen Tovex A (\varnothing 60 mm, Länge 800 mm). Gebohrt wurden 6 Reihen zu je 11 Bohrlöchern mit den geplanten Geometrien. Aufgrund der Gebirgsverhältnisse wurde bei der Sprengung vom 8.9.2015 auf 2 Löcher verzichtet, weshalb insgesamt 64 Bohrlöcher gesprengt wurden. Die Verzögerungszeit zwischen den Reihen betrug 42 ms, von Loch zu Loch betrug die Verzögerung 25 ms.

Zweite Teilversuchsreihe: Tovex S extra

Die Sprenganlagen Nr. 2015_09_10_01 und 2015_09_14_01 weisen eine identische Bohrgeometrie ist mit den beiden vorherigen auf. Beim Bohren der ersten Anlage musste ebenfalls aufgrund der vorliegenden Gebirgsverhältnisse auf zwei Löcher verzichtet werden. Die Ladung erfolgte dieses Mal mit dem brisanteren Sprengstoff Tovex S extra mit derselben spezifischen Lademenge.

Bei der Sprengung vom 10.9.2015 wurde aufgrund der Gebirgsverhältnisse in die ersten 5 Bohrlöcher geringfügig mehr Sprengstoff eingebracht. Dazu wurden maximal 1,5 Patronen in die Bohrlöcher eingebracht, was einer maximalen Lademenge von 4,2 kg pro Zündzeitstufe entspricht.

Auch bei der Sprengung vom 14.9.2015 mussten in den letzten vier Löchern 1,5 Patronen geladen werden. Dieser Abweichung von der Planung wird eine besondere Achtung in den Erschütterungsdiagrammen zugemessen.

Die Auswertung erfolgt erneut im nachstehenden Diagramm.

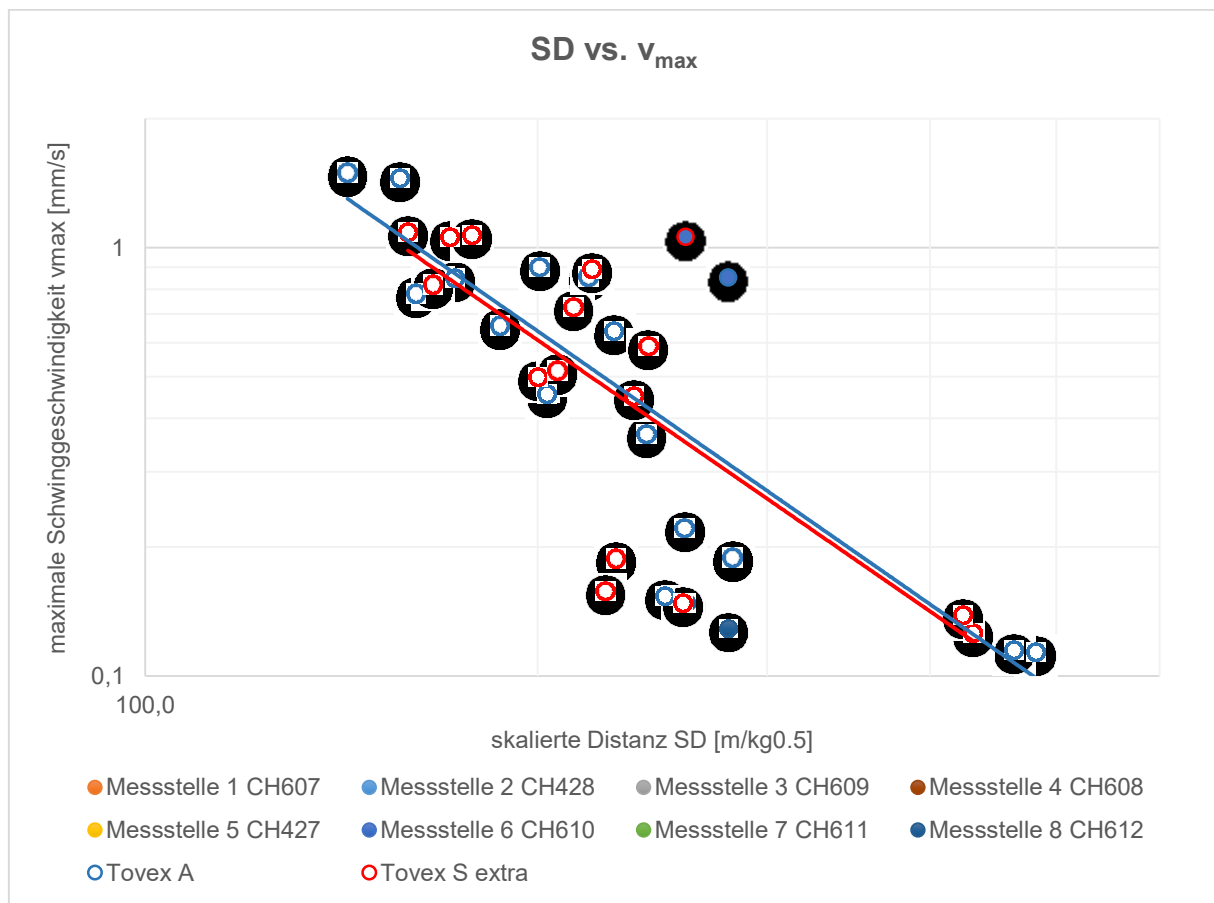
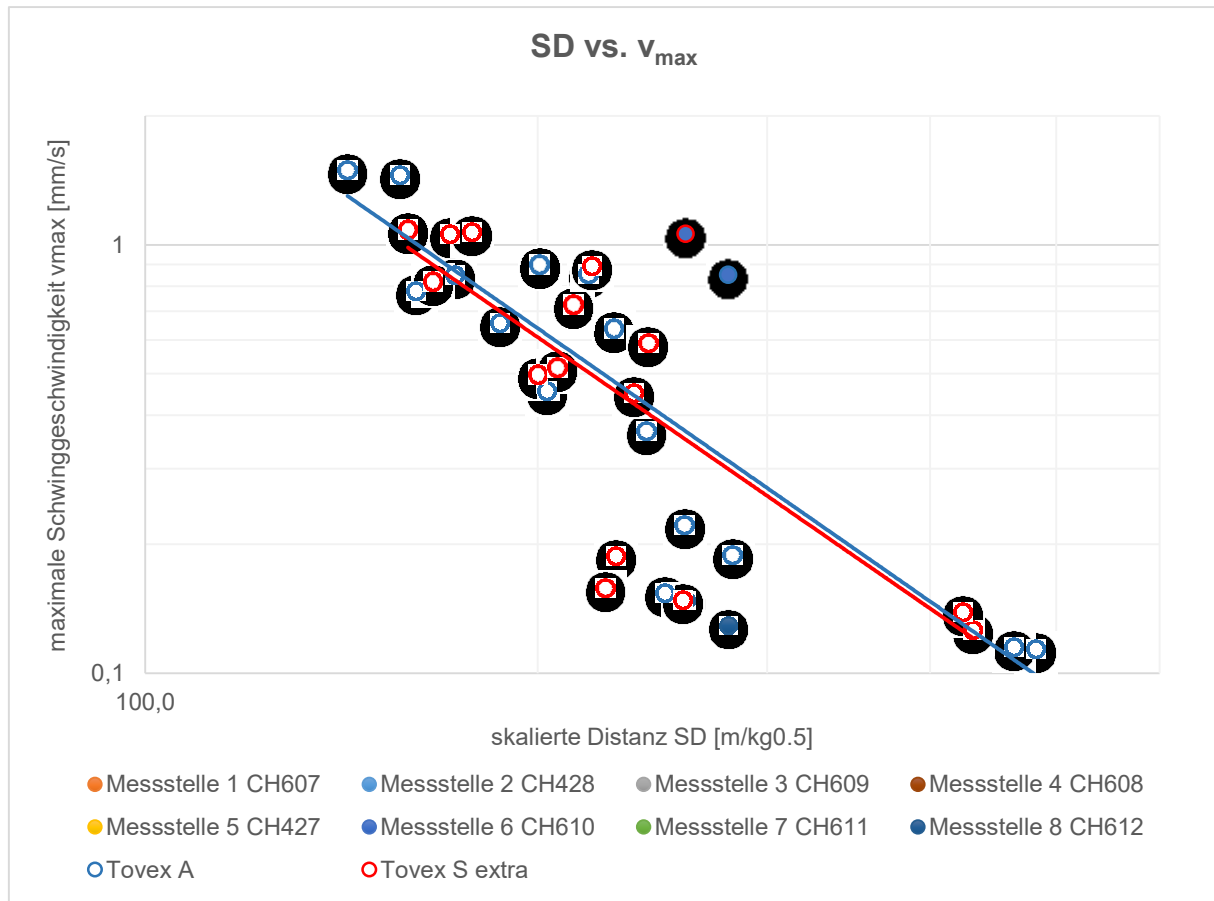


Abbildung 80: Auswertung der Sprengstoffbrisanz hinsichtlich der Erschütterungscharakteristik im Mergel- und Kalkgestein der Oberen Effinger Schichten auf Basis der maximalen Schwinggeschwindigkeiten und der skalierten Distanz

Die Sprengversuche mit Sprengstoffen unterschiedlicher Brisanz zeigen geringe Unterschiede. Einige der Messstellen weisen geringfügige Verbesserungen auf. So können trotz einer leicht höheren Sprengstoffmenge je Zeitzündstufe in einigen wenigen Bohrlöchern niedrigere bzw. gleichbleibend niedrige Schwinggeschwindigkeiten an den Messstellen erzielt werden. Aus den beiden Regressionsgeraden in Abbildung 80



geht hervor, dass die Verwendung des Sprengstoffes Tovex S extra zu leicht verringerten Maximalamplituden führt. Die Messungen jedoch eine stärkere Streuung im Vergleich zu den Versuchssprengungen mit Tovex A, weshalb der zugehörige Regressionskoeffizient mit 54,2 % deutlich niedriger ist. Offen bleibt die Frage, inwiefern die leicht erhöhte Sprengstoffmenge pro Zeitzündstufe die Erschütterungen beeinflusst. Die Untersuchung der zugehörigen Seismogramme der beiden Sprengungen zeigt die Maximalamplituden nicht dort, wo sie zu erwarten sind. Die Amplituden müssten bei der Sprengung vom 10.9.2015 zu Beginn bzw. am 14.9.2015 am Ende der Erschütterungsmesswerte ein Maximum aufweisen.

6.4 Erschütterungsprognosen

Für die Vorhersage der zu erwartenden maximalen Schwinggeschwindigkeiten steht eine umfangreiche Sammlung von Formeln zur Verfügung, die meist auf empirischen Zusammenhängen beruhen. Da keine der Formeln das komplexe Wellenausbreitungsverhalten und Inhomogenitäten des Untergrundes berücksichtigt, liegt der Gültigkeitsbereich im homogenen Halbraum. Eine weitere Problematik liegt in der fehlenden Berücksichtigung der Bohr-, Spreng-, und Zündtechnik sowie den Eigenschaften des Sprengstoffes, sodass zwangsläufig eine breite Streuung der Prognosen auftritt (MÜLLER et al., 2009). In dieser Arbeit sollen hinsichtlich der Prognosen vor allem die Untergrundverhältnisse berücksichtigt werden. Neben der Stärke des Quellsignales spielt dabei die Mächtigkeit der auflagernden Lockersedimente auf dem Festgestein eine entscheidende Rolle. In Abbildung 81 wurden die Mächtigkeiten der Lockersedimente auf dem Festgestein auf Basis von Geländebegehungen und Kartenrecherchen abgeschätzt. Aus diesen geht hervor, dass westlich des Steinbruches im Gemeindegebiet von Auenstein kaum nennenswerte Lockersedimentmächtigkeiten vorhanden sind. Erst in Ufernähe der Aare ist mit einer Zunahme der Mächtigkeiten zu rechnen. Da in diesem Bereich keine Gebäude stehen, kann dieses Gebiet bei der Prognose vernachlässigt werden. Angesichts der geringen Bedeckung kann das Gemeindegebiet von Auenstein vereinfacht als Homogenbereich betrachtet werden, welches aus Festgesteinen aufgebaut ist.

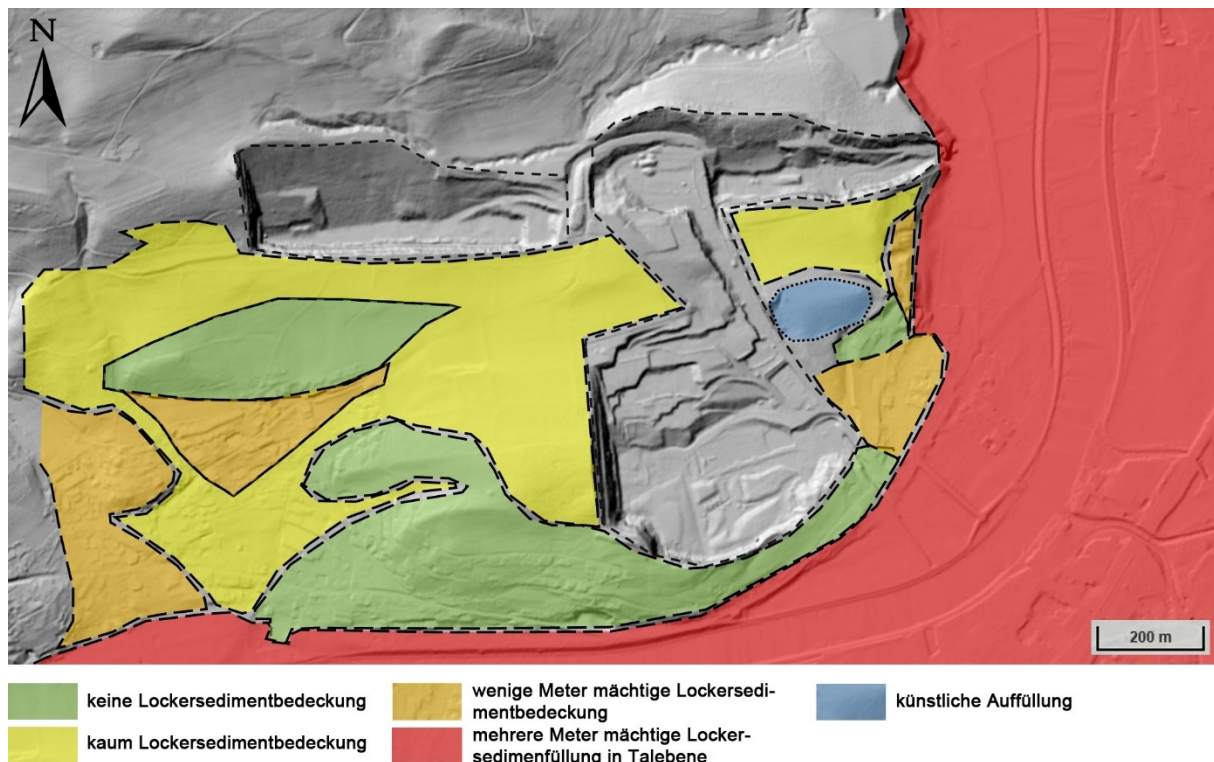


Abbildung 81: Abschätzung der Mächtigkeit der Lockersedimente

In dem Homogenbereich erweist sich die Abstands-Lademengen-Beziehung zur Voraussage der zu erwartenden maximalen Schwinggeschwindigkeiten als hilfreich. Diese dienen zur groben Abschätzung der Schwinggeschwindigkeit im Gelände außerhalb eines Gebäudes (SCHILLINGER et al., 2014). Die Beziehung geht auf die grundlegenden Erkenntnisse von KOCH (1958) zurück und berücksichtigt die erheblichsten Einflussgrößen wie die Entfernung des Sprengortes zum Messpunkt und die Lademenge pro Zündzeitstufe. Nach diversen Weiterentwicklungen existiert eine Formel zur Abschätzung der erwartenden Werte für sedimentäre Gesteine, welche in einer guten Näherung die vorherrschenden Verhältnisse im Bereich Auenstein beschreibt. Aufgrund der guten Korrelation wird die Anwendung der folgenden Formel für den Bereich Auenstein als sinnvoll erachtet:

$$v_{max} = 969 * L^{0,6} * r^{-1,5}$$

v_{max} ... Maximale Schwinggeschwindigkeit $\left[\frac{mm}{s}\right]$

L ... Maximale Lademenge pro Zündzeitstufe [kg]

r ... Entfernung zwischen Sprengort und Messstelle [m]

Formel 6-3

Der Vergleich der Messwerte mit den Prognosen zeigt eine akzeptable Übereinstimmung, wie aus der nachstehenden Tabelle anhand der Messstation CH607 ersichtlich ist.

| maximale Schwinggeschwindigkeit | Prognose | Abweichung |
|---------------------------------|------------------|------------|
| v_{max} [mm/s] | v_{max} [mm/s] | [%] |
| 0,124 | 0,101 | -18,3 |
| 0,128 | 0,124 | -2,9 |
| 0,283 | 0,472 | 66,8 |
| 0,182 | 0,117 | -35,6 |
| 0,14 | 0,221 | 58,1 |
| 0,075 | 0,117 | 56,7 |
| 0,213 | 0,468 | 119,5 |
| 0,1274 | 0,213 | 66,9 |
| 0,119 | 0,101 | -15,4 |
| 0,122 | 0,110 | -9,8 |
| 0,252 | 0,215 | -14,8 |
| 0,311 | 0,485 | 56,1 |
| 0,1733 | 0,121 | -30,3 |
| 0,13 | 0,106 | -18,1 |
| 0,367 | 0,317 | -13,6 |
| 0,367 | 0,215 | -41,5 |
| 0,107 | 0,059 | -44,8 |
| 0,0825 | 0,089 | 8,0 |
| 0,114 | 0,075 | -34,2 |
| 0,469 | 0,724 | 54,4 |
| 0,115 | 0,079 | -30,9 |
| 0,126 | 0,087 | -30,8 |
| 0,139 | 0,089 | -35,6 |
| 0,216 | 0,190 | -11,9 |
| 0,1187 | 0,190 | 60,4 |
| 0,3718 | 0,716 | 92,6 |
| 0,2563 | 0,190 | -25,8 |
| 0,358 | 0,695 | 94,1 |
| 0,529 | 0,313 | -40,9 |
| 0,275 | 0,180 | -34,6 |
| 0,216 | 0,179 | -17,1 |

Tabelle 7: Vergleich der wahren und prognostizierten maximalen Schwinggeschwindigkeiten der Messstelle CH607

Auf Basis dieser Beziehung kann die Vorhersage der maximalen Amplitude unter der Bekanntgabe der maximalen Lademenge pro Zündzeitstufe getroffen werden. Diese werden im Folgenden für verschiedene Sprengstoffmengen je Zündzeitstufe angegeben:

| Entfernung | Prognose (7,5 kg je ZZS) | Entfernung | Prognose (15 kg je ZZS) | Entfernung | Prognose (25 kg je ZZS) |
|------------|-----------------------------|------------|----------------------------|------------|----------------------------|
| [m] | [mm/s] | [m] | [mm/s] | [m] | [mm/s] |
| 100 | 3,246 | 100 | 4,920 | 100 | 6,685 |
| 125 | 2,323 | 125 | 3,521 | 125 | 4,783 |
| 150 | 1,767 | 150 | 2,678 | 150 | 3,639 |
| 175 | 1,402 | 175 | 2,125 | 175 | 2,888 |
| 200 | 1,148 | 200 | 1,740 | 200 | 2,363 |
| 225 | 0,962 | 225 | 1,458 | 225 | 1,981 |
| 250 | 0,821 | 250 | 1,245 | 250 | 1,691 |
| 275 | 0,712 | 275 | 1,079 | 275 | 1,466 |
| 300 | 0,625 | 300 | 0,947 | 300 | 1,286 |
| 325 | 0,554 | 325 | 0,840 | 325 | 1,141 |
| 350 | 0,496 | 350 | 0,751 | 350 | 1,021 |
| 375 | 0,447 | 375 | 0,678 | 375 | 0,921 |
| 400 | 0,406 | 400 | 0,615 | 400 | 0,836 |
| 425 | 0,370 | 425 | 0,562 | 425 | 0,763 |
| 450 | 0,340 | 450 | 0,515 | 450 | 0,700 |
| 475 | 0,314 | 475 | 0,475 | 475 | 0,646 |
| 500 | 0,290 | 500 | 0,440 | 500 | 0,598 |
| 525 | 0,270 | 525 | 0,409 | 525 | 0,556 |
| 550 | 0,252 | 550 | 0,381 | 550 | 0,518 |
| 575 | 0,235 | 575 | 0,357 | 575 | 0,485 |
| 600 | 0,221 | 600 | 0,335 | 600 | 0,455 |
| 625 | 0,208 | 625 | 0,315 | 625 | 0,428 |
| 650 | 0,196 | 650 | 0,297 | 650 | 0,403 |
| 675 | 0,185 | 675 | 0,281 | 675 | 0,381 |
| 700 | 0,175 | 700 | 0,266 | 700 | 0,361 |
| 725 | 0,166 | 725 | 0,252 | 725 | 0,342 |
| 750 | 0,158 | 750 | 0,240 | 750 | 0,325 |
| 775 | 0,150 | 775 | 0,228 | 775 | 0,310 |
| 800 | 0,143 | 800 | 0,217 | 800 | 0,295 |
| 825 | 0,137 | 825 | 0,208 | 825 | 0,282 |
| 850 | 0,131 | 850 | 0,199 | 850 | 0,270 |
| 975 | 0,107 | 975 | 0,162 | 975 | 0,220 |
| 1000 | 0,103 | 1000 | 0,156 | 1000 | 0,211 |

Tabelle 8: Prognostizierte maximale Schwinggeschwindigkeiten im Bereich Auenstein für verschiedene Lademengen je Zündzeitstufe

Die Vorhersage der maximalen Schwinggeschwindigkeiten im Bereich Veltheim-Au scheint aufgrund des geschichteten Bodenaufbaus mit Locker- und Festgesteinen wesentlich komplizierter zu sein. Wie im Kapitel 4 bereits erwähnt, erfährt die Amplitude beim Übergang vom Festgestein ins Lockergestein eine signifikante Erhöhung. Das Verhalten der Amplituden kann näherungsweise in vereinfachter Form über eine Übertragungsfunktion wiedergegeben werden. Als Vereinfachung wird im Folgenden eine homogene Sedimentschicht auf einer elastischen Festgesteinsschicht ohne Dämpfung behandelt. Demnach ergibt sich die Amplitudenverstärkungsfunktion über die folgende Formel. Aus ihr geht hervor, dass eine starke Abhängigkeit vom Frequenzinhalt der anregenden Bewegung sowie von der Schichtdicke und den S-Wellengeschwindigkeiten gegeben ist (MESKOURIS et al., 2011).

$$|F(\omega, \xi = 0)| = \frac{1}{\sqrt{\cos^2(k_{se} * h) + I^2 * k_{se} * h}}$$

k_{se} ... Wellenzahl [m^{-1}]

h ... Schichtmächtigkeit [m]

I ... Impedanzverhältnis von Sediment/Fels [–]

Formel 6-4

Von den Auswertungen der Frequenzen an den jeweiligen Messstationen ist bekannt, dass die Maximalausschläge bei rund 60 Hz stattfinden. Deshalb wird die Berechnung der Amplitudenverstärkungsfunktion für diese Frequenz durchgeführt. Die Sedimentmächtigkeit kann durch Raumlage- und Höhenmessungen für die Messstation CH610 gut berechnet werden. Demnach kann hier eine Mächtigkeit von rund 15 m ermittelt werden. Aus gravimetrischen Kartierungen wird die Mächtigkeit der Lockersedimente im Bereich der Aare auf rund 20 – 30 m geschätzt. Die Amplitudenverstärkungsfaktoren erreichen für die verschiedenen Mächtigkeiten folgende Werte unter Annahme von wassergesättigten Sedimenten mit einer S-Wellengeschwindigkeit von 800 m/s und einer Dichte von 2000 kg/m³. Die Werte der Festgesteine wurden aus den Labormessungen übernommen (Dichte = 2560 kg/m³, $v_s = 3952$ m/s).

| h [m] | F($\omega, \xi=0$) [-] |
|-------|--------------------------|
| 1 | 1,114 |
| 2 | 1,646 |
| 3 | 4,088 |
| 4 | 2,648 |
| 5 | 1,338 |
| 6 | 1,013 |
| 7 | 0,972 |
| 8 | 1,156 |
| 9 | 1,790 |
| 10 | 2,913 |
| 11 | 1,726 |
| 12 | 1,121 |
| 13 | 0,941 |
| 14 | 0,967 |
| 15 | 1,216 |
| 16 | 1,876 |
| 17 | 2,109 |
| 18 | 1,339 |
| 19 | 0,991 |
| 20 | 0,900 |
| 21 | 0,980 |
| 22 | 1,286 |
| 23 | 1,839 |
| 24 | 1,626 |
| 29 | 1,351 |
| 30 | 1,682 |

Tabelle 9: Amplitudenverstärkungsfaktoren für verschiedene Mächtigkeiten der Sedimente

Unter Verwendung der in Tabelle 8 prognostizierten Schwinggeschwindigkeiten würden bei einer Lockergesteinsmächtigkeit folgende Amplituden im Frequenzbereich von 60 Hz erzeugt:

| Entfernung | Prognose (7,5 kg je ZS) | Prognose: Übergang Festgestein zu Lockergestein (7,5 kg je ZS) | | Entfernung | Prognose (15 kg je ZS) | Prognose: Übergang Festgestein zu Lockergestein (15 kg je ZS) | | Entfernung | Prognose (25 kg je ZS) | Prognose: Übergang Festgestein zu Lockergestein (25 kg je ZS) |
|------------|----------------------------|---|--|------------|---------------------------|--|--|------------|---------------------------|--|
| [m] | [mm/s] | [mm/s] | | [m] | [mm/s] | [mm/s] | | [m] | [mm/s] | [mm/s] |
| 100 | 3,246 | 5,459 | | 100 | 4,920 | 8,274 | | 100 | 6,685 | 11,242 |
| 125 | 2,323 | 3,906 | | 125 | 3,521 | 5,921 | | 125 | 4,783 | 8,044 |
| 150 | 1,767 | 2,972 | | 150 | 2,678 | 4,504 | | 150 | 3,639 | 6,119 |
| 175 | 1,402 | 2,358 | | 175 | 2,125 | 3,574 | | 175 | 2,888 | 4,856 |
| 200 | 1,148 | 1,930 | | 200 | 1,740 | 2,925 | | 200 | 2,363 | 3,975 |
| 225 | 0,962 | 1,617 | | 225 | 1,458 | 2,452 | | 225 | 1,981 | 3,331 |
| 250 | 0,821 | 1,381 | | 250 | 1,245 | 2,093 | | 250 | 1,691 | 2,844 |
| 275 | 0,712 | 1,197 | | 275 | 1,079 | 1,814 | | 275 | 1,466 | 2,465 |
| 300 | 0,625 | 1,051 | | 300 | 0,947 | 1,592 | | 300 | 1,286 | 2,164 |
| 325 | 0,554 | 0,932 | | 325 | 0,840 | 1,412 | | 325 | 1,141 | 1,919 |
| 350 | 0,496 | 0,834 | | 350 | 0,751 | 1,264 | | 350 | 1,021 | 1,717 |
| 375 | 0,447 | 0,752 | | 375 | 0,678 | 1,139 | | 375 | 0,921 | 1,548 |
| 400 | 0,406 | 0,682 | | 400 | 0,615 | 1,034 | | 400 | 0,836 | 1,405 |
| 425 | 0,370 | 0,623 | | 425 | 0,562 | 0,944 | | 425 | 0,763 | 1,283 |
| 450 | 0,340 | 0,572 | | 450 | 0,515 | 0,867 | | 450 | 0,700 | 1,178 |
| 475 | 0,314 | 0,527 | | 475 | 0,475 | 0,799 | | 475 | 0,646 | 1,086 |
| 500 | 0,290 | 0,488 | | 500 | 0,440 | 0,740 | | 500 | 0,598 | 1,006 |
| 525 | 0,270 | 0,454 | | 525 | 0,409 | 0,688 | | 525 | 0,556 | 0,935 |
| 550 | 0,252 | 0,423 | | 550 | 0,381 | 0,641 | | 550 | 0,518 | 0,872 |
| 575 | 0,235 | 0,396 | | 575 | 0,357 | 0,600 | | 575 | 0,485 | 0,815 |
| 600 | 0,221 | 0,371 | | 600 | 0,335 | 0,563 | | 600 | 0,455 | 0,765 |
| 625 | 0,208 | 0,349 | | 625 | 0,315 | 0,530 | | 625 | 0,428 | 0,719 |
| 650 | 0,196 | 0,329 | | 650 | 0,297 | 0,499 | | 650 | 0,403 | 0,678 |
| 675 | 0,185 | 0,311 | | 675 | 0,281 | 0,472 | | 675 | 0,381 | 0,641 |
| 700 | 0,175 | 0,295 | | 700 | 0,266 | 0,447 | | 700 | 0,361 | 0,607 |
| 725 | 0,166 | 0,280 | | 725 | 0,252 | 0,424 | | 725 | 0,342 | 0,576 |
| 750 | 0,158 | 0,266 | | 750 | 0,240 | 0,403 | | 750 | 0,325 | 0,547 |
| 775 | 0,150 | 0,253 | | 775 | 0,228 | 0,384 | | 775 | 0,310 | 0,521 |
| 800 | 0,143 | 0,241 | | 800 | 0,217 | 0,366 | | 800 | 0,295 | 0,497 |
| 825 | 0,137 | 0,230 | | 825 | 0,208 | 0,349 | | 825 | 0,282 | 0,474 |
| 850 | 0,131 | 0,220 | | 850 | 0,199 | 0,334 | | 850 | 0,270 | 0,454 |
| 875 | 0,127 | 0,211 | | 875 | 0,191 | 0,319 | | 875 | 0,259 | 0,434 |
| 900 | 0,123 | 0,203 | | 900 | 0,184 | 0,305 | | 900 | 0,249 | 0,415 |
| 925 | 0,119 | 0,195 | | 925 | 0,177 | 0,292 | | 925 | 0,240 | 0,397 |
| 950 | 0,116 | 0,188 | | 950 | 0,171 | 0,279 | | 950 | 0,231 | 0,380 |
| 975 | 0,113 | 0,181 | | 975 | 0,165 | 0,267 | | 975 | 0,222 | 0,363 |
| 1000 | 0,110 | 0,174 | | 1000 | 0,159 | 0,255 | | 1000 | 0,213 | 0,346 |

Tabelle 10: Prognosen der erzielten Schwinggeschwindigkeiten beim Übergang der seismischen Wellen vom Festgestein zum Lockergestein

Durch die Anwendung der Formel 4-3 kann die Abnahme der Amplitude in den Lockersedimenten auf Basis der errechneten Maximalamplituden am Übergangsbereich zwischen den Fest- und Lockergesteinen abgeschätzt werden. Die Amplitude im Festgestein beim Übergangsbereich wird dabei über die Formel 6-3 abgeschätzt. Die Berechnung der Erhöhung der Amplitude am Übergangsbereich wird über die Gesetzmäßigkeit 6-4 eruiert. Von diesem Wert ausgehend wird die Dämpfung und sphärische Divergenz über die Formel 4-3 ermittelt. Der Dämpfungsfaktor wurde aus den Seismogrammen abgeschätzt, wobei diese mit $0,006 \text{ m}^{-1}$ angenommen wird. Die Amplituden wurden in den folgenden Tabellen für verschiedene Entfernungen ermittelt.

Sprengerschütterungen

| Entfernung | Prognose (7,5 kg je ZS) | Prognose: Übergang Festgestein zu Lockergestein (7,5 kg je ZS) | Entfernung vom Übergangsbereich Fest- zu Lockergestein | Prognose aufgrund der Dämpfung als Funktion der Entfernung vom Übergangsbereich | Entfernung vom Übergangsbereich Fest- zu Lockergestein | Prognose aufgrund der Dämpfung als Funktion der Entfernung vom Übergangsbereich | Entfernung vom Übergangsbereich Fest- zu Lockergestein | Prognose aufgrund der Dämpfung als Funktion der Entfernung vom Übergangsbereich |
|------------|-------------------------|--|--|---|--|---|--|---|
| [m] | [mm/s] | [mm/s] | [m] | [mm/s] | [m] | [mm/s] | [m] | [mm/s] |
| 100 | 3,246 | 5,459 | 50 | 2,696 | 100 | 1,498 | 200 | 0,548 |
| 125 | 2,323 | 3,906 | 50 | 2,067 | 100 | 1,191 | 200 | 0,453 |
| 150 | 1,767 | 2,972 | 50 | 1,651 | 100 | 0,978 | 200 | 0,384 |
| 175 | 1,402 | 2,358 | 50 | 1,359 | 100 | 0,824 | 200 | 0,331 |
| 200 | 1,148 | 1,930 | 50 | 1,144 | 100 | 0,706 | 200 | 0,291 |
| 225 | 0,962 | 1,617 | 50 | 0,980 | 100 | 0,615 | 200 | 0,258 |
| 250 | 0,821 | 1,381 | 50 | 0,853 | 100 | 0,541 | 200 | 0,231 |
| 275 | 0,712 | 1,197 | 50 | 0,750 | 100 | 0,482 | 200 | 0,209 |
| 300 | 0,625 | 1,051 | 50 | 0,667 | 100 | 0,432 | 200 | 0,190 |
| 325 | 0,554 | 0,932 | 50 | 0,598 | 100 | 0,391 | 200 | 0,174 |
| 350 | 0,496 | 0,834 | 50 | 0,540 | 100 | 0,356 | 200 | 0,160 |
| 375 | 0,447 | 0,752 | 50 | 0,491 | 100 | 0,326 | 200 | 0,148 |
| 400 | 0,406 | 0,682 | 50 | 0,449 | 100 | 0,300 | 200 | 0,137 |
| 425 | 0,370 | 0,623 | 50 | 0,413 | 100 | 0,277 | 200 | 0,128 |
| 450 | 0,340 | 0,572 | 50 | 0,381 | 100 | 0,257 | 200 | 0,119 |
| 475 | 0,314 | 0,527 | 50 | 0,353 | 100 | 0,239 | 200 | 0,112 |
| 500 | 0,290 | 0,488 | 50 | 0,329 | 100 | 0,223 | 200 | 0,105 |
| 525 | 0,270 | 0,454 | 50 | 0,307 | 100 | 0,209 | 200 | 0,099 |
| 550 | 0,252 | 0,423 | 50 | 0,287 | 100 | 0,197 | 200 | 0,093 |
| 575 | 0,235 | 0,396 | 50 | 0,270 | 100 | 0,185 | 200 | 0,088 |
| 600 | 0,221 | 0,371 | 50 | 0,254 | 100 | 0,175 | 200 | 0,084 |
| 625 | 0,208 | 0,349 | 50 | 0,240 | 100 | 0,165 | 200 | 0,080 |
| 650 | 0,196 | 0,329 | 50 | 0,227 | 100 | 0,157 | 200 | 0,076 |
| 675 | 0,185 | 0,311 | 50 | 0,215 | 100 | 0,149 | 200 | 0,072 |
| 700 | 0,175 | 0,295 | 50 | 0,204 | 100 | 0,142 | 200 | 0,069 |
| 725 | 0,166 | 0,280 | 50 | 0,194 | 100 | 0,135 | 200 | 0,066 |
| 750 | 0,158 | 0,266 | 50 | 0,185 | 100 | 0,129 | 200 | 0,063 |
| 775 | 0,150 | 0,253 | 50 | 0,176 | 100 | 0,123 | 200 | 0,061 |
| 800 | 0,143 | 0,241 | 50 | 0,168 | 100 | 0,118 | 200 | 0,058 |
| 825 | 0,137 | 0,230 | 50 | 0,161 | 100 | 0,113 | 200 | 0,056 |
| 850 | 0,131 | 0,220 | 50 | 0,154 | 100 | 0,108 | 200 | 0,054 |
| 975 | 0,107 | 0,179 | 50 | 0,126 | 100 | 0,089 | 200 | 0,045 |
| 1000 | 0,103 | 0,173 | 50 | 0,122 | 100 | 0,086 | 200 | 0,043 |

Tabelle 11: Maximalamplituden im Lockersediment in Abhängigkeit von der Entfernung des Übergangsbereiches für 7,5 kg Sprengstoff je Zündzeitstufe

| Entfernung | Prognose (15 kg je ZS) | Prognose: Übergang Festgestein zu Lockergestein (15 kg je ZS) | Entfernung vom Übergangsbereich Fest- zu Lockergestein | Prognose aufgrund der Dämpfung als Funktion der Entfernung vom Übergangsbereich | Entfernung vom Übergangsbereich Fest- zu Lockergestein | Prognose aufgrund der Dämpfung als Funktion der Entfernung vom Übergangsbereich | Entfernung vom Übergangsbereich Fest- zu Lockergestein | Prognose aufgrund der Dämpfung als Funktion der Entfernung vom Übergangsbereich |
|------------|------------------------|---|--|---|--|---|--|---|
| [m] | [mm/s] | [mm/s] | [m] | [mm/s] | [m] | [mm/s] | [m] | [mm/s] |
| 100 | 4,920 | 8,274 | 50 | 4,087 | 100 | 2,271 | 200 | 0,831 |
| 125 | 3,521 | 5,921 | 50 | 3,133 | 100 | 1,805 | 200 | 0,686 |
| 150 | 2,678 | 4,504 | 50 | 2,502 | 100 | 1,483 | 200 | 0,581 |
| 175 | 2,125 | 3,574 | 50 | 2,059 | 100 | 1,248 | 200 | 0,502 |
| 200 | 1,740 | 2,925 | 50 | 1,734 | 100 | 1,070 | 200 | 0,441 |
| 225 | 1,458 | 2,452 | 50 | 1,486 | 100 | 0,932 | 200 | 0,391 |
| 250 | 1,245 | 2,093 | 50 | 1,292 | 100 | 0,821 | 200 | 0,350 |
| 275 | 1,079 | 1,814 | 50 | 1,137 | 100 | 0,730 | 200 | 0,316 |
| 300 | 0,947 | 1,592 | 50 | 1,011 | 100 | 0,655 | 200 | 0,288 |
| 325 | 0,840 | 1,412 | 50 | 0,907 | 100 | 0,593 | 200 | 0,263 |
| 350 | 0,751 | 1,264 | 50 | 0,819 | 100 | 0,539 | 200 | 0,242 |
| 375 | 0,678 | 1,139 | 50 | 0,745 | 100 | 0,494 | 200 | 0,224 |
| 400 | 0,615 | 1,034 | 50 | 0,681 | 100 | 0,454 | 200 | 0,208 |
| 425 | 0,562 | 0,944 | 50 | 0,626 | 100 | 0,420 | 200 | 0,193 |
| 450 | 0,515 | 0,867 | 50 | 0,578 | 100 | 0,389 | 200 | 0,181 |
| 475 | 0,475 | 0,799 | 50 | 0,536 | 100 | 0,362 | 200 | 0,169 |
| 500 | 0,440 | 0,740 | 50 | 0,498 | 100 | 0,338 | 200 | 0,159 |
| 525 | 0,409 | 0,688 | 50 | 0,465 | 100 | 0,317 | 200 | 0,150 |
| 550 | 0,381 | 0,641 | 50 | 0,436 | 100 | 0,298 | 200 | 0,142 |
| 575 | 0,357 | 0,600 | 50 | 0,409 | 100 | 0,281 | 200 | 0,134 |
| 600 | 0,335 | 0,563 | 50 | 0,385 | 100 | 0,265 | 200 | 0,127 |
| 625 | 0,315 | 0,530 | 50 | 0,363 | 100 | 0,251 | 200 | 0,121 |
| 650 | 0,297 | 0,499 | 50 | 0,343 | 100 | 0,237 | 200 | 0,115 |
| 675 | 0,281 | 0,472 | 50 | 0,325 | 100 | 0,226 | 200 | 0,110 |
| 700 | 0,266 | 0,447 | 50 | 0,309 | 100 | 0,215 | 200 | 0,105 |
| 725 | 0,252 | 0,424 | 50 | 0,294 | 100 | 0,204 | 200 | 0,100 |
| 750 | 0,240 | 0,403 | 50 | 0,280 | 100 | 0,195 | 200 | 0,096 |
| 775 | 0,228 | 0,384 | 50 | 0,267 | 100 | 0,186 | 200 | 0,092 |
| 800 | 0,217 | 0,366 | 50 | 0,255 | 100 | 0,178 | 200 | 0,088 |
| 825 | 0,208 | 0,349 | 50 | 0,244 | 100 | 0,171 | 200 | 0,085 |
| 850 | 0,199 | 0,334 | 50 | 0,234 | 100 | 0,164 | 200 | 0,081 |
| 875 | 0,190 | 0,320 | 50 | 0,224 | 100 | 0,157 | 200 | 0,078 |
| 900 | 0,182 | 0,306 | 50 | 0,215 | 100 | 0,151 | 200 | 0,076 |
| 925 | 0,175 | 0,294 | 50 | 0,207 | 100 | 0,146 | 200 | 0,073 |
| 950 | 0,168 | 0,283 | 50 | 0,199 | 100 | 0,140 | 200 | 0,070 |
| 975 | 0,162 | 0,272 | 50 | 0,192 | 100 | 0,135 | 200 | 0,068 |
| 1000 | 0,156 | 0,262 | 50 | 0,185 | 100 | 0,131 | 200 | 0,066 |

Tabelle 12: Maximalamplituden im Lockersediment in Abhängigkeit von der Entfernung des Übergangsbereiches für 15 kg Sprengstoff je Zündzeitstufe

| Entfernung | Prognose (25 kg je ZS) | Prognose: Übergang Festgestein zu Lockergestein (25 kg je ZS) | Entfernung vom Übergangsbereich Fest- zu Lockergestein | Prognose aufgrund der Dämpfung als Funktion der Entfernung vom Übergangsbereich | Entfernung vom Übergangsbereich Fest- zu Lockergestein | Prognose aufgrund der Dämpfung als Funktion der Entfernung vom Übergangsbereich | Entfernung vom Übergangsbereich Fest- zu Lockergestein | Prognose aufgrund der Dämpfung als Funktion der Entfernung vom Übergangsbereich |
|------------|------------------------|---|--|---|--|---|--|---|
| [m] | [mm/s] | [mm/s] | [m] | [mm/s] | [m] | [mm/s] | [m] | [mm/s] |
| 100 | 6,685 | 11,242 | 50 | 5,552 | 100 | 3,085 | 200 | 1,129 |
| 125 | 4,783 | 8,044 | 50 | 4,257 | 100 | 2,453 | 200 | 0,932 |
| 150 | 3,639 | 6,119 | 50 | 3,400 | 100 | 2,015 | 200 | 0,790 |
| 175 | 2,888 | 4,856 | 50 | 2,798 | 100 | 1,696 | 200 | 0,683 |
| 200 | 2,363 | 3,975 | 50 | 2,356 | 100 | 1,454 | 200 | 0,599 |
| 225 | 1,981 | 3,331 | 50 | 2,019 | 100 | 1,266 | 200 | 0,531 |
| 250 | 1,691 | 2,844 | 50 | 1,756 | 100 | 1,115 | 200 | 0,476 |
| 275 | 1,466 | 2,465 | 50 | 1,545 | 100 | 0,992 | 200 | 0,430 |
| 300 | 1,286 | 2,164 | 50 | 1,374 | 100 | 0,891 | 200 | 0,391 |
| 325 | 1,141 | 1,919 | 50 | 1,232 | 100 | 0,805 | 200 | 0,358 |
| 350 | 1,021 | 1,717 | 50 | 1,113 | 100 | 0,733 | 200 | 0,329 |
| 375 | 0,921 | 1,548 | 50 | 1,012 | 100 | 0,671 | 200 | 0,304 |
| 400 | 0,836 | 1,405 | 50 | 0,925 | 100 | 0,617 | 200 | 0,282 |
| 425 | 0,763 | 1,283 | 50 | 0,850 | 100 | 0,570 | 200 | 0,263 |
| 450 | 0,700 | 1,178 | 50 | 0,785 | 100 | 0,529 | 200 | 0,246 |
| 475 | 0,646 | 1,086 | 50 | 0,728 | 100 | 0,492 | 200 | 0,230 |
| 500 | 0,598 | 1,006 | 50 | 0,677 | 100 | 0,460 | 200 | 0,216 |
| 525 | 0,556 | 0,935 | 50 | 0,632 | 100 | 0,431 | 200 | 0,204 |
| 550 | 0,518 | 0,872 | 50 | 0,592 | 100 | 0,405 | 200 | 0,193 |
| 575 | 0,485 | 0,815 | 50 | 0,556 | 100 | 0,381 | 200 | 0,182 |
| 600 | 0,455 | 0,765 | 50 | 0,523 | 100 | 0,360 | 200 | 0,173 |
| 625 | 0,428 | 0,719 | 50 | 0,494 | 100 | 0,340 | 200 | 0,164 |
| 650 | 0,403 | 0,678 | 50 | 0,467 | 100 | 0,323 | 200 | 0,156 |
| 675 | 0,381 | 0,641 | 50 | 0,442 | 100 | 0,306 | 200 | 0,149 |
| 700 | 0,361 | 0,607 | 50 | 0,420 | 100 | 0,291 | 200 | 0,142 |
| 725 | 0,342 | 0,576 | 50 | 0,399 | 100 | 0,278 | 200 | 0,136 |
| 750 | 0,325 | 0,547 | 50 | 0,380 | 100 | 0,265 | 200 | 0,130 |
| 775 | 0,310 | 0,521 | 50 | 0,363 | 100 | 0,253 | 200 | 0,125 |
| 800 | 0,295 | 0,497 | 50 | 0,346 | 100 | 0,242 | 200 | 0,120 |
| 825 | 0,282 | 0,474 | 50 | 0,331 | 100 | 0,232 | 200 | 0,115 |
| 850 | 0,270 | 0,454 | 50 | 0,317 | 100 | 0,223 | 200 | 0,111 |
| 875 | 0,258 | 0,434 | 50 | 0,304 | 100 | 0,214 | 200 | 0,106 |
| 900 | 0,248 | 0,416 | 50 | 0,292 | 100 | 0,206 | 200 | 0,103 |
| 925 | 0,238 | 0,400 | 50 | 0,281 | 100 | 0,198 | 200 | 0,099 |
| 950 | 0,228 | 0,384 | 50 | 0,270 | 100 | 0,191 | 200 | 0,096 |
| 975 | 0,220 | 0,369 | 50 | 0,260 | 100 | 0,184 | 200 | 0,092 |
| 1000 | 0,211 | 0,356 | 50 | 0,251 | 100 | 0,177 | 200 | 0,089 |

Tabelle 13: Maximalamplituden im Lockersediment in Abhängigkeit von der Entfernung des Übergangsbereiches für 25 kg Sprengstoff je Zündzeitstufe

Nach den Berechnungen könnte eine Sprengung in den Oberen Effinger Schichten mit einer maximalen Lademenge von 25 kg je Zündzeitstufe die Erschütterungscharakteristik in Abbildung 82 aufweisen. Die Sprengstelle ist mit dem roten Stern im Westen markiert. Die blaue Kurve stellt die Maximalamplituden im Festgestein dar, wohingegen der Wechsel zu den Lockersedimenten eine Erhöhung der Werte der orangen Kurve bewirkt. Zudem ist gut ersichtlich, dass die Dämpfung der Schwingung in den Lockersedimenten weitaus besser ist als im Festgestein.



Abbildung 82: Prognostizierte Maximalamplituden einer Sprengung in den Oberen Effinger Schichten

6.5 Erschütterungsreduktion

Die Sprengversuche haben Möglichkeiten aufgezeigt, wie die Erschütterungsimmissionen minimiert werden können. Im Zuge der Versuche kann immer nur der Einfluss von jeweils einem Parameter erforscht werden. Da sich daraus eine große Vielfalt an Versuchsreihen ergibt, soll dieser Abschnitt einen kurzen Überblick geben, welche Veränderungen zu besseren Resultaten beitragen können. Bereits durch eine Optimierung des Bohrrasters ist eine Reduktion der Erschütterungen zu erwarten. Einerseits spielt die Einhaltung der Bohrgenauigkeit eine bedeutende Rolle für die Minimierung der Erschütterungen. Da Ungenauigkeiten mit zunehmender Bohrlänge und Neigung größer werden, wird die Erstellung von kurzen, vertikalen Bohrlöchern empfohlen (REICHHOLF et al., 2008). Zudem ist auf die Einhaltung der exakten Bohrlochlänge erforderlich. Dadurch werden Unterbohrungen vermieden, die sich ansonsten negativ auf die Erschütterungen auswirken. Werden diese bewusst gebohrt, so ist darauf zu achten, dass diese möglichst klein gehalten werden. Nach REICHHOLF et al. sind Unterbohrungen bis 0,8 m vollkommen ausreichend. Zudem wird für den Endbesatz die Verwendung von Kies mit einer Körnung von 8-15 mm anstatt Bohrmehl empfohlen. Nach der empirischen Abstand-Lademenge-Beziehung von KOCH (1958) würde eine Verringerung der Sprengstoffmenge pro Zündzeitstufe eine Verbesserung bringen. Dies könnte beispielsweise durch die Verkleinerung des Bohrlochdurchmessers erfolgen. Nach MÜLLER et al. (2010) sind bei der Dimensionierung der Sprenganlagen weitere Optimierungsmöglichkeiten vorhanden. Demnach ist der spezifische Sprengstoffverbrauch mit den bereits vorhandenen Schwächezonen im Fels abzugleichen. Die Verwendung einer einheitlichen Sprengstoffart dient ebenfalls zur besseren Steuerung der Erschütterungen. Beim Beladen der Bohrlöcher ist nach Möglichkeit bis auf den Endbesatz auf einen 100%igen Füllungsgrad zu achten. Zusätzlich ist auf einen einheitlichen spezifischen Sprengstoffeinsatz bei allen Bohrlöchern der jeweiligen Sprenganlage zu achten. Ein weiterer Verbesserungsansatz nach MÜLLER et al. (2010) schlägt eine Planung von mehrreihigen Sprenganlagen vor, die zu einer besseren energetischen Ausnutzung der Sprengstoffe führen. In Bezug auf die Bohrgeometrie soll das Seitenverhältnis von Bohrlochabstand zu Reihenabstand ab der zweiten Reihe größer gleich 1 sein. Die Ladesäule ist überdies aus einem einheitlichen Sprengstoff aufzubauen. Die Zündung der Sprengladungen sollte progressiv von einer Seite oder aus der Mitte nach links bzw. rechts erfolgen. Nach MÜLLER et al. (2010) würd die Auslegung der Sprengung nach der Impulstheorie die Zündung von mehrere Bohrlöchern simultan in einem stumpfen Winkel zur freien Fläche erlauben. Dabei konnte eine Erhöhung der der Maximalamplituden statistischen Auswertungen zufolge vermieden werden.

7. Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Das Projekt verfolgt das Hauptziel die sprengbezogenen Erschütterungen in den Steinbrüchen der Jura-Cement-Fabriken in Wildegg zu analysieren und zu minimieren.

Als Basis wurden zu Projektbeginn die geologischen Gegebenheiten erkundet. Diese offenbaren, dass neben den triassischen Kalk- und Mergelgesteinen auch quartäre Sedimente in den Steinbrüchen. Diese treten auch in der Talebene der Aare auf.

In einer petrophysikalischen Studie wurden Proben der verschiedenen Formationen auf ihre elastischen Eigenschaften untersucht. Dabei wurden aus gemessenen Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten und Dichten die elastischen Modulus und die akustischen Impedanzen der jeweiligen Formationen abgeleitet. Auf Basis dieser Resultate konnte ein geringes Optimierungspotential bezüglich der Sprengstoffauswahl festgestellt werden. Nach derzeitigem Stand erfolgen die Sprengungen unter transsonischen Verhältnissen. Durch Umstellung auf einen brisanteren Sprengstoff können die Erschütterungen geringfügig verbessert werden. Zudem konnten aufgrund der berechneten akustischen Impedanzen die Formationen nach deren Erschütterungsempfindlichkeiten eingeteilt werden. Jene Gesteine mit eher niedrigen akustischen Impedanzen wie beispielsweise Mergelgesteine sind durch eine hohe Erschütterungsempfindlichkeit charakterisiert.

Das unterschiedliche Erschütterungsverhalten in den Gemeinden Auenstein und Veltheim-Au konnte über das Wellenausbreitungsverhalten begründet werden. Westlich und südwestlich des Steinbruches im Auensteiner Gemeindegebiet wurden an verschiedenen Seismometern tendenziell niedrigfrequente Schwingungen aufgezeichnet, wohingegen unter Berücksichtigung der starken Entfernungsabhängigkeit im Gemeindegebiet von Veltheim-Au höher frequente Schwingungen mit deutlich höheren maximalen Schwinggeschwindigkeiten auftreten. Das unterschiedliche Verhalten konnte auf wechselnde geologische Untergrundverhältnisse zurückgeführt werden.

In Bezug auf die Sprengtechnik wurde der Bohr- und Sprengprozess einer Begutachtung unterzogen. Dabei konnte ein Abbild der präzise ausgeführten Arbeiten von den Bohristen und Sprengbefugten gewonnen werden. Messtechnische Untersuchungen der Bohrlöcher bestätigen die Einhaltung hoher Genauigkeiten. Bezüglich der Zündfolge der Sprenganlagen könnten vertiefende Untersuchungen eventuelle Verbesserungsmöglichkeiten aufzeigen. Die Auslegung von Sprengungen nach der Impulstheorie wobei mehrere Bohrlöcher simultan gezündet werden, würde ein Forschungs- und Optimierungspotential mit sich bringen.

Um Erschütterungsimmissionen zu verringern wurden verschiedene Versuche durchgeführt. Dabei stellte sich heraus, dass durch die Ausrichtung der Bruchwand geringfügige Verbesserungen bei ENE-einfallenden Bruchwände zu erzielen sind. Als weitere Haupteinflussgröße für die Erschütterungscharakteristik konnte die spezifische Sprengstoffmenge hervorgehoben werden. Abweichungen in beide Richtungen vom optimalen Wert führen zu einer Erhöhung der Maximalamplituden. Eine Reduktion der Schwinggeschwindigkeiten kann über die Zündung kleinerer Lademengen pro Zündzeitstufe unter Einhaltung der optimalen, spezifischen Sprengstoffmenge. Dies könnte beispielsweise in den schallweichen Gesteinen der Oberen- und Unteren Effinger Schichten durch einen kleineren Bohrlochdurchmesser erreicht werden.

Als problematisch erwiesen sich weitere Auswertungen zur Feststellung der Einflussgröße verschiedener Parameter auf die Erschütterungscharakteristik aus der Datenbank. Oftmals ließen verschiedene Umstände eine Vergleichbarkeit nicht zu. Einige der Analysen ließen keine signifikanten Trends erkennen und blieben erfolglos.

Bezüglich der Erschütterungsmesswerte liegen alle Werte unter den gesetzlich vorgeschriebenen Grenzwerten. Betreffs dem Schadenspotential von Bauwerken ist die Erschütterungsanregung von sehr kurzer Dauer, sodass eine Schwingungsanfächung als zu gering eingestuft werden kann. Die Auswertung der komplexen Schwingungen nach der Schweizer Norm SN640312a reduziert diese auf den Maximalwert einer linear polarisierten Welle. Die starke Simplifizierung ist nach STEINHAUSER (2010) als kritisch anzusehen, da die Kompression und Scherung in dreidimensionalem Raum wirken. Für eine spreng- und erschütterungstechnische Analyse wäre eine Zeitreihenanalyse das geeignete Mittel, um statistisch gesicherte Ergebnisse des gesamten Amplituden- und Frequenzspektrums zu erhalten. Angesichts der knappen Zeit konnten Zeitreihenanalysen nicht mehr durchgeführt werden. Die Auswertungen in dieser Arbeit wurden zum Teil mit der Herstellereigenen Software durchgeführt. Diese beinhaltet die grundsätzlichen Optionen zur Filterung der Daten und für eine erste Begutachtung der Schwingungsdiagramme. Angesichts einer umständlichen Bedienung der Software und dem fehlenden Potential für erweiterte Analysen ist diese als ungeeignet einzustufen. Mittels Zeitreihenanalysen wäre eine sinnvolle Prozessierung der Rohdaten möglich, womit eine tiefgründige Untersuchung der spreng- und erschütterungstechnischen Einflussgrößen erfolgen kann.

Literaturverzeichnis

AKI, K. et al. (2009): Quantitative Seismology Second Edition, University Science Books, U.S.

ALLENBACH, R. P. (2001): Synsedimentary tectonics in an epicontinental sea: a new interpretation of the Oxfordian basins of northern Switzerland. *Ecol Geol Helv* 94:265–287

BIAGGI, D. et al. (2014): Arbeitsbericht NAB 13-31 Geologisches Baugrundmodell für das geologische Standortgebiet Jura Ost als Proxi für den Faziesraum West

BRAILE, L. (2010): Seismic Wave Demonstrations and Animations:
<http://web.ics.purdue.edu/~braile/edumod/waves/WaveDemo.htm>, abgerufen am 14.1.2016

BRODTRAGER, E. (2014): Untersuchungen zu betrieblichen Emissionen Im Bereich des aktuellen Abbaus und der geplanten Abbauerweiterungsbereiche des Steinbruchs der Firma Jura Cement in Wildegg

BURKHALTER, R.M. (1996): Die Passwang-Alloformation (Unteres Aalenien bis unteres Bajocien) im zentralen und nördlichen Schweizer Jura, *Eclogae geol. Helv.* 89/3: 875-934

BUXTORF, A. (1916): Prognosen und befunde beim Hauesnsteinbasis und Grenchenbergtunnel und die geologie des Juragebirges. *Verhandlungen der Naturforschenden Gesellschaft in Basel* 27, 184–205

CLAUSER, C. (2014): Einführung in die Geophysik Globale physikalische Felder und Prozesse in der Erde, Berlin [u.a.] / Springer Spektrum (2014)

CLOETINGH, S. et al., (2005): Intraplate deformation and 3D rheological structure of the Rhine Rift System and adjacent areas of the northern Alpine foreland. *International Journal of Earth Sciences* 94, 758-778.

FEHLMANN, H. et al. (1962): Die eisenhaltigen Doggererze der Schweiz. *Beiträger zur Geologie der Schweiz, Geotechnische Serie, XIII. Lieferung.* 7.

GANDER, P. (2004): Arbeitsbericht NAB 04-04 Geologie und Hydrogeologie der Oberen Süsswassermolasse Dokumentation des aktuellen Kenntnisstandes

GONZALEZ, R. et al. (1996): Stratigraphy and paleogeography of the Hauptrogenstein and Klingnau Formations (middle Bajocian to late Bathonian), northern Switzerland. *Eclogae Geologicae Helveticae*, 89: 695-720.

GYGI, R. (2000): Integrated Stratigraphy of the Oxfordian and Kimmeridgian (Late Jurassic) in northern Switzerland and adjacent southern Germany. – Denkschr. Schweiz. Akad. Naturwiss., 104: 151 S.; Basel (Birkhäuser).

HANN, H. P. et al. (2000): Neue Daten zur Tektonik des Südschwarzwalds.- Jber. Mitt. Oberrhein. Geol. Ver., N. F. 82:363-376. Stuttgart.

ISEE Field Practice Guidelines for Blasting Seismographs (2009)

JORDAN, P. et al. (2011a): Geologischer Atlas der Schweiz 1:25'000, Blatt 135 Aarau (LK 1089) – Erläuterungen. Bundesamt für Landestopografie swisstopo, Bern.

KOCH, W. (1958): Zur Möglichkeit der Abgrenzung von Lademengen bei Steinbruchsprengungen nach festgestellten Erschütterungsstärken. Nobel Hefte. 24:92–96

KÖHLER, J. et al. (1998). Explosivstoffe (9., überarb. und erw. Aufl.). Weinheim: Wiley-VCH

KOUZNIAK, N. et al. (1998): Supersonic detonation in rock mass - Analytical solutions and validation of numerical models - Part 1: Stress analysis. FRAGBLAST – International Journal of Blasting and Fragmentation 2: 449-486.

LAWS, S. et al. (2007): Geologie und Hydrogeologie der Effinger Schichten im Tafeljura und am Jurasüdfuss. Zusammenfassung des Wissensstandes vor den Untersuchungen in den EWS-Bohrungen Küttigen 1, Küttigen 2 und Oftringen. Mit Beiträgen von U. Eichenberger & P.-Y. Jeannin, Schweizerisches Institut für Speläologie und Karstforschung. Nagra Arbeitsbericht NAB 07-28. Nagra, Wettingen.

LEINS, W. et al. (1973): Ermittlung der Sprengfähigkeit von Gesteinen, Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen Volume 2364

MEDICI, F. et al. (1995): Geothermal map of Switzerland 1995 : (heat flow density). Schweizerische Geophysikalische Kommission, 30, 36 pp

MESKOURIS, K. et al. (2011): Bauwerke und Erdbeben: Grundlagen - Anwendung - Beispiele Gebundene Ausgabe – August 2011

MÜLLER, B. et al. (2007): The physically interpretable and statistically proved forecast and evaluation of blast vibrations.- Proc. of the EVACES'07 – Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures, Porto, Portugal, 24-26 October 2007, pp. 125-126.

MÜLLER, B. et al. (2009): Entwicklung eines Verfahrens zur definierten Berechnung von Gewinnungssprengungen und deren Erschütterungsimmissionen zur Reduzierung der Umwelteinwirkungen sowie Erhöhung der Sicherheit Abschlussbericht über ein Projekt, gefördert unter dem Aktenzeichen: 24578-21/0 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

MÜLLER, B. et al. (2009): Entwicklung eines Verfahrens zur definierten Berechnung von Gewinnungssprengungen und deren Erschütterungsimmissionen zur Reduzierung der Umwelteinwirkungen sowie Erhöhung der Sicherheit, Abschlussbericht über ein Projekt, gefördert unter dem Aktenzeichen: 24578-21/0 von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

MÜLLER, B. et al., (2009): Wichtige Ergebnisse des Forschungsvorhabens „Umweltfreundliche Sprengtechnik“. SPRENGINFO 31

MÜLLER, B. et al., (2010): Sprengtechnik nach neuesten Erkenntnissen - Grundsätze, Möglichkeiten und Konsequenzen. SPRENGINFO 32 (2010) 1

NAGRA, (1988): Technischer Bericht NTB 88-25 Sedimentstudie Zwischenbericht 1988: Möglichkeiten zur Endlagerung Langlebiger Radioaktiver Abfälle in den Sedimenten der Schweiz

NAGRA, (1991): Technischer Bericht NTB 90-04 Zur Tektonik der zentralen Nordschweiz Interpretation aufgrund regionaler Seismik, Oberflächengeologie und Tiefbohrungen

NAGRA, (2008): Technischer Bericht NTB 08-03 Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager. Darlegung der Anforderungen, des Vorgehens und der Ergebnisse

NAGRA, (2008): Technischer Bericht NTB 08-04 Vorschlag geologischer Standortgebiete für das SMA- und das HAA-Lager. Geologische Grundlagen

ÖNORM S 9001 (1978): Mechanische Schwingungen - Erschütterungen; allgemeine Grundsätze und Ermittlung von Schwingungsgrößen

OTTIGER, R. (2015): JCF Rohstoffsicherung Jakobsberg-Egg Geologisch hydrogeologische Abklärungen 2014. Geotest Bericht Nr. 1312084.18

REICHHOLF, G. et al. (2008): Critical Investigation into the Drilling and Blasting Work done at the "Mormont" Quarry in Order to Reduce Blast Vibrations, BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte 2008, Volume 153

RICHART, F. et al. (1979): Vibrations of soils and foundations. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey

ROLL, A. (1979): Versuch einer Volumenbilanz des Oberrheintalgrabens und seiner Schultem. Geologisches Jahrbuch, A52, 3-82.

SCHILLINGER, R. et al. (2014): Prognose von Sprengerschütterungen, BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte October 2014, Volume 159, Issue 10, pp 418-424

SCHÖN, J. (1983): Petrophysik. Physikalische Eigenschaften von Gesteinen und Mineralien

SCHÖN, J. (2011): Physical Properties of Rocks, Volume 8: A workbook (Handbook of Petroleum Exploration and Production), Elsevier

SCHULER, P. (2015): Auenstein / Veltheim Materialabbau Steinbitz, Unteregg
Abbaubewilligung 2013 / 2014. Bericht Nr. 1202205.20

SCHWARZ, H. U. (1975): Sedimentary Structures and facies Analysis of shallow marine carbonates: Lower Muschelkalk, Middle Triassic, South-Western Germany. – Contr. Sedimentol. 3, 1-100.

SN 640 312a (1992): „Erschütterungseinwirkungen auf Bauwerke“, Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute, 8008 Zürich, April 1992

STEINHAUSER, P. (2010): Die Anhaltswerte der Bergbausprengverordnung aus erschütterungstechnischer Sicht. BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte 2010, Volume 155

STUDER, J. A. et al. (2008): Bodendynamik Grundlagen, Kennziffern, Probleme und Lösungsansätze, Springer-Verlag Berlin Heidelberg

TRÜMPY, R. (1980): Geology of Switzerland, a guide book Part A : An outline of the geology of Switzerland.

VOLAROVIC, M.P. et al. (1977): Elastic properties of rocks. In: Volarovic, M.P., Stiller, H., Lebedev, T.S. (Eds.), Issledovanie Fiziceskich svoit sv mineralnogo vescestva zemli privysokich termodinamiceskich parametrach. Izd. Naukova dumka, Kiev 1977, S. 43 – 49

WEISSERT, H. et al., (2009): Der Ozean im Gebirge. Eine geologische Zeitreise durch die Schweiz.

WETZEL, A. et al. (2003): Reactivated basement structures affecting the sedimentary facies in a tectonically "quiescent" epicontinental basin: an example from NW Switzerland. Sedimentary Geology, 157: 153-172.

WILDI, W. (1975): Die Mettauer Überschiebung im Aargauischen Tafeljura (Nordschweiz). Eclogae geologicae Helvetiae 68, 483-489.

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: Lage der Jura-Cement-Fabriken Möriken-Wildegg..... | 2 |
| Abbildung 2: Lage und Unterteilung der Steinbrüche..... | 3 |
| Abbildung 3: Tektonische GröÙeinheiten der Nordschweiz mit Störungssystemen; (NAGRA, 2008), modifiziert..... | 4 |
| Abbildung 4: Paläogeographische Gegebenheiten in der frühen und mittleren Trias | 5 |
| Abbildung 5: Paläogeographische Situation im Braunen Jura (ALLIA, 1996)..... | 6 |
| Abbildung 6: Stratigraphisches Profil im östlichen Jura (BIAGGI (2014): Arbeitsbericht NAB 13-31)..... | 9 |
| Abbildung 7: Tektonische Beziehung zwischen Sockel und Deckgebirge in der Nordschweiz (Medici et al., 1995; ergänzt nach NAGRA 08-04)..... | 11 |
| Abbildung 8: Künstliche Verlegung des Flussverlaufes im Jahre 1844 (l. oben), 1881 (r. oben), 1963 (l. unten), 2013 (r. unten); Quelle: www.swisstopo.admin.ch | 12 |
| Abbildung 9: Geologische Karte des Untersuchungsgebietes; (Bundesamt für Landestopografie swisstopo, http://www.swisstopo.admin.ch ; aufgerufen am 9.1.2016), verändert..... | 13 |
| Abbildung 10: Aufschluss der Oberen Effinger Schichten am Jakobsberg..... | 14 |
| Abbildung 11: Aufschluss des Gerstenhübelkalkes am Jakobsberg | 15 |
| Abbildung 12: Aufschluss der Unteren Effinger Schichten in Steinbitz..... | 16 |
| Abbildung 13: Aufschluss des Hauptrogensteines, Zigzag-Zone, Spatkalk- und Birmenstorfer Schichten (von links unten nach rechts oben) in Steinbitz | 17 |
| Abbildung 14: Aufschluss des Hauptrogensteines in der Oberegg | 18 |
| Abbildung 15: Trennflächenscharen der Oberen Effinger Schichten..... | 20 |
| Abbildung 16: Trennflächenscharen des Gerstenhübelkalkes | 21 |
| Abbildung 17: Trennflächenscharen der Unteren Effinger Schichten..... | 23 |
| Abbildung 18: Trennflächenscharen der Birmenstorfer Schichten | 24 |
| Abbildung 19: Trennflächenscharen des Spatkalkes | 25 |
| Abbildung 20: Trennflächenscharen der Zigzag-Zone | 26 |
| Abbildung 21: Trennflächenscharen des Hauptrogensteines | 27 |
| Abbildung 22: Trennflächenscharen mit Darstellung in Klüftrosendiagrammen | 28 |
| Abbildung 23: Messstellen zur Erfassung der Wasserpegel und Ausdehnung der grundwassergesättigten Lockersedimente (hellblaue Flächen)..... | 29 |
| Abbildung 24: Darstellung der Kernbohrungen im NNW - SSE streichenden Profil (rote gestrichelte Linie im rechten Bild) und einem Satellitenbild | 34 |
| Abbildung 25: Bohrkernabschnitte der Oberen Effinger Schichten zur Entnahme der Plugs..... | 35 |

| | |
|---|----|
| Abbildung 26: Bohrkernabschnitte des Gerstenhübelkalkes zur Entnahme der Plugs | 36 |
| Abbildung 27: Bohrkernabschnitte der Unteren Effinger Schichten zur Entnahme der Plugs | 36 |
| Abbildung 28: Bohrkernabschnitte der Birnenstorfer Schichten zur Entnahme der Plugs | 37 |
| Abbildung 29: Bohrkernabschnitte der Spatkalk Schichten zur Entnahme der Plugs | 37 |
| Abbildung 30: Bohrkernabschnitte der Zigzag Schichten zur Entnahme der Plugs | 38 |
| Abbildung 31: Bohrkernabschnitte des Haupttrogensteines zur Entnahme der Plugs | 38 |
| Abbildung 32: Abhängigkeit der P-Wellengeschwindigkeit von der Porosität am Beispiel des Haupttrogensteines | 42 |
| Abbildung 33: Anisotropie der seismischen P-Wellenausbreitungsgeschwindigkeiten der trockenen Prüfkörper (normal und parallel zur Schichtung) | 46 |
| Abbildung 34: Klassifizierung der Sprengbarkeit der Formationen nach MÜLLER et al. (2007); entnommen aus MÜLLER et al. (2009); verändert | 47 |
| Abbildung 35: Wellengeschwindigkeiten der Formationen und Detonationsgeschwindigkeiten der verwendeten Sprengstoffe..... | 49 |
| Abbildung 36: Seismische Wellentypen (BRAILE, 2010) | 52 |
| Abbildung 37: Verhältnis der Wellengeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Poissonzahl (RICHART et al., 1979) | 53 |
| Abbildung 38: Amplituden der Horizontal- und Vertikalkomponenten der Rayleighwellen in Abhängigkeit der Tiefe (RICHART et al., 1979) | 53 |
| Abbildung 39: Geometrie der Wellenausbreitung..... | 57 |
| Abbildung 40: Digitaler Scan der Bruchwand (grün) mit geplanten Bohrlöchern (blau) | 60 |
| Abbildung 41: Profil eines geplanten Bohrloches..... | 60 |
| Abbildung 42: Aktualisiertes 3D-Modell der Sprenganlage mit dem wahren Verlauf der Bohrlöcher 9 und 10 | 62 |
| Abbildung 43: GeoSIG GMSplus Messsystem zur Erfassung der Schwinggeschwindigkeiten und Frequenzen der Erschütterungen; Quelle: geosig.com | 66 |
| Abbildung 44: Gerätestandorte aller Messungen während der Datenaufnahme | 67 |
| Abbildung 45: Auswertung von Schwingungen nach der Schweizer Norm SN640312a | 69 |
| Abbildung 46: Gerätestandort CH427; Bild: BRODRAGER (2014)..... | 69 |
| Abbildung 47: Gerätestandort CH428; Bild: BRODRAGER (2014)..... | 69 |
| Abbildung 48: Gerätestandort CH607; Bild: BRODRAGER (2014)..... | 70 |
| Abbildung 49: Gerätestandort CH609; Bild: BRODRAGER (2014)..... | 70 |
| Abbildung 50: Gerätestandort CH610; Bild: BRODRAGER (2014)..... | 70 |
| Abbildung 51: Gerätestandort CH611; Bild: BRODRAGER (2014)..... | 70 |
| Abbildung 52: Gerätestandort CH612; Bild: BRODRAGER (2014)..... | 71 |
| Abbildung 53: Gerätestandort CH608..... | 71 |
| Abbildung 54: Gerätestandort CH608..... | 71 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 55: Maximale Schwinggeschwindigkeiten aller erfassten Sprengungen an den jeweiligen Messstationen..... | 73 |
| Abbildung 56: Lage der Sprengstellen; Punktgröße korreliert mit der maximalen Sprengstoffmenge pro Zündzeitstufe..... | 74 |
| Abbildung 57: Erschütterungscharakteristik der Messstationen in Auenstein..... | 74 |
| Abbildung 58: Erschütterungscharakteristik der Messstationen in Veltheim-Au | 75 |
| Abbildung 59: Auswertung der maximalen Schwinggeschwindigkeiten auf Basis der Distanz | 77 |
| Abbildung 60: Auswertung der maximalen Schwinggeschwindigkeiten auf Basis der skalierten Distanz | 79 |
| Abbildung 61: Auswertung der x-Komponente auf Basis der skalierten Distanz | 80 |
| Abbildung 62: Auswertung der y-Komponente auf Basis der skalierten Distanz | 80 |
| Abbildung 63: Auswertung der z-Komponente auf Basis der skalierten Distanz | 81 |
| Abbildung 64: Auswertung der Vertikalkomponenten gegen Höhendifferenzen auf Basis der skalierten Distanz für Messstellen auf dem Festgestein | 82 |
| Abbildung 65: Auswertung der Vertikalkomponenten gegen Höhendifferenzen auf Basis der skalierten Distanz für Messstellen auf dem Lockergestein..... | 82 |
| Abbildung 66: Auswertung der dominanten Frequenz der x-Achse in Abhängigkeit von der Entfernung zur Sprengstelle | 83 |
| Abbildung 67: Auswertung der dominanten Frequenz der y-Achse in Abhängigkeit von der Entfernung zur Sprengstelle | 83 |
| Abbildung 68: Auswertung der dominanten Frequenz der z-Achse in Abhängigkeit von der Entfernung zur Sprengstelle | 84 |
| Abbildung 69: Abhängigkeit der Frequenz von der Schwinggeschwindigkeit für Festgesteine | 85 |
| Abbildung 70: Abhängigkeit der Frequenz von der Schwinggeschwindigkeit für Lockergesteine | 85 |
| Abbildung 71: Frequenzspektrum nach Filterung des Seismogrammausschnittes von der Sprengung vom 29.7.2015 | 86 |
| Abbildung 72: Charakteristisches Seismogramm mit FFT und dem Leistungsdichtespektrum der Messstellen auf dem Festgestein (Sprengung vom 29.7.2015; 4 s - Ausschnitt) | 87 |
| Abbildung 73: Charakteristisches Seismogramm mit FFT und dem Leistungsdichtespektrum der Messstellen auf dem Lockersediment (Sprengung vom 29.7.2015; 4 s - Ausschnitt)..... | 88 |
| Abbildung 74: Position und Raumlage der ausgewerteten Bruchwände im Satellitenbild und Schmidtschen Netz | 89 |

| | |
|--|-----|
| Abbildung 75: Auswertung des Einflusses der Bruchwandorientierung auf die Erschütterungscharakteristik auf Basis der maximalen Schwinggeschwindigkeiten und der skalierten Distanz | 90 |
| Abbildung 76: Gesamtleistung der Sprengung 2015_07_31_01 (SSE einfallende Bruchwand) an der Station CH607 | 91 |
| Abbildung 77: Gesamtleistung der Sprengung 2015_09_16_01 (ENE einfallende Bruchwand) an der Station CH607 | 91 |
| Abbildung 78: Auswertung der spezifischen Sprengstoffmenge hinsichtlich der Erschütterungscharakteristik im Gerstenhübelkalk auf Basis der maximalen Schwinggeschwindigkeiten und der skalierten Distanz | 93 |
| Abbildung 79: Auswertung der spezifischen Sprengstoffmenge hinsichtlich der Erschütterungscharakteristik im Hauptrogenstein auf Basis der maximalen Schwinggeschwindigkeiten und der skalierten Distanz | 94 |
| Abbildung 80: Auswertung der Sprengstoffbrisanz hinsichtlich der Erschütterungscharakteristik im Mergel- und Kalkgestein der Oberen Effinger Schichten auf Basis der maximalen Schwinggeschwindigkeiten und der skalierten Distanz | 96 |
| Abbildung 81: Abschätzung der Mächtigkeit der Lockersedimente | 98 |
| Abbildung 82: Prognostizierte Maximalamplituden einer Sprengung in den Oberen Effinger Schichten | 105 |

Formelverzeichnis

| | |
|------------------|----|
| Formel 3-1 | 40 |
| Formel 3-2 | 41 |
| Formel 3-3 | 43 |
| Formel 3-4 | 44 |
| Formel 3-5 | 44 |
| Formel 3-6 | 44 |
| Formel 3-7 | 44 |
| Formel 4-1 | 55 |
| Formel 4-2 | 55 |
| Formel 4-3 | 57 |
| Formel 4-4 | 57 |
| Formel 4-5 | 58 |
| Formel 6-1 | 76 |
| Formel 6-2 | 78 |

Formel 6-3.....99
Formel 6-4.....100

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Durchschnittliche Kluft- und Grundwasserpegelstände 201430
Tabelle 2: Probenentnahme aus den Kernbohrungen33
Tabelle 3: Labormesswerte der beprobten Formationen.....42
Tabelle 4: Berechnete Kennwerte aus den Labormessungen.....45
Tabelle 5: Kennwerte der verwendeten Sprengstoffe49
Tabelle 6: Messstellenbezeichnung und Koordinaten der Standorte.....67
Tabelle 7: Vergleich der wahren und prognostizierten maximalen Schwinggeschwindigkeiten der Messstelle CH60799
Tabelle 8: Prognostizierte maximale Schwinggeschwindigkeiten im Bereich Auenstein für verschiedene Lademengen je Zündzeitstufe100
Tabelle 9: Amplitudenverstärkungsfaktoren für verschiedene Mächtigkeiten der Sedimente101
Tabelle 10: Prognosen der erzielten Schwinggeschwindigkeiten beim Übergang der seismischen Wellen vom Festgestein zum Lockergestein102
Tabelle 11: Maximalamplituden im Lockersediment in Abhängigkeit von der Entfernung des Übergangsbereiches für 7,5 kg Sprengstoff je Zündzeitstufe.....103
Tabelle 12: Maximalamplituden im Lockersediment in Abhängigkeit von der Entfernung des Übergangsbereiches für 15 kg Sprengstoff je Zündzeitstufe103
Tabelle 13: Maximalamplituden im Lockersediment in Abhängigkeit von der Entfernung des Übergangsbereiches für 15 kg Sprengstoff je Zündzeitstufe104

Anhang

| Allgemeine Daten | | | | | | | | | | | Vermessung | |
|------------------|-------------|------------|----------------|------------------|-------------------|------------------------|-------------------|--------------|----------------------|--|------------|--|
| Sprengung | | | | | | | | | | | | |
| Nr. Sprengung | Sprengdatum | Sprengzeit | Steinbrucharea | Typ | Sprengbefugter | Witterungsverhältnisse | Bodenverhältnisse | Windrichtung | Datum der Vermessung | | | |
| 2015_07_15_01 | 15.07.2015 | 09:45:00 | Jakobsberg | Wandsprengung | Viktor Haslimeier | sonnig | trocken | #NV | keine Vermessung | | | |
| 2015_07_16_01 | 16.07.2015 | 14:00:00 | Jakobsberg | Flächensprengung | Viktor Haslimeier | sonnig | trocken | #NV | keine Vermessung | | | |
| 2015_07_17_01 | 17.07.2015 | 10:00:00 | Unteregg | Wandsprengung | Peter Geissmann | sonnig | trocken | #NV | keine Vermessung | | | |
| 2015_07_23_01 | 23.07.2015 | 15:30:00 | Jakobsberg | Flächensprengung | Viktor Haslimeier | sonnig | trocken | #NV | keine Vermessung | | | |
| 2015_07_29_01 | 29.07.2015 | 14:00:00 | Steinbitz | Flächensprengung | Viktor Haslimeier | regnerisch | nass | #NV | keine Vermessung | | | |
| 2015_07_31_01 | 31.07.2015 | 10:00:00 | Jakobsberg | Wandsprengung | Viktor Haslimeier | sonnig | trocken | #NV | keine Vermessung | | | |
| 2015_08_04_01 | 04.08.2015 | 10:59:00 | Oberegg | Flächensprengung | Peter Geissmann | bedeckt | trocken | #NV | keine Vermessung | | | |
| 2015_08_06_01 | 06.08.2015 | 10:30:00 | Steinbitz | Flächensprengung | Viktor Haslimeier | sonnig | trocken | #NV | keine Vermessung | | | |
| 2015_08_11_01 | 11.08.2015 | 09:45:00 | Jakobsberg | Wandsprengung | Andreas Bruder | sonnig | trocken | #NV | keine Vermessung | | | |
| 2015_08_13_01 | 13.08.2015 | 10:38:00 | Jakobsberg | Wandsprengung | Andreas Bruder | sonnig | trocken | #NV | keine Vermessung | | | |
| 2015_08_17_01 | 17.08.2015 | 15:00:00 | Jakobsberg | Wandsprengung | Andreas Bruder | bedeckt | trocken | #NV | keine Vermessung | | | |
| 2015_08_19_01 | 19.08.2015 | 14:00:00 | Unteregg | Wandsprengung | Peter Geissmann | bedeckt | trocken | #NV | keine Vermessung | | | |
| 2015_08_20_01 | 20.08.2015 | 11:00:00 | Jakobsberg | Flächensprengung | Andreas Bruder | neblig | trocken | #NV | keine Vermessung | | | |
| 2015_08_24_01 | 24.08.2015 | 09:45:00 | Jakobsberg | Wandsprengung | Andreas Bruder | regnerisch | nass | #NV | keine Vermessung | | | |
| 2015_08_27_01 | 27.08.2015 | 10:00:00 | Jakobsberg | Wandsprengung | Peter Geissmann | sonnig | nass | #NV | keine Vermessung | | | |
| 2015_08_27_02 | 27.08.2015 | 10:00:00 | Jakobsberg | Wandsprengung | Andreas Bruder | sonnig | nass | #NV | keine Vermessung | | | |
| 2015_08_31_01 | 31.08.2015 | 10:00:00 | Jakobsberg | Flächensprengung | Andreas Bruder | sonnig | trocken | #NV | keine Vermessung | | | |
| 2015_09_01_01 | 01.09.2015 | 16:00:00 | Jakobsberg | Flächensprengung | Andreas Bruder | regnerisch | trocken | #NV | keine Vermessung | | | |
| 2015_09_04_01 | 04.09.2015 | 10:00:00 | Jakobsberg | Flächensprengung | Andreas Bruder | sonnig | trocken | #NV | keine Vermessung | | | |
| 2015_09_04_02 | 04.09.2015 | 10:30:00 | Oberegg | Wandsprengung | Peter Geissmann | sonnig | trocken | #NV | 24.08.2015 | | | |
| 2015_09_08_01 | 08.09.2015 | 10:30:00 | Jakobsberg | Flächensprengung | Andreas Bruder | sonnig | trocken | #NV | keine Vermessung | | | |
| 2015_09_10_01 | 10.09.2015 | 09:45:00 | Jakobsberg | Flächensprengung | Andreas Bruder | sonnig | trocken | #NV | keine Vermessung | | | |
| 2015_09_14_01 | 14.09.2015 | 10:00:00 | Jakobsberg | Flächensprengung | Andreas Bruder | sonnig | trocken | #NV | keine Vermessung | | | |
| 2015_09_16_01 | 16.09.2015 | 10:00:00 | Jakobsberg | Wandsprengung | Andreas Bruder | bedeckt | trocken | #NV | keine Vermessung | | | |
| 2015_09_17_01 | 17.09.2015 | 10:30:00 | Jakobsberg | Flächensprengung | Andreas Bruder | regnerisch | nass | #NV | keine Vermessung | | | |
| 2015_09_18_01 | 18.09.2015 | 10:30:00 | Oberegg | Wandsprengung | Peter Geissmann | bedeckt | trocken | #NV | keine Vermessung | | | |
| 2015_09_22_01 | 22.09.2015 | 10:00:00 | Jakobsberg | Wandsprengung | Andreas Bruder | bedeckt | feucht | #NV | keine Vermessung | | | |
| 2015_09_28_01 | 28.09.2015 | 15:00:00 | Oberegg | Wandsprengung | Peter Geissmann | sonnig | trocken | #NV | keine Vermessung | | | |
| 2015_10_02_01 | 02.12.2015 | 10:30:00 | Jakobsberg | Wandsprengung | Peter Geissmann | sonnig | trocken | E | keine Vermessung | | | |
| 2015_10_14_01 | 14.14.2015 | 10:00:00 | Jakobsberg | Wandsprengung | Lukas Lindlndi | bewölkt | trocken | W | keine Vermessung | | | |
| 2015_10_15_01 | 15.10.2015 | 15:00:00 | Jakobsberg | Wandsprengung | Lukas Lindlndi | bewölkt | trocken | W | keine Vermessung | | | |
| 2015_10_20_01 | 20.10.2015 | 16:00:00 | Jakobsberg | Wandsprengung | Andreas Bruder | sonnig | trocken | windstill | keine Vermessung | | | |
| 2015_10_22_01 | 22.10.2015 | 15:30:00 | Jakobsberg | Flächensprengung | Lukas Lindlndi | bewölkt | nass | W | keine Vermessung | | | |
| 2015_10_27_01 | 27.10.2015 | 10:00:00 | Jakobsberg | Wandsprengung | Andreas Bruder | bewölkt | trocken | windstill | keine Vermessung | | | |
| 2015_10_28_01 | 28.10.2015 | 10:00:00 | Unteregg | Wandsprengung | Peter Geissmann | bewölkt | nass | SSE | 22.10.2015 | | | |
| 2015_10_28_02 | 28.10.2015 | 14:00:00 | Jakobsberg | Flächensprengung | Andreas Bruder | Hochnebel | trocken | windstill | keine Vermessung | | | |
| 2015_11_03_01 | 03.11.2015 | 10:00:00 | Jakobsberg | Wandsprengung | Andreas Bruder | Hochnebel | trocken | SSE | 02.11.2015 | | | |
| 2015_11_06_01 | 06.11.2015 | 10:00:00 | Unteregg | Wandsprengung | Peter Geissmann | sonnig | trocken | SSE | 01.11.2015 | | | |

| Allgemeine Daten | | Geologie | | Geometrische und bohrtechnische Daten | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------|----------------------------|---------------|--------|---------------------------------------|--|--|--|--|------|--|--|-----------|---------|---------------------------------|----------------|-------|---------------|------------------------|--------|--------------------------------|--------|------------------------------|---------|
| Sprengung | | Gestein | | Koordinaten BL 1 | | | | Koordinaten BL X | | | | Kubatur | | | | | | Einfallswinkel | | Einspannung | | | |
| Nr. Sprengung | Formation | Lithologie | RW | HW | Rechtswert des Bohrchöses der ersten Reihe | Hochwert des Bohrchöses der ersten Reihe | Rechtswert des Bohrchöses der ersten Reihe | Hochwert des Bohrchöses der ersten Reihe | RW3 | Rechtswert des Bohrchöses der ersten Reihe | Hochwert des Bohrchöses der ersten Reihe | m ü M [m] | hWd [m] | durchschnittliche Bruchwandhöhe | Abschlagbreite | l [m] | Abschlaglänge | Vkub [m ³] | ER [°] | Einfallsrichtung der Bruchwand | EW [°] | Einfallswinkel der Bruchwand | Spalte1 |
| 2015_07_15_01 | Gerstenhübelkalk | Kalkstein | 653895 | 252414 | #NV | 252414 | #NV | 362 | 4,0 | 5,0 | 45,0 | 900,0 | 143 | 81 | #NV | | | | | | | | |
| 2015_07_16_01 | Obere Efinger Schichten | Mergel | 653812 | 252358 | #NV | 252358 | #NV | 366 | 3,4 | 12,0 | 24,0 | 979,2 | 77 | 80 | #NV | | | | | | | | |
| 2015_07_17_01 | Hauptrogenstein | Kalkstein | 653690 | 252902 | #NV | 252902 | #NV | 390 | 23,6 | 4,0 | 146,0 | 13805,8 | 78 | 79 | #NV | | | | | | | | |
| 2015_07_23_01 | Gerstenhübelkalk | Kalkstein | 653806 | 252371 | #NV | 252371 | #NV | 366 | 3,2 | 15,0 | 63,0 | 3024,0 | 146 | 82 | #NV | | | | | | | | |
| 2015_07_29_01 | Birmenstorfer Schichten, l | Mergel | 653794 | 252667 | #NV | 252667 | #NV | 396 | 7,2 | 24,0 | 33,0 | 5702,4 | 343 | 80 | #NV | | | | | | | | |
| 2015_07_31_01 | Gerstenhübelkalk | Kalkstein | 653886 | 252419 | #NV | 252419 | #NV | 362 | 4,0 | 5,0 | 40,0 | 800,0 | 148 | 82 | #NV | | | | | | | | |
| 2015_08_04_01 | Hauptrogenstein | Kalkstein | 653394 | 252779 | #NV | 252779 | #NV | 403 | 6,8 | 23,0 | 48,0 | 6844,8 | 192 | 79 | #NV | | | | | | | | |
| 2015_08_06_01 | Birmenstorfer Schichten, l | Mergel | 653827 | 252641 | #NV | 252641 | #NV | 392 | 6,8 | 18,0 | 50,0 | 6120,0 | 68 | 79 | #NV | | | | | | | | |
| 2015_08_11_01 | Gerstenhübelkalk | Kalkstein | 653899 | 252427 | #NV | 252427 | #NV | 365 | 4,0 | 5,0 | 35,0 | 700,0 | 145 | 79 | #NV | | | | | | | | |
| 2015_08_13_01 | Gerstenhübelkalk | Kalkstein | 653887 | 252430 | #NV | 252430 | #NV | 368 | 4,0 | 5,0 | 31,0 | 620,0 | 147 | 83 | #NV | | | | | | | | |
| 2015_08_17_01 | Gerstenhübelkalk | Kalkstein | 653683 | 252404 | #NV | 252404 | #NV | 376 | 6,3 | 4,0 | 81,0 | 2041,2 | 56 | 79 | #NV | | | | | | | | |
| 2015_08_19_01 | Hauptrogenstein | Kalkstein | 653714 | 252813 | #NV | 252813 | #NV | 390 | 24,7 | 4,0 | 146,0 | 14424,8 | 78 | 78 | #NV | | | | | | | | |
| 2015_08_20_01 | Obere Efinger Schichten | Mergel | 653788 | 252371 | #NV | 252371 | #NV | 380 | 3,2 | 12,0 | 65,0 | 2496,0 | 55 | 80 | #NV | | | | | | | | |
| 2015_08_24_01 | Gerstenhübelkalk | Kalkstein | 653864 | 252420 | #NV | 252420 | #NV | 370 | 4,0 | 5,0 | 28,0 | 560,0 | 145 | 79 | #NV | | | | | | | | |
| 2015_08_27_01 | Gerstenhübelkalk | Kalkstein | 653652 | 252448 | #NV | 252448 | #NV | 409 | 12,3 | 3,7 | 98,0 | 4460,0 | 170 | 79 | #NV | | | | | | | | |
| 2015_08_27_02 | Gerstenhübelkalk | Kalkstein | 653700 | 252333 | #NV | 252333 | #NV | 377 | 6,3 | 2,8 | 80,0 | 1411,2 | 58 | 79 | #NV | | | | | | | | |
| 2015_08_31_01 | Gerstenhübelkalk | Kalkstein | 653864 | 252408 | #NV | 252408 | #NV | 365 | 2,5 | 12,5 | 25,0 | 781,3 | 80 | 85 | #NV | | | | | | | | |
| 2015_09_01_01 | Gerstenhübelkalk | Kalkstein | 653867 | 252429 | #NV | 252429 | #NV | 361 | 2,5 | 8,5 | 32,5 | 690,6 | 144 | 79 | #NV | | | | | | | | |
| 2015_09_04_01 | Gerstenhübelkalk | Kalkstein | 653867 | 252389 | #NV | 252389 | #NV | 363 | 2,5 | 15,0 | 27,5 | 1031,3 | 53 | 90 | #NV | | | | | | | | |
| 2015_09_04_02 | Hauptrogenstein | Kalkstein | 653483 | 252749 | #NV | 252749 | #NV | 421 | 24,5 | 4,0 | 63,0 | 6174,0 | 260 | 77 | #NV | | | | | | | | |
| 2015_09_08_01 | Gerstenhübelkalk | Kalkstein | 653832 | 252394 | #NV | 252394 | #NV | 368 | 2,5 | 15,0 | 27,5 | 1031,3 | 56 | 90 | #NV | | | | | | | | |
| 2015_09_10_01 | Gerstenhübelkalk | Kalkstein | 653817 | 252387 | #NV | 252387 | #NV | 360 | 2,5 | 15,0 | 27,5 | 1031,3 | 52 | 90 | #NV | | | | | | | | |
| 2015_09_14_01 | Gerstenhübelkalk | Kalkstein | 653802 | 252387 | #NV | 252387 | #NV | 360 | 2,5 | 15,0 | 27,5 | 1031,3 | 53 | 90 | #NV | | | | | | | | |
| 2015_09_16_01 | Gerstenhübelkalk | Kalkstein | 653807 | 252394 | #NV | 252394 | #NV | 360 | 6,3 | 2,7 | 60,0 | 1020,6 | 52 | 84 | #NV | | | | | | | | |
| 2015_09_17_01 | Obere Efinger Schichten | Mergel | 653807 | 252394 | #NV | 252394 | #NV | 360 | 4,9 | 7,0 | 8,0 | 274,4 | 52 | 90 | #NV | | | | | | | | |
| 2015_09_18_01 | Hauptrogenstein | Kalkstein | 653481 | 252749 | #NV | 252749 | #NV | 421 | 24,2 | 4,0 | 62,0 | 6001,6 | 263 | 78 | #NV | | | | | | | | |
| 2015_09_22_01 | Obere Efinger Schichten | Mergel | 653787 | 252355 | #NV | 252355 | #NV | 367 | 6,3 | 5,6 | 58,0 | 2046,2 | 54 | 80 | #NV | | | | | | | | |
| 2015_09_28_01 | Hauptrogenstein | Kalkstein | 653500 | 252756 | #NV | 252756 | #NV | 421 | 24,5 | 4,0 | 62,0 | 6076,0 | 260 | 77 | #NV | | | | | | | | |
| 2015_10_02_01 | Obere Efinger Schichten | Mergel | 653681 | 252442 | 653578 | 252432 | 653578 | 395 | 12,3 | 3,7 | 103,5 | 4894,2 | 186 | 78 | eins eitig | | | | | | | | |
| 2015_10_14_01 | Obere Efinger Schichten | Mergel | 653702 | 252330 | 653680 | 252403 | 653680 | 386 | 6,0 | 2,8 | 76,2 | 1638,0 | 73 | 80 | eins eitig | | | | | | | | |
| 2015_10_15_01 | Obere Efinger Schichten | Mergel | 653786 | 252356 | 653740 | 252387 | 653740 | 377 | 6,0 | 2,8 | 55,5 | 1050,0 | 34 | 80 | eins eitig | | | | | | | | |
| 2015_10_20_01 | Obere Efinger Schichten | Mergel | 653772 | 252353 | 653752 | 252381 | 653752 | 374 | 6,3 | 2,8 | 34,4 | 1323,0 | 54 | 80 | eins eitig | | | | | | | | |
| 2015_10_22_01 | Obere Efinger Schichten | Mergel | 653695 | 252319 | 653673 | 252339 | 653673 | 383 | 2,8 | 2,8 | 29,7 | 1211,3 | 42 | 90 | eins eitig | | | | | | | | |
| 2015_10_27_01 | Obere Efinger Schichten | Mergel | 653792 | 252330 | 653739 | 252392 | 653739 | 375 | 6,3 | 2,8 | 81,6 | 1675,8 | 49 | 80 | eins eitig | | | | | | | | |
| 2015_10_28_01 | Hauptrogenstein | Kalkstein | 653682 | 252896 | 653710 | 252767 | 653710 | 365 | 23,6 | 4,0 | 132,0 | 12732,0 | 78 | 78 | beidseitig | | | | | | | | |
| 2015_10_28_02 | Obere Efinger Schichten | Mergel | 653663 | 252348 | 653696 | 252358 | 653696 | 379 | 3,1 | 8,4 | 34,5 | 856,1 | 107 | 80 | eins eitig | | | | | | | | |
| 2015_11_03_01 | Obere Efinger Schichten | Mergel, Kalks | 653690 | 252347 | 653674 | 252406 | 653674 | 377 | 6,3 | 2,8 | 61,1 | 1102,5 | 75 | 80 | eins eitig | | | | | | | | |
| 2015_11_06_01 | Hauptrogenstein | Kalkstein | 653625 | 252780 | 653607 | 252778 | 653607 | 411 | 20,8 | 7,4 | 18,1 | 3234,9 | 276 | 80 | eins eitig | | | | | | | | |

| Allgemeine Daten | | Geometrische und bohrtechnische Daten | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------|--------|---------------------------------------|---------------|---------------------------------|-----------------|------------------------|---------------------|---------------------|--------------------|---------------------------|--------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----|
| Sprengung | | Bohrgeometrie | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Nr. Sprengung | B [m]2 | S _B [m] | Seitenabstand | durchschnittliche Bohrlochlänge | Bohrlochneigung | Länge der Unterbohrung | d _B [mm] | Bohrlochdurchmesser | n _R [-] | Anzahl der Bohrlochreihen | n _B [-] | Anzahl der Bohrlöcher | n _{B1} [-] | n _{B2} [-] | n _{B3} [-] | n _{B4} [-] | n _{B5} [-] | n _{B6} [-] | n _{B7} [-] | n _{B8} [-] | n _{B9} [-] | n _{B10} [-] | n _{B11} [-] | n _{B12} [-] | |
| 2015_07_15_01 | 2,50 | 2,50 | 2,50 | 4,00 | 10 | 0,0 | 90 | 2 | 37 | 19 | 18 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2015_07_16_01 | 3,00 | 3,00 | 3,40 | 3,40 | 10 | 0,0 | 90 | 7 | 38 | 1 | 3 | 6 | 7 | 8 | 9 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2015_07_17_01 | 4,00 | 3,00 | 24,64 | 10 | 1,0 | 0,0 | 90 | 1 | 45 | 45 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2015_07_23_01 | 3,00 | 3,00 | 3,20 | 10 | 0,0 | 0,0 | 90 | 5 | 104 | 21 | 21 | 21 | 21 | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2015_07_29_01 | 3,00 | 3,00 | 7,20 | 10 | 0,0 | 0,0 | 90 | 11 | 88 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| 2015_07_31_01 | 2,50 | 2,50 | 4,00 | 10 | 0,0 | 0,0 | 90 | 2 | 33 | 17 | 16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2015_08_04_01 | 3,00 | 3,50 | 7,20 | 10 | 1,0 | 0,0 | 90 | 8 | 98 | 6 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 13 | 14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2015_08_06_01 | 3,00 | 3,00 | 6,80 | 10 | 0,0 | 0,0 | 90 | 6 | 98 | 17 | 17 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2015_08_11_01 | 2,50 | 2,50 | 4,00 | 10 | 0,0 | 0,0 | 90 | 2 | 29 | 15 | 14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2015_08_13_01 | 2,50 | 2,50 | 4,00 | 10 | 0,0 | 0,0 | 90 | 2 | 25 | 13 | 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2015_08_17_01 | 2,80 | 2,50 | 6,30 | 10 | 0,0 | 0,0 | 90 | 2 | 42 | 30 | 12 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2015_08_19_01 | 4,00 | 3,50 | 25,70 | 12 | 1,0 | 0,0 | 90 | 1 | 45 | 45 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2015_08_20_01 | 3,20 | 3,00 | 3,20 | 10 | 0,0 | 0,0 | 90 | 4 | 82 | 19 | 21 | 21 | 21 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2015_08_24_01 | 2,50 | 2,50 | 4,00 | 10 | 0,0 | 0,0 | 90 | 2 | 22 | 11 | 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2015_08_27_01 | 3,70 | 3,70 | 13,30 | 12 | 1,0 | 0,0 | 90 | 1 | 28 | 28 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2015_08_27_02 | 2,80 | 2,50 | 6,30 | 10 | 0,0 | 0,0 | 90 | 1 | 32 | 32 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2015_08_31_01 | 2,50 | 2,50 | 2,50 | 10 | 0,0 | 0,0 | 90 | 5 | 50 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2015_09_01_01 | 2,50 | 2,50 | 2,50 | 10 | 0,0 | 0,0 | 90 | 3 | 41 | 11 | 15 | 15 | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2015_09_04_01 | 2,50 | 2,50 | 2,50 | 10 | 0,0 | 0,0 | 90 | 6 | 66 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2015_09_04_02 | 4,00 | 3,50 | 25,50 | 17 | 1,0 | 0,0 | 90 | 1 | 19 | 19 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2015_09_08_01 | 2,50 | 2,50 | 2,50 | 10 | 0,0 | 0,0 | 90 | 6 | 64 | 11 | 10 | 10 | 10 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2015_09_10_01 | 2,50 | 2,50 | 2,50 | 10 | 0,0 | 0,0 | 90 | 6 | 64 | 11 | 11 | 10 | 10 | 10 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2015_09_14_01 | 2,50 | 2,50 | 2,50 | 10 | 0,0 | 0,0 | 90 | 6 | 66 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2015_09_16_01 | 2,80 | 2,00 | 6,30 | 10 | 0,0 | 0,0 | 90 | 1 | 25 | 25 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2015_09_17_01 | 2,00 | 2,00 | 4,90 | 10 | 0,0 | 0,0 | 90 | 3 | 12 | 3 | 5 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2015_09_18_01 | 4,00 | 3,50 | 25,20 | 16 | 1,0 | 0,0 | 90 | 1 | 19 | 19 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2015_09_22_01 | 2,80 | 2,50 | 6,30 | 10 | 0,0 | 0,0 | 90 | 1 | 47 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 |
| 2015_09_28_01 | 4,00 | 3,50 | 25,50 | 15 | 1,0 | 0,0 | 90 | 1 | 19 | 19 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2015_10_02_01 | 3,70 | 3,70 | 13,33 | 12 | 1,0 | 0,0 | 90 | 1 | 29 | 29 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2015_10_14_01 | 2,80 | 2,50 | 6,30 | 10 | 0,3 | 0,0 | 90 | 1 | 39 | 39 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2015_10_15_01 | 2,80 | 2,50 | 6,30 | 10 | 0,3 | 0,0 | 90 | 1 | 25 | 25 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2015_10_20_01 | 2,80 | 2,50 | 6,30 | 10 | 0,0 | 0,0 | 90 | 1 | 30 | 30 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2015_10_22_01 | 2,80 | 2,80 | 3,01 | 0 | 0,2 | 0,0 | 90 | 1 | 55 | 55 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2015_10_27_01 | 2,80 | 2,50 | 6,30 | 10 | 0,0 | 0,0 | 90 | 1 | 38 | 38 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2015_10_28_01 | 4,00 | 3,00 | 24,58 | 12 | 1,0 | 0,0 | 90 | 1 | 45 | 45 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2015_10_28_02 | 2,80 | 2,80 | 3,12 | 10 | 0,0 | 0,0 | 90 | 3 | 35 | 13 | 12 | 10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2015_11_03_01 | 2,80 | 2,50 | 6,30 | 10 | 0,0 | 0,0 | 90 | 1 | 25 | 25 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2015_11_06_01 | 3,70 | 3,50 | 21,82 | 10 | 1,0 | 0,0 | 90 | 2 | 12 | 6 | 6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

| Allgemeine Daten | | Geometrische und bohrtechnische Daten | | | | Sonstiges |
|------------------|----------------------------|---------------------------------------|-----------------------|------------------------|-------------|--|
| Sprengung | | Besatz | | Zwischenbesatzmaterial | Anmerkungen | |
| Nr. Sprengung | l _{bes} [m] | Besatzmaterial | l _{Zbes} [m] | Zwischenbesatzes | | Zwischenbesatzmaterial |
| 2015_07_15_01 | 2,9 Bohrmehl | | 0,0 keines | | | |
| 2015_07_16_01 | 2,4 Bohrmehl | | 0,0 keines | | | Bohrlochlängen variieren stark |
| 2015_07_17_01 | 3,5 Bohrmehl | | 1,8 Bohrmehl | | | BL 43, 44 stark zerklüftet |
| 2015_07_23_01 | 2,1 Bohrmehl | | 0,0 keines | | | |
| 2015_07_29_01 | 3,1 Bohrmehl | | 0,0 keines | | | |
| 2015_07_31_01 | 2,7 Bohrmehl | | 0,0 keines | | | 3 Löcher mit Splittbesatz |
| 2015_08_04_01 | 2,6 Bohrmehl | | 0,0 keines | | | |
| 2015_08_06_01 | 3,0 Bohrmehl | | 0,0 keines | | | |
| 2015_08_11_01 | 2,7 Bohrmehl | | 0,0 keines | | | |
| 2015_08_13_01 | 2,9 Bohrmehl | | 0,0 keines | | | |
| 2015_08_17_01 | 3,0 Bohrmehl | | 0,0 keines | | | |
| 2015_08_19_01 | 3,2 Bohrmehl | | 1,0 Bohrmehl | | | BL 42-45 dreigeteilt; hier Zwischenbesatz; BL 25 ca. 4m Luft, hier ca. 10 m Sprengschnur |
| 2015_08_20_01 | 2,1 Bohrmehl | | 0,0 keines | | | |
| 2015_08_24_01 | 2,8 Bohrmehl | | 0,0 keines | | | |
| 2015_08_27_01 | 3,8 Bohrmehl | | 1,0 Bohrmehl | | | |
| 2015_08_27_02 | 3,1 Bohrmehl | | 0,0 keines | | | |
| 2015_08_31_01 | 2,0 Bohrmehl, Kies | | 0,0 keines | | | 1,8 m Bohrmehl-Zwischenbesatz bei BL 1 |
| 2015_09_01_01 | 1,9 Bohrmehl, Kies | | 0,0 keines | | | ca. 1 Kies- und 1 m Bohrmehlbesatz |
| 2015_09_04_01 | 1,9 Bohrmehl, Kies | | 0,0 keines | | | ca. 1 Kies- und 1 m Bohrmehlbesatz |
| 2015_09_04_02 | 2,6 - 11,0 Bohrmehl | | 1,0 Bohrmehl | | | ca. 1 Kies- und 1 m Bohrmehlbesatz |
| 2015_09_08_01 | 1,9 Bohrmehl, Kies | | 0,0 keines | | | ca. 1 Kies- und 1 m Bohrmehlbesatz |
| 2015_09_10_01 | 1,8 Bohrmehl, Kies | | 0,0 keines | | | ca. 1 Kies- und 1 m Bohrmehlbesatz |
| 2015_09_14_01 | 1,8 Bohrmehl, Kies | | 0,0 keines | | | ca. 1 Kies- und 1 m Bohrmehlbesatz |
| 2015_09_16_01 | 3,2 Bohrmehl | | 0,0 keines | | | |
| 2015_09_17_01 | 3,0 Bohrmehl | | 0,0 keines | | | Vorbereitungssprengung um einen sauberen Abschluss der nächsten Sprengungen zu erhalten |
| 2015_09_18_01 | 2,8 -12,0 Bohrmehl | | 1,0 Bohrmehl | | | BL 2, 8, 12 zerklüftet |
| 2015_09_22_01 | 3,2 Bohrmehl | | 0,0 keines | | | |
| 2015_09_28_01 | 2,8 - 12,0 Bohrmehl | | 1,0 Bohrmehl | | | kein Zwischenbesatz bei BL 2 |
| 2015_10_02_01 | 3,5 Bohrmehl | | 1,0 Bohrmehl | | | |
| 2015_10_14_01 | 3,0 Bohrmehl | | 0,0 keines | | | |
| 2015_10_15_01 | 2,9 - 4,0 Bohrmehl | | 0,0 keines | | | |
| 2015_10_20_01 | 3,0 Bohrmehl | | 0,0 keines | | | |
| 2015_10_22_01 | 1,5 - 2,0 Bohrmehl, Splitt | | 0,0 keines | | | |
| 2015_10_27_01 | 3,0 - 4,3 Bohrmehl | | 0,0 keines | | | Bei BL 3+4 Luftpolster eingebracht |
| 2015_10_28_01 | 2,2 - 3,0 Bohrmehl | | 1,1 - 1,3 Bohrmehl | | | Bei BL 25 unten ca 4m Luft und oben ca. 5m Luft |
| 2015_10_28_02 | 2,1 Bohrmehl, Splitt | | 0,0 keines | | | BL 1-4 mit Splitt verdämmt |
| 2015_11_03_01 | 3,0 Bohrmehl | | 0,0 keines | | | |
| 2015_11_06_01 | 2,9 - 3,5 Bohrmehl | | 1,0 Bohrmehl | | | BL 1 unten ca. 3m Luft und Detonex 12g/m; oben ca 6m Luft |

| Allgemeine Daten | | Sprengstoffbezogene Daten | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------|---|---|-----------------|----------------|---|---|--|-------------------|----------|----------|-----------|-------------------------------------|--|------------|--------------------------------------|---|--------------|
| | | Sprengschnur | | | | | | Sprengstoffmengen | | | Verbrauch | | Sonstiges | | | | |
| Sprengung | Handelsname und Dimensionen des Sprengstoffes | Handelsname und Dimensionen des Sprengstoffes | Sprengstofftyp2 | Sprengstofftyp | WS [kg/2 In der Schatladung menge | Sprengstoffdichte: niedrigster Wert angegeben [g/cm ³] | Detonationsgeschwindigkeit gkeit: niedrigster Wert wird angegeben [m/s] | LS12 [m] | LS20 [m] | LS40 [m] | LSG [kg] | gesamte Sprengstoffmenge [kg] | Sprengstoffmenge in einem Bohrloch [kg] | LZmax [kg] | maximale Lademenge pro Zündstülze | Spezifischer Sprengstoffverbrauch [g/m ³] | Anmerkungen4 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2015.07.15.01 | | | | | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 215,00 | 6,66 | 6,66 | 238,89 | | |
| 2015.07.16.01 | | | | | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 215,00 | 7,50 | 7,50 | 219,57 | | |
| 2015.07.17.01 | | | | | 3442 | 1,20 | 3700 | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 5387,00 | 134,97 | 74,97 | 390,20 | | |
| 2015.07.23.01 | | | | | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 680,00 | 6,67 | 6,67 | 224,87 | | |
| 2015.07.29.01 | | | | | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 1690,00 | 20,83 | 20,83 | 296,37 | | |
| 2015.07.31.01 | | | | | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 195,00 | 8,33 | 8,33 | 243,75 | | |
| 2015.08.04.01 | | | | | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 2040,00 | 25,83 | 25,83 | 298,04 | | |
| 2015.08.06.01 | | | | | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 1290,00 | 20,83 | 20,83 | 210,78 | | |
| 2015.08.11.01 | | | | | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 172,50 | 6,67 | 6,67 | 246,43 | | |
| 2015.08.13.01 | | | | | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 147,00 | 7,50 | 7,50 | 237,10 | | |
| 2015.08.17.01 | | | | | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 510,00 | 12,50 | 12,50 | 249,85 | | |
| 2015.08.19.01 | | | | | 0 | 0 | | 10 | 0 | 0 | 0,12 | 4495,72 | 138,30 | 73,30 | 311,67 | | |
| 2015.08.20.01 | | | | | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 477,50 | 6,67 | 6,67 | 191,31 | | |
| 2015.08.24.01 | | | | | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 130,00 | 6,67 | 6,67 | 232,14 | | |
| 2015.08.27.01 | | | | | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 1091,40 | 42,49 | 21,66 | 244,71 | | |
| 2015.08.31.01 | | | | | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 395,00 | 13,33 | 13,33 | 279,90 | | |
| 2015.09.01.01 | | | | | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 125,00 | 2,50 | 2,50 | 160,00 | | |
| 2015.09.01.01 | | | | | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 155,00 | 5,00 | 5,00 | 224,43 | | |
| 2015.09.04.01 | | | | | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 247,50 | 3,75 | 3,75 | 240,00 | | |
| 2015.09.04.02 | Tovex T 50x800 | | | | 1038 | 1,10 | 3800 | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 1905,00 | 120,80 | 66,64 | 308,55 | | |
| 2015.09.08.01 | | | | | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 240,00 | 3,75 | 3,75 | 232,73 | | |
| 2015.09.10.01 | | | | | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 240,00 | 4,20 | 4,20 | 232,73 | | |
| 2015.09.14.01 | | | | | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 242,50 | 4,20 | 4,20 | 235,15 | | |
| 2015.09.16.01 | | | | | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 350,00 | 15,00 | 15,00 | 342,94 | In BL 1 je 2 Patronen Tovex A und Tovex T | |
| 2015.09.18.01 | | | | | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 125,00 | 15,83 | 15,00 | 455,54 | | |
| 2015.09.17.01 | | | | | 0 | 0 | | 70 | 0 | 0 | 0,84 | 1825,44 | 53,32 | 64,97 | 304,16 | BL 5 - 19: ca 5 m Detonex 12 g/m | |
| 2015.09.22.01 | | | | | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 672,50 | 14,16 | 14,16 | 328,65 | | |
| 2015.09.28.01 | Tovex T 50x800 | | | | 923 | 1,20 | 3800 | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 1774,60 | 124,97 | 66,64 | 292,07 | | |
| 2015.10.02.01 | Tovex T 50x800 | | | | 572,5 | 1,10 | 3700 | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 1150,00 | 43,33 | 23,33 | 234,97 | BL 26 oben 3 m Luft (Luft) | |
| 2015.10.14.01 | Tovex A 60x800 | | | | 370,0 | 1,20 | 3800 | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 478,33 | 12,78 | 10,00 | 292,02 | | |
| 2015.10.15.01 | | | | | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 306,67 | 12,78 | 12,78 | 292,06 | | |
| 2015.10.20.01 | | | | | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 383,33 | 12,78 | 12,78 | 289,75 | | |
| 2015.10.27.01 | | | | | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 267,78 | 5,28 | 5,28 | 221,07 | | |
| 2015.10.27.01 | | | | | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 463,89 | 12,78 | 12,78 | 276,82 | | |
| 2015.10.28.01 | Tovex A 60x800 | | | | 2258,3 | 1,10 | 3700 | 50 | 0 | 0 | 0,60 | 4400,60 | 131,67 | 71,67 | 345,63 | Bei BL 29, 30, 31, 32 unten je 10m Detonex 12g/m | |
| 2015.10.28.02 | | | | | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 179,72 | 5,28 | 5,28 | 209,92 | | |
| 2015.11.03.01 | | | | | 0 | 0 | | 0 | 0 | 0 | 0,00 | 319,44 | 12,78 | 12,78 | 289,75 | | |
| 2015.11.06.01 | | | | | 521,7 | 1,10 | 3800 | 30 | 0 | 0 | 0,36 | 1000,36 | 95,00 | 50,00 | 309,24 | | |

| Allgemeine Daten | | Zündtechnische Daten | | | | | | | | | | Sonstiges | | | | | | | | | | | |
|------------------|--------------|----------------------|--------------|---------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------------------|----------------------|--------------------------------|--|--|--|--|-----------------|--|-----------|----------|--|
| | | Zünder | | | Verzögerungszeiten | | | | Sonstiges | | | Sonstiges | | | | | | | | | | | |
| Sprengung | | Zündreihfolge | Zündrichtung | Zündverfahren | n _{zel} [°] | n _{neu} [°] | n _{alt} [°] | n _{elek} [°] | n _{mech} [°] | n _{elek} [°] | n _{mech} [°] | Anzahl der Zündzylinder elektrisch | n _{zel} [°] | Anzahl der Bohrtöcher je Zelle | Oberflächenverzögerung zwischen den Reihen | Oberflächenverzögerung zwischen dem Bohrtöcher einer Reihe | Verzögerungszeit zwischen Oberflächen und Bohrtöcher | Anmerkungen | Luftschall [dB] | Distanz der Sprengstelle zur Schalldruckmessstelle | Steinflug | Versager | |
| Nr. Sprengung | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2015_07_15_01 | asymmetrisch | ENE -> WSW | ENE -> WSW | NONEL | 0 | 37 | 0 | 1 | 25 | 25 | 500 | 500 | 25 | 1 | 25 | 25 | 500 | 500 2 mal 2 Bohrtöcher zugleich gezündet | keine Angabe | #NV | < 50 m | keine | |
| 2015_07_16_01 | asymmetrisch | SE -> NW | SE -> NW | NONEL | 0 | 36 | 0 | 1 | 25,67 | 25 | 500 | 500 | 25 | 1 | 25,67 | 25 | 500 | 500 2 mal 2 Bohrtöcher zugleich gezündet | keine Angabe | #NV | < 50 m | keine | |
| 2015_07_17_01 | symmetrisch | N <-> S | N <-> S | NONEL | 0 | 36 | 0 | 1 | #NV | #NV | 500 | 500 | 25 | 1 | #NV | 25 | 500 | 500 2 mal 2 Bohrtöcher zugleich gezündet | keine Angabe | #NV | < 50 m | keine | |
| 2015_07_23_01 | asymmetrisch | N -> S | N -> S | NONEL | 0 | 104 | 0 | 1 | 25,67 | 25 | 500 | 500 | 25 | 1 | 25,67 | 25 | 500 | 500 2 mal 2 Bohrtöcher zugleich gezündet | keine Angabe | #NV | < 50 m | keine | |
| 2015_07_29_01 | asymmetrisch | N -> S | N -> S | NONEL | 0 | 88 | 0 | 1 | 25,67 | 25 | 500 | 500 | 25 | 1 | 25,67 | 25 | 500 | 500 2 mal 2 Bohrtöcher zugleich gezündet | keine Angabe | #NV | < 50 m | keine | |
| 2015_07_31_01 | asymmetrisch | ENE -> WSW | ENE -> WSW | NONEL | 0 | 33 | 0 | 1 | 25,67 | 25 | 500 | 500 | 25 | 1 | 25,67 | 25 | 500 | 500 2 mal 2 Bohrtöcher zugleich gezündet | keine Angabe | #NV | < 50 m | keine | |
| 2015_08_04_01 | asymmetrisch | SE -> NW | SE -> NW | NONEL | 0 | 98 | 0 | 1 | 25,42 | 25 | 500 | 500 | 25 | 1 | 25,42 | 25 | 500 | 500 2 mal 2 Bohrtöcher zugleich gezündet | keine Angabe | #NV | < 50 m | keine | |
| 2015_08_06_01 | asymmetrisch | NNW -> SSE | NNW -> SSE | NONEL | 0 | 100 | 0 | 1 | 25,67 | 25 | 500 | 500 | 25 | 1 | 25,67 | 25 | 500 | 500 2 mal 2 Bohrtöcher zugleich gezündet | keine Angabe | #NV | < 50 m | keine | |
| 2015_08_11_01 | asymmetrisch | ENE -> WSW | ENE -> WSW | NONEL | 0 | 29 | 0 | 1 | 17,25 | 25 | 500 | 500 | 25 | 1 | 17,25 | 25 | 500 | 500 2 mal 2 Bohrtöcher zugleich gezündet | keine Angabe | #NV | < 50 m | keine | |
| 2015_08_13_01 | asymmetrisch | ENE -> WSW | ENE -> WSW | NONEL | 0 | 25 | 0 | 1 | 17,25 | 25 | 500 | 500 | 25 | 1 | 17,25 | 25 | 500 | 500 2 mal 2 Bohrtöcher zugleich gezündet | keine Angabe | #NV | < 50 m | keine | |
| 2015_08_17_01 | asymmetrisch | SSE -> NNW | SSE -> NNW | NONEL | 0 | 42 | 0 | 1 | 17,25 | 25 | 500 | 500 | 25 | 1 | 17,25 | 25 | 500 | 500 2 mal 2 Bohrtöcher zugleich gezündet | keine Angabe | #NV | < 50 m | keine | |
| 2015_08_19_01 | asymmetrisch | N <-> S | N <-> S | NONEL | 0 | 84 | 0 | 1 | 17,25, 42 | 25 | 500 | 500 | 25 | 1 | 17,25, 42 | 25 | 500 | 500 2 mal 2 Bohrtöcher zugleich gezündet | keine Angabe | #NV | < 50 m | keine | |
| 2015_08_20_01 | asymmetrisch | S -> N | S -> N | NONEL | 0 | 82 | 0 | 1 | 25 | 67 | 500 | 500 | 25 | 1 | 25 | 67 | 500 | 500 2 mal 2 Bohrtöcher zugleich gezündet | keine Angabe | #NV | < 50 m | keine | |
| 2015_08_24_01 | asymmetrisch | ENE -> WSW | ENE -> WSW | NONEL | 0 | 22 | 0 | 1 | 25 | 25 | 500 | 500 | 25 | 1 | 25 | 25 | 500 | 500 2 mal 2 Bohrtöcher zugleich gezündet | keine Angabe | #NV | < 50 m | keine | |
| 2015_08_27_01 | asymmetrisch | E -> W | E -> W | NONEL | 0 | 56 | 0 | 1 | 25 | 25 | 500 | 500 | 25 | 1 | 25 | 25 | 500 | 500 2 mal 2 Bohrtöcher zugleich gezündet | keine Angabe | #NV | < 50 m | keine | |
| 2015_08_27_02 | asymmetrisch | S -> N | S -> N | NONEL | 0 | 32 | 0 | 1 | 0 | 25 | 500 | 500 | 25 | 1 | 0 | 25 | 500 | 500 2 mal 2 Bohrtöcher zugleich gezündet | keine Angabe | #NV | < 50 m | keine | |
| 2015_08_31_01 | asymmetrisch | S -> N | S -> N | NONEL | 0 | 50 | 0 | 1 | 25,42 | 25 | 500 | 500 | 25 | 1 | 25,42 | 25 | 500 | 500 2 mal 2 Bohrtöcher zugleich gezündet | keine Angabe | #NV | < 50 m | keine | |
| 2015_09_01_01 | asymmetrisch | E -> W | E -> W | NONEL | 0 | 41 | 0 | 1 | 25,42 | 25 | 500 | 500 | 25 | 1 | 25,42 | 25 | 500 | 500 2 mal 2 Bohrtöcher zugleich gezündet | keine Angabe | #NV | < 50 m | keine | |
| 2015_09_04_01 | asymmetrisch | S -> N | S -> N | NONEL | 0 | 66 | 0 | 1 | 42 | 25 | 500 | 500 | 25 | 1 | 42 | 25 | 500 | 500 2 mal 2 Bohrtöcher zugleich gezündet | keine Angabe | #NV | < 50 m | keine | |
| 2015_09_04_02 | asymmetrisch | N -> S | N -> S | NONEL | 0 | 38 | 0 | 1 | 42 | 25 | 500 | 500 | 25 | 1 | 42 | 25 | 500 | 500 2 mal 2 Bohrtöcher zugleich gezündet | keine Angabe | #NV | < 50 m | keine | |
| 2015_09_10_01 | asymmetrisch | S -> N | S -> N | NONEL | 0 | 64 | 0 | 1 | 42 | 25 | 500 | 500 | 25 | 1 | 42 | 25 | 500 | 500 2 mal 2 Bohrtöcher zugleich gezündet | keine Angabe | #NV | < 50 m | keine | |
| 2015_09_10_01 | asymmetrisch | S -> N | S -> N | NONEL | 0 | 66 | 0 | 1 | 42 | 25 | 500 | 500 | 25 | 1 | 42 | 25 | 500 | 500 2 mal 2 Bohrtöcher zugleich gezündet | keine Angabe | #NV | < 50 m | keine | |
| 2015_09_14_01 | asymmetrisch | S -> N | S -> N | NONEL | 0 | 25 | 0 | 1 | 0 | 25 | 500 | 500 | 25 | 1 | 0 | 25 | 500 | 500 2 mal 2 Bohrtöcher zugleich gezündet | keine Angabe | #NV | < 50 m | keine | |
| 2015_09_16_01 | asymmetrisch | S -> N | S -> N | NONEL | 0 | 66 | 0 | 1 | 42 | 25 | 500 | 500 | 25 | 1 | 42 | 25 | 500 | 500 2 mal 2 Bohrtöcher zugleich gezündet | keine Angabe | #NV | < 50 m | keine | |
| 2015_09_17_01 | asymmetrisch | S -> N | S -> N | NONEL | 0 | 12 | 0 | 1 | 0 | 25 | 500 | 500 | 25 | 1 | 0 | 25 | 500 | 500 2 mal 2 Bohrtöcher zugleich gezündet | keine Angabe | #NV | < 50 m | keine | |
| 2015_09_18_01 | asymmetrisch | N <-> S | N <-> S | NONEL | 0 | 35 | 0 | 1 | 25 | 25 | 500 | 500 | 25 | 1 | 25 | 25 | 500 | 500 2 mal 2 Bohrtöcher zugleich gezündet | keine Angabe | #NV | < 50 m | keine | |
| 2015_09_22_01 | symmetrisch | #NV | #NV | NONEL | 0 | 47 | 0 | 1 | #NV | #NV | 500 | 500 | 25 | 1 | #NV | 25 | 500 | 500 2 mal 2 Bohrtöcher zugleich gezündet | keine Angabe | #NV | < 50 m | keine | |
| 2015_09_28_01 | asymmetrisch | E -> W | E -> W | NONEL | 0 | 38 | 0 | 1 | 25 | 25 | 500 | 500 | 25 | 1 | 25 | 25 | 500 | 500 2 mal 2 Bohrtöcher zugleich gezündet | keine Angabe | #NV | < 50 m | keine | |
| 2015_10_02_01 | asymmetrisch | E -> W | E -> W | NONEL | 0 | 57 | 0 | 1 | 25 | 25 | 500 | 500 | 25 | 1 | 25 | 25 | 500 | 500 2 mal 2 Bohrtöcher zugleich gezündet | keine Angabe | #NV | < 50 m | keine | |
| 2015_10_14_01 | asymmetrisch | S -> N | S -> N | NONEL | 0 | 39 | 0 | 1 | - | - | 500 | 500 | 25 | 1 | - | - | 500 | 500 2 mal 2 Bohrtöcher zugleich gezündet | keine Angabe | #NV | < 50 m | keine | |
| 2015_10_15_01 | asymmetrisch | S -> N | S -> N | NONEL | 0 | 25 | 0 | 1 | - | - | 500 | 500 | 25 | 1 | - | - | 500 | 500 2 mal 2 Bohrtöcher zugleich gezündet | keine Angabe | #NV | < 50 m | keine | |
| 2015_10_20_01 | asymmetrisch | S -> N | S -> N | NONEL | 0 | 30 | 0 | 1 | - | - | 500 | 500 | 25 | 1 | - | - | 500 | 500 2 mal 2 Bohrtöcher zugleich gezündet | keine Angabe | #NV | < 50 m | keine | |
| 2015_10_22_01 | asymmetrisch | S -> N | S -> N | NONEL | 0 | 55 | 0 | 1 | 42 | 25 | 500 | 500 | 25 | 1 | 42 | 25 | 500 | 500 2 mal 2 Bohrtöcher zugleich gezündet | keine Angabe | #NV | < 50 m | keine | |
| 2015_10_27_01 | asymmetrisch | S -> N | S -> N | NONEL | 0 | 38 | 0 | 1 | - | - | 500 | 500 | 25 | 1 | - | - | 500 | 500 2 mal 2 Bohrtöcher zugleich gezündet | keine Angabe | #NV | < 50 m | keine | |
| 2015_10_28_01 | asymmetrisch | N <-> S | N <-> S | NONEL | 0 | 84 | 0 | 1 | - | - | 500 | 500 | 25 | 1 | - | - | 500 | 500 2 mal 2 Bohrtöcher zugleich gezündet | keine Angabe | #NV | < 50 m | keine | |
| 2015_10_28_02 | asymmetrisch | SE -> NW | SE -> NW | NONEL | 0 | 35 | 0 | 1 | 42 | 25 | 500 | 500 | 25 | 1 | 42 | 25 | 500 | 500 2 mal 2 Bohrtöcher zugleich gezündet | keine Angabe | #NV | < 50 m | keine | |
| 2015_11_03_01 | asymmetrisch | S -> N | S -> N | NONEL | 0 | 25 | 0 | 1 | - | - | 500 | 500 | 25 | 1 | - | - | 500 | 500 2 mal 2 Bohrtöcher zugleich gezündet | keine Angabe | #NV | < 50 m | keine | |
| 2015_11_06_01 | asymmetrisch | E -> W | E -> W | NONEL | 0 | 24 | 0 | 1 | 34 | 25 | 500 | 500 | 25 | 1 | 34 | 25 | 500 | 500 2 mal 2 Bohrtöcher zugleich gezündet | keine Angabe | #NV | < 50 m | keine | |

| Messstelle 1 CH607 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------|----------|--------|-------------|----------|-----------|-------|---|--------|---------------------------|-------------------|-------------------------|---------------------------------|------------------------|--|-----------------------|--|-----------------------|--|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| Allgemeine Daten | | | Koordinaten | | | | Distanz | | Schwinggeschwindigkeit | | | | Schwinggeschwindigkeit | | | | | | | | | | | |
| Sprengung | Standort | RW | Rechtswert | Hochwert | m ü M [m] | Höhe | Distanz der Sprengstelle zur Messstelle | r [m] | SD [m/kg ^{0,5}] | Skalierte Distanz | v _{max} [mm/s] | maximale Schwinggeschwindigkeit | v _N [mm/s] | maximale Schwinggeschwindigkeit der x-Komponente | v _E [mm/s] | maximale Schwinggeschwindigkeit der y-Komponente | v _Z [mm/s] | maximale Schwinggeschwindigkeit der z-Komponente | f _N [s ⁻¹] | maximale Frequenz x-Komponente | f _E [s ⁻¹] | maximale Frequenz y-Komponente | f _Z [s ⁻¹] | maximale Frequenz z-Komponente |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2015_07_15_01 | Frei | 652933 | 252400 | 407 | 962,1 | 372,7 | 0,124 | 0,077 | 0,087 | 0,092 | 36,62 | 36,38 | 10,01 | | | | | | | | | | | |
| 2015_07_16_01 | Frei | 652933 | 252400 | 407 | 880,0 | 321,4 | 0,128 | 0,082 | 0,11 | 0,106 | 35,77 | 29,08 | 29,57 | | | | | | | | | | | |
| 2015_07_17_01 | Frei | 652933 | 252400 | 407 | 908,3 | 104,9 | 0,283 | 0,203 | 0,255 | 0,233 | 6,1 | 6,1 | 6,59 | | | | | | | | | | | |
| 2015_07_23_01 | Frei | 652933 | 252400 | 407 | 873,5 | 338,3 | 0,182 | 0,128 | 0,144 | 0,181 | 13,73 | 34,15 | 28,14 | | | | | | | | | | | |
| 2015_07_29_01 | Frei | 652933 | 252400 | 407 | 901,4 | 197,5 | 0,14 | 0,1 | 0,119 | 0,122 | 12,45 | 32,84 | 32,71 | | | | | | | | | | | |
| 2015_07_31_01 | Frei | 652933 | 252400 | 407 | 953,2 | 330,2 | 0,075 | 0,086 | 0,092 | 0,113 | 36,13 | 36,13 | 30,76 | | | | | | | | | | | |
| 2015_08_04_01 | Frei | 652933 | 252400 | 407 | 596,8 | 117,4 | 0,213 | 0,15 | 0,141 | 0,213 | 7,26 | 12,48 | 9,16 | | | | | | | | | | | |
| 2015_08_06_01 | Frei | 652933 | 252400 | 407 | 925,9 | 202,9 | 0,1274 | 0,092 | 0,1113 | 0,1016 | 10,5 | 15,14 | 9,52 | | | | | | | | | | | |
| 2015_08_11_01 | Frei | 652933 | 252400 | 407 | 966,4 | 374,3 | 0,119 | 0,076 | 0,09 | 0,089 | 14,25 | 34,27 | 13,06 | | | | | | | | | | | |
| 2015_08_13_01 | Frei | 652933 | 252400 | 407 | 954,5 | 348,6 | 0,122 | 0,066 | 0,109 | 0,092 | 18,43 | 27,86 | 30,58 | | | | | | | | | | | |
| 2015_08_17_01 | Frei | 652933 | 252400 | 407 | 750,0 | 212,2 | 0,252 | 0,192 | 0,243 | 0,238 | 35,52 | 32,32 | 28,44 | | | | | | | | | | | |
| 2015_08_19_01 | Frei | 652933 | 252400 | 407 | 883,5 | 103,2 | 0,311 | 0,209 | 0,252 | 0,238 | 18,55 | 35,4 | 35,64 | | | | | | | | | | | |
| 2015_08_20_01 | Frei | 652933 | 252400 | 407 | 855,5 | 331,4 | 0,1733 | 0,1225 | 0,1409 | 0,1354 | 13,67 | 29,79 | 29,54 | | | | | | | | | | | |
| 2015_08_24_01 | Frei | 652933 | 252400 | 407 | 931,2 | 360,7 | 0,13 | 0,072 | 0,099 | 0,102 | 14,5 | 7,66 | 7,87 | | | | | | | | | | | |
| 2015_08_27_01 | Frei | 652933 | 252400 | 407 | 720,6 | 154,8 | 0,367 | 0,271 | 0,308 | 0,275 | 36,01 | 36,5 | 36,01 | | | | | | | | | | | |
| 2015_08_27_02 | Frei | 652933 | 252400 | 407 | 769,9 | 210,9 | 0,367 | 0,271 | 0,308 | 0,275 | 36,01 | 36,5 | 36,01 | | | | | | | | | | | |
| 2015_08_31_01 | Frei | 652933 | 252400 | 407 | 931,0 | 588,8 | 0,107 | 0,055 | 0,092 | 0,075 | 34,18 | 34,67 | 31,49 | | | | | | | | | | | |
| 2015_09_01_01 | Frei | 652933 | 252400 | 407 | 934,5 | 417,9 | 0,0825 | 0,0359 | 0,0509 | 0,0564 | 6,53 | 6,53 | 6,53 | | | | | | | | | | | |
| 2015_09_04_01 | Frei | 652933 | 252400 | 407 | 934,1 | 482,3 | 0,114 | 0,062 | 0,086 | 0,09 | 15,75 | 104,43 | 15,38 | | | | | | | | | | | |
| 2015_09_04_02 | Frei | 652933 | 252400 | 407 | 651,4 | 79,8 | 0,469 | 0,257 | 0,278 | 0,394 | 7,32 | 10,99 | 10,5 | | | | | | | | | | | |
| 2015_09_08_01 | Frei | 652933 | 252400 | 407 | 899,0 | 464,3 | 0,115 | 0,067 | 0,089 | 0,084 | 18,13 | 17,46 | 10,19 | | | | | | | | | | | |
| 2015_09_10_01 | Frei | 652933 | 252400 | 407 | 884,1 | 431,4 | 0,126 | 0,071 | 0,115 | 0,108 | 17,09 | 28,81 | 27,59 | | | | | | | | | | | |
| 2015_09_14_01 | Frei | 652933 | 252400 | 407 | 869,1 | 424,1 | 0,139 | 0,103 | 0,125 | 0,104 | 34,18 | 34,18 | 33,2 | | | | | | | | | | | |
| 2015_09_16_01 | Frei | 652933 | 252400 | 407 | 874,0 | 225,7 | 0,216 | 0,1485 | 0,1818 | 0,1559 | 36,62 | 37,6 | 37,35 | | | | | | | | | | | |
| 2015_09_18_01 | Frei | 652933 | 252400 | 407 | 874,0 | 225,7 | 0,1187 | 0,0799 | 0,0943 | 0,0998 | 11,96 | 33,94 | 8,06 | | | | | | | | | | | |
| 2015_09_17_01 | Frei | 652933 | 252400 | 407 | 649,7 | 80,6 | 0,3718 | 0,2775 | 0,2535 | 0,3218 | 6,35 | 5,62 | 8,79 | | | | | | | | | | | |
| 2015_09_22_01 | Frei | 652933 | 252400 | 407 | 855,2 | 227,2 | 0,2563 | 0,2302 | 0,2005 | 0,1799 | 36,13 | 34,91 | 36,87 | | | | | | | | | | | |
| 2015_09_28_01 | Frei | 652933 | 252400 | 407 | 669,5 | 82,0 | 0,358 | 0,268 | 0,216 | 0,341 | 19,29 | 11,72 | 11,96 | | | | | | | | | | | |
| 2015_10_02_01 | Frei | 652933 | 252400 | 407 | 749,2 | 155,1 | 0,529 | 0,285 | 0,51 | 0,329 | 38,09 | 103,03 | 36,62 | | | | | | | | | | | |
| 2015_10_14_01 | Frei | 652933 | 252400 | 407 | 772,2 | 244,2 | 0,275 | 0,223 | 0,221 | 0,204 | 35,16 | 35,16 | 35,16 | | | | | | | | | | | |
| 2015_10_15_01 | Frei | 652933 | 252400 | 407 | 854,1 | 238,9 | 0,216 | 0,176 | 0,208 | 0,165 | 36,62 | 36,13 | 37,35 | | | | | | | | | | | |
| 2015_10_20_01 | Frei | 652933 | 252400 | 407 | 840,3 | 235,1 | 0,205 | 0,16 | 0,193 | 0,132 | 36,62 | 36,13 | 36,87 | | | | | | | | | | | |
| 2015_10_22_01 | Frei | 652933 | 252400 | 407 | 766,3 | 333,6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2015_10_27_01 | Frei | 652933 | 252400 | 407 | 861,8 | 241,1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2015_10_28_01 | Frei | 652933 | 252400 | 407 | 898,3 | 106,1 | 0,2435 | 0,1971 | 0,2045 | 0,1978 | 6,96 | 7,2 | 6,71 | | | | | | | | | | | |
| 2015_10_28_02 | Frei | 652933 | 252400 | 407 | 731,8 | 318,6 | 0,1631 | 0,1208 | 0,1297 | 0,1154 | 33,94 | 33,45 | 25,39 | | | | | | | | | | | |
| 2015_11_03_01 | Frei | 652933 | 252400 | 407 | 758,9 | 212,3 | 0,2327 | 0,192 | 0,2017 | 0,1968 | 35,89 | 35,4 | 35,64 | | | | | | | | | | | |
| 2015_11_06_01 | Frei | 652933 | 252400 | 407 | 789,5 | 111,6 | 0,1716 | 0,1232 | 0,145 | 0,1347 | 7,58 | 4,68 | 5,24 | | | | | | | | | | | |

| Messstelle 2 CH428 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------|----------|------------|----------|-------------|---------|-------------|---|----------------|---|-------------|--|------------------------|--|-------------|--|------------|--------------------------------|------------|--------------------------------|------------|--------------------------------|
| Allgemeine Daten | | | | Koordinaten | | | | Distanz | | | | Schwinggeschwindigkeit | | | | | | | | | |
| Sprengung | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Nr. Sprengung | Haushalt | Rechtswert | Hochwert | Höhe | r [m]15 | m ü M [m]15 | Distanz der Sprengstelle zur Messstelle | SD [m/kg0.5]16 | maximale vektorielle Schwinggeschwindigkeit | vN [mm/s]17 | maximale Schwinggeschwindigkeit der x-Komponente | vE [mm/s]19 | maximale Schwinggeschwindigkeit der y-Komponente | vZ [mm/s]20 | maximale Schwinggeschwindigkeit der z-Komponente | fN [s-1]22 | maximale Frequenz x-Komponente | fE [s-1]23 | maximale Frequenz y-Komponente | fZ [s-1]24 | maximale Frequenz z-Komponente |
| 2015_07_15_01 | Aellig | 654242 | 252287 | 352 | 369.5 | 143.1 | 0.914 | 0.758 | 0.403 | 0.666 | 36.13 | 80.57 | 120.12 | | | | | | | | |
| 2015_07_16_01 | Aellig | 654242 | 252287 | 352 | 435.8 | 159.2 | 0.675 | 0.669 | 0.639 | 0.596 | 91.31 | 8.79 | 121.83 | | | | | | | | |
| 2015_07_17_01 | Aellig | 654242 | 252287 | 352 | 826.4 | 95.4 | 1.707 | 1.253 | 0.679 | 1.23 | 7.81 | 8.3 | 123.54 | | | | | | | | |
| 2015_07_23_01 | Aellig | 654242 | 252287 | 352 | 444.0 | 172.0 | 1.003 | 0.649 | 0.572 | 0.904 | 86.3 | 71.29 | 116.58 | | | | | | | | |
| 2015_07_29_01 | Aellig | 654242 | 252287 | 352 | 587.5 | 128.7 | 1.489 | 0.814 | 1.112 | 1.315 | 79.83 | 66.65 | 114.99 | | | | | | | | |
| 2015_07_31_01 | Aellig | 654242 | 252287 | 352 | 379.7 | 131.5 | 1.091 | 0.762 | 0.475 | 1.069 | 35.64 | 72.27 | 114.26 | | | | | | | | |
| 2015_08_04_01 | Aellig | 654242 | 252287 | 352 | 980.4 | 192.9 | 0.155 | 0.128 | 0.102 | 0.154 | 7.9 | 6.96 | 119.32 | | | | | | | | |
| 2015_08_06_01 | Aellig | 654242 | 252287 | 352 | 545.5 | 119.5 | 1.562 | 1.32 | 0.705 | 1.332 | 75.2 | 88.13 | 117.92 | | | | | | | | |
| 2015_08_11_01 | Aellig | 654242 | 252287 | 352 | 370.5 | 143.5 | 1.589 | 1.438 | 0.714 | 0.823 | 92.53 | 89.11 | 12.21 | | | | | | | | |
| 2015_08_13_01 | Aellig | 654242 | 252287 | 352 | 382.7 | 139.8 | 1.747 | 1.029 | 1.569 | 0.991 | 89.6 | 89.11 | 119.14 | | | | | | | | |
| 2015_08_17_01 | Aellig | 654242 | 252287 | 352 | 571.1 | 161.6 | 0.719 | 0.573 | 0.44 | 0.561 | 85.69 | 90.09 | 11.47 | | | | | | | | |
| 2015_08_19_01 | Aellig | 654242 | 252287 | 352 | 745.3 | 87.0 | 1.923 | 1.735 | 0.84 | 1.131 | 139.16 | 89.36 | 119.87 | | | | | | | | |
| 2015_08_20_01 | Aellig | 654242 | 252287 | 352 | 461.7 | 178.8 | 0.8719 | 0.841 | 1.268 | 1.204 | 140.14 | 90.58 | 121.09 | | | | | | | | |
| 2015_08_24_01 | Aellig | 654242 | 252287 | 352 | 400.7 | 155.2 | 1.385 | 0.961 | 1.044 | 1.044 | 92.04 | 92.04 | 119.63 | | | | | | | | |
| 2015_08_27_01 | Aellig | 654242 | 252287 | 352 | 611.6 | 131.4 | 1.177 | 0.8 | 0.91 | 1.044 | 91.06 | 91.06 | 118.77 | | | | | | | | |
| 2015_08_27_02 | Aellig | 654242 | 252287 | 352 | 543.9 | 149.0 | 1.177 | 0.8 | 0.91 | 1.044 | 91.06 | 91.06 | 118.77 | | | | | | | | |
| 2015_08_31_01 | Aellig | 654242 | 252287 | 352 | 396.9 | 251.0 | 1.02 | 0.615 | 0.833 | 0.675 | 92.77 | 92.53 | 120.36 | | | | | | | | |
| 2015_09_01_01 | Aellig | 654242 | 252287 | 352 | 401.0 | 179.3 | 1.05 | 0.658 | 0.66 | 0.937 | 87.4 | 98.84 | 121.58 | | | | | | | | |
| 2015_09_04_01 | Aellig | 654242 | 252287 | 352 | 388.6 | 200.7 | 0.9 | 0.609 | 0.653 | 0.756 | 81.54 | 35.4 | 122.8 | | | | | | | | |
| 2015_09_04_02 | Aellig | 654242 | 252287 | 352 | 888.6 | 108.8 | 0.773 | 0.74 | 0.599 | 0.612 | 7.08 | 7.32 | 8.79 | | | | | | | | |
| 2015_09_08_01 | Aellig | 654242 | 252287 | 352 | 423.7 | 218.8 | 0.856 | 0.584 | 0.512 | 0.722 | 86.06 | 91.31 | 119.81 | | | | | | | | |
| 2015_09_10_01 | Aellig | 654242 | 252287 | 352 | 436.6 | 213.0 | 0.726 | 0.532 | 0.407 | 0.552 | 85.45 | 91.06 | 122.07 | | | | | | | | |
| 2015_09_14_01 | Aellig | 654242 | 252287 | 352 | 451.2 | 220.2 | 0.893 | 0.753 | 0.516 | 0.541 | 93.02 | 92.77 | 121.09 | | | | | | | | |
| 2015_09_16_01 | Aellig | 654242 | 252287 | 352 | 448.0 | 115.7 | 0.8761 | 0.748 | 0.774 | 0.675 | 11.96 | 10.74 | 120.61 | | | | | | | | |
| 2015_09_17_01 | Aellig | 654242 | 252287 | 352 | 448.0 | 115.7 | 0.5376 | 0.3413 | 0.2838 | 0.4454 | 85.69 | 93.02 | 121.83 | | | | | | | | |
| 2015_09_18_01 | Aellig | 654242 | 252287 | 352 | 890.3 | 110.4 | 0.5431 | 0.519 | 0.4831 | 0.3612 | 5.86 | 7.57 | 18.55 | | | | | | | | |
| 2015_09_22_01 | Aellig | 654242 | 252287 | 352 | 460.1 | 122.2 | 1.083 | 0.808 | 0.671 | 0.723 | 33.69 | 91.8 | 122.19 | | | | | | | | |
| 2015_09_28_01 | Aellig | 654242 | 252287 | 352 | 877.8 | 107.5 | 0.386 | 0.365 | 0.303 | 0.215 | 11.96 | 11.96 | 10.01 | | | | | | | | |
| 2015_10_02_01 | Aellig | 654242 | 252287 | 352 | 582.0 | 120.5 | 1.472 | 1.07 | 1.119 | 1.472 | 90.7 | 90.58 | 117.55 | | | | | | | | |
| 2015_10_14_01 | Aellig | 654242 | 252287 | 352 | 541.7 | 171.3 | 0.768 | 0.525 | 0.446 | 0.554 | 84.23 | 12.45 | 12.45 | | | | | | | | |
| 2015_10_15_01 | Aellig | 654242 | 252287 | 352 | 461.2 | 129.0 | 0.81 | 0.491 | 0.751 | 0.535 | 92.04 | 92.29 | 121.58 | | | | | | | | |
| 2015_10_20_01 | Aellig | 654242 | 252287 | 352 | 474.6 | 132.8 | 0.766 | 0.671 | 0.56 | 0.45 | 84.96 | 35.16 | 118.9 | | | | | | | | |
| 2015_10_22_01 | Aellig | 654242 | 252287 | 352 | 547.9 | 238.5 | 0.25 | 0.222 | 0.229 | 0.219 | 35.89 | 12.45 | 12.21 | | | | | | | | |
| 2015_10_27_01 | Aellig | 654242 | 252287 | 352 | 452.0 | 126.5 | 1.231 | 0.966 | 1.031 | 0.769 | 91.55 | 91.55 | 119.63 | | | | | | | | |
| 2015_10_28_01 | Aellig | 654242 | 252287 | 352 | 827.3 | 97.7 | 0.2744 | 0.1879 | 0.1769 | 0.2438 | 87.4 | 8.54 | 121.09 | | | | | | | | |
| 2015_10_28_02 | Aellig | 654242 | 252287 | 352 | 582.2 | 253.4 | 0.6903 | 581 | 3781 | 0.4996 | 84.23 | 92.53 | 121.34 | | | | | | | | |
| 2015_11_03_01 | Aellig | 654242 | 252287 | 352 | 555.3 | 155.3 | 0.5684 | 0.3993 | 0.3443 | 0.3694 | 6.58 | 8.13 | 121.95 | | | | | | | | |
| 2015_11_06_01 | Aellig | 654242 | 252287 | 352 | 789.8 | 111.7 | 0.5684 | 0.3993 | 0.3443 | 0.3694 | 6.58 | 8.13 | 121.95 | | | | | | | | |

| Messstelle 3 CH609 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------|----------|--------|--------|-------------|----------|-----------|--------|---|---------------------------|---|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------|---------------------------------|-----------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-------------------|-----------------------------------|-------------------|-----------------------------------|------|
| Allgemeine Daten | | | | Koordinaten | | | | Distanz | | | Schwinggeschwindigkeit | | | | | | | | | | | | |
| Sprengung | | | | Rechtswert | Hochwert | m ü M [m] | r [m] | Distanz der Sprengstelle zur Messstelle | SD [m/kg ^{0,5}] | maximale vektorielle Schwinggeschwindigkeit | maximale Schwinggeschwindigkeit | maximale Schwinggeschwindigkeit | maximale Schwinggeschwindigkeit | v _E [mm/s] | maximale Schwinggeschwindigkeit | v _Z [mm/s] | geschwindigkeit der z-Komponente | f _N [s ⁻¹] | maximale Frequenz | f _E [s ⁻¹] | maximale Frequenz | f _Z [s ⁻¹] | |
| Nr. Sprengung | Haushalt | RW | HW | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | höhe |
| 2015_07_15_01 | Weber | 654206 | 252517 | 364 | 327,6 | 126,9 | 0,84 | 0,484 | 0,577 | 0,685 | 36,13 | 84,47 | 101,81 | | | | | | | | | | |
| 2015_07_16_01 | Weber | 654206 | 252517 | 364 | 424,9 | 155,2 | 0,416 | 0,227 | 0,257 | 0,288 | 78,13 | 28,56 | 101,32 | | | | | | | | | | |
| 2015_07_17_01 | Weber | 654206 | 252517 | 364 | 643,8 | 74,4 | 0,747 | 0,566 | 0,55 | 0,728 | 102,29 | 37,35 | 102,29 | | | | | | | | | | |
| 2015_07_23_01 | Weber | 654206 | 252517 | 364 | 425,8 | 164,9 | 0,696 | 0,607 | 0,696 | 0,458 | 78,37 | 83,74 | 101,07 | | | | | | | | | | |
| 2015_07_29_01 | Weber | 654206 | 252517 | 364 | 438,5 | 96,1 | 0,964 | 0,54 | 0,579 | 0,907 | 104,74 | 107,74 | 107,74 | | | | | | | | | | |
| 2015_07_31_01 | Weber | 654206 | 252517 | 364 | 334,7 | 115,9 | 0,79 | 0,498 | 0,459 | 0,79 | 36,67 | 88,13 | 103,03 | | | | | | | | | | |
| 2015_08_04_01 | Weber | 654206 | 252517 | 364 | 853,2 | 167,9 | 0,115 | 0,048 | 0,074 | 0,089 | 3,97 | 57,07 | 7,26 | | | | | | | | | | |
| 2015_08_06_01 | Weber | 654206 | 252517 | 364 | 398,8 | 87,4 | 0,6918 | 0,4072 | 0,605 | 0,57 | 102,78 | 15,14 | 102,78 | | | | | | | | | | |
| 2015_08_11_01 | Weber | 654206 | 252517 | 364 | 319,9 | 123,9 | 0,965 | 0,549 | 0,55 | 0,724 | 36,38 | 79,35 | 101,32 | | | | | | | | | | |
| 2015_08_13_01 | Weber | 654206 | 252517 | 364 | 330,7 | 120,8 | 0,979 | 0,661 | 0,501 | 0,8 | 75,68 | 83,25 | 101,07 | | | | | | | | | | |
| 2015_08_17_01 | Weber | 654206 | 252517 | 364 | 535,1 | 151,4 | 0,428 | 0,264 | 0,221 | 0,307 | 36,25 | 88,29 | 101,75 | | | | | | | | | | |
| 2015_08_19_01 | Weber | 654206 | 252517 | 364 | 574,2 | 67,1 | 0,959 | 0,557 | 0,435 | 0,849 | 37,6 | 37,6 | 79,59 | | | | | | | | | | |
| 2015_08_20_01 | Weber | 654206 | 252517 | 364 | 442,8 | 171,5 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2015_08_24_01 | Weber | 654206 | 252517 | 364 | 355,5 | 137,7 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2015_08_27_01 | Weber | 654206 | 252517 | 364 | 558,3 | 120,0 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2015_08_27_02 | Weber | 654206 | 252517 | 364 | 538,4 | 147,5 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2015_08_31_01 | Weber | 654206 | 252517 | 364 | 358,9 | 227,0 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2015_09_01_01 | Weber | 654206 | 252517 | 364 | 350,2 | 156,6 | 0,6158 | 0,3945 | 0,4294 | 0,4262 | 127,2 | 79,35 | 106,2 | | | | | | | | | | |
| 2015_09_04_01 | Weber | 654206 | 252517 | 364 | 362,4 | 187,1 | 0,658 | 0,585 | 0,489 | 0,422 | 167,24 | 81,3 | 112,06 | | | | | | | | | | |
| 2015_09_04_02 | Weber | 654206 | 252517 | 364 | 759,3 | 93,0 | 0,658 | 0,585 | 0,489 | 0,422 | 167,24 | 81,3 | 112,06 | | | | | | | | | | |
| 2015_09_08_01 | Weber | 654206 | 252517 | 364 | 393,7 | 203,3 | 0,455 | 0,45 | 0,346 | 0,282 | 34,97 | 81,18 | 9,09 | | | | | | | | | | |
| 2015_09_10_01 | Weber | 654206 | 252517 | 364 | 410,1 | 200,1 | 0,498 | 0,413 | 0,336 | 0,291 | 174,32 | 80,32 | 100,1 | | | | | | | | | | |
| 2015_09_14_01 | Weber | 654206 | 252517 | 364 | 424,4 | 207,1 | 0,517 | 0,367 | 0,247 | 0,44 | 33,81 | 36,62 | 33,94 | | | | | | | | | | |
| 2015_09_16_01 | Weber | 654206 | 252517 | 364 | 417,5 | 107,8 | 0,5901 | 0,2942 | 0,4475 | 0,5202 | 36,62 | 36,62 | 36,38 | | | | | | | | | | |
| 2015_09_17_01 | Weber | 654206 | 252517 | 364 | 417,5 | 107,8 | 0,4764 | 0,248 | 0,2713 | 0,4153 | 158,69 | 122,07 | 103,3 | | | | | | | | | | |
| 2015_09_18_01 | Weber | 654206 | 252517 | 364 | 761,2 | 94,4 | 0,4764 | 0,248 | 0,2713 | 0,4153 | 158,69 | 122,07 | 103,3 | | | | | | | | | | |
| 2015_09_22_01 | Weber | 654206 | 252517 | 364 | 449,2 | 119,4 | 0,5306 | 0,4237 | 0,4123 | 0,4421 | 36,01 | 35,77 | 35,77 | | | | | | | | | | |
| 2015_09_28_01 | Weber | 654206 | 252517 | 364 | 745,4 | 91,3 | 0,3 | 0,173 | 0,247 | 0,29 | 7,57 | 7,32 | 6,59 | | | | | | | | | | |
| 2015_10_02_01 | Weber | 654206 | 252517 | 364 | 530,3 | 109,8 | 0,807 | 0,449 | 0,656 | 0,582 | 16,85 | 82,03 | 17,09 | | | | | | | | | | |
| 2015_10_14_01 | Weber | 654206 | 252517 | 364 | 537,6 | 170,0 | 0,416 | 0,2 | 0,305 | 0,299 | 36,5 | 84,47 | 36,38 | | | | | | | | | | |
| 2015_10_15_01 | Weber | 654206 | 252517 | 364 | 449,8 | 125,8 | 0,558 | 0,303 | 0,302 | 0,501 | 35,89 | 72,75 | 35,89 | | | | | | | | | | |
| 2015_10_20_01 | Weber | 654206 | 252517 | 364 | 464,0 | 129,8 | 0,434 | 0,244 | 0,389 | 0,391 | 38,33 | 36,38 | 102,78 | | | | | | | | | | |
| 2015_10_22_01 | Weber | 654206 | 252517 | 364 | 548,0 | 238,5 | 0,249 | 0,137 | 0,176 | 0,234 | 26,37 | 82,28 | 106,69 | | | | | | | | | | |
| 2015_10_27_01 | Weber | 654206 | 252517 | 364 | 454,3 | 127,1 | 0,6471 | 0,546 | 0,627 | 0,604 | 156,49 | 85,21 | 7,32 | | | | | | | | | | |
| 2015_10_28_01 | Weber | 654206 | 252517 | 364 | 646,7 | 76,4 | 0,1434 | 0,087 | 0,1259 | 0,0903 | 9,28 | 83,5 | 9,77 | | | | | | | | | | |
| 2015_10_28_02 | Weber | 654206 | 252517 | 364 | 568,7 | 247,5 | 0,3464 | 0,2062 | 0,2563 | 0,3301 | 36,38 | 37,35 | 104,98 | | | | | | | | | | |
| 2015_11_03_01 | Weber | 654206 | 252517 | 364 | 543,3 | 152,0 | 0,2592 | 0,1687 | 0,1919 | 0,1949 | 5,52 | 83,92 | 8,33 | | | | | | | | | | |
| 2015_11_06_01 | Weber | 654206 | 252517 | 364 | 637,8 | 90,2 | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| Messstelle 4 CH608 | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------|----------|------------|-------------|-------------|---|-------------------|---|--|--|--|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--|--|
| Allgemeine Daten | | | | Koordinaten | | | | Distanz | | | | Schwinggeschwindigkeit | | | |
| Sprengung | Haushalt | Rechtswert | Hochwert | Höhe | Distanz der Sprengstelle zur Messstelle | Skalierte Distanz | maximale vektorielle Schwinggeschwindigkeit | maximale Schwinggeschwindigkeit der x-Komponente | maximale Schwinggeschwindigkeit der y-Komponente | maximale Schwinggeschwindigkeit der z-Komponente | maximale Frequenz x-Komponente | maximale Frequenz y-Komponente | maximale Frequenz z-Komponente | | |
| Nr. Sprengung | RW37 | HW38 | m ü M [m]39 | r [m]40 | SD [m/kg0.5]2 | vmax [mm/s]41 | vN [mm/s]42 | vE [mm/s]43 | vZ [mm/s]44 | fN [s-1]46 | fE [s-1]47 | fZ [s-1]48 | | | |
| 2015_07_15_01 | 654400 | 252763 | 364 | 613,9 | 237,8 | 0,4207 | 0,4012 | 0,1761 | 0,2317 | 67,14 | 67,14 | 73,73 | | | |
| 2015_07_16_01 | 654400 | 252763 | 364 | 714,0 | 260,7 | 0,1584 | 0,1433 | 0,0808 | 0,1281 | 8,79 | 8,79 | 100,1 | | | |
| 2015_07_17_01 | 654400 | 252763 | 364 | 723,5 | 83,6 | 0,9385 | 0,735 | 0,711 | 0,4307 | 10,25 | 17,82 | 10,01 | | | |
| 2015_07_23_01 | 654400 | 252763 | 364 | 711,7 | 275,6 | 0,2039 | 0,2039 | 0,2033 | 0,1659 | 49,32 | 49,32 | 49,32 | | | |
| 2015_07_29_01 | 654400 | 252763 | 364 | 613,6 | 134,4 | 0,6585 | 0,5004 | 0,254 | 0,6235 | 19,29 | 8,79 | 59,57 | | | |
| 2015_07_31_01 | 654400 | 252763 | 364 | 618,5 | 214,3 | 0,2864 | 0,2542 | 0,1101 | 0,2216 | 18,55 | 28,32 | 78,13 | | | |
| 2015_08_04_01 | 654400 | 252763 | 364 | 1006,1 | 198,0 | 0,157 | 0,148 | 0,09 | 0,111 | 49,35 | 7,57 | 49,35 | | | |
| 2015_08_06_01 | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2015_08_11_01 | 654140 | 252343 | 361 | 255,2 | 98,9 | 1,672 | 0,639 | 0,967 | 1,548 | 17,58 | 18,8 | 21 | | | |
| 2015_08_13_01 | 654140 | 252343 | 361 | 287,5 | 97,7 | 1,814 | 0,761 | 0,882 | 1,586 | 19,04 | 18,8 | 21,97 | | | |
| 2015_08_17_01 | 654140 | 252343 | 361 | 461,1 | 130,4 | 0,98 | 0,811 | 0,534 | 0,715 | 10,99 | 21,73 | 18,31 | | | |
| 2015_08_19_01 | 654140 | 252343 | 361 | 634,3 | 74,1 | 1,092 | 0,814 | 0,865 | 1,014 | 9,16 | 18,31 | 100,22 | | | |
| 2015_08_20_01 | 654140 | 252343 | 361 | 353,1 | 136,8 | 1,588 | 1,096 | 1,042 | 1,394 | 13,56 | 18,43 | 21,97 | | | |
| 2015_08_24_01 | 654140 | 252343 | 361 | 286,5 | 111,0 | 1,763 | 0,768 | 0,967 | 1,628 | 18,8 | 18,8 | 19,04 | | | |
| 2015_08_27_01 | 654140 | 252343 | 361 | 499,2 | 107,3 | 2,342 | 1,088 | 1,648 | 1,893 | 10,74 | 17,09 | 17,09 | | | |
| 2015_08_27_02 | 654140 | 252343 | 361 | 440,1 | 120,5 | 2,342 | 1,088 | 1,648 | 1,893 | 10,74 | 17,09 | 17,09 | | | |
| 2015_08_31_01 | 654140 | 252343 | 361 | 283,6 | 179,3 | 1,043 | 0,61 | 0,521 | 0,976 | 22,71 | 21,48 | 21,97 | | | |
| 2015_09_01_01 | 654140 | 252343 | 361 | 286,2 | 128,0 | 0,9883 | 0,4961 | 0,54 | 0,969 | 24,9 | 17,58 | 21,97 | | | |
| 2015_09_04_01 | 654140 | 252343 | 361 | 276,8 | 143,0 | 1,498 | 0,762 | 0,96 | 1,228 | 24,9 | 19,53 | 21,73 | | | |
| 2015_09_04_02 | 654140 | 252343 | 361 | 772,3 | 94,6 | 1,14 | 0,677 | 1,015 | 0,874 | 8,79 | 32,69 | 10,74 | | | |
| 2015_09_08_01 | 654140 | 252343 | 361 | 312,2 | 161,2 | 0,782 | 0,459 | 0,578 | 0,633 | 24,96 | 17,15 | 22,83 | | | |
| 2015_09_10_01 | 654140 | 252343 | 361 | 326,0 | 159,1 | 1,086 | 0,651 | 0,71 | 1,04 | 22,95 | 16,85 | 13,43 | | | |
| 2015_09_14_01 | 654140 | 252343 | 361 | 340,9 | 166,3 | 0,821 | 0,609 | 0,637 | 0,686 | 22,95 | 22,71 | 22,46 | | | |
| 2015_09_16_01 | 654140 | 252343 | 361 | 336,9 | 87,0 | 1,157 | 0,753 | 0,913 | 1,14 | 23,19 | 15,38 | 23,19 | | | |
| 2015_09_17_01 | 654140 | 252343 | 361 | 336,9 | 87,0 | 0,7734 | 0,6057 | 0,3797 | 0,669 | 11,23 | 18,8 | 39,06 | | | |
| 2015_09_18_01 | 654140 | 252343 | 361 | 774,0 | 96,0 | 0,7194 | 0,4948 | 0,625 | 0,571 | 6,1 | 19,04 | 18,55 | | | |
| 2015_09_22_01 | 654140 | 252343 | 361 | 353,2 | 93,9 | 1,192 | 0,861 | 0,974 | 1,117 | 24,78 | 15,26 | 15,5 | | | |
| 2015_09_28_01 | Wartung | | | | | | | | | | | | | | |
| 2015_10_02_01 | Wartung | #NV | #NV | #NV | #NV | | | | | | | | | | |
| 2015_10_14_01 | Wartung | #NV | #NV | #NV | #NV | | | | | | | | | | |
| 2015_10_15_01 | Wartung | #NV | #NV | #NV | #NV | | | | | | | | | | |
| 2015_10_20_01 | Wartung | #NV | #NV | #NV | #NV | | | | | | | | | | |
| 2015_10_22_01 | Gössi | 653135 | 251977 | 384 | 656,2 | 285,6 | 0,165 | 0,085 | 0,139 | 9,77 | 7,81 | 8,3 | | | |
| 2015_10_27_01 | Gössi | 653135 | 251977 | 384 | 745,8 | 208,6 | 0,3211 | 0,2946 | 0,1883 | 17,82 | 17,82 | 6,84 | | | |
| 2015_10_28_01 | Gössi | 653135 | 251977 | 384 | 1069,5 | 126,3 | 0,1615 | 0,095 | 0,1587 | 10,01 | 21,24 | 10,99 | | | |
| 2015_10_28_02 | Gössi | 653135 | 251977 | 384 | 645,3 | 280,9 | 0,2718 | 0,2553 | 0,1468 | 36,38 | 34,67 | 37,11 | | | |
| 2015_11_03_01 | Gössi | 653135 | 251977 | 384 | 667,0 | 186,6 | 0,1523 | 0,1293 | 0,1695 | 5,06 | 4,69 | 4,9 | | | |
| 2015_11_06_01 | Gössi | 653135 | 251977 | 384 | 940,7 | 133,0 | 0,1523 | 0,1293 | 0,1695 | 5,06 | 4,69 | 4,9 | | | |

| Messstelle 5 CH427 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------|-----------|---------------|-----------------|-------------|----------|-------|-------|---|---------------------------|-------------------|-------------------------|---------------------------------|-----------------------|----------------------------------|---------------------------------|-----------------------|----------------------------------|---------------------------------|-----------------------|----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|--|
| Allgemeine Daten | | | | Koordinaten | | | | Distanz | | | Schwinggeschwindigkeit | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Sprengung | | Nr. Sprengung | Hauszahl | Rechtswert | Hochwert | Höhe | | Distanz der Sprengstelle zur Messstelle | SD [m/kg ^{0.5}] | Skalierte Distanz | V _{max} [mm/s] | maximale Schwinggeschwindigkeit | V _N [mm/s] | geschwindigkeit der x-Komponente | maximale Schwinggeschwindigkeit | V _E [mm/s] | geschwindigkeit der y-Komponente | maximale Schwinggeschwindigkeit | V _Z [mm/s] | geschwindigkeit der z-Komponente | f _N [s ⁻¹] | maximale Frequenz x-Komponente | f _E [s ⁻¹] | maximale Frequenz y-Komponente | f _Z [s ⁻¹] | maximale Frequenz z-Komponente | |
| in | ü M [m]ß1 | | | | | r [m] | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 654228 | Ungricht, Mülle | 654228 | 252646 | 379 | 405,8 | 157,2 | 0,8586 | 0,5784 | 0,3551 | 18,31 | 8,54 | 36,13 | | | | | | | | | | | | | |
| | | 654228 | Ungricht, Mülle | 654228 | 252646 | 379 | 506,0 | 184,8 | 0,5312 | 0,3375 | 0,3115 | 0,4479 | 6,84 | 7,57 | 13,67 | | | | | | | | | | | | |
| | | 654228 | Ungricht, Mülle | 654228 | 252646 | 379 | 595,8 | 68,8 | 2,088 | 1,524 | 0,994 | 1,889 | 6,23 | 8,06 | 12,33 | | | | | | | | | | | | |
| | | 654228 | Ungricht, Mülle | 654228 | 252646 | 379 | 503,7 | 195,1 | 0,6431 | 0,4965 | 0,4521 | 0,59 | 11,23 | 10,74 | 13,92 | | | | | | | | | | | | |
| | | 654228 | Ungricht, Mülle | 654228 | 252646 | 379 | 434,5 | 95,2 | 1,323 | 0,794 | 0,554 | 1,265 | 19,04 | 19,29 | 104,49 | | | | | | | | | | | | |
| | | 654228 | Ungricht, Mülle | 654228 | 252646 | 379 | 410,5 | 142,2 | 0,9314 | 0,564 | 0,3656 | 0,923 | 35,16 | 7,81 | 34,42 | | | | | | | | | | | | |
| | | 654228 | Ungricht, Mülle | 654228 | 252646 | 379 | 844,5 | 166,2 | 0,252 | 0,201 | 0,107 | 0,197 | 6,77 | 7,6 | 12,63 | | | | | | | | | | | | |
| | | 654228 | Ungricht, Mülle | 654228 | 252646 | 379 | 401,0 | 87,9 | 1,468 | 1,043 | 0,583 | 1,465 | 17,58 | 14,89 | 32,71 | | | | | | | | | | | | |
| | | 654228 | Ungricht, Mülle | 654228 | 252646 | 379 | 395,2 | 153,1 | 0,855 | 0,8 | 0,855 | 0,712 | 18,31 | 8,54 | 33,69 | | | | | | | | | | | | |
| | | 654228 | Ungricht, Mülle | 654228 | 252646 | 379 | 403,7 | 147,4 | 0,837 | 0,569 | 0,484 | 0,752 | 17,82 | 7,57 | 36,87 | | | | | | | | | | | | |
| | | 654228 | Ungricht, Mülle | 654228 | 252646 | 379 | 596,3 | 168,7 | 0,577 | 0,392 | 0,235 | 1,172 | 11,72 | 36,62 | 36,62 | | | | | | | | | | | | |
| | | 654228 | Ungricht, Mülle | 654228 | 252646 | 379 | 540,4 | 63,1 | 1,976 | 1,639 | 0,978 | 1,507 | 18,31 | 8,18 | 12,57 | | | | | | | | | | | | |
| | | 654228 | Ungricht, Mülle | 654228 | 252646 | 379 | 518,9 | 201,0 | 0,5517 | 0,4317 | 0,4068 | 0,4891 | 12,45 | 14,65 | 13,43 | | | | | | | | | | | | |
| | | 654228 | Ungricht, Mülle | 654228 | 252646 | 379 | 428,5 | 166,0 | 1,038 | 0,632 | 0,8 | 0,83 | 7,32 | 7,81 | 13,43 | | | | | | | | | | | | |
| | | 654228 | Ungricht, Mülle | 654228 | 252646 | 379 | 609,1 | 130,9 | 0,916 | 0,56 | 0,668 | 0,888 | 17,58 | 16,85 | 35,28 | | | | | | | | | | | | |
| | | 654228 | Ungricht, Mülle | 654228 | 252646 | 379 | 613,8 | 168,1 | 0,916 | 0,56 | 0,668 | 0,888 | 17,58 | 16,85 | 35,28 | | | | | | | | | | | | |
| | | 654228 | Ungricht, Mülle | 654228 | 252646 | 379 | 434,9 | 275,1 | 0,501 | 0,468 | 0,232 | 0,386 | 30,76 | 30,52 | 33,69 | | | | | | | | | | | | |
| | | 654228 | Ungricht, Mülle | 654228 | 252646 | 379 | 421,2 | 188,4 | 0,4571 | 0,4267 | 0,2493 | 0,4052 | 40,53 | 15,38 | 12,82 | | | | | | | | | | | | |
| | | 654228 | Ungricht, Mülle | 654228 | 252646 | 379 | 443,1 | 228,8 | 0,638 | 0,614 | 0,316 | 0,456 | 7,08 | 15,14 | 105,96 | | | | | | | | | | | | |
| | | 654228 | Ungricht, Mülle | 654228 | 252646 | 379 | 752,1 | 92,1 | 1,744 | 1,621 | 0,785 | 0,745 | 7,32 | 7,32 | 10,86 | | | | | | | | | | | | |
| | | 654228 | Ungricht, Mülle | 654228 | 252646 | 379 | 469,4 | 242,4 | 0,367 | 0,3 | 0,243 | 0,306 | 8,48 | 7,51 | 12,82 | | | | | | | | | | | | |
| | | 654228 | Ungricht, Mülle | 654228 | 252646 | 379 | 485,8 | 237,0 | 0,451 | 0,331 | 0,265 | 0,409 | 11,72 | 8,06 | 12,94 | | | | | | | | | | | | |
| | | 654228 | Ungricht, Mülle | 654228 | 252646 | 379 | 498,6 | 243,3 | 0,589 | 0,271 | 0,208 | 0,576 | 11,96 | 7,57 | 34,42 | | | | | | | | | | | | |
| | | 654228 | Ungricht, Mülle | 654228 | 252646 | 379 | 490,7 | 126,7 | 0,6037 | 0,3552 | 0,467 | 0,591 | 12,45 | 7,81 | 13,92 | | | | | | | | | | | | |
| | | 654228 | Ungricht, Mülle | 654228 | 252646 | 379 | 490,7 | 126,7 | 0,3897 | 0,2657 | 0,1493 | 0,3434 | 7,08 | 7,81 | 34,67 | | | | | | | | | | | | |
| | | 654228 | Ungricht, Mülle | 654228 | 252646 | 379 | 754,1 | 93,5 | 1,107 | 1,103 | 0,4957 | 0,578 | 7,32 | 7,32 | 13,18 | | | | | | | | | | | | |
| | | 654228 | Ungricht, Mülle | 654228 | 252646 | 379 | 528,4 | 140,4 | 0,669 | 0,4518 | 0,4536 | 0,626 | 8,79 | 7,57 | 36,13 | | | | | | | | | | | | |
| | | 654228 | Ungricht, Mülle | 654228 | 252646 | 379 | 736,3 | 90,2 | 0,967 | 0,938 | 0,509 | 0,777 | 7,32 | 7,32 | 11,72 | | | | | | | | | | | | |
| | | 654228 | Ungricht, Mülle | 654228 | 252646 | 379 | 583,8 | 120,9 | 0,906 | 0,674 | 0,609 | 0,862 | 17,46 | 16,97 | 35,4 | | | | | | | | | | | | |
| | | 654228 | Ungricht, Mülle | 654228 | 252646 | 379 | 613,6 | 194,0 | 0,577 | 0,328 | 0,28 | 0,463 | 11,84 | 9,03 | 12,7 | | | | | | | | | | | | |
| | | 654228 | Ungricht, Mülle | 654228 | 252646 | 379 | 528,6 | 147,9 | 0,658 | 0,331 | 0,264 | 0,656 | 37,35 | 7,81 | 36,38 | | | | | | | | | | | | |
| | | 654228 | Ungricht, Mülle | 654228 | 252646 | 379 | 542,0 | 151,6 | 0,556 | 0,354 | 0,291 | 0,514 | 8,54 | 7,81 | 36,38 | | | | | | | | | | | | |
| | | 654228 | Ungricht, Mülle | 654228 | 252646 | 379 | 625,3 | 272,2 | 0,329 | 0,259 | 0,282 | 0,292 | 12,21 | 7,57 | 12,7 | | | | | | | | | | | | |
| | | 654228 | Ungricht, Mülle | 654228 | 252646 | 379 | 538,5 | 150,6 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 654228 | Ungricht, Mülle | 654228 | 252646 | 379 | 600,5 | 70,9 | 1,317 | 1,238 | 0,918 | 1,099 | 6,84 | 7,32 | 11,84 | | | | | | | | | | | | |
| | | 654228 | Ungricht, Mülle | 654228 | 252646 | 379 | 638,8 | 278,0 | 0,1871 | 0,1571 | 0,1238 | 0,1544 | 6,59 | 11,23 | 12,7 | | | | | | | | | | | | |
| | | 654228 | Ungricht, Mülle | 654228 | 252646 | 379 | 615,5 | 172,2 | 0,4317 | 0,3712 | 0,1723 | 0,3754 | 37,35 | 7,32 | 36,87 | | | | | | | | | | | | |
| | | 654228 | Ungricht, Mülle | 654228 | 252646 | 379 | 617,7 | 87,4 | 0,61 | 0,4348 | 0,2761 | 0,5299 | 7,08 | 8,3 | 34,67 | | | | | | | | | | | | |

| Allgemeine Daten | | Messstelle 6 CH610 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------|---------|--------------------|------------|--------|----------|-----------|--------|---|---------------------------|-------------------------|---------------------------------|-----------------------|--|-----------------------|--|-----------------------|--|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| | | Koordinaten | | | Distanz | | | Schwinggeschwindigkeit | | | | | | | | | | | | | | | |
| Sprengung | | Haushalt | Rechtswert | HW | Hochwert | m ü M [m] | Höhe | Distanz der Sprengstelle zur Messstelle | SD [m/kg ^{0,5}] | V _{max} [mm/s] | maximale Schwinggeschwindigkeit | V _N [mm/s] | maximale Schwinggeschwindigkeit der x-Komponente | V _E [mm/s] | maximale Schwinggeschwindigkeit der y-Komponente | V _Z [mm/s] | maximale Schwinggeschwindigkeit der z-Komponente | f _N [s ⁻¹] | maximale Frequenz x-Komponente | f _E [s ⁻¹] | maximale Frequenz y-Komponente | f _Z [s ⁻¹] | maximale Frequenz z-Komponente |
| 2015_07_15_01 | Brugger | 654147 | 252507 | 252507 | 370 | 1,704 | 1,102 | 1,339 | 1,395 | 35,89 | 36,13 | 36,13 | | | | | | | | | | | |
| 2015_07_16_01 | Brugger | 654147 | 252507 | 252507 | 370 | 366,6 | 0,387 | 0,3856 | 0,4207 | 16,36 | 28,56 | 40,04 | | | | | | | | | | | |
| 2015_07_17_01 | Brugger | 654147 | 252507 | 252507 | 370 | 604,0 | 1,162 | 0,963 | 1,91 | 20,51 | 17,82 | 38,45 | | | | | | | | | | | |
| 2015_07_23_01 | Brugger | 654147 | 252507 | 252507 | 370 | 367,1 | 0,673 | 0,96 | 0,983 | 96,31 | 36,62 | 96,31 | | | | | | | | | | | |
| 2015_07_29_01 | Brugger | 654147 | 252507 | 252507 | 370 | 387,6 | 1,41 | 1,299 | 2,808 | 80,08 | 14,89 | 71,04 | | | | | | | | | | | |
| 2015_07_31_01 | Brugger | 654147 | 252507 | 252507 | 370 | 275,4 | 1,093 | 0,733 | 1,659 | 89,84 | 34,42 | 89,84 | | | | | | | | | | | |
| 2015_08_04_01 | Brugger | 654147 | 252507 | 252507 | 370 | 800,6 | 0,3215 | 0,1134 | 0,293 | 91,25 | 14,1 | 91,25 | | | | | | | | | | | |
| 2015_08_06_01 | Brugger | 654147 | 252507 | 252507 | 370 | 346,9 | 2,278 | 1,004 | 2,22 | 87,89 | 15,14 | 38,7 | | | | | | | | | | | |
| 2015_08_11_01 | Brugger | 654147 | 252507 | 252507 | 370 | 280,6 | 1,454 | 0,997 | 1,264 | 99,37 | 1,264 | 99,37 | | | | | | | | | | | |
| 2015_08_13_01 | Brugger | 654147 | 252507 | 252507 | 370 | 271,2 | 1,41 | 1,288 | 1,045 | 98,63 | 31,25 | 29,05 | | | | | | | | | | | |
| 2015_08_17_01 | Brugger | 654147 | 252507 | 252507 | 370 | 475,3 | 1,099 | 0,911 | 0,977 | 94,24 | 36,13 | 94,24 | | | | | | | | | | | |
| 2015_08_19_01 | Brugger | 654147 | 252507 | 252507 | 370 | 530,2 | 2,061 | 1,183 | 1,688 | 88,26 | 23,44 | 37,6 | | | | | | | | | | | |
| 2015_08_20_01 | Brugger | 654147 | 252507 | 252507 | 370 | 383,9 | 1,027 | 0,572 | 1,805 | 94,73 | 29,66 | 94,73 | | | | | | | | | | | |
| 2015_08_24_01 | Brugger | 654147 | 252507 | 252507 | 370 | 296,1 | 1,406 | 1,142 | 1,091 | 96,44 | 30,52 | 96,44 | | | | | | | | | | | |
| 2015_08_27_01 | Brugger | 654147 | 252507 | 252507 | 370 | 498,5 | 1,352 | 0,869 | 1,566 | 16,85 | 15,38 | 90,82 | | | | | | | | | | | |
| 2015_08_27_02 | Brugger | 654147 | 252507 | 252507 | 370 | 479,7 | 1,784 | 1,352 | 1,566 | 16,85 | 15,38 | 90,82 | | | | | | | | | | | |
| 2015_08_31_01 | Brugger | 654147 | 252507 | 252507 | 370 | 299,8 | 0,961 | 0,498 | 1,007 | 97,17 | 30,76 | 97,41 | | | | | | | | | | | |
| 2015_09_01_01 | Brugger | 654147 | 252507 | 252507 | 370 | 290,7 | 1,161 | 0,821 | 1,032 | 96,44 | 30,52 | 96,44 | | | | | | | | | | | |
| 2015_09_04_01 | Brugger | 654147 | 252507 | 252507 | 370 | 303,8 | 0,808 | 0,538 | 1,273 | 95,46 | 28,32 | 95,46 | | | | | | | | | | | |
| 2015_09_04_02 | Brugger | 654147 | 252507 | 252507 | 370 | 706,7 | 0,939 | 0,579 | 0,915 | 18,07 | 8,54 | 8,79 | | | | | | | | | | | |
| 2015_09_08_01 | Brugger | 654147 | 252507 | 252507 | 370 | 334,7 | 1,72,8 | 0,851 | 0,696 | 91,19 | 16,54 | 91,25 | | | | | | | | | | | |
| 2015_09_10_01 | Brugger | 654147 | 252507 | 252507 | 370 | 351,1 | 1,71,3 | 1,06 | 0,891 | 89,6 | 26,37 | 89,6 | | | | | | | | | | | |
| 2015_09_14_01 | Brugger | 654147 | 252507 | 252507 | 370 | 365,3 | 1,78,2 | 1,07 | 0,944 | 93,99 | 33,2 | 93,99 | | | | | | | | | | | |
| 2015_09_16_01 | Brugger | 654147 | 252507 | 252507 | 370 | 358,3 | 92,5 | 0,6 | 1,219 | 36,38 | 36,38 | 37,11 | | | | | | | | | | | |
| 2015_09_17_01 | Brugger | 654147 | 252507 | 252507 | 370 | 358,3 | 92,5 | 0,9555 | 0,69 | 93,75 | 37,6 | 93,75 | | | | | | | | | | | |
| 2015_09_18_01 | Brugger | 654147 | 252507 | 252507 | 370 | 708,6 | 0,7271 | 0,548 | 0,691 | 92,77 | 14,65 | 6,59 | | | | | | | | | | | |
| 2015_09_22_01 | Brugger | 654147 | 252507 | 252507 | 370 | 390,8 | 1,641 | 1,243 | 1,496 | 35,52 | 35,28 | 36,01 | | | | | | | | | | | |
| 2015_09_28_01 | Brugger | 654147 | 252507 | 252507 | 370 | 693,3 | 0,722 | 0,386 | 0,677 | 26,86 | 21,73 | 38,33 | | | | | | | | | | | |
| 2015_10_02_01 | Brugger | 654147 | 252507 | 252507 | 370 | 470,5 | 1,662 | 1,011 | 1,317 | 17,09 | 13,92 | 36,99 | | | | | | | | | | | |
| 2015_10_14_01 | Brugger | 654147 | 252507 | 252507 | 370 | 478,9 | 0,792 | 0,386 | 0,763 | 35,89 | 12,82 | 88,99 | | | | | | | | | | | |
| 2015_10_15_01 | Brugger | 654147 | 252507 | 252507 | 370 | 391,3 | 0,986 | 0,644 | 0,391 | 36,13 | 16,36 | 36,62 | | | | | | | | | | | |
| 2015_10_20_01 | Brugger | 654147 | 252507 | 252507 | 370 | 405,4 | 0,74 | 0,482 | 0,658 | 35,89 | 15,38 | 36,38 | | | | | | | | | | | |
| 2015_10_22_01 | Brugger | 654147 | 252507 | 252507 | 370 | 489,5 | 2,13,1 | 0,292 | 0,322 | 27,83 | 13,18 | 26,61 | | | | | | | | | | | |
| 2015_10_27_01 | Brugger | 654147 | 252507 | 252507 | 370 | 396,7 | 111,0 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2015_10_28_01 | Brugger | 654147 | 252507 | 252507 | 370 | 606,3 | 0,982 | 0,644 | 0,83 | 24,41 | 17,33 | 85,45 | | | | | | | | | | | |
| 2015_10_28_02 | Brugger | 654147 | 252507 | 252507 | 370 | 509,4 | 0,1932 | 0,1947 | 0,264 | 22,46 | 29,3 | 39,31 | | | | | | | | | | | |
| 2015_11_03_01 | Brugger | 654147 | 252507 | 252507 | 370 | 484,2 | 1,35,5 | 0,1614 | 0,832 | 36,62 | 36,62 | 37,84 | | | | | | | | | | | |
| 2015_11_06_01 | Brugger | 654147 | 252507 | 252507 | 370 | 589,1 | 0,612 | 0,515 | 0,654 | 129,64 | 129,39 | 129,39 | | | | | | | | | | | |

| Messstelle 7 CH611 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------|----------|------------|----------|-------------|---|---------------------------|-------------------|-------------------------|---|-----------------------|---|-----------------------|---|-----------------------|----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|--------|
| Allgemeine Daten | | | | Koordinaten | | | | Distanz | | | Schwinggeschwindigkeit | | | | | | | | | | | |
| Sprengung | | | | Hochwert | | | | Sprengstelle | | | maximale | | | | | | | | | | | |
| Nr. Sprengung | Haushalt | Rechtswert | Hochwert | Höhe | Distanz der Sprengstelle zur Messstelle | SD [m/kg ^{0,5}] | Skalierte Distanz | V _{max} [mm/s] | geschwindigkeit Schwing-geschwindigkeit | V _N [mm/s] | geschwindigkeit Schwing-geschwindigkeit | V _E [mm/s] | geschwindigkeit Schwing-geschwindigkeit | V _Z [mm/s] | maximale Schwing-geschwindigkeit | f _N [s ⁻¹] | maximale Frequenz x-Komponente | f _E [s ⁻¹] | maximale Frequenz y-Komponente | f _Z [s ⁻¹] | maximale Frequenz z-Komponente | |
| 2015_07_15_01 | Schärer | 653551 | 251999 | 400 | 539,0 | 208,8 | 0,169 | 0,129 | 0,133 | 0,163 | 0,129 | 0,133 | 0,163 | 0,129 | 0,133 | 0,163 | 12,21 | 15,14 | 12,21 | 15,14 | 12,21 | 15,14 |
| 2015_07_16_01 | Schärer | 653551 | 251999 | 400 | 443,8 | 162,1 | 0,163 | 0,099 | 0,107 | 0,141 | 0,099 | 0,107 | 0,141 | 0,099 | 0,107 | 0,141 | 76,17 | 12,21 | 76,17 | 12,21 | 76,17 | 12,21 |
| 2015_07_17_01 | Schärer | 653551 | 251999 | 400 | 913,6 | 105,5 | 0,27 | 0,263 | 0,203 | 0,224 | 0,263 | 0,203 | 0,224 | 0,263 | 0,203 | 0,224 | 18,31 | 17,82 | 18,31 | 17,82 | 18,31 | 17,82 |
| 2015_07_23_01 | Schärer | 653551 | 251999 | 400 | 451,0 | 174,7 | 0,219 | 0,209 | 0,163 | 0,18 | 0,209 | 0,163 | 0,18 | 0,209 | 0,163 | 0,18 | 19,84 | 13,49 | 19,84 | 13,49 | 19,84 | 12,73 |
| 2015_07_29_01 | Schärer | 653551 | 251999 | 400 | 710,8 | 155,8 | 0,379 | 0,194 | 0,17 | 0,367 | 0,194 | 0,17 | 0,367 | 0,194 | 0,17 | 0,367 | 19,53 | 15,26 | 19,53 | 15,26 | 19,53 | 31,01 |
| 2015_07_31_01 | Schärer | 653551 | 251999 | 400 | 537,2 | 186,1 | 0,162 | 0,114 | 0,116 | 0,148 | 0,114 | 0,116 | 0,148 | 0,114 | 0,116 | 0,148 | 18,07 | 18,07 | 18,07 | 18,07 | 18,07 | 36,13 |
| 2015_08_04_01 | Schärer | 653551 | 251999 | 400 | 795,6 | 156,6 | 0,082 | 0,059 | 0,104 | 0,082 | 0,059 | 0,104 | 0,082 | 0,059 | 0,104 | 0,082 | 15,47 | 15,56 | 15,47 | 15,56 | 15,47 | 27,74 |
| 2015_08_06_01 | Schärer | 653551 | 251999 | 400 | 698,8 | 153,1 | 0,3188 | 0,2301 | 0,1824 | 0,2484 | 0,2301 | 0,1824 | 0,2484 | 0,2301 | 0,1824 | 0,2484 | 75,2 | 10,99 | 75,2 | 10,99 | 75,2 | 71,29 |
| 2015_08_11_01 | Schärer | 653551 | 251999 | 400 | 551,6 | 213,7 | 0,204 | 0,125 | 0,134 | 0,204 | 0,125 | 0,134 | 0,204 | 0,125 | 0,134 | 0,204 | 12,48 | 18,4 | 12,48 | 18,4 | 12,48 | 36,74 |
| 2015_08_13_01 | Schärer | 653551 | 251999 | 400 | 546,5 | 199,6 | 0,216 | 0,147 | 0,182 | 0,197 | 0,147 | 0,182 | 0,197 | 0,147 | 0,182 | 0,197 | 74,28 | 80,14 | 74,28 | 80,14 | 74,28 | 74,16 |
| 2015_08_17_01 | Schärer | 653551 | 251999 | 400 | 426,0 | 120,5 | 0,282 | 0,19 | 0,216 | 0,189 | 0,19 | 0,216 | 0,189 | 0,19 | 0,216 | 0,189 | 18,1 | 18,28 | 18,1 | 18,28 | 18,1 | 107,24 |
| 2015_08_19_01 | Schärer | 653551 | 251999 | 400 | 830,2 | 97,0 | 0,406 | 0,308 | 0,32 | 0,318 | 0,308 | 0,32 | 0,318 | 0,308 | 0,32 | 0,318 | 18,31 | 79,1 | 18,31 | 79,1 | 18,31 | 74,71 |
| 2015_08_20_01 | Schärer | 653551 | 251999 | 400 | 441,1 | 170,9 | 0,183 | 0,168 | 0,159 | 0,158 | 0,168 | 0,159 | 0,158 | 0,168 | 0,159 | 0,158 | 12,21 | 19,84 | 12,21 | 19,84 | 12,21 | 10,77 |
| 2015_08_24_01 | Schärer | 653551 | 251999 | 400 | 524,6 | 203,2 | 0,527 | 0,378 | 0,355 | 0,43 | 0,378 | 0,355 | 0,43 | 0,378 | 0,355 | 0,43 | 17,94 | 18,19 | 17,94 | 18,19 | 17,94 | 18,07 |
| 2015_08_27_01 | Schärer | 653551 | 251999 | 400 | 460,2 | 98,9 | 0,527 | 0,378 | 0,355 | 0,43 | 0,378 | 0,355 | 0,43 | 0,378 | 0,355 | 0,43 | 17,94 | 18,19 | 17,94 | 18,19 | 17,94 | 18,07 |
| 2015_08_27_02 | Schärer | 653551 | 251999 | 400 | 365,7 | 100,2 | 0,127 | 0,074 | 0,058 | 0,106 | 0,074 | 0,058 | 0,106 | 0,074 | 0,058 | 0,106 | 11,72 | 21,24 | 11,72 | 21,24 | 11,72 | 31,98 |
| 2015_08_31_01 | Schärer | 653551 | 251999 | 400 | 515,0 | 325,7 | 0,126 | 0,074 | 0,058 | 0,106 | 0,074 | 0,058 | 0,106 | 0,074 | 0,058 | 0,106 | 11,72 | 21,24 | 11,72 | 21,24 | 11,72 | 31,98 |
| 2015_09_01_01 | Schärer | 653551 | 251999 | 400 | 533,6 | 238,6 | 0,222 | 0,138 | 0,092 | 0,19 | 0,138 | 0,092 | 0,19 | 0,138 | 0,092 | 0,19 | 87,55 | 19,65 | 87,55 | 19,65 | 87,55 | 15,44 |
| 2015_09_04_01 | Schärer | 653551 | 251999 | 400 | 502,0 | 259,2 | 0,421 | 0,294 | 0,338 | 0,341 | 0,294 | 0,338 | 0,341 | 0,294 | 0,338 | 0,341 | 18,55 | 17,58 | 18,55 | 17,58 | 18,55 | 7,08 |
| 2015_09_04_02 | Schärer | 653551 | 251999 | 400 | 753,1 | 92,3 | 0,154 | 0,107 | 0,09 | 0,15 | 0,107 | 0,09 | 0,15 | 0,107 | 0,09 | 0,15 | 18,8 | 19,1 | 18,8 | 19,1 | 18,8 | 27,4 |
| 2015_09_08_01 | Schärer | 653551 | 251999 | 400 | 484,8 | 250,3 | 0,188 | 0,166 | 0,113 | 0,148 | 0,166 | 0,113 | 0,148 | 0,166 | 0,113 | 0,148 | 21,97 | 20,51 | 21,97 | 20,51 | 21,97 | 25,15 |
| 2015_09_10_01 | Schärer | 653551 | 251999 | 400 | 470,4 | 229,5 | 0,158 | 0,116 | 0,075 | 0,153 | 0,116 | 0,075 | 0,153 | 0,116 | 0,075 | 0,153 | 25,88 | 15,99 | 25,88 | 15,99 | 25,88 | 33,94 |
| 2015_09_14_01 | Schärer | 653551 | 251999 | 400 | 462,1 | 225,5 | 0,2235 | 0,1938 | 0,1529 | 0,2063 | 0,1938 | 0,1529 | 0,2063 | 0,1938 | 0,1529 | 0,2063 | 11,96 | 15,87 | 11,96 | 15,87 | 11,96 | 24,66 |
| 2015_09_16_01 | Schärer | 653551 | 251999 | 400 | 470,7 | 121,6 | 0,2483 | 0,146 | 0,1145 | 0,1889 | 0,146 | 0,1145 | 0,1889 | 0,146 | 0,1145 | 0,1889 | 84,72 | 12,94 | 84,72 | 12,94 | 84,72 | 84,72 |
| 2015_09_17_01 | Schärer | 653551 | 251999 | 400 | 753,3 | 93,4 | 0,4443 | 0,2965 | 0,3732 | 0,3844 | 0,2965 | 0,3732 | 0,3844 | 0,2965 | 0,3732 | 0,3844 | 4,64 | 18,07 | 4,64 | 18,07 | 4,64 | 7,32 |
| 2015_09_18_01 | Schärer | 653551 | 251999 | 400 | 427,1 | 113,5 | 0,2964 | 0,1981 | 0,1838 | 0,2649 | 0,1981 | 0,1838 | 0,2649 | 0,1981 | 0,1838 | 0,2649 | 19,17 | 14,89 | 19,17 | 14,89 | 19,17 | 15,26 |
| 2015_09_22_01 | Schärer | 653551 | 251999 | 400 | 758,7 | 92,9 | 0,458 | 0,323 | 0,29 | 0,323 | 0,323 | 0,29 | 0,323 | 0,323 | 0,29 | 0,323 | 19,04 | 18,53 | 19,04 | 18,53 | 19,04 | 7,08 |
| 2015_09_28_01 | Schärer | 653551 | 251999 | 400 | 461,7 | 95,6 | 0,586 | 0,504 | 0,425 | 0,416 | 0,504 | 0,425 | 0,416 | 0,504 | 0,425 | 0,416 | 17,94 | 18,07 | 17,94 | 18,07 | 17,94 | 18,19 |
| 2015_10_02_01 | Schärer | 653551 | 251999 | 400 | 363,8 | 115,0 | 0,348 | 0,248 | 0,214 | 0,246 | 0,248 | 0,214 | 0,246 | 0,248 | 0,214 | 0,246 | 18,8 | 18,8 | 18,8 | 18,8 | 18,8 | 88,87 |
| 2015_10_14_01 | Schärer | 653551 | 251999 | 400 | 427,4 | 119,6 | 0,234 | 0,208 | 0,116 | 0,197 | 0,208 | 0,116 | 0,197 | 0,208 | 0,116 | 0,197 | 18,31 | 16,85 | 18,31 | 16,85 | 18,31 | 16,85 |
| 2015_10_15_01 | Schärer | 653551 | 251999 | 400 | 417,3 | 116,7 | 0,268 | 0,194 | 0,181 | 0,21 | 0,194 | 0,181 | 0,21 | 0,194 | 0,181 | 0,21 | 18,8 | 13,67 | 18,8 | 13,67 | 18,8 | 15,38 |
| 2015_10_20_01 | Schärer | 653551 | 251999 | 400 | 350,9 | 152,7 | 0,253 | 0,157 | 0,129 | 0,228 | 0,157 | 0,129 | 0,228 | 0,157 | 0,129 | 0,228 | 26,61 | 15,38 | 26,61 | 15,38 | 26,61 | 48,34 |
| 2015_10_27_01 | Schärer | 653551 | 251999 | 400 | 409,4 | 114,5 | 0,4302 | 0,3732 | 0,2136 | 0,4149 | 0,3732 | 0,2136 | 0,4149 | 0,3732 | 0,2136 | 0,4149 | 18,07 | 17,7 | 18,07 | 17,7 | 18,07 | 48,1 |
| 2015_10_28_01 | Schärer | 653551 | 251999 | 400 | 906,5 | 107,1 | 0,195 | 0,1228 | 0,1351 | 0,1691 | 0,1228 | 0,1351 | 0,1691 | 0,1228 | 0,1351 | 0,1691 | 86,43 | 96,44 | 86,43 | 96,44 | 86,43 | 10,25 |
| 2015_10_28_02 | Schärer | 653551 | 251999 | 400 | 366,5 | 159,5 | 0,2521 | 0,1903 | 0,1795 | 0,1728 | 0,1903 | 0,1795 | 0,1728 | 0,1903 | 0,1795 | 0,1728 | 88,13 | 20,51 | 88,13 | 20,51 | 88,13 | 88,13 |
| 2015_11_03_01 | Schärer | 653551 | 251999 | 400 | 374,7 | 104,8 | 0,1673 | 0,1042 | 0,1653 | 0,1356 | 0,1042 | 0,1653 | 0,1356 | 0,1042 | 0,1653 | 0,1356 | 4,98 | 4,69 | 4,98 | 4,69 | 4,98 | 7,77 |
| 2015_11_06_01 | Schärer | 653551 | 251999 | 400 | 784,5 | 110,9 | 0,1673 | 0,1042 | 0,1653 | 0,1356 | 0,1042 | 0,1653 | 0,1356 | 0,1042 | 0,1653 | 0,1356 | 4,98 | 4,69 | 4,98 | 4,69 | 4,98 | 7,77 |

| Messstelle 8 CH612 | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------|------------|----------|-----------|---------------------------|---|------------------------|---|--|--|--|-----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Allgemeine Daten | | | | Schwinggeschwindigkeit | | | | | | | | | |
| Koordinaten | | | | Distanz | | Schwinggeschwindigkeit | | | | | | | |
| Haushalt | Rechtswert | Hochwert | m ü M [m] | r [m] | Distanz der Sprengstelle zur Messstelle | Skalierte Distanz | maximale vektorielle Schwinggeschwindigkeit | maximale Schwinggeschwindigkeit der x-Komponente | maximale Schwinggeschwindigkeit der y-Komponente | maximale Schwinggeschwindigkeit der z-Komponente | maximale Frequenz x-Komponente | maximale Frequenz y-Komponente | maximale Frequenz z-Komponente |
| RW | HW | | | SD [m/kg ^{0.5}] | V _{max} [mm/s] | V _N [mm/s] | V _E [mm/s] | V _Z [mm/s] | f _N [s ⁻¹] | f _E [s ⁻¹] | f _Z [s ⁻¹] | | |
| 2015_07_15_01 | 653712 | 251865 | 358 | 578,7 | 224,2 | 0,134 | 0,111 | 0,086 | 0,109 | 36,87 | 36,87 | 119,63 | |
| 2015_07_16_01 | 653712 | 251865 | 358 | 503,0 | 183,7 | 0,197 | 0,173 | 0,087 | 0,154 | 140,14 | 29,05 | 118,9 | |
| 2015_07_17_01 | 653712 | 251865 | 358 | 1037,2 | 119,8 | 0,219 | 0,183 | 0,175 | 0,205 | 18,55 | 9,03 | 8,06 | |
| 2015_07_23_01 | 653712 | 251865 | 358 | 514,7 | 199,3 | 0,29 | 0,208 | 0,092 | 0,225 | 96,47 | 15,63 | 96,47 | |
| 2015_07_29_01 | 653712 | 251865 | 358 | 806,2 | 176,6 | 0,263 | 0,257 | 0,138 | 0,215 | 27,59 | 19,53 | 119,63 | |
| 2015_07_31_01 | 653712 | 251865 | 358 | 580,7 | 201,2 | 0,189 | 0,131 | 0,101 | 0,099 | 36,13 | 35,16 | 86,43 | |
| 2015_08_04_01 | 653712 | 251865 | 358 | 967,7 | 190,4 | 0,07 | 0,053 | 0,033 | 0,062 | 15,56 | 12,85 | 14,83 | |
| 2015_08_06_01 | 653712 | 251865 | 358 | 784,5 | 171,9 | 0,2719 | 0,1976 | 0,1878 | 0,2325 | 75,44 | 10,74 | 75,44 | |
| 2015_08_11_01 | 653712 | 251865 | 358 | 592,3 | 229,4 | 0,179 | 0,142 | 0,111 | 0,131 | 56,73 | 14,07 | 75,47 | |
| 2015_08_13_01 | 653712 | 251865 | 358 | 591,5 | 216,0 | 0,192 | 0,175 | 0,112 | 0,192 | 57,43 | 76,84 | 76,72 | |
| 2015_08_17_01 | 653712 | 251865 | 358 | 539,8 | 152,7 | 0,209 | 0,177 | 0,177 | 0,171 | 17,49 | 18,07 | 21,39 | |
| 2015_08_19_01 | 653712 | 251865 | 358 | 948,0 | 110,7 | 0,277 | 0,221 | 0,178 | 0,233 | 79,1 | 18,31 | 79,1 | |
| 2015_08_20_01 | 653712 | 251865 | 358 | 511,7 | 198,2 | 0,204 | 0,1968 | 0,1719 | 0,1412 | 14,4 | 14,16 | 78,61 | |
| 2015_08_24_01 | 653712 | 251865 | 358 | 575,4 | 222,9 | 0,189 | 0,165 | 0,099 | 0,169 | 62,29 | 19,23 | 80,17 | |
| 2015_08_27_01 | 653712 | 251865 | 358 | 586,1 | 125,9 | 0,581 | 0,2983 | 0,4451 | 0,58 | 17,82 | 17,94 | 79,63 | |
| 2015_08_27_02 | 653712 | 251865 | 358 | 468,2 | 128,2 | 0,581 | 0,2983 | 0,4451 | 0,58 | 17,82 | 17,94 | 79,63 | |
| 2015_08_31_01 | 653712 | 251865 | 358 | 563,9 | 356,6 | 0,1213 | 0,1115 | 0,0712 | 0,1085 | 57,13 | 31,49 | 75,44 | |
| 2015_09_01_01 | 653712 | 251865 | 358 | 584,9 | 261,6 | 0,134 | 0,095 | 0,095 | 0,102 | 27,44 | 32,17 | 79,5 | |
| 2015_09_04_01 | 653712 | 251865 | 358 | 546,4 | 282,2 | 0,189 | 0,154 | 0,108 | 0,138 | 79,04 | 14,59 | 79,04 | |
| 2015_09_04_02 | 653712 | 251865 | 358 | 913,2 | 111,9 | 0,238 | 0,219 | 0,193 | 0,186 | 30 | 16,17 | 17,85 | |
| 2015_09_08_01 | 653712 | 251865 | 358 | 542,4 | 280,1 | 0,1291 | 0,1291 | 0,1054 | 0,0925 | 17,21 | 13 | 24,11 | |
| 2015_09_10_01 | 653712 | 251865 | 358 | 532,5 | 259,8 | 0,148 | 0,1444 | 0,0974 | 0,1025 | 129,88 | 12,94 | 118,16 | |
| 2015_09_14_01 | 653712 | 251865 | 358 | 529,7 | 258,5 | 0,148 | 0,141 | 0,121 | 0,094 | 84,35 | 136,84 | 21,73 | |
| 2015_09_16_01 | 653712 | 251865 | 358 | 537,5 | 138,8 | 0,3259 | 0,3196 | 0,1472 | 0,1899 | 130,37 | 13,67 | 79,63 | |
| 2015_09_17_01 | 653712 | 251865 | 358 | 537,5 | 138,8 | 0,1831 | 0,1663 | 0,1005 | 0,1291 | 129,88 | 131,84 | 78,37 | |
| 2015_09_18_01 | 653712 | 251865 | 358 | 913,7 | 113,4 | 0,2454 | 0,1992 | 0,187 | 0,222 | 18,55 | 8,3 | 18,31 | |
| 2015_09_22_01 | 653712 | 251865 | 358 | 495,7 | 131,7 | 0,2733 | 0,2558 | 0,1693 | 0,2549 | 35,64 | 8,91 | 79,47 | |
| 2015_09_28_01 | 653712 | 251865 | 358 | 915,9 | 112,2 | 0,224 | 0,22 | 0,139 | 0,217 | 26,61 | 15,38 | 79,63 | |
| 2015_10_02_01 | 653712 | 251865 | 358 | 577,8 | 119,6 | | | | | | | | |
| 2015_10_14_01 | 653712 | 251865 | 358 | 465,1 | 147,1 | 0,233 | 0,191 | 0,1452 | 0,209 | 80,32 | 18,92 | 80,57 | |
| 2015_10_15_01 | 653712 | 251865 | 358 | 496,5 | 138,9 | 0,2719 | 0,1882 | 0,1343 | 0,1343 | 36,38 | 36,38 | 36,13 | |
| 2015_10_20_01 | 653712 | 251865 | 358 | 491,7 | 137,5 | 0,2218 | 0,2122 | 0,1479 | 0,1785 | 35,89 | 13,43 | 80,32 | |
| 2015_10_22_01 | 653712 | 251865 | 358 | 454,3 | 197,8 | 0,221 | 0,1474 | 0,1069 | 0,1722 | 81,05 | 15,63 | 81,05 | |
| 2015_10_27_01 | 653712 | 251865 | 358 | 471,8 | 132,0 | 0,2589 | 0,2303 | 0,1825 | 0,2046 | 36,38 | 74,95 | 74,95 | |
| 2015_10_28_01 | 653712 | 251865 | 358 | 1031,4 | 121,8 | 0,3178 | 0,1752 | 0,217 | 0,226 | 17,82 | 76,42 | 76,42 | |
| 2015_10_28_02 | 653712 | 251865 | 358 | 485,5 | 211,3 | 0,2044 | 0,0756 | 0,1135 | 0,1135 | 82,52 | 82,52 | 82,28 | |
| 2015_11_03_01 | 653712 | 251865 | 358 | 482,5 | 135,0 | 0,2136 | 0,1704 | 0,1293 | 0,1724 | 28,56 | 34,67 | 81,05 | |
| 2015_11_06_01 | 653712 | 251865 | 358 | 919,1 | 130,0 | 0,1579 | 0,0931 | 0,135 | 0,095 | 28,63 | 7,96 | 8,22 | |

| Messstelle 9 CH209 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------|----------------|------------|-------------|------------|-------------|---------|---|---------------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|----|
| Allgemeine Daten | | | Koordinaten | | | | Schwinggeschwindigkeit | | | | | | | | | | |
| Sprengung | | | Hauszahl | Rechtswert | Hochwert | Höhe | Distanz der Sprengstelle zur Messstelle | SD [m/kg ^{0,5}] | V _{max} [mm/s] | V _N [mm/s] | V _E [mm/s] | V _Z [mm/s] | maximale Schwinggeschwindigkeit der z-Komponente | maximale Frequenz x-Komponente | maximale Frequenz y-Komponente | maximale Frequenz z-Komponente | |
| Nr. Sprengung | r [m] | r in M [m] | | | | | | | | | | | | | | | RW |
| 2015_07_15_01 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2015_07_16_01 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2015_07_17_01 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2015_07_23_01 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2015_07_29_01 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2015_07_31_01 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2015_08_04_01 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2015_08_06_01 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2015_08_11_01 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2015_08_13_01 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2015_08_17_01 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2015_08_19_01 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2015_08_20_01 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2015_08_24_01 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2015_08_27_01 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2015_08_27_02 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2015_08_31_01 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2015_09_01_01 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2015_09_04_01 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2015_09_04_02 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2015_09_08_01 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2015_09_10_01 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2015_09_14_01 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 2015_09_16_01 | Garage Steinbr | 654140 | 252343 | 361 | 336,9 | 87,0 | 1,318 | 0,738 | 0,0471 | 1,24 | 23,19 | 187,01 | 23,19 | | | | |
| 2015_09_17_01 | Garage Steinbr | 654140 | 252343 | 361 | 336,9 | 87,0 | 0,9345 | 0,4641 | 0,04701 | 0,91 | 10,5 | 149,9 | 39,06 | | | | |
| 2015_09_18_01 | Garage Steinbr | 654140 | 252343 | 361 | 774,0 | 96,0 | 0,742 | 0,4388 | 0,04546 | 0,666 | 6,1 | 185,3 | 27,1 | | | | |
| 2015_09_22_01 | Garage Steinbr | 654140 | 252343 | 361 | 353,2 | 93,9 | 1,182 | 0,847 | 0,04585 | 1,082 | 24,78 | 186,28 | 15,5 | | | | |
| 2015_09_28_01 | Wartung | | | | 700676,7054 | 85832,2 | | | | | | | | | | | |
| 2015_10_02_01 | Wartung | #NV | #NV | #NV | #NV | #NV | | | | | | | | | | | |
| 2015_10_14_01 | Wartung | #NV | #NV | #NV | #NV | #NV | | | | | | | | | | | |
| 2015_10_15_01 | Wartung | #NV | #NV | #NV | #NV | #NV | | | | | | | | | | | |
| 2015_10_20_01 | Aellig 1. OG | 654242 | 252287 | 356 | 474,6 | 132,8 | 0,6828 | 0,627 | 0,4519 | 0,4893 | 13,06 | 14,77 | 37,6 | | | | |
| 2015_10_22_01 | Aellig 1. OG | 654242 | 252287 | 356 | 547,9 | 238,5 | 0,6828 | 0,627 | 0,4519 | 0,4893 | 13,18 | 14,65 | 37,6 | | | | |
| 2015_10_27_01 | Aellig 1. OG | 654242 | 252287 | 356 | 452,0 | 126,5 | 0,9674 | 0,856 | 0,4921 | 0,4844 | 12,21 | 14,53 | 36,74 | | | | |
| 2015_10_28_01 | Aellig 1. OG | 654242 | 252287 | 356 | 827,3 | 97,7 | 1,332 | 1,271 | 0,603 | 0,763 | 11,6 | 7,45 | 18,31 | | | | |
| 2015_10_28_02 | Aellig 1. OG | 654242 | 252287 | 356 | 582,2 | 253,4 | 0,6408 | 0,4624 | 0,4747 | 0,22 | 9,77 | 9,52 | 24,9 | | | | |
| 2015_11_03_01 | Aellig 1. OG | 654242 | 252287 | 356 | 555,3 | 155,3 | 0,6375 | 0,562 | 0,4823 | 0,5522 | 11,72 | 11,23 | 37,11 | | | | |
| 2015_11_06_01 | Aellig 1. OG | 654242 | 252287 | 356 | 789,8 | 111,7 | 0,6144 | 0,534 | 0,4022 | 0,3462 | 5,13 | 8,79 | 19,29 | | | | |