



# INSIDE

Stadtwerke München GmbH  
Innovative Energie Pullach  
Karlsruher Institut für Technologie



*Verbundvorhaben:* Induzierte Seismizität & Bodendeformation als Interferenzaspekte beim Betrieb von Geothermieanlagen in der süddeutschen Molasse – Untersuchungen zu einem verbesserten Prozessverständnis im tiefen Untergrund und Maßnahmen zur Risikominimierung

---

## SEISMISCHES NETZWERK INSIDE: AUFBAU UND INBETRIEBNAHME

---

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

*Grant agreement number*

Karlsruher Institut für Technologie:	03EE4008A
SWM Services GmbH:	03EE4008B
Innovative Energie für Pullach GmbH:	03EE4008C

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

<b>Titel:</b>	Seismisches Netzwerk INSIDE: Aufbau und Inbetriebnahme
<b>Arbeitspaket:</b>	AP1: Basisdatenerhebung und Datenaufnahme
<b>Meilenstein:</b>	M1.2.3
<b>Fälligkeitsdatum:</b>	09.2020
<b>Tatsächliches Datum:</b>	17.11.2021
<b>Partner:</b>	Zuständig: KIT beteiligte Partner: EW
<b>Ansprechpartner:</b>	Emmanuel Gaucher Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Institut für Angewandte Geowissenschaften Abteilung Geothermie Adenauerring 20b, Geb. 50.40 76131 Karlsruhe, Germany  Email: <a href="mailto:emmanuel.gaucher@kit.edu">emmanuel.gaucher@kit.edu</a> Phone: +49 721 608 45223
<b>Autoren:</b>	KIT : Jérôme Azzola, Emmanuel Gaucher
<b>Version:</b>	1.0

Version	Datum	Beschreibung der Ergänzungen, Änderungen, Überprüfungen
1.0	17.11.2021	Erste Version

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG</b> .....	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>EINLEITUNG</b> .....	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>NETZWERK BESCHREIBUNG</b> .....	<b>9</b>
3.1	ÜBERSICHT .....	9
3.2	STANDORTE .....	10
3.3	MATERIAL .....	12
3.3.1	<i>Oberflächenstationen</i> .....	12
3.3.2	<i>Bohrlochstationen</i> .....	14
3.3.3	<i>Glasfaserkabelstationen: DAS und DTSS</i> .....	15
3.4	DATA MANAGEMENT .....	21
3.4.1	<i>Datenübertragung</i> .....	21
3.4.2	<i>Volum der Daten</i> .....	21
<b>4</b>	<b>BEURTEILUNG DER HINTERGRUNDBODENUNRUHE AN DER OBERFLÄCHEN- UND BOHRLOCH-MESSSTATIONEN</b> .....	<b>22</b>
4.1	I95-WERTE DER HINTERGRUNDBODENUNRUHE .....	22
4.2	AMPLITUDENSPEKTRUM DER BODENUNRUHE .....	24
4.2.1	<i>Spektrogramm</i> .....	24
4.2.2	<i>Probabilistische spektrale Leistungsdichte</i> .....	25
<b>5</b>	<b>THEORETISCHE MODELLIERUNG DER AUFLÖSUNGSFÄHIGKEIT DES SEISMISCHEN NETZWERKS</b> .....	<b>29</b>
5.1	ALLGEMEINES ZUR MODELLIERUNG .....	29
5.2	MINIMALE MAGNITUDE ZUR DETEKTION .....	30
5.2.1	<i>Methode</i> .....	30
5.2.2	<i>Ergebnisse</i> .....	31
5.3	UNSICHERHEIT DER LOKALISIERUNG FÜR EINE BESTIMMTE MAGNITUDE .....	33
5.3.1	<i>Methode</i> .....	33
5.3.2	<i>Ergebnisse</i> .....	33
5.4	FAZIT .....	34
<b>6</b>	<b>DAS-MESSSTELLE INBETRIEBNAHME</b> .....	<b>35</b>
	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b> .....	<b>36</b>
	<b>ANHANG</b> .....	<b>37</b>
	BESCHREIBUNG DER TEILAUFGABE AP1.2 „SEISMISCHES MONITORING“ .....	37

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Status Juli 2020 und ursprünglich ausgewählte Gebiete für die Installation der seismischen INSIDE Messtationen. Rote Kreise: Oberflächenstationen. Schwarzes Pentagon: Bohrlochstation. Brauner Stern: Mini-array. Die rosa Sterne zeigen die Stationen des BetreiberNetzwerks und die grünen Dreiecke die alten MAGS Projekt Stationen.....	10
Abbildung 2: Oben - Übersicht über das installierte Netzwerk im Süden von München. Die schwarzen Linien zeigen die Verläufe der Bohrungen in Pullach und Schäftlarnstraße. Die roten Kreuze kennzeichnen die Bohrlochköpfe. Unten - Zoom auf den Einsatzbereich. Rote Punkte: Positionen der INSIDE-Stationen. Grüne Punkte: Positionen der MAGS-Stationen. ....	11
Abbildung 3: Schematische Erläuterung des Prinzips der Installation des Seismometers an der Oberfläche (a.) und Beispiel im Feld (b.).....	12
Abbildung 4: obertägigen Gehäuse in FRIE (a.), WBRU (b.) und FORS (c.). Teil a. zeigt die Situation an der Oberfläche, wenn alles eingerichtet ist. Die Teile b. und c. zeigen das Innere des Schanks mit seismischer und elektrischer Ausrüstung. ....	13
Abbildung 5: eigenständige Oberflächeninstallationen im Forstenrieder Park.....	14
Abbildung 6: Einsatz in der Siemensallee-Bohrung (links) und zugehöriger Schaltschrank (rechts). ....	15
Abbildung 7: Links: Bohrung des Bohrlochs in Buchenhain. Rechts: Verlegung der Glasfaserkabeln im Bohrloch und Absenkung der Kabel mit Hilfe eines Rohrs. ....	17
Abbildung 8: Verlegung von Glasfaserkabeln an der Oberfläche in einem 80 cm breiten Graben rund um den Park. Der Betonschacht enthält alle Kabelenden und das Geophon. ....	18
Abbildung 9: wasserdichte Boxen zum Schutz der Anschlüsse im Schacht. ....	18
Abbildung 10: Oberflächeninstallationen in Buchenhain. ....	19
Abbildung 11: Einbauschema, Seitenansicht. ....	20
Abbildung 12: Ansicht von oben. Für das „BRUsens strain V9“-Kabel, und wenn beide Lupen verbindet werden, zeigt das Diagramm die Positionen der Richtungsänderungen um den Park sowie die Positionen der Schrankeingänge und -ausgänge.....	20
Abbildung 13: Gemessene Bodenunruhe an den seismischen Stationen des seismischen Netzes, dargestellt als statistische Verteilung von 195 Werten. Für jede Station werden die 195-Werte innerhalb eines 30-Minuten-Fensters ausgewertet. Die Messungen sind für die Ostkomponenten (a.), die Nordkomponenten (b.) und die vertikalen Komponenten (c.) dargestellt. Die Striche reichen bis zu den extremen Datenpunkten (Min. und Max. in der Serie von 195 Werte). Die unteren und oberen Ränder des Rahmens geben das 25. bzw. 75. Perzentil an und die orangefarbene Linie die Mediane. Die grün gepunktete Linie stellt die Mittelwerte dar. Die Einkerbungen geben die Standardabweichung an. Die schwarze Linie stellt den Schwellenwert von $\pm 2 \mu\text{m/s}$ dar. ....	23
Abbildung 14: Messstelle Buchenhain. Für jede Komponente, links, Spektrogramme der gemessenen Bodenunruhe für einen Zeitraum von 48 Stunden. Die Messezeit ist entlang der X-Achse gezeigt und die Frequenz entlang der Y-Achse. Die Farbskala der Legenden stellt die ermittelten Rauschamplituden in dB (m/s) dar. Rechts werden einzelne Spektren für drei verschiedene Zeiten (6am., 12am., 12pm.) gezeigt. Diese bestimmten Zeiten werden durch die gepunkteten Linien links dargestellt. ....	24
Abbildung 15: Wie Abbildung 14, für Messstelle in Siemensallee („SIEM“), Wörnbrunn („WBRU“), Waldfriedhof („FRIE“) und Forstenrieder Park („FORS“). ....	25
Abbildung 16: Standort Buchenhain. Pseudo-probabilistische spektrale Leistungsdichte der Bodenunruhe für die Ostkomponente (oben links), Nordkomponente (oben rechts) und Vertikalkomponente (unten). Für jedes Diagramm gibt die Farbskala die Wahrscheinlichkeit an, dass eine gegebene spektrale Amplitude (Y-Achse des Diagramms) bei einer gegebenen Frequenz (X-Achse) überschritten wird. Die hellgraue Kurve zeigt den gemessenen durchschnittlichen Rauschamplituden und die schwarze Kurve das 95-Perzentil. Diese beiden Kurven sollten innerhalb des Bereichs liegen, der durch die grauen Linien definiert ist. Diese Linien definieren die sogenannten „New Low- and High-Noise Models“ (Peterson, 1993). ....	26
Abbildung 17: Wie Abbildung 16 aber für Siemensallee. ....	27
Abbildung 18: Wie Abbildung 16, aber für Wörnbrunn.....	27
Abbildung 19: Wie Abbildung 16, aber für Waldfriedhof. ....	28
Abbildung 20: Wie Abbildung 16, aber für Forstenrieder Park.....	28
Abbildung 21: Das gestreifte Quadrat stellt den Oberflächenbereich dar, wo die Parameter ermittelt werden. Das Quadrat ist 16,5 km lang. Das Untersuchungsbereich umfasst das Gebiet von Pullach und zielt auf das Reservoir in der Tiefe (von 2250 bis 2750 m, unter dem Meeresspiegel (MSL)). ....	29
Abbildung 22: Spektrale Leistungsdichte für die Station „FRIE“. Für eine gegebene Entfernung zu der Station zeigen die farbigen Linien das Spektrum, das für Quellen unterschiedlicher Momentmagnitude $M_w$ berechnet wurde. Die rote Linie zeigt das Cut-Off-Spektrum, das aus dem Bodenunruhemessungen an der Zielstation berechnet wurde. Es	

wurde 3-mal das 95. Perzentil der gemessenen Rauschamplituden (d.h. die schwarze Linie, die bereits in Abbildung 16 - Abbildung 20 dargestellt werden) berechnet. An diesem Standort und für die untersuchte Station wäre die limitierende Magnitude $M_{W, lim} = -0,3$ .....	31
Abbildung 23: Karte in einer Tiefe von 2250 m - An jedem Ort des Studiengebiets berechnen wir für jede Station einen Schwellenwert für die Detektion eines Ergebnisses (hier $M_{W, lim}$ notiert). Der drittniedrigste Wert gilt als die minimale Ereignismagnitude, die mit drei verschiedenen Stationen detektiert werden kann. ....	32
Abbildung 24: Wie Abbildung 23, aber für eine Tiefe von 2750 (unter MSL). ....	32
Abbildung 25: Karte in einer Tiefe von 2250 m - Station Buchenhain („BUCH“) - An jedem Ort des Studiengebiets vergleichen wir die Bodenunruhemessungen einer bestimmten Station mit dem theoretischen Spektrum eines Erdbebens einer gegebenen Magnitude. Aus den Bodenunruhe- und Quellenspektren erstellen wir das entsprechende Signal-Stör-Verhältnis (links). Schließlich weisen wir jedem SNR-Wert einen bestimmten Pickingfehler $dT$ zu (links). ....	33
Abbildung 26: Darstellung des 2D-Datensets (Entfernung entlang des Kabels / Zeit) für einen bestimmten Hammertest. 35	

## TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Typen der seismischen Stationen, die an den verschiedenen Standorten installiert werden. ....	9
Tabelle 2: Angaben zu den seismischen Messstationen. ....	9
Tabelle 3: Schätzung des Volumens der seismischen Daten, die im Rahmen des Projekts erfasst werden sollen. ....	21

# 1 ZUSAMMENFASSUNG

Dieses Dokument gilt als Ergebnis des Meilensteins M1.2.3 des INSIDE-Projekts und befasst sich mit der Installation und Inbetriebnahme des seismischen Netzes. Dieser Meilenstein entspricht einem Hauptziel des Projekts, nämlich der Erweiterung der Kapazität des bestehenden seismischen Netzes um die Standorte Sendling/Schäftlarnstraße, Pullach und Baierbrunn im Großraum von München. Das Netz besteht aus fünf seismischen Stationen, von denen eine in einem Überwachungsbohrloch in 170 m Tiefe installiert wurde. Zusätzlich wurde eine Messstation in Buchenhain installiert, die für die Erfassung von Distributed Acoustic Sensing (DAS) und Distributed Temperatur and Strain Sensing (DTSS) Messungen bestimmt ist. Ein Mini-Array wird Ende 2021 oder Anfang 2022 in der Siemenshalle installiert.

Wir stellen die fünf Standorte vor, die die Auswahlkriterien erfüllten und für die Installation der seismischen Stationen ausgewählt wurden. Diese Standorte befinden sich am Rande eines Kreises mit einem Radius von etwa 4 km. Die technischen Mittel für die Installation der Messstationen werden ebenfalls vorgestellt.

Wir vorstellen und diskutieren die Messungen zur Abschätzung der Hintergrundbodenunruhe (Noise), gemäß den Empfehlungen für den Themenkomplex „Seismische Überwachung“ der Arbeitsgruppe „Induzierte Seismizität“ des Forschungskollegiums Physik des Erdkörpers e.V. (FKPE). Ziel dieser Messungen ist es, die Erkennungs- und Lokalisierungsfähigkeiten des Netzes zu bewerten. An jedem Standort werden die Bodenunruhemessungen im Hinblick auf die gemessenen Amplituden und deren Frequenzverteilung ausgewertet. Die Amplituden werden statistisch behandelt und wir analysieren zu diesem Zweck die statistische Verteilung von I95-Werten. Die Frequenzverteilung des Rauschens wird durch die Berechnung des Spektrogramms und der probabilistischen Leistungsdichte analysiert. Anhand dieser Messungen wird schließlich die Detektionskapazität der einzelnen Stationen theoretisch bestimmt.

Nach den Messungen, die seit der Installation der Messstationen durchgeführt wurden, bestätigen wir, dass die einzelnen Standorte des seismischen Netzes die FKPE-Empfehlungen für die maximale Hintergrundbodenunruhe erfüllen.

Insgesamt zeigen die Stationen eine geringe Empfindlichkeit gegenüber Bodenunruhe im Frequenzbereich, das gezielt wird. Der Vergleich mit den Messungen, die nach der Messkampagne im Mai 2020 durchgeführt wurden, ermöglicht es die tatsächliche Kapazität des Netzes im Verhältnis zu den Erwartungen und dieser vorläufigen Bewertung zu beurteilen. Im Vergleich ist die Auswirkung der Hintergrundbodenunruhe am Messpunkt in Siemensallee geringer, da die Station in einem Messbohrloch installiert wurde. Im Forstenrieder Park wurde die Messstation ca. 900 m nach Nordwesten verlegt, was ebenfalls zu einer Reduzierung der Auswirkungen der Hintergrundbodenunruhe führte.

In den theoretischen Simulationen ermöglicht das Netz die Erkennung von Ereignissen mit einer kinetischen Energie bis zu  $M_W = -1$ . Für ein Ereignis, das innerhalb des von den fünf Stationen beschriebenen Perimeters stattfindet, liegt diese Schwelle allgemein bei  $M_W = -0,7$ . Außerhalb dieses Bereichs steigt die Detektionsschwelle auf  $M_W = -0,5$ . In Anbetracht der durchgeführten Messungen und Simulationen liegen im Gebiet von Pullach die theoretischen Fehler bei der Detektion eines Ereignisses mit einer Magnituden  $M_W = -0,7$  im Bereich von 10 bis 60 ms.

In diesem Bericht wurden nicht die Detektions- und Lokalisierungsfähigkeiten des Mini-Arrays beurteilt, weil die Messstelle noch nicht installiert wurde. Nach Vorliegen dieser Daten, werden die Fähigkeiten mit denen von Standard-Seismometern auch verglichen. Das Gleiche gilt für die DAS-Messungen in Buchenhain, die hier nur vorgestellt werden

## 2 EINLEITUNG

Die seismische Überwachung ist einer der Schlüsselaspekte des INSIDE-Projekts. Eines seiner Ziele ist der Ausbau eines seismischen Netzwerks zur kontinuierlichen Erfassung der Seismizität, die während eines geothermischen Betriebs induziert wird. Im Rahmen des Projekts INSIDE konzentrieren wir uns auf die Beobachtung der Standorte Sendling/Schäftlarnstraße, Pullach und Baierbrunn (Großraum von München, Bayern). Eine Aufgabe besteht darin, die schwache Seismizität zu identifizieren, um einen Wert für die Reservoir Charakterisierung bereitzustellen. Ein anderes Ziel des Projekts besteht darin, Standardüberwachungs- mit innovativen Techniken zu vergleichen (z.B. Mini-Array, *Distributed Acoustic Sensing* mit Glasfaserkabeln). Darüber hinaus wurde die Lage der bestehenden Überwachungsstationen in der Region bei der Designphase berücksichtigt, da das INSIDE-Netzwerk die Beobachtungspunkte nicht duplizieren soll, sondern vervollständigen. Diese Aspekte, sowie die Standardempfehlungen (Baisch et al., 2011; Arbeitsgruppe „Induzierte Seismizität“ FKPE e.V. et al., 2012), haben das Design des Netzwerks beeinflusst. In diesem Bericht werden die Ergebnisse dieser Konzeptionsphase vorgestellt. Die Kapazität des Netzes, das in 2021 in Betrieb genommen wurde, wird schließlich bewertet.

## 3 NETZWERK BESCHREIBUNG

### 3.1 ÜBERSICHT

Das seismische Netzwerk umfasst:

- vier Oberflächenstationen,
- eine Bohrlochstation,
- Bohren eines Bohrlochs (bis zu ca. 250 m) und Verlegen von Glasfaserkabeln zur Nutzung der Distributed Fiber-Optic Sensing Technologie, bzw. hier die Aufnahme von Distributed Acoustic Sensing (DAS) und Distributed Temperatur and Strain Sensing (DTSS) Messungen.
- ein Mini-Array mit 9 unabhängigen Stationen.

Tabelle 1 zeigt die verschiedenen Typen von seismischen Stationen, die je nach Standort und gewähltem Akronym installiert werden.

**Tabelle 1: Typen der seismischen Stationen, die an den verschiedenen Standorten installiert werden.**

Standort	Abkürzung	Oberfläche	Bohrloch	Glasfaserkabel	Mini-Array
Waldfriedhof (Neuried)	FRIE	1			
Wörnbrunn (Grünwald)	WBRU	1			
Forstenrieder Park	FORS	1			
Buchenhain	BUCH	1		DAS + DTSS	
Siemens Allee (Sendling)	SIEM		1		1 (9)

Ziel der Mini-Array- und Bohrlochstationen ist eine höhere Signalerfassungsfähigkeit als mit einem einzelnen Oberflächengeophon zu erreichen. Durch die Mischung von Aufnahmetechniken vor Ort können die Methoden verglichen und ihre Vor- und Nachteile beschrieben werden. Weiterhin ist die Eignung von Glasfaserkabeln zur Aufzeichnung von akustischen- und Dehnungssignalen zu bewerten. Mit dieser Messtechnik kann eine große Anzahl von Messpunkten über die gesamte Länge des verlegten Kabels erhalten werden.

Tabelle 2 enthält weitere Details zu den Messstationen, einschließlich GPS-Standort und Datum der Inbetriebnahme.

**Tabelle 2: Angaben zu den seismischen Messstationen.**

Standort	Buchenhain BUCH	Woernbrunn WBRU	Siemensallee SIEM	Forstenrieder Park FORS	Waldfriedhof FRIE
Lat. (° WGS84)	48.02938	48.040502	48.088526	48.063897	48.100717
Lon (° WGS84)	11.48802	11.549588	11.530045	11.441629	11.485279
Inbetriebnahme	10 Juni 2021	27 März 2021	26 Nov. 2020	28 März 2021	28 März 2021
Abtastrate (Hz)	250				

## 3.2 STANDORTE

Abbildung 1 zeigt die ursprünglich ausgewählten Standorte für die Messstationen. Im Vergleich zu den ersten getesteten Standorten (siehe Bericht für M1.2.1: *Seismisches Netzwerk INSIDE: planungs- und design Phase*) wurde die „FORS“-Station ca. 900 m weiter nordwestlich installiert. Der Abstand zur Autobahn und zur Stromleitung, die die Hauptquellen von Bodenunruhen sind, wurde deshalb vergrößert. Die „SIEM“-Station wurde in einem Wasserbeobachtungsbohrloch in der Siemensallee installiert.

Abbildung 2 zeigt die endgültigen Positionen der Messstationen des seismischen Netzwerks. Um zu zeigen, wie diese Stationen in das größere Betreibernetz passen ist die Karte mit den Stationen des MAGS-Projekts ergänzt. Die Übersicht, oben, erlaubt die Lokalisierung dieser Stationen in Bezug auf die Bohrungen in Pullach und in die Schäftlarnstraße

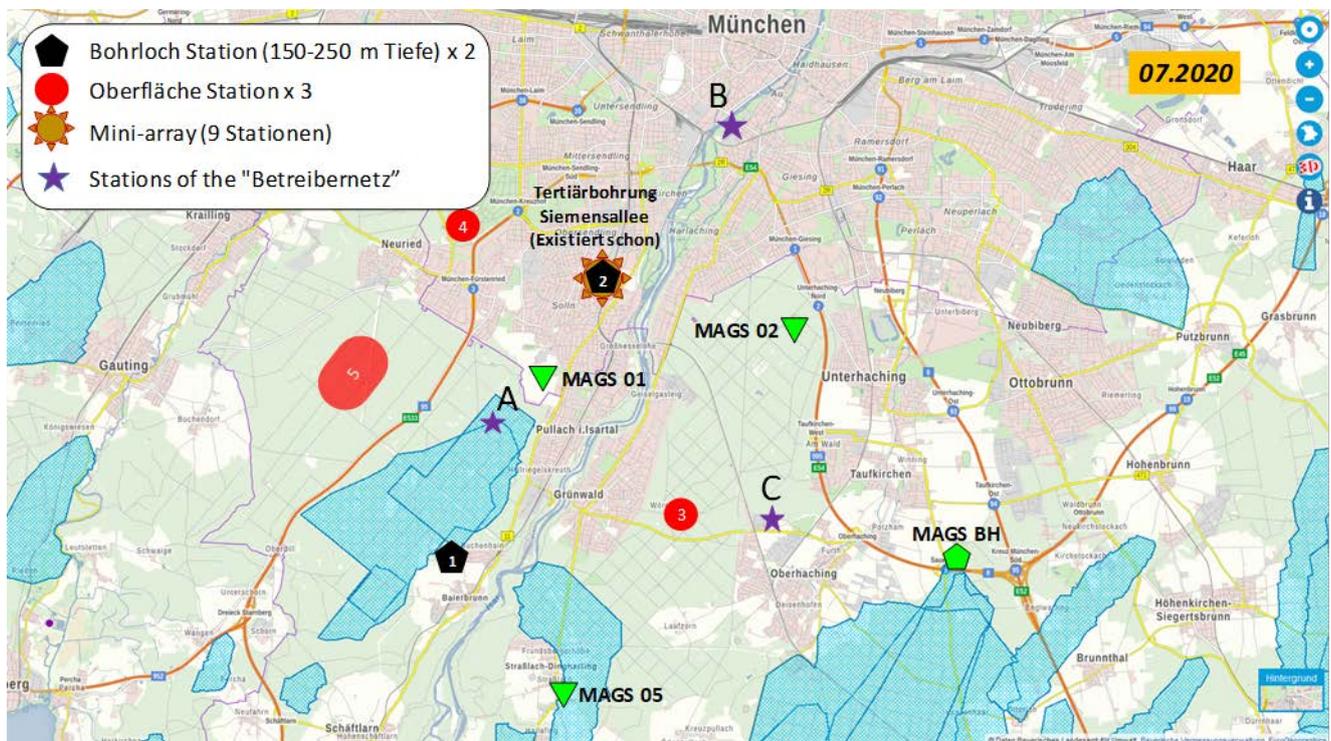


Abbildung 1: Status Juli 2020 und ursprünglich ausgewählte Gebiete für die Installation der seismischen INSIDE Messstationen. Rote Kreise: Oberflächenstationen. Schwarzes Pentagon: Bohrlochstation. Brauner Stern: Mini-array. Die rosa Sterne zeigen die Stationen des Betreibernetzwerks und die grünen Dreiecke die alten MAGS Projekt Stationen.

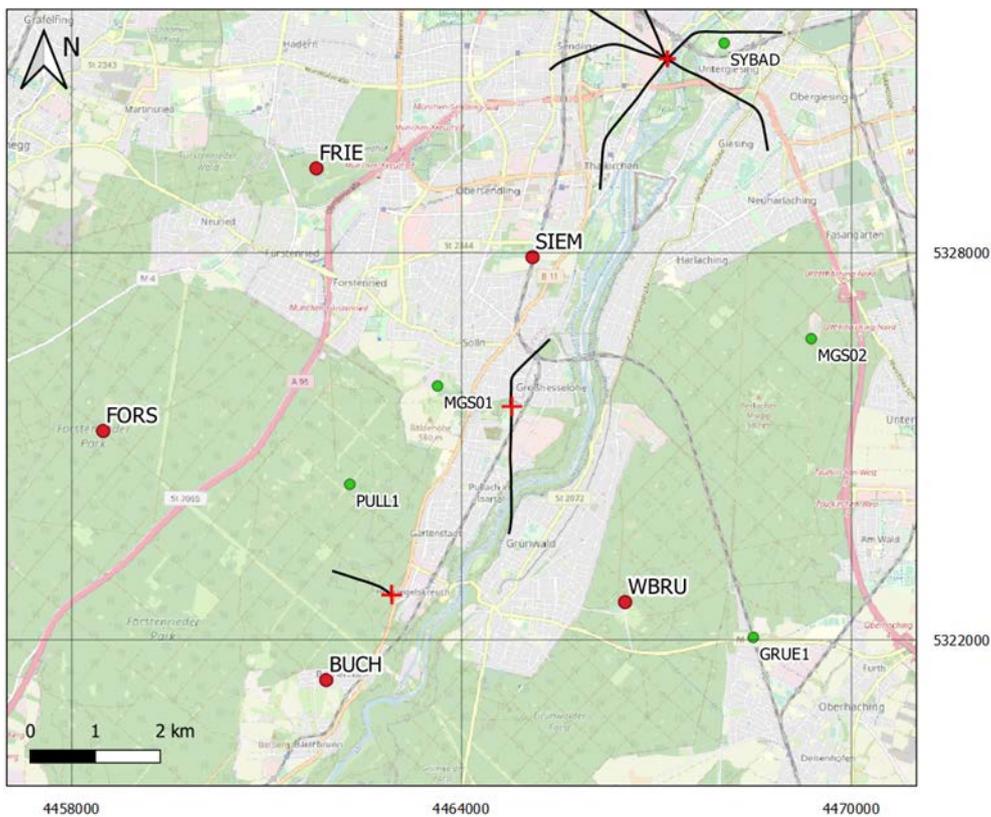
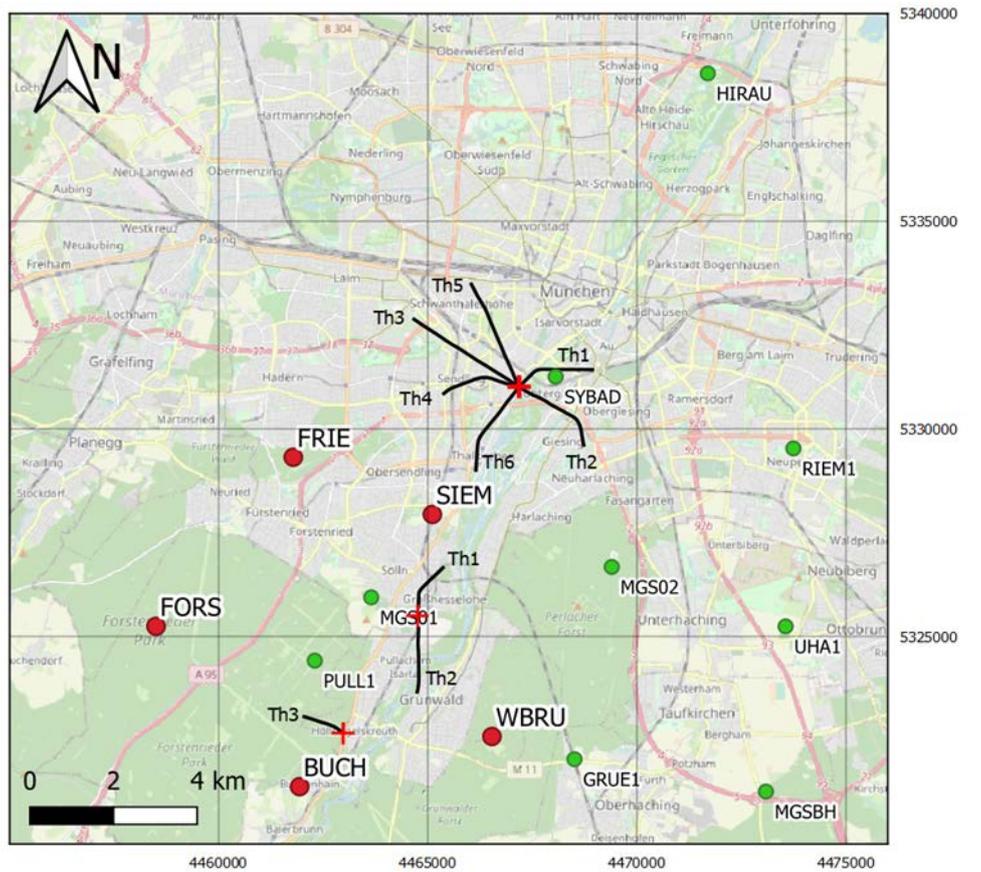


Abbildung 2: Oben - Übersicht über das installierte Netzwerk im Süden von München. Die schwarzen Linien zeigen die Verläufe der Bohrungen in Pullach und Schäflarnstraße. Die roten Kreuze kennzeichnen die Bohrlochköpfe. Unten - Zoom auf den Einsatzbereich. Rote Punkte: Positionen der INSIDE-Stationen. Grüne Punkte: Positionen der MAGS-Stationen.

## 3.3 MATERIAL

### 3.3.1 OBERFLÄCHENSTATIONEN

#### 3.3.1.1 Seismische Ausrüstung

Hersteller: Nanometrics.

Geophone: Trillium Compact Surface Vault 120 s, 750 V/m/s,  $\pm 10^\circ$  Neigungstoleranz, 3-Komponenten.

Datenerfassung: Centaur-4 DAQ, 24bit, 32GB SD-Card, GPS, 3-Kanal Version.

#### 3.3.1.2 Installation

Am März 2021 wurden die drei Oberflächenstation „WBRU“, „FRIE“ und „FORS“ installiert. Die Messstation in Buchenhain wurde im Juni 2021 eingerichtet.

Eine Oberflächenstation besteht aus zwei Hauptteilen: einem unterirdischen Teil, der das Seismometer enthält und einem Oberflächenteil, der den Rest der Ausrüstung enthält. Das seismische Kabel stellt die Verbindung zwischen beiden Teilen her.

Abbildung 3 zeigt das Installationsprinzip des oben genannten ersten Teils. Zusätzlich zur schematischen Darstellung wird ein Beispiel für den Einsatz im Feld dargestellt.

Das Oberflächenteil (s. Abbildung 4 für Beispiele im Feld) ist ein wasserdichter Schaltschrank die folgenden Geräte enthält:

- ein Datenlogger,
- elektrische Ausrüstung, die eine kontinuierliche Stromversorgung der Geräte sicherstellt,
- ein Modem: für Echtzeit-Datenübertragung,
- eine GPS-Antenne.

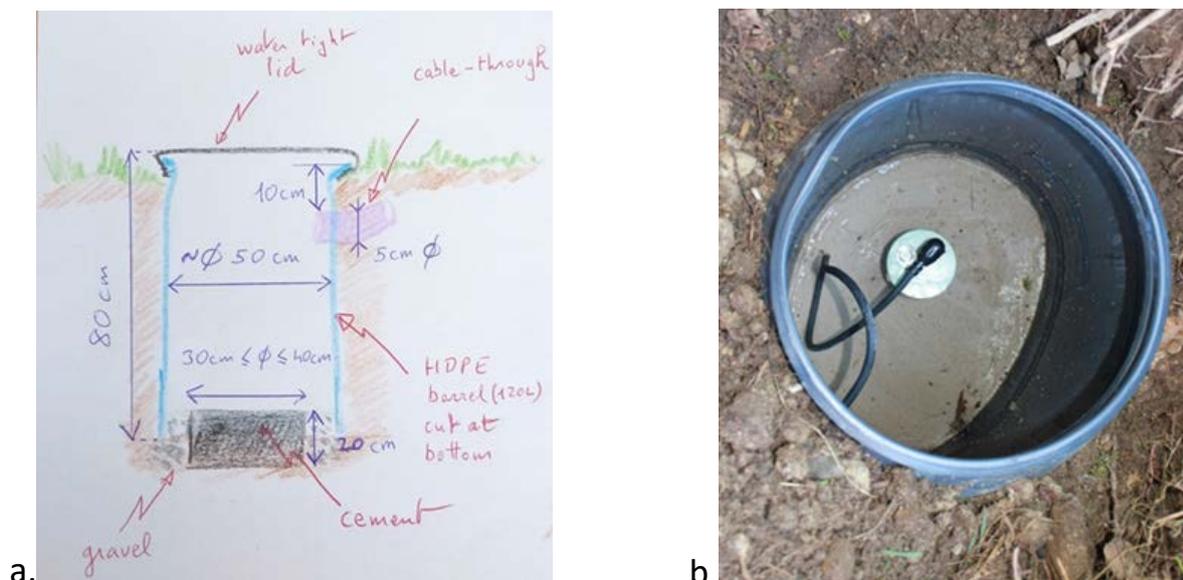


Abbildung 3: Schematische Erläuterung des Prinzips der Installation des Seismometers an der Oberfläche (a.) und Beispiel im Feld (b.).



**Abbildung 4: obertägigen Gehäuse in FRIE (a.), WBRU (b.) und FORS (c.). Teil a. zeigt die Situation an der Oberfläche, wenn alles eingerichtet ist. Die Teile b. und c. zeigen das Innere des Schrankes mit seismischer und elektrischer Ausrüstung.**

Für die Spannungsversorgung können zwei Situationen in Betracht gezogen werden. Entweder wird der seismische Schrank an das Stromnetz angeschlossen, oder werden Solarmodule benutzt.

Im ersten Fall installieren wir im Schrank ein Schalter, einen Umrichter und ein UPS („Uninterruptible Power Supply“) mit einer Batterie zur kontinuierlichen Versorgung der Geräte (z.B. Abbildung 4 b., c.). Dieses elektrische System ist ein zusätzlicher Schutz, und die Stromversorgung des Schrankes ist an einen zusätzlichen Schaltschrank mit Netzanschluss angeschlossen

Wenn keine Stromversorgung vorhanden ist, wie im Forstenrieder Park, werden Solarmodule benutzt für die Stromversorgung der seismischen Geräte. Im Schrank befindet sich der Umrichter und ein Überspannungsschutz (z.B. Abbildung 4 c.). Die Solarmodule sind mit dem Schaltschrank an einem Metallrahmen befestigt (Abbildung 5).



Abbildung 5: eigenständige Oberflächeninstallationen im Forstenrieder Park.

### 3.3.2 BOHRLOCHSTATIONEN

#### 3.3.2.1 Seismische Ausrüstung

Hersteller: Nanometrics,

Seismometer: Trillium Compact Posthole 20 s, 750 V/m/s,  $\pm 10^\circ$  Neigungstoleranz, 3-Komponenten, bis 300-m Tiefe Wasserdicht. Durchmesser: 97 mm,

Datenerfassung: Centaur-4 DAQ, 24bit, 32GB SD-Card, GPS, 6-Kanal Version.

#### 3.3.2.2 Installation

An der Oberfläche sieht die Anlage wie eine Oberflächenstation (z.B. Abbildung 6, rechts). Das Seismometer wird in einem Bohrloch eingesetzt.

In der Siemensallee-Bohrung, die der SWM gehört, wurde am 26 November 2020 das Geophon bei ca. 170 m eingesetzt (Abbildung 6). Das Seismometer wird im Bohrloch installiert und das Kabel für die Stromversorgung und die Datenübertragung wird mit dem Datenlogger verbunden, der sich in einem Schaltschrank neben dem Bohrlochkopf befindet.



Abbildung 6: Einsatz in der Siemensallee-Bohrung (links) und zugehöriger Schaltschrank (rechts).

### 3.3.3 GLASFASERKABELSTATIONEN: DAS UND DTSS

#### 3.3.3.1 Ausrüstung

Glasfaserkabel (GFK) und entsprechende Erfassungsgeräte sind für GFK-Stationen erforderlich. Für jede Messung, DAS und DTSS, ist ein eigenes Single-Mode Glasfaser und eine eigene Erfassungsausrüstung erforderlich.

Bei DAS ist das Ziel, die **Dehnungsrate** des an die Erde gekoppelten Kabels zu messen. Das Erfassungsgeräte A1-R von Febus ist ein phasenbasiertes System, mit dem die Verformung der optischen Faser quantifiziert werden kann. Die optische Dephasierung zwischen 2 Positionen auf der optischen Faser ist direkt mit der ausgeübten longitudinalen Belastung (Dehnung oder Kompression) verbunden. Die Messung der optischen Dephasierung entlang eine gegebene Strecke, die „Gauge Length“ (GL), steht dann im Zusammenhang mit der Dehnung entlang diese Strecke des Kabels.

Wie bei der GL wird eine Zeitlänge, die „Derivation Time“ (DT) für die Berechnung der Ableitung der Dehnung nach der Zeit genommen. Die Berechnung der Dehnungsrate ermöglicht es, die Daten von Artefakten zu korrigieren und die Qualität der Daten zu sichern. Die Einheit der Dehnungsrate ist Nanostrain/s, d.h. nm/m/s.

Bei DTSS ist es die Dehnung des ebenfalls an die Erde gekoppelten Kabels zu messen. Im Verhältnis zur DAS ist es möglich mit dieser Messmethode die Reaktion des Untergrunds bei niedrigeren Frequenzen zu bewerten.

Hersteller des Erfassungsgerätes: Febus-Optics S.A.S.

DAS Datenlogger: A1-R

- „Single-ended“
- Abtast-Intervall: 0,8 – 10 m
- Maximale Detektionsfrequenz: > 2,5 kHz
- Optical Konnektor E2000/APC
- Elektrische Spannung: 220 V AC
- Elektrische Leistung (max.): 500 W
- Größe: 19“ / 4U (Rack)
- Gewicht: 15 kg
- Betriebstemperatur: -10°C – 40°C

DTSS Datenlogger: G1-R

- Single-ended
- Räumliche Auflösung: 1 m
- Abtast-Intervall: 0,1 m
- Wiederholgenauigkeit ( $2\sigma$ ): 12  $\mu\text{m/m}$  oder 0,6°C
- Optical connector (Stecker): E2000/APC
- Elektrische Spannung: 220 V AC
- Elektrische Leistung (max.): 400 W
- Größe: 19“ / 4U (Rack)
- Gewicht: 15 kg
- Betriebstemperatur: 0°C – 40°C

Aufgrund der großen Datenmengen (vgl. Tabelle 3), die mit der DAS/DTS-Überwachung verbunden sind, muss ein RAID10-Speichersystem gleichzeitig benutzt werden.

Diese Geräte werden vor Ort in einem Schrank mit einem Gestell und einem an die Belüftung dieser Geräte angepassten Belüftungssystem gelagert.

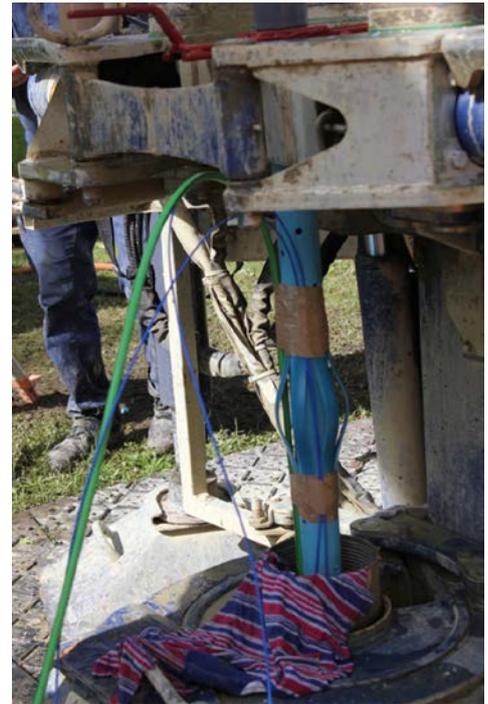
Hersteller des Kabels: Brugg Kabel AG.

Grün Kabel dediziert zur Erfassung von DAS Daten - BRUsens DAS & DTS & Communication Hybrid: ein Kabel mit mehreren Elementen, u.a. zwei Simplex-Elementen mit dicht gepufferter Monomode-Faser mit Kunststoff-Außenmantel. Das Kabel enthält auch ein Element mit 10 Singlemode-Fasern, die für DTSS verwendet werden können. Durchmesser 12,0 mm.

Blau Kabel dediziert zur Erfassung von DTSS Daten - BRUsens strain V9: Flexible Glasfaser-Dehnungsmessleitung mit zentralem Metallrohr, strukturiertem Außenmantel, einer single-Mode optischen Faser, Dehnungsbereich bis zu 1 % (10000  $\mu\text{strain}$ ). Durchmesser 3.2 mm.

### **3.3.3.2 Installation**

Die dedizierte vertikale Überwachungsbohrung wurde in Buchenhain im Mai 2021 bis 250 m Tiefe gebohrt (Abbildung 7). Zwei Glasfaserkabeln wurden an dem Rohr befestigt und nach unten geführt. Die Kabel und das Rohr sind dann im Bohrloch einzementiert. Ein Kabel ist für die verteilte akustische Messung (DAS) bestimmt, und wurde von oben nach unten in einem Strich installiert. Das andere ist für die verteilte Temperatur- und Dehnungsmessung (DTSS) bestimmt. Das Kabel ist U-förmig im Bohrloch verlegt (nach unten und rückwärts).



**Abbildung 7: Links: Bohrung des Bohrlochs in Buchenhain. Rechts: Verlegung der Glasfaserkabeln im Bohrloch und Absenkung der Kabel mit Hilfe eines Rohrs.**

Zusätzlich zum vertikalen Einsatz wurden den Glasfaserkabeln horizontal um den Schacht verlegen. Beide Kabel bilden dabei zwei Schleifen von jeweils ca. 100 m rund um den Park (Abbildung 8). Die Kabel wurden in eine Tiefe von 80 cm eingegraben, und liegen auf einem Sandbett, um die Verbindung zum Boden zu verbessern. Mit solcher Messausrüstung ist es erwartet potenzielle Seismizität und Bodenverformung in vertikaler und horizontaler Richtung zu beobachten.





**Abbildung 8:** Verlegung von Glasfaserkabeln an der Oberfläche in einem 80 cm breiten Graben rund um den Park. Der Betonschacht enthält alle Kabelenden und das Geophon.

Die verschiedenen Kabelenden (z.B. der Bohrung und des Schaltschranks) werden in einem Betonschacht geführt. Die Verbinder, die an den Kabelenden installiert sind und die es ermöglichen, die Rekorder an verschiedene Teile der Anlage anzuschließen, werden im Schacht in einer Box geschützt (Abbildung 9). Der Schacht enthält auch das Seismometer der Messstation „BUCH“.



**Abbildung 9:** wasserdichte Boxen zum Schutz der Anschlüsse im Schacht.

An der Oberfläche wurde ein klimatisierter 19"-Schaltschrank für die Rekorder installiert (Abbildung 10). Der Schaltschrank enthält auch ein Display zur Datenvisualisierung, die Ausrüstung der seismischen Oberflächenstation „BUCH“ und die elektrische Ausrüstung.



**Abbildung 10: Oberflächeninstallationen in Buchenhain.**

Abbildung 11 zeigt das Prinzip der Installation in einer schematischen Darstellung. Die gesamte Aufnahmelänge mit dem DTSS-Kabel beträgt 751 m (d.h., wenn beide Lupen verbunden werden und wenn das im Bohrloch installierte Kabel angeschlossen ist). Mit dem DAS-Kabel ist es 505 m bis zum Tiefpunkt der Bohrung. Die Positionen entlang des Glasfaserkabels sind in Abbildung 12 für das „BRUsens strain V9“ Kabel referenziert.

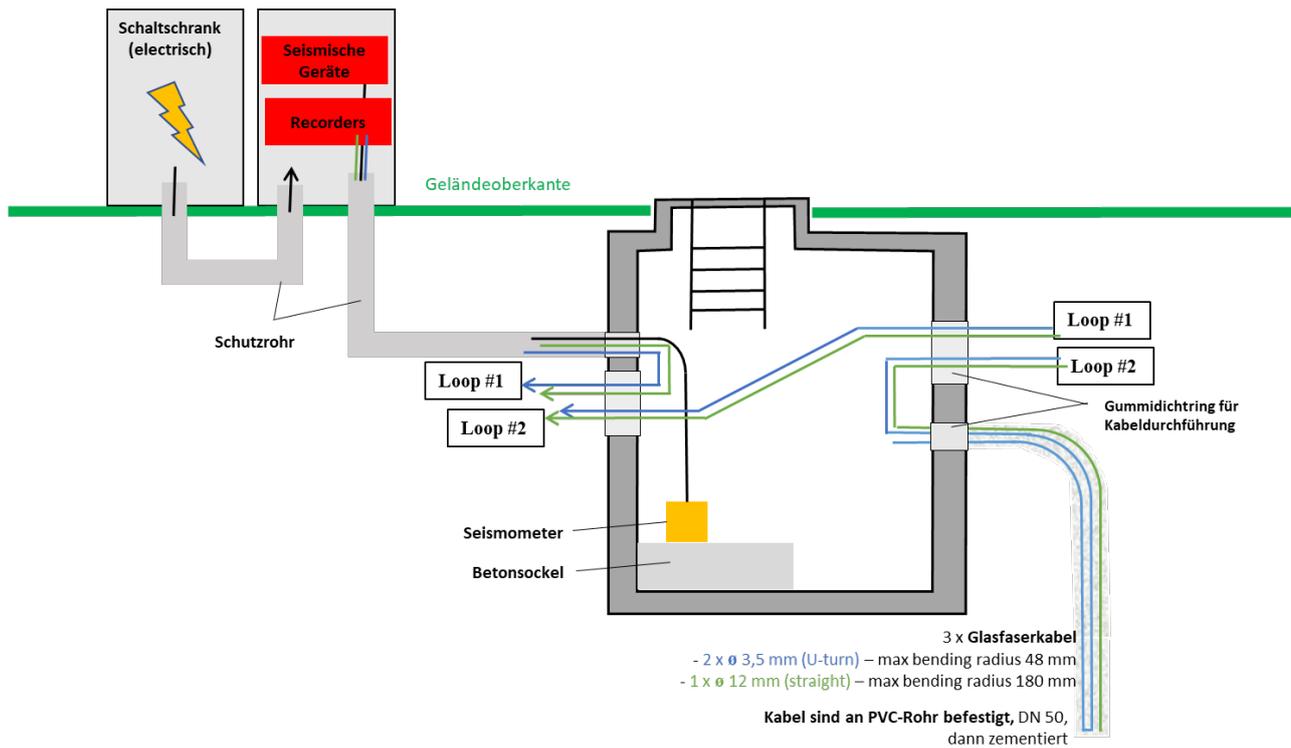


Abbildung 11: Einbauschema, Seitenansicht.

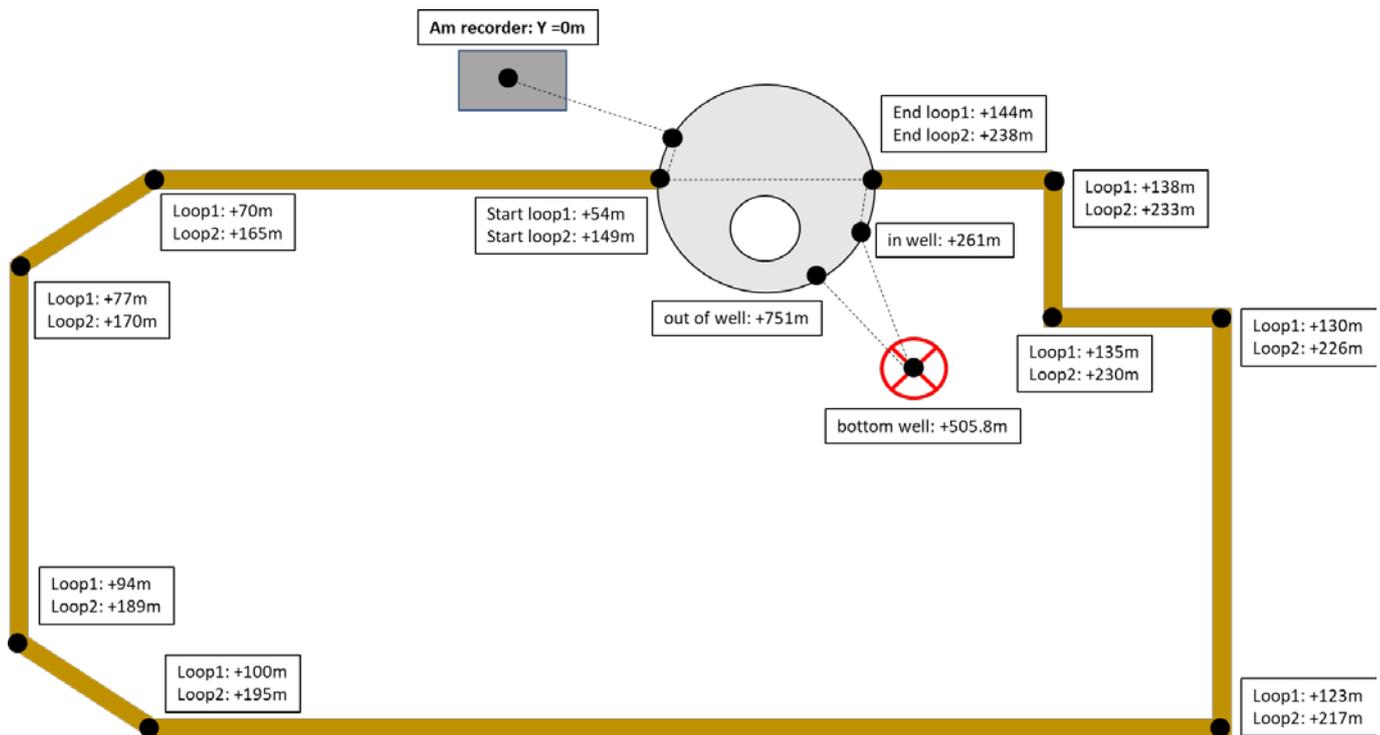


Abbildung 12: Ansicht von oben. Für das „BRUsens strain V9“-Kabel, und wenn beide Lupen verbindet werden, zeigt das Diagramm die Positionen der Richtungsänderungen um den Park sowie die Positionen der Schrankeingänge und -ausgänge.

### 3.4 DATA MANAGEMENT

Die Verwaltung der vom Netzwerk gesammelten Daten hat zwei Ziele:

1. eine sichere Langzeitspeicherung von Daten zu ermöglichen,
2. die Übertragung von seismischen Daten in Echtzeit zur Überwachung und Datenverarbeitung zu ermöglichen.

#### 3.4.1 DATENÜBERTRAGUNG

Nur seismischer „Rohdaten“ von Stationen, die mit einem Modem eingerichtet sind, werden in Echtzeit vom Messgerät zum KIT Server übertragen. Eine automatische Datenverarbeitung ist im KIT implementiert. Diese Verarbeitung wird durch manuelle Überprüfung und Nachbearbeitung der Daten ergänzt.

Echtzeitdaten von Bohrloch- und Oberflächenstationen werden über Seedlink übertragen. SeedLink ist ein Echtzeit-Datenerfassungsprotokoll und eine Client-Server-Software, die dieses Protokoll implementiert. Für die automatische Archivierung und Verarbeitung dieser Daten ist am KIT SeisCompP installiert, eine seismologische Software zur Datenerfassung, -verarbeitung, -verteilung und interaktiven Analyse. Der anschließenden Datenverarbeitung wird eine größere Aufmerksamkeit gewidmet, indem regelmäßig speziell entwickelte Python-Skripte ausgeführt werden.

Die Daten der DAS und DTSS werden an RAID10-System gespeichert. Die Daten können dann kopiert werden, nachdem das Speichersystem wiederhergestellt wurde. Da der Datenumfang der GFK-DAS Daten sehr hoch ist, ist eine Echtzeitübertragung dieser Daten während der Projektdauer nicht realistisch (Tabelle 3). Das GFK-DTSS wird zunächst nicht in Echtzeit angebunden.

Die INSIDE-Partner erhalten einen freien Zugang zu allen Daten, insofern die „Rohdaten“ und deren Verarbeitung in der INSIDE-Datenbank gespeichert werden. Das geophysikalische Observatorium Fürstenfeldbruck (GOF) erhalten auch einen freien Zugang zu der „Rohdaten“ der 5 seismologischen Stationen.

#### 3.4.2 VOLUM DER DATEN

Tabelle 3 enthält eine Schätzung des Volumens der seismischen Daten, die im Rahmen des Projekts erfasst werden sollen.

**Tabelle 3: Schätzung des Volumens der seismischen Daten, die im Rahmen des Projekts erfasst werden sollen.**

Rohdaten					
Typ der Daten	Oberflächen-Stationen	Bohrloch-Stationen	Mini-Array	DAS (Strain-Rate)	DTSS
Format	miniseed/binary	miniseed /binary	miniseed /binary	hdf5/binary	hdf5/binary
Übertragung	On-line - transferred via Seedlink-Protocol	On-line - transferred via Seedlink protocol	Off-line	Off-line	Off-line
Stationen	4	1	9	~500 m Kabel	~700 m Kabel
Abtastrate (Hz)	250	250	200		
Speicherung per Monat	32 GB	8 GB	70 GB	1.8 TB	< 1 MB

## 4 BEURTEILUNG DER HINTERGRUNDBODENUNRUHE AN DER OBERFLÄCHEN- UND BOHRLOCH-MESSSTATIONEN

Anthropogenes Hintergrundrauschen (Noise) und unsichtbare Geräuschquellen können einen starken Einfluss auf die Qualität der Aufzeichnung und Verarbeitung der Seismizität haben. Das Ziel der Messung ist die Quantifizierung der Fähigkeit, Seismizität für jeden Standort und für jede Art von Messung zu erfassen.

In diesem Abschnitt konzentrieren wir uns auf die Daten, die von den im Projekt installierten, Oberflächen- und Bohrlochseismometern aufgezeichnet werden.

Um die Hintergrundbodenunruhe zu beurteilen, benützen wir hier die Daten, die seit der Einrichtung der Stationen erfasst wurden (siehe Tabelle 2). Wir interessieren uns für die Amplitude dieser Messungen sowie für ihre Verteilung im Frequenzbereich. Von besonderem Interesse ist der Frequenzbereich von 5 bis 40 Hz, in dem die Datenverarbeitung stattfinden sollte, da wir davon ausgingen, angesichts des angenommenen Standorts der in INSIDE untersuchten Ereignisse. Wir sind in den ermittelten Leistungsdichten besonders an einer lokalen Seismizität interessiert, die in einer Tiefe von etwa 3 km induziert wird. Die untere Grenze des Frequenzbereichs des seismischen Signals an der Oberfläche sollte zwischen 2 / 5 Hz liegen, und die obere Grenze des Frequenzbereichs sollte auf 40 Hz liegen.

### 4.1 I95-WERTE DER HINTERGRUNDBODENUNRUHE

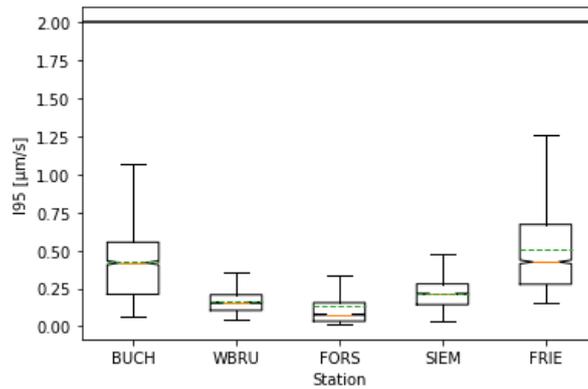
Die Hintergrundbodenunruhe wird hier als I95-Werte quantifiziert (Arbeitsgruppe „Induzierte Seismizität“ FKPE e.V. et al., 2012; Groos and Ritter, 2009). Dieser Parameter charakterisiert die vom Seismometer erfassten Amplituden.

Für jede aufgezeichnete Komponente und für jedes Zeitfenster von 30 Minuten messen wir den Umfang des durch das 95. Perzentil definierten Bereich. Wenn die Verteilung von den niedrigsten zu den höchsten Amplituden geordnet ist, entspricht das 95. Perzentil, dem Wert bei dem 95 % der Daten unter diesem Schwellenwert liegen. Die Daten werden zuvor zwischen 5 und 40 Hz gefiltert. Die für jedes Zeitintervall erhaltene Messung ermöglicht die Erstellung einer statistischen Serie, die in Abbildung 13 dargestellt ist.

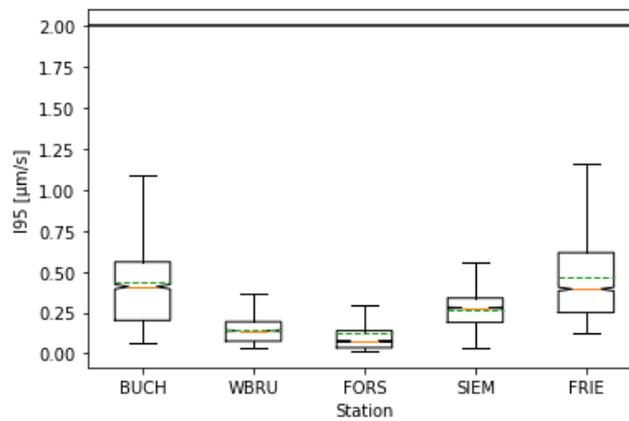
Die Arbeitsgruppe „Induzierte Seismizität“ FKPE e.V. et al. (2012) empfiehlt, dass der I95-Wert zwischen  $\pm 2 \mu\text{m/s}$  liegen sollte. Für die Messstellen des seismischen Netzes fallen die I95-Werte systematisch unter den  $\pm 2 \mu\text{m/s}$  Grenzwert, sogar für die extremen Datenpunkten.

Für die Messstellen im Forstenrieder Park („FORS“), in Buchenhain („BUCH“) und in Neuried („FRIE“) sieht man eine Differenz zwischen dem Mittelwert (in Grün) und dem Median (in Orange). Dieser Unterschied ist ein Indikator für die Verteilung der Messungen in einem gegebenen 30-Minuten Zeitbereich, sowie der hohe Wert der Standardabweichung für „BUCH“ und „FRIE“. In diesem Ort sind die gemessenen Bodenbewegungsamplituden im Laufe des Tages variabel. An der Messstelle „BUCH“ oder „FRIE“, die sich in einem Wohngebiet befinden, ist der Schwellenwert in Abhängigkeit mit dem Tagesverkehr; im Fall der Messstelle „FORS“ ist es aufgrund des variablen Autobahnverkehrs.

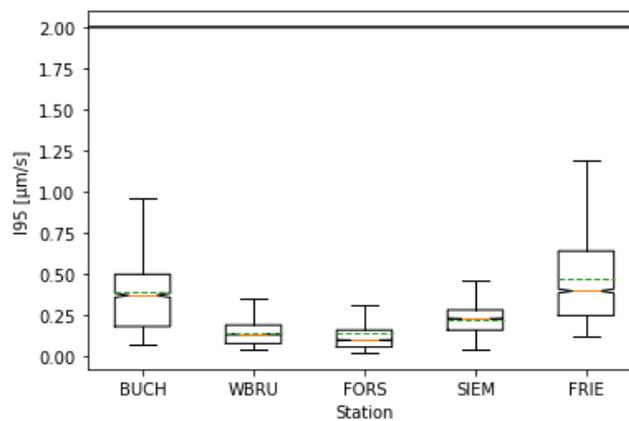
Für die Messstelle in Siemensallee („SIEM“) ist es zu bemerken, dass die Installation des Instruments in einem Bohrloch zu einer deutlichen Verbesserung der Störungen geführt hat. Der Einfluss der nahen gelegenen Bahnlinie wird erheblich reduziert. Für die Messstelle in Forstenrieder Park ist es die Verschiebung der Station weiter nach West-Norden, entfernt von der Stromleitung und der Autobahn, die den Lärmpegel deutlich verbessert hat, im Vergleich zu den ersten Messungen im Mai 2020.



a. Ostkomponenten



b. Nordkomponenten



c. Vertikalen Komponenten

**Abbildung 13: Gemessene Bodenunruhe an den seismischen Stationen des seismischen Netzes, dargestellt als statistische Verteilung von 195 Werten. Für jede Station werden die 195-Werte innerhalb eines 30-Minuten-Fensters ausgewertet. Die Messungen sind für die Ostkomponenten (a.), die Nordkomponenten (b.) und die vertikalen Komponenten (c.) dargestellt. Die Striche reichen bis zu den extremen Datenpunkten (Min. und Max. in der Serie von 195 Werten). Die unteren und oberen Ränder des Rahmens geben das 25. bzw. 75. Perzentil an und die orangefarbene Linie die Mediane. Die grün gepunktete Linie stellt die Mittelwerte dar. Die Einkerbungen geben die Standardabweichung an. Die schwarze Linie stellt den Schwellenwert von  $\pm 2 \mu\text{m/s}$  dar.**

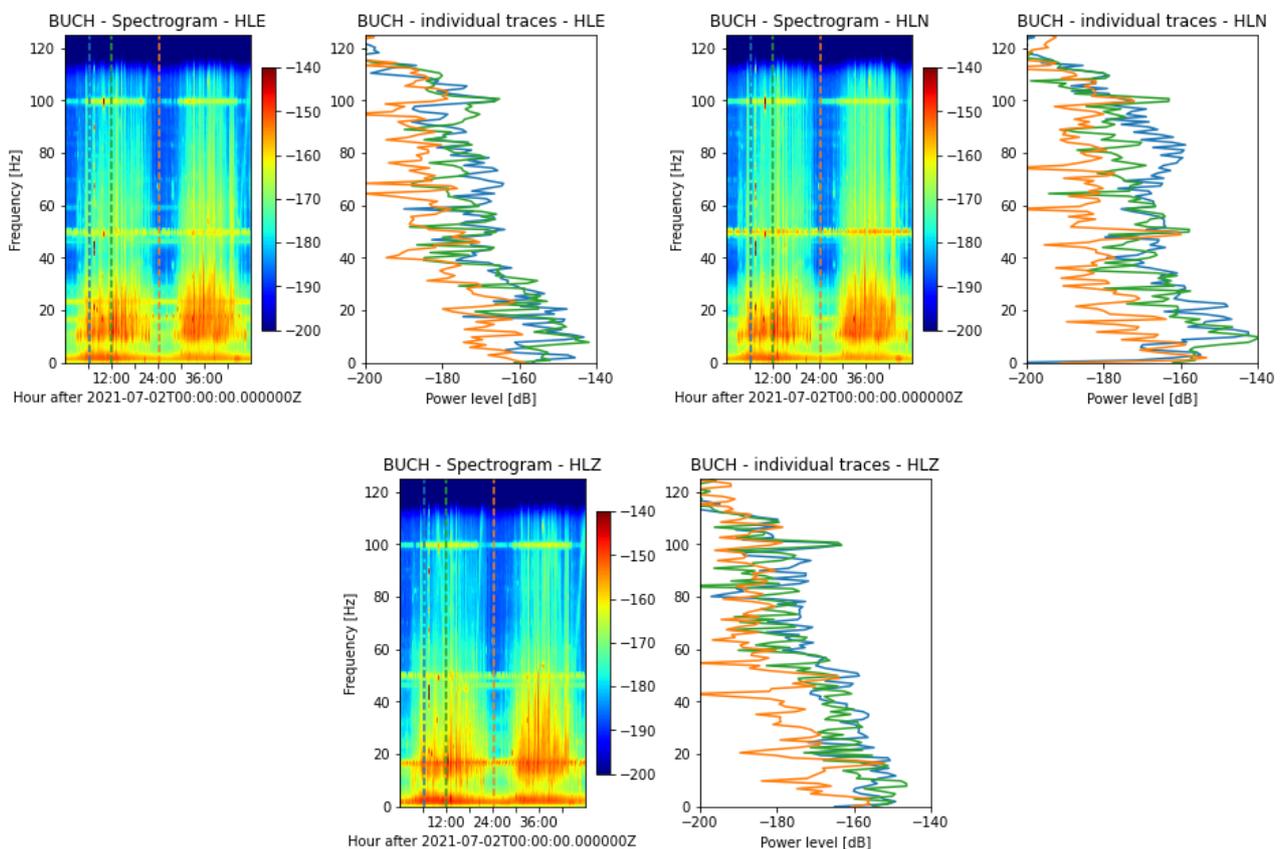
## 4.2 AMPLITUDENSPEKTRUM DER BODENUNRUHE

Hier wird die Frequenzverteilung des Rausches beurteilt. Zu diesem Zweck ist es möglich verschiedene Arten der Darstellung in Betracht zu ziehen.

### 4.2.1 SPEKTROGRAMM

Mit Hilfe von Spektrogrammen ist es möglich, die zeitliche Entwicklung der Frequenzverteilung des Rausches zu verfolgen. Wir sind in Abbildung 14 und Abbildung 15 an der Entwicklung innerhalb eines 48-Stunden-Fensters interessiert, das einen Freitag und einen Samstag umfasst.

Aus der Abbildung 14 kann man deutlich den Einfluss auf die Bodenunruhe der anthropogenen Aktivität in einem Wohngebiet und den typischen Tag/Nacht-Variabilität erkennen. Dieser Effekt zeigt sich besonders zwischen 1 und 20 Hz, obwohl dieser Trend über den gesamten Frequenzbereich sichtbar ist. Eine vergleichbare zeitliche Entwicklung ist an anderen Standorten zu erkennen (z.B. „FRIE“, siehe Abbildung 15).



**Abbildung 14: Messstelle Buchenhain.** Für jede Komponente, links, Spektrogramme der gemessenen Bodenunruhe für einen Zeitraum von 48 Stunden. Die Messezeit ist entlang der X-Achse gezeigt und die Frequenz entlang der Y-Achse. Die Farbskala der Legenden stellt die ermittelten Rauschamplituden in dB (m/s) dar. Rechts werden einzelne Spektren für drei verschiedene Zeiten (6am., 12am., 12pm.) gezeigt. Diese bestimmten Zeiten werden durch die gepunkteten Linien links dargestellt.

Für Oberflächenstationen sind die in Wörnbrunn (Station „WBRU“) beobachtete Bodenunruheamplituden in diesem 48-Stunden Bereich die niedrigsten.

Das elektrische Rauschen bei 50 Hz ist ebenfalls leicht an den Abbildungen zu erkennen. Der Standort in Buchenhain, in Wörnbrunn, in Neuried und im Forstenrieder Park sind hier betroffen, da sich die Messgeräte nahe bei einer Spannungsleitung befinden. Im Neuried („FRIE“) ist dieses Signal hauptsächlich auf der dargestellte Z-Komponente beobachtet.

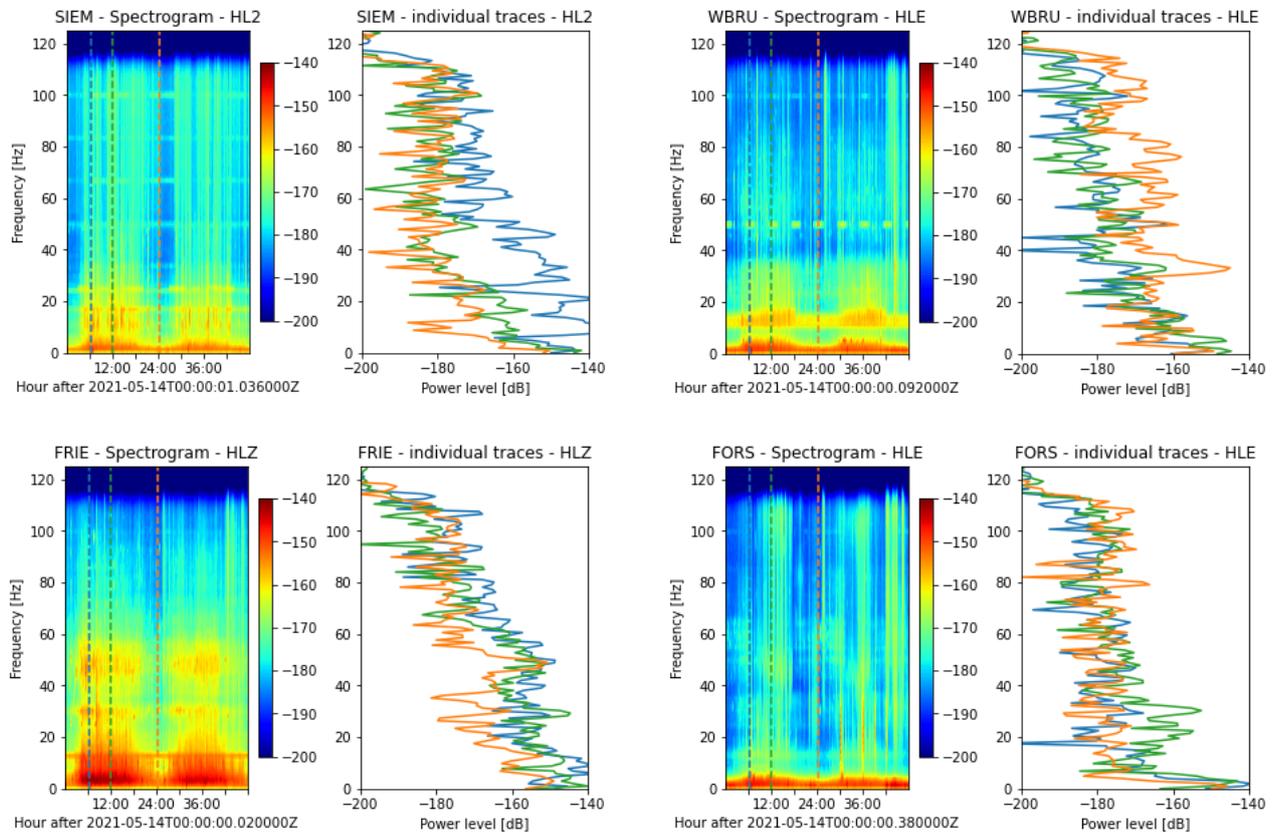


Abbildung 15: Wie Abbildung 14, für Messstelle in Siemensallee („SIEM“), Wörnbrunn („WBRU“), Waldfriedhof („FRIE“) und Forstenrieder Park („FORS“).

#### 4.2.2 PROBABILISTISCHE SPEKTRALE LEISTUNGSDICHTE

Abbildung 16, Abbildung 17, Abbildung 18, Abbildung 19 und Abbildung 20 zeigen die Pseudo-probabilistische spektrale Leistungsdichte der Bodenunruhe, die an den Standorte Buchenhain („BUCH“), Siemensallee („SIEM“), Wörnbrunn („WBRU“), Waldfriedhof („FRIE“) und Forstenrieder Park („FORS“) gemessen wurden. Im Gegensatz zu den Messungen im vorigen Teil sind wir nicht an einem begrenzten Zeitbereich interessiert, sondern an allen Daten, die seit der Installation der Stationen erfasst wurden. Die Analyse ist deshalb statistisch.

Die hellgraue Kurve die mit der Pseudo-probabilistische spektrale Leistungsdichte der Bodenunruhe gezeigt wird, stellt den gemessenen durchschnittlichen Rauschamplituden dar. Die schwarze Kurve zeigt das 95-Perzentil. Letzteres wird in Teil 5 verwendet, um die Station in Bezug auf die Frequenzkurve eines Ereignisses einer bestimmten Magnitude zu charakterisieren.

Wie beobachtet, liegt das durchschnittliche Rauschen an allen Standorten unter dem New High Noise Modell (NHNM - obere graue Linie) im Zielfrequenzband. Das 95-Perzentil überschreiten an manchen Stationen das Modell für niedrige Frequenzen (unter 0,1Hz). Dies ist auf den optimalen Betriebsbereich des verwendeten Trillium Compact TC 20 zurückzuführen.

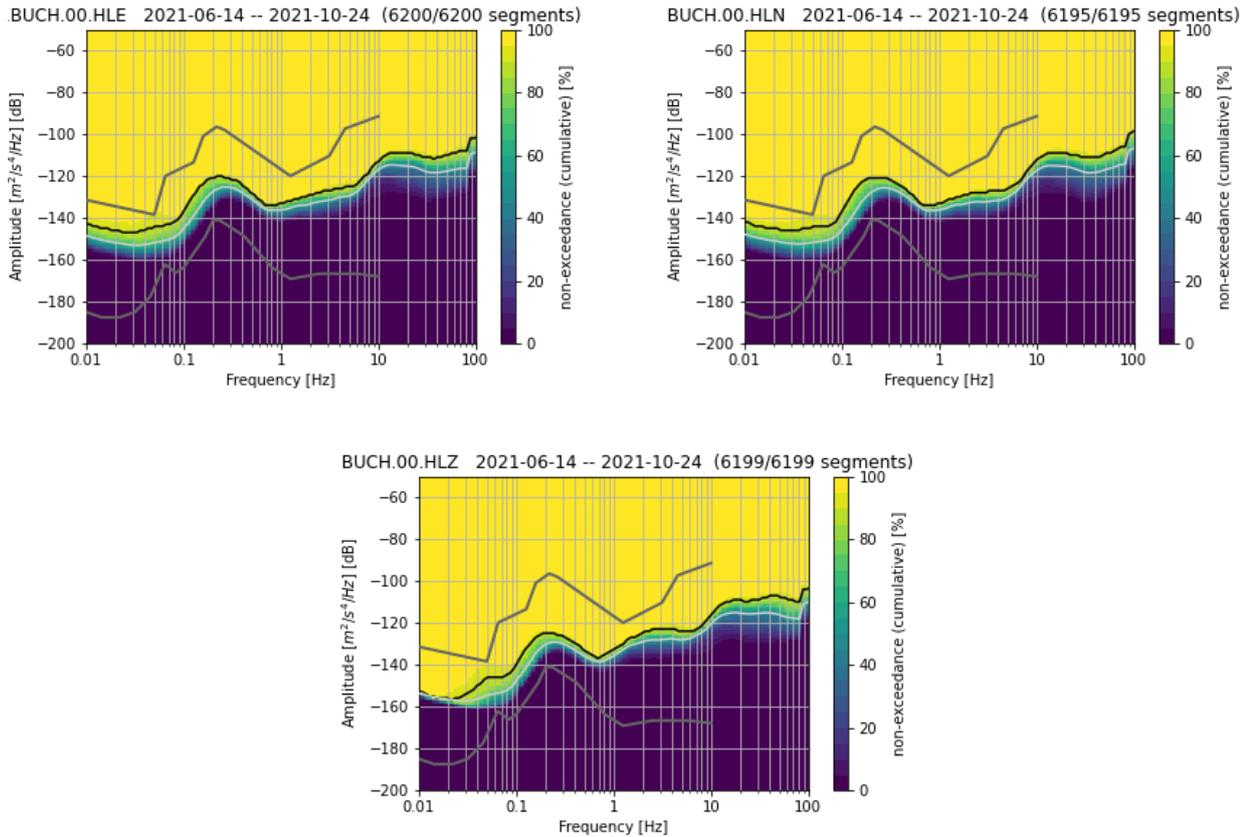


Abbildung 16: Standort Buchenhain. Pseudo-probabilistische spektrale Leistungsdichte der Bodenunruhe für die Ostkomponente (oben links), Nordkomponente (oben rechts) und Vertikalkomponente (unten). Für jedes Diagramm gibt die Farbskala die Wahrscheinlichkeit an, dass eine gegebene spektrale Amplitude (Y-Achse des Diagramms) bei einer gegebenen Frequenz (X-Achse) überschritten wird. Die hellgraue Kurve zeigt den gemessenen durchschnittlichen Rauschamplituden und die schwarze Kurve das 95-Perzentil. Diese beiden Kurven sollten innerhalb des Bereichs liegen, der durch die grauen Linien definiert ist. Diese Linien definieren die sogenannten „New Low- and High-Noise Models“ (Peterson, 1993).

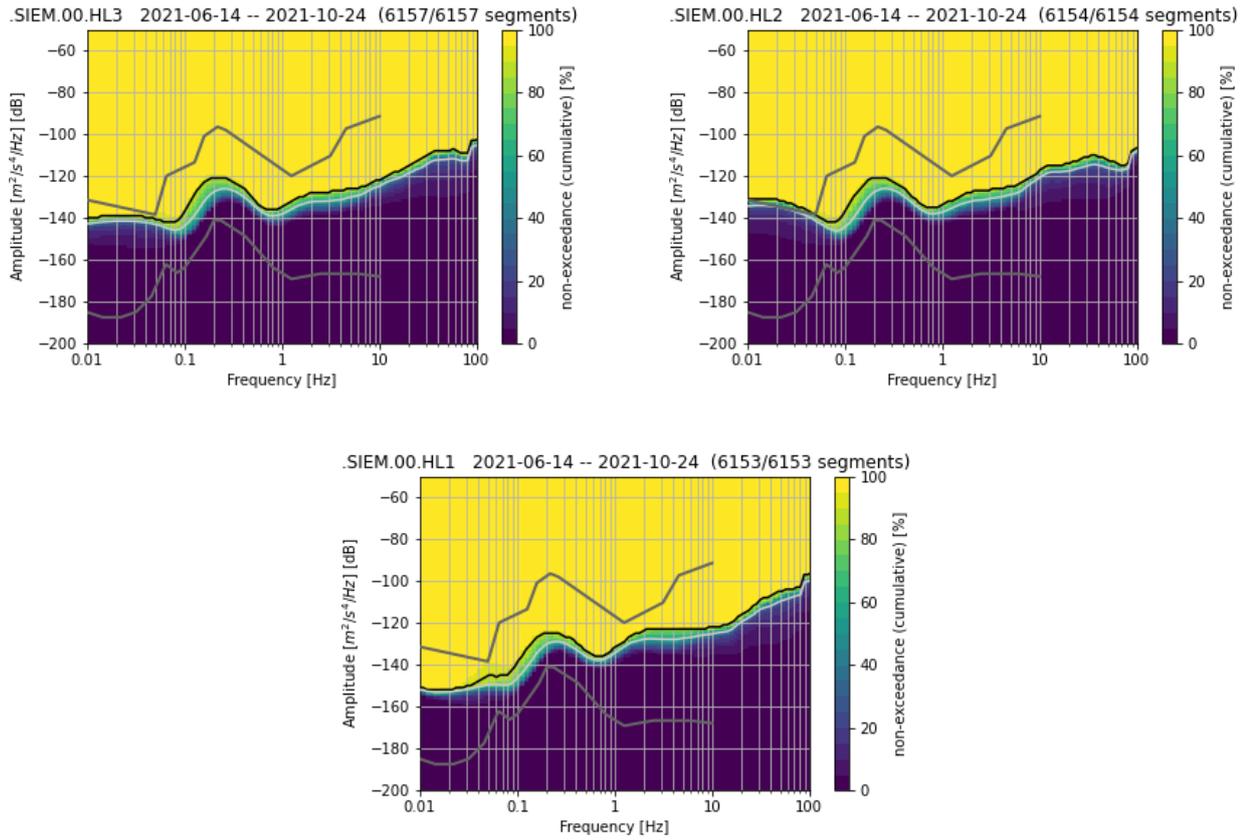


Abbildung 17: Wie Abbildung 16 aber für Siemensallee.

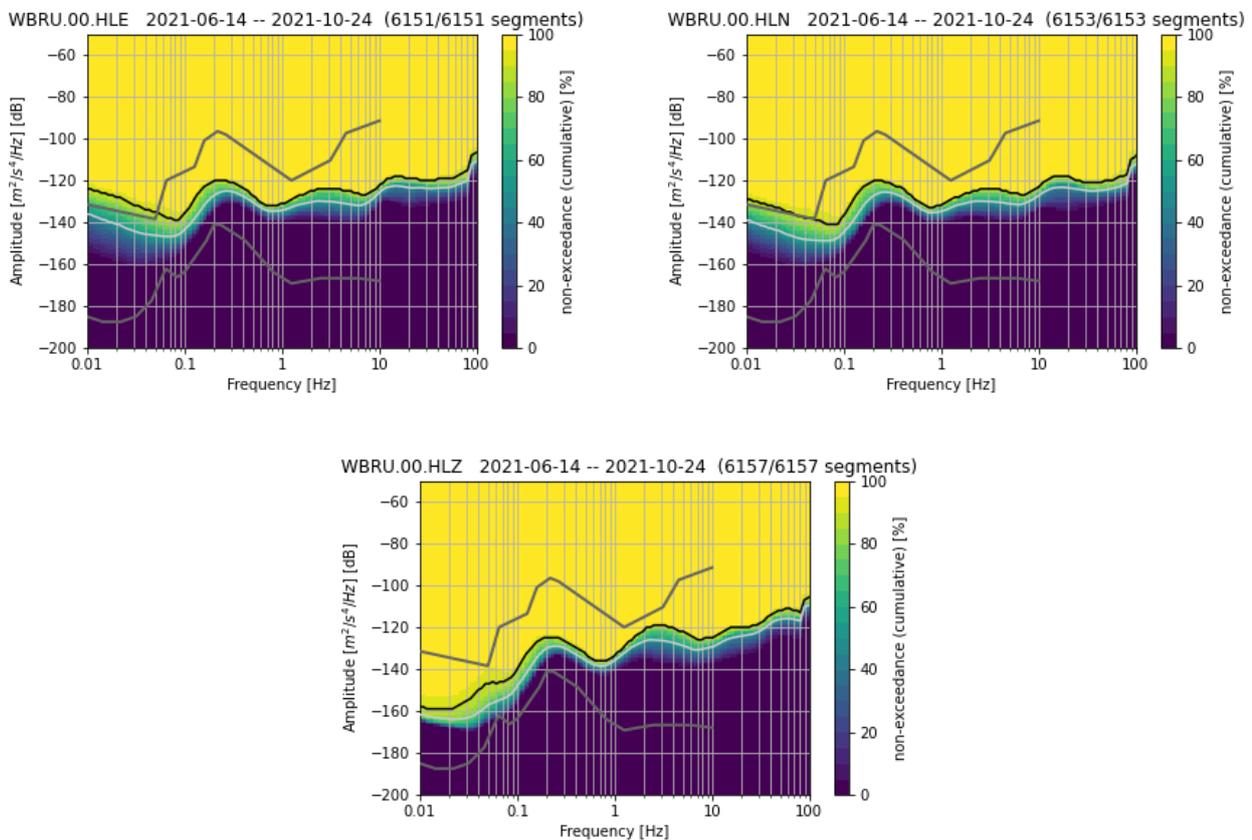


Abbildung 18: Wie Abbildung 16, aber für Wörnbrunn.

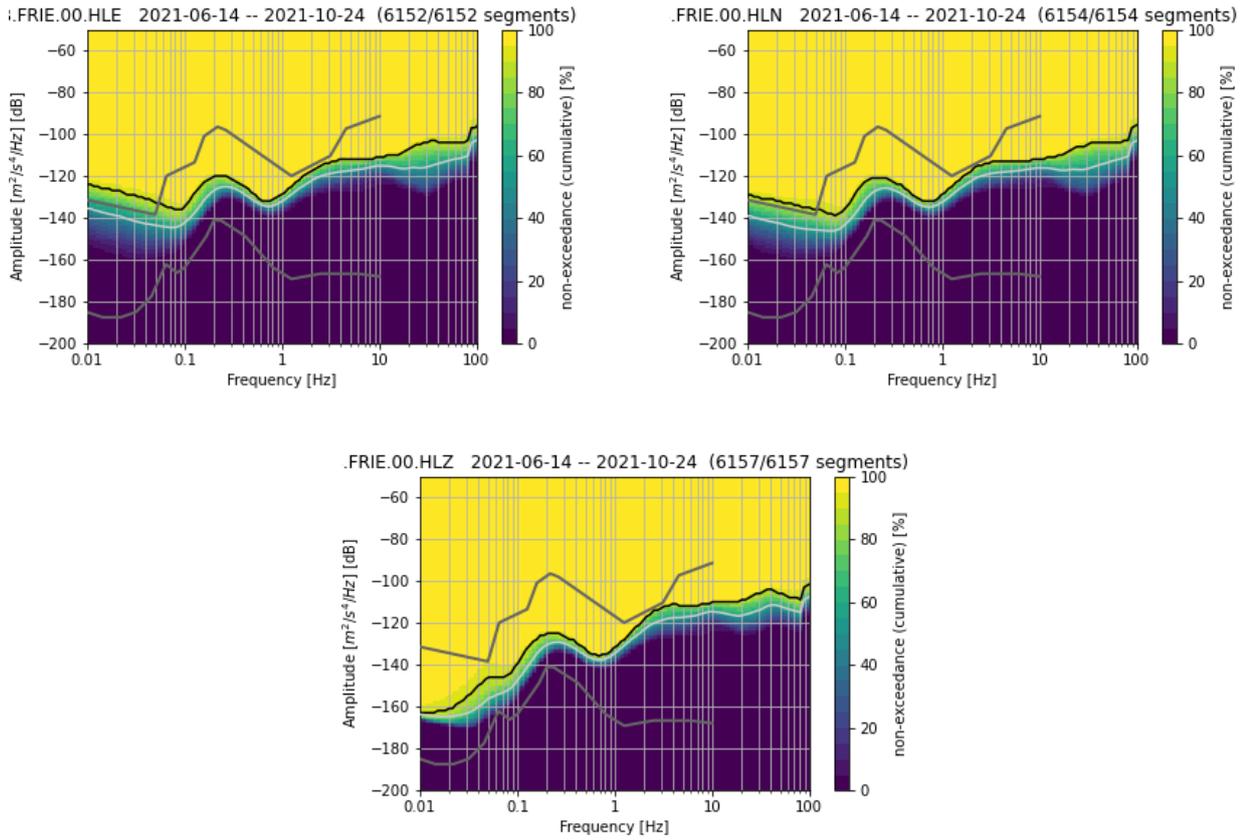


Abbildung 19: Wie Abbildung 16, aber für Waldfriedhof.

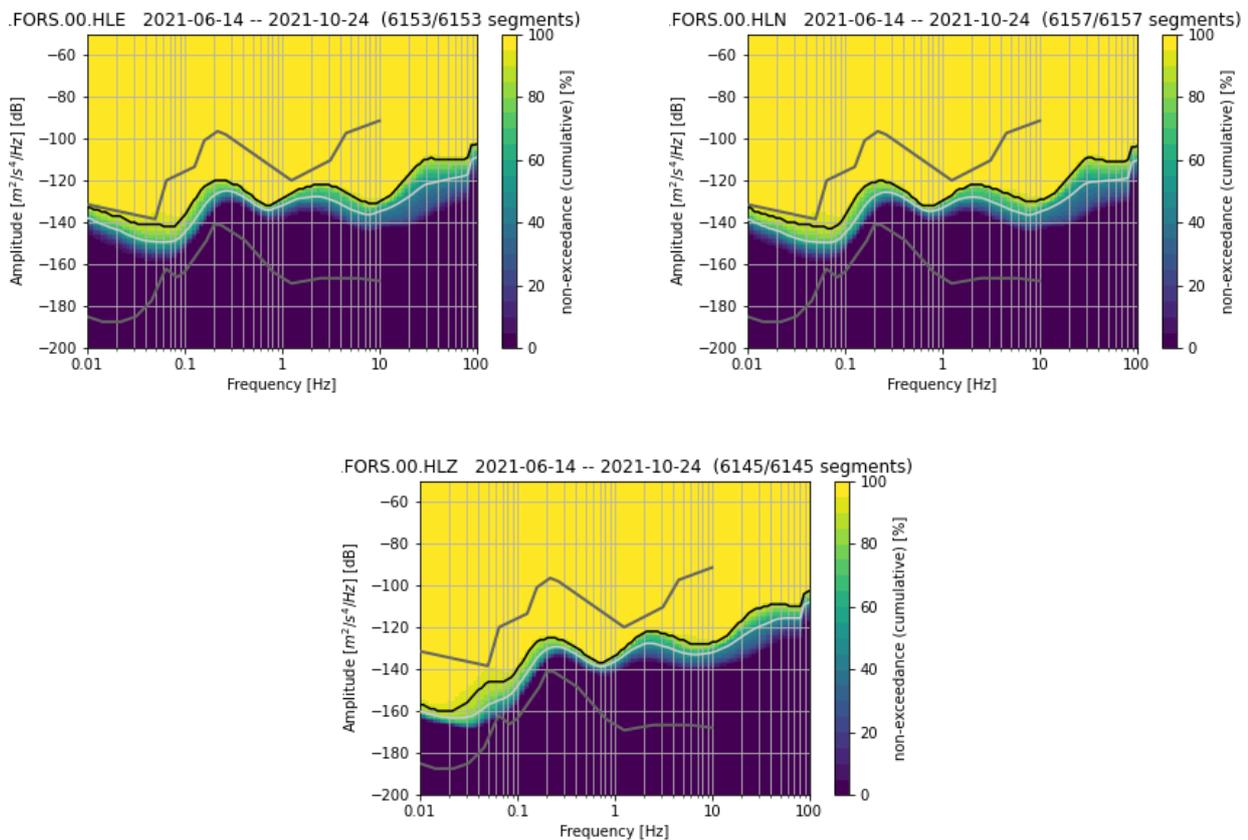


Abbildung 20: Wie Abbildung 16, aber für Forstenrieder Park.

## 5 THEORETISCHE MODELLIERUNG DER AUFLÖSUNGSFÄHIGKEIT DES SEISMISCHEN NETZWERKS

### 5.1 ALLGEMEINES ZUR MODELLIERUNG

Aus den Bodenunruhemessungen, die in Teil 4.2 präsentiert werden, sollen dann Einschränkungen für die Detektions- und Lokalisierungsfähigkeiten des Netzes abgeleitet werden. Diese Grenzen sind wichtige Parameter, die es ermöglichen, die tatsächliche Kapazität des Netzes zu bewerten.

Diese Parameter werden innerhalb eines Volumens theoretisch bewertet. An der Oberfläche deckt dieses Volum den Bereich von Pullach ab (Abbildung 21). In der Tiefe erstreckt sich diese Zone von 2250 m bis 2750 m (unter dem Meeresspiegel - MSL), und zielt deshalb auf das Reservoir. Es wird in der Simulation durch ein regelmäßiges Mesh mit einem Knotenabstand von 500 m dargestellt.

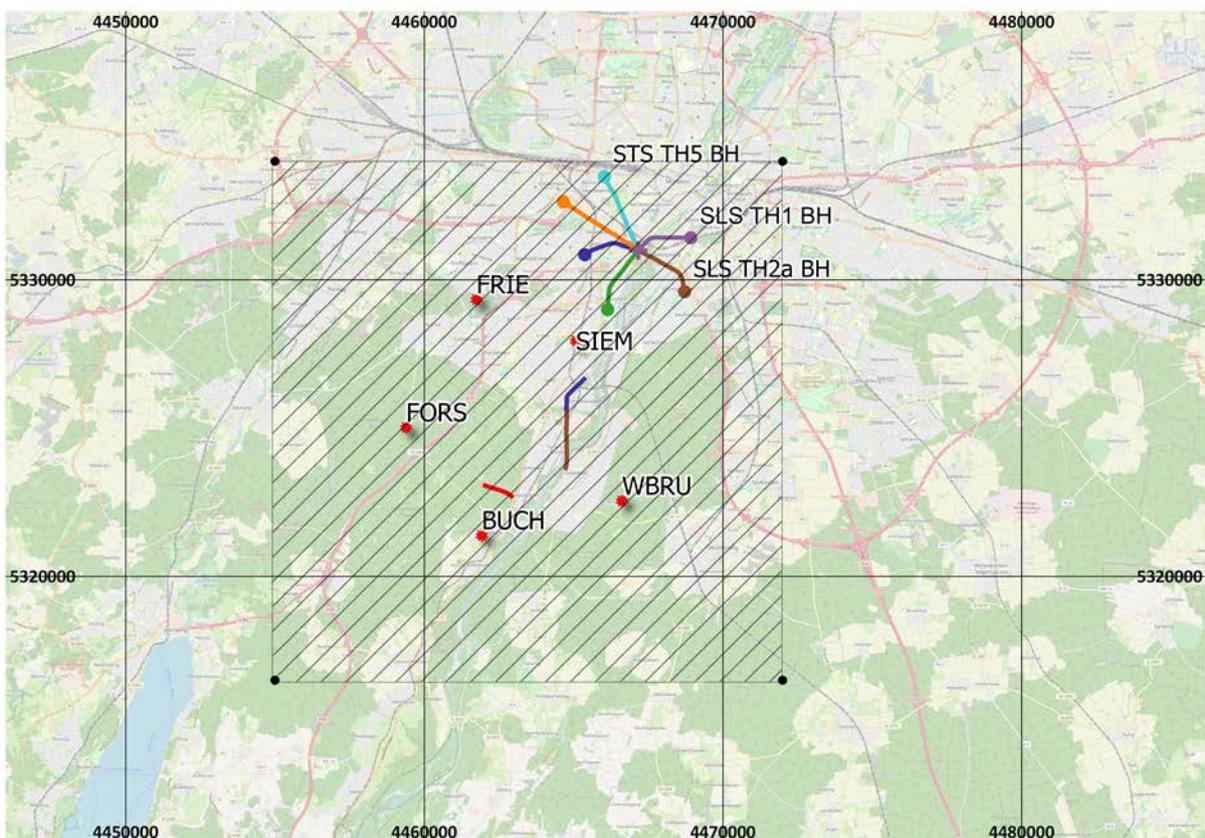


Abbildung 21: Das gestreifte Quadrat stellt den Oberflächenbereich dar, wo die Parameter ermittelt werden. Das Quadrat ist 16,5 km lang. Das Untersuchungsgebiet umfasst das Gebiet von Pullach und zielt auf das Reservoir in der Tiefe (von 2250 bis 2750 m, unter dem Meeresspiegel (MSL)).

Die Modellierungsparameter und wichtige Arbeitshypothesen sind hier zusammengefasst

#### Kriterium für die Detektion an P-Wellen:

- über die 5 - 40 Hz Frequenzbereich bewertet;
- das Quellsignal muss die dreifache Amplitude der Bodenunruhe überschreiten;

- die Amplitude der Bodenunruhe wird durch das 95. Perzentil der Daten, die während der Aufzeichnungsdauer an einer Messstelle erfasst wurden, bewertet. Die Bodenunruhe wird durch die gemessene vertikale Komponente beschrieben;
- das Quellsignal wird theoretisch bewertet (Boatwright et al., 1980);
- für eine Detektion wird mindestens 3 Pickings auf der vertikalen Komponente von verschiedenen Stationen benötigt.

#### **Kriterium für die Lokalisierung und Bewertung der Unsicherheit für eine Bestimmte Magnitude:**

- unter Berücksichtigung der Ergebnisse, die bei der Detektionsfähigkeiten in Teil 5.2 präsentiert werden, wird die Momentmagnitude des Ereignisses auf  $M_W = -0,7$  festgelegt;
- P-Wellen-Ankünfte werden in der vertikalen Komponente beobachtet. Unsicherheiten sind in Abhängigkeit vom Signal-Rausch-Verhältnis;

die Picking-Zeitunsicherheiten, den wir für die Lokalisierungsfähigkeiten bewerten wollen, variiert von 10 ms (in Verbindung mit ein Signal-Stör-Verhältnis größer als oder gleich 10), auf 5 s (für ein Signal-Stör-Verhältnis gleich 1).

## **5.2 MINIMALE MAGNITUDE ZUR DETEKTION**

### **5.2.1 METHODE**

Ein erster Schritt in der theoretischen Modellierung besteht darin, die minimale Ereignisenergie auszuwerten, die mit einer ausreichenden Anzahl von Stationen des Netzes detektiert und lokalisiert werden kann (d.h. hier drei Stationen, unter Berücksichtigung der Kriterien die in Teil 5.1 beschreiben werden).

Als ersten Schritt in diesem Prozess berechnen wir das theoretische Geschwindigkeitsspektrum eines Ereignisses, das in einer bestimmten Entfernung von einer gegebenen Station des Netzwerks auftritt. Die verwendeten Kriterien sind die, die bei Del Pezzo et al. (2013) vorgeschlagen wurden. Wir basieren die Berechnung der Quellspektren auf einem theoretischen Quellenmodell, das von Boatwright (1980) entwickelt wurde. Wir konzentrieren uns insbesondere auf den Frequenzbereich von 5 bis 40 Hz, in dem die Erkennung vermutlich stattfinden wird.

In diesem Frequenzbereich vergleichen wir die Amplituden der theoretischen Quellspektren, die verschiedenen Momentmagnituden  $M_W$  entsprechen, mit den Amplituden eines Spektrums, das die Detektionsschwelle definiert und das aus der Bodenunruhemessungen berechnet wird (siehe Abteilung 4.2). Für jede Station berechnen wir einen Schwellenwert, der das Dreifache des 95. Perzentils der spektralen Leistungsdichte (PSD) entspricht. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass das 95. Perzentil die Messstation charakterisiert, bedeutet dieses Verhältnis von drei, dass die Detektion eines Ereignisses ein Signal-Stör-Verhältnis (SNR) von 3 erfordert.

An jeden Standort des Meschens definieren wir für jede Station eine Cut-Off-Magnitude. Die Detektionsschwelle ist die Magnitude, bei welcher das Schwellenspektrum und das Spektrum der Quelle in dem gewünschten Frequenzbereich sich treffen. Diese limitierende Magnitude wird hier  $M_{W, lim}$  notiert. Für die Station „FRIE“ und einen gegebenen Ereignisort veranschaulicht Abbildung 22 das Verfahren zur Definition der Magnituden-Detektionsschwelle.

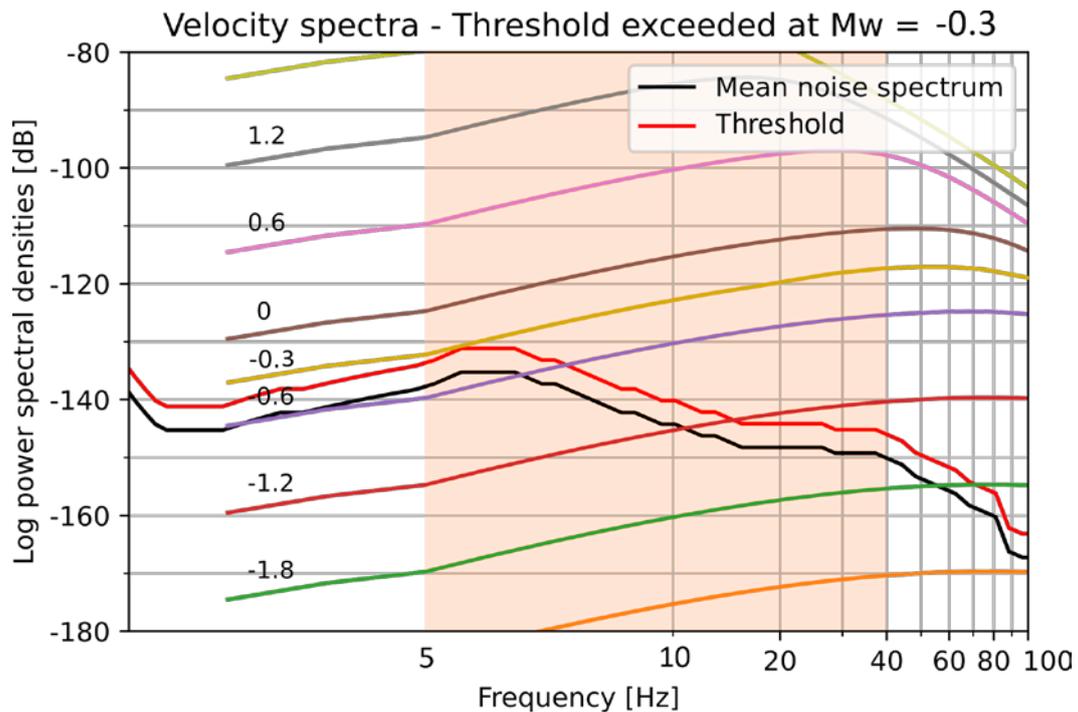


Abbildung 22: Spektrale Leistungsdichten für die Station „FRIE“. Für eine gegebene Entfernung zu der Station zeigen die farbigen Linien das Spektrum, das für Quellen unterschiedlicher Momentmagnitude  $M_w$  berechnet wurde. Die rote Linie zeigt das Cut-Off-Spektrum, das aus dem Bodenunruhemessungen an der Zielstation berechnet wurde. Es wurde 3-mal das 95. Perzentil der gemessenen Rauschamplituden (d.h. die schwarze Linie, die bereits in Abbildung 16 - Abbildung 20 dargestellt werden) berechnet. An diesem Standort und für die untersuchte Station wäre die limitierende Magnitude  $M_{w, lim} = -0,3$ .

Wir gehen davon aus, dass 3 verschiedenen Pickings auf dem P-Wellen (erfasst an drei Stationen) erforderlich sind, um ein Ereignis einer bestimmten Magnitude zu detektieren. Wir definieren deshalb die **minimale** Magnitude, die man mit einer ausreichenden Anzahl von Stationen detektiert kann, als die drittniedrigste Schwellenamplitude  $M_{w, lim}$ , die wir in der gleichen Weise wie in Abbildung 22 für jede Station im Netz erhalten haben. Abbildung 23 zeigt die räumliche Variation der minimalen Magnitude, die aus den Aufzeichnungen des Netzes detektiert werden konnte. Die erhaltenen Werte werden in zwei horizontalen Flächen abgebildet. Die Karte, die für eine größere Tiefe von 2750 m (unter MSL) erhalten wurde, ist Abbildung 24 dargestellt.

## 5.2.2 ERGEBNISSE

Innerhalb des Netzwerks schätzen wir die minimale Ereignisenergie, die von drei Stationen im Netzwerk detektiert werden auf eine (Momenten-) Magnitude  $M_w = -1$ . Rund um des Stationsbereichs erreicht dieser Parameter einen Wert von  $-0,7$ , im Studiengebiet.

Dieser Netzwerkparameter entspricht den Empfehlungen der FKPE, der die Detektion von Ereignissen der Magnitude 1 empfiehlt (Arbeitsgruppe „Induzierte Seismizität“ FKPE e.V. et al., 2012; Groos and Ritter, 2009). Diese Ergebnisse bleiben in einer Tiefe von 2750 m unverändert (vgl. Abbildung 24).

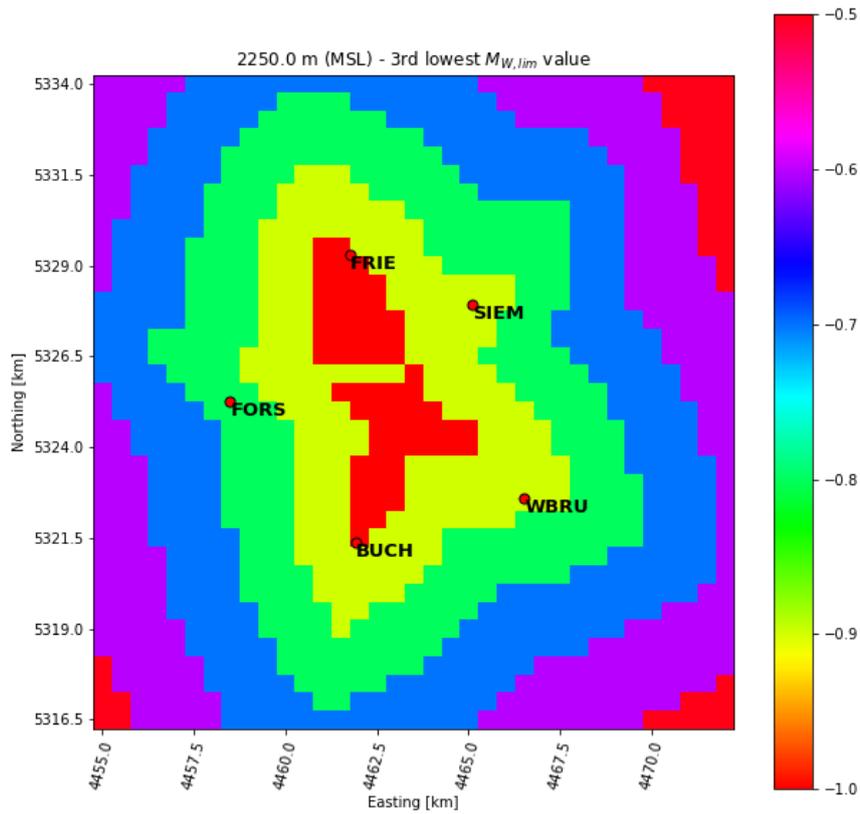


Abbildung 23: Karte in einer Tiefe von 2250 m - An jedem Ort des Studiengebiets berechnen wir für jede Station einen Schwellenwert für die Detektion eines Ergebnisses (hier  $M_{W,lim}$  notiert). Der drittniedrigste Wert gilt als die minimale Ereignismagnitude, die mit drei verschiedenen Stationen detektiert werden kann.

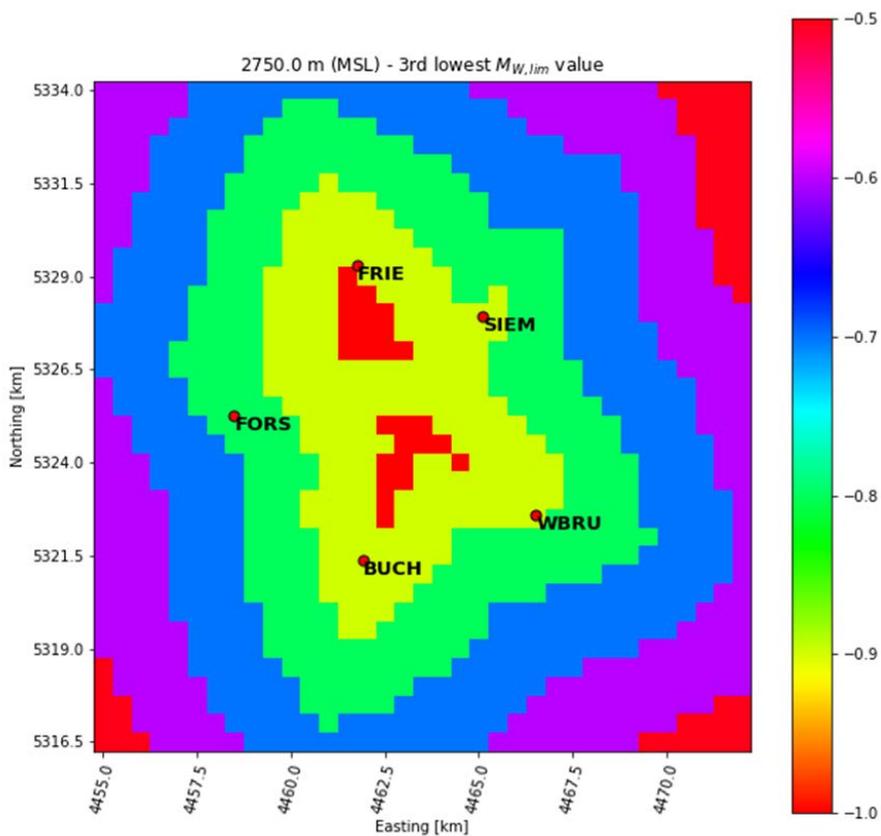


Abbildung 24: Wie Abbildung 23, aber für eine Tiefe von 2750 (unter MSL).

## 5.3 UNSICHERHEIT DER LOKALISIERUNG FÜR EINE BESTIMMTE MAGNITUDE

### 5.3.1 METHODE

Ein zweiter Schritt im Modellierungsprozess besteht in der Festlegung von Beschränkungen für die Lokalisierung der Ereignisse. Dazu setzen wir die Energie des Erdbebens auf  $M_w = -0,7$ , d.h. ein Grenzwert für das Studiengebiet, entsprechend der Abbildung 23.

An jeden Standort benutzen wir das entsprechende Quellenspektrum und die Bodenunruhemessungen eine gegebene Station, um das Signal-Stör-Verhältnis (SNR) zu abschätzen (Abbildung 25, links).

*Anmerkung: Durch die Geschwindigkeitsspektren analysieren wir ein Signal, das uns das Quadrat des Signal-Rausch-Verhältnisses ( $SNR^2$ ) berechnen lässt.*

Die Verhältnisse werden schließlich in Fehler bei der Erfassung der Ankünfte des P- Wellenzuges,  $dT$ , umgerechnet (Abbildung 25, rechts). Wie beschreibt in Teil 5.1 verwenden wir zu diesem Zweck eine inverse Funktion, so dass:

- Wenn  $SNR \leq 1$ ,  $dT = 5$  s,
- Wenn  $SNR \geq 10$ ,  $dT = 10$  ms,
- Wenn  $1 < SNR < 10$ ,  $dT \propto 1 / (SNR - 1)$ .

Diese Karten sind daher von den Geräuschpegeln, die an eine bestimmte Messstelle aufgezeichnet wurden, abhängig.

### 5.3.2 ERGEBNISSE

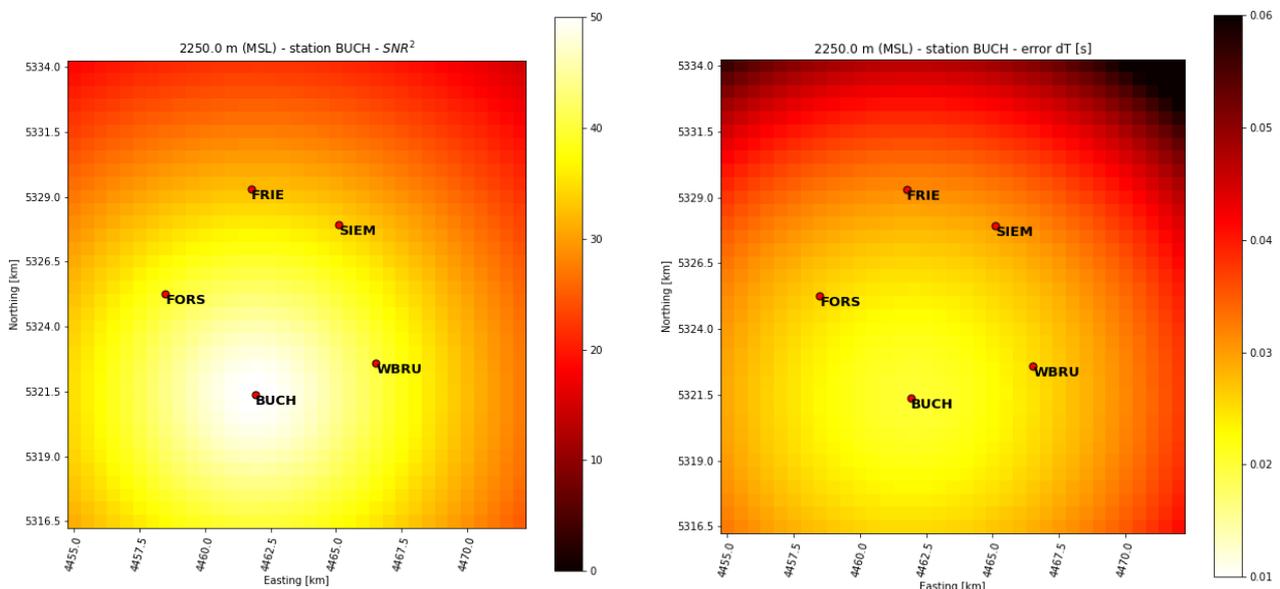


Abbildung 25: Karte in einer Tiefe von 2250 m - Station Buchenhain („BUCH“) - An jedem Ort des Studiengebiets vergleichen wir die Bodenunruhemessungen einer bestimmten Station mit dem theoretischen Spektrum eines Erdbebens einer gegebenen Magnitude. Aus den Bodenunruhe- und Quellenspektren erstellen wir das entsprechende Signal-Stör-Verhältnis (links). Schließlich weisen wir jedem SNR-Wert einen bestimmten Pickingfehler  $dT$  zu (links).

Für eine gegebene Magnitude entwickelt sich das Signal-Stör-Verhältnis in logischer Weise mit der Entfernung zu der untersuchten Station. Für jede Station bewerten wir die räumliche Entwicklung des Fehlers bei dem Picking der P-Wellen Ankünfte, für ein Ereignis der Magnitude  $M_W = -0,7$ . Für Station „BUCH“ evolviert dieser Fehler im Bereich des Netzes von 10 ms (untere Schwelle) bis zu 40 ms im Stationsgebiet und 60 ms im erweiterten Studiengebiet.

Für die anderen Messstellen des seismischen Netzes sind die Ergebnisse ähnlich. Die räumliche Verteilung dieser  $dT$ -Fehler ist besonders vorteilhaft für die Messstellen „WBRU“.

Im Studiengebiet verursacht die Station „FRIE“ die höchsten  $dT$ -Fehlern, in dem untersuchten Frequenzband. Dies ist auch der Ort, an dem das Hintergrundbodenunruhe im gewünschten Frequenzband am stärksten ist (siehe Abbildung 19). Es ist zu beachten, dass sich unsere Analyse auf das Frequenzband von 5 bis 40 Hz konzentriert, wo diese Stationen empfindlich gegenüber anthropogenem Lärm sind.

## 5.4 FAZIT

Die in dem Teil 5 beschriebene Methode bewertet die Erkennungs- und Lokalisierungsfähigkeiten des Netzes in einem Radius von etwa 10 km, mit Fokus auf das Frequenzband von 5 bis 40 Hz und der Erkennung von P-Wellen-Ankünften.

Innerhalb des Netzwerks schätzen wir auf  $M_W = -0,7$ , die minimale Ereignisenergie, die von drei Stationen im Netzwerk detektiert werden kann.

Für jede Station bewerten wir die räumliche Entwicklung des Fehlers bei dem Picking der P-Wellen Ankünfte für ein Ereignis der Magnitude  $M_W = -0,7$ . Für Station „BUCH“ evolviert zum Beispiel dieser Fehler im Zielbereich des Netzes von 10 ms bis zu 40 ms im Stationsgebiet.

In diesem Teil des Berichts schlagen wir einen theoretischen Ansatz vor, der die Anwendung von theoretischen Kriterien erfordert. Es wird interessant sein zu sehen, wie diese Kriterien und Ergebnisse mit realen Daten umgesetzt werden.

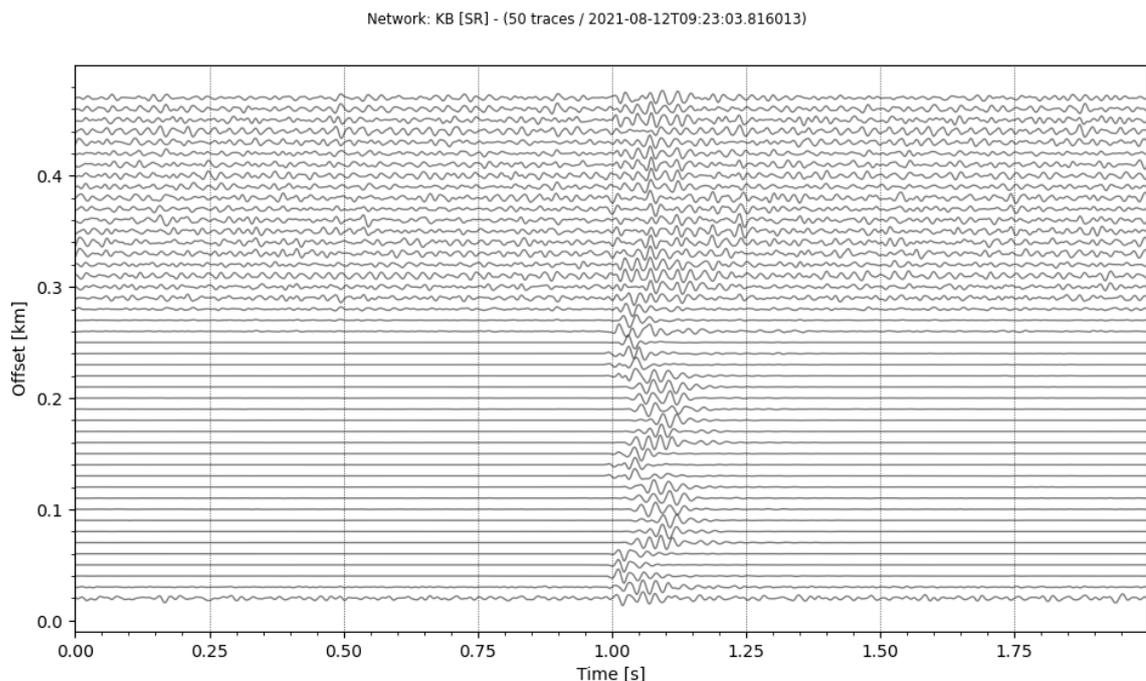
## 6 DAS-MESSSTELLE INBETRIEBNAHME

Nach der Installation der Messstation wurde ein Hammertest durchgeführt. Die Hammerschläge wurden auf ein Metallteil oberhalb des Bohrlochs ausgeführt. Das erzeugte Signal wird entlang der Glasfaserkabel erfasst, d. h. an den beiden Oberflächenschleifen und in der Bohrung.

In Abbildung 26 wird das Signal, das mit dem Hammerschlag verbunden ist, in einem 2 s Fenster dargestellt. Die Messungen zeigen, dass das zugehörige Signal über die gesamte Länge des Kabels an der Oberfläche, aber auch in der Tiefe des Bohrlochs aufgezeichnet wird. In Abbildung 26 ist zu beachten, dass die Amplituden Spur für Spur normalisiert sind, was die relativen Amplituden nicht wiedergibt.

Die ersten Ankünfte werden entlang des in der Nähe des Schachts verlegten Kabels erfassen (bei etwa 1 s und etwa 0,04 km, 0,16 km und 0,28 km). Die Bereiche zwischen diese Positionen definieren die beiden Oberflächenschleifen. Bei mehr als 0,2 km befindet sich das Kabel im Bohrloch.

Dieser Test zeigt, dass das vom Hammer erzeugte Signal bis nach unten im Bohrloch aufgezeichnet wird, und dass das DAS-System funktionsfähig ist.



**Abbildung 26: Darstellung des 2D-Datensets (Entfernung entlang des Kabels / Zeit) für einen bestimmten Hammertest.**

Eine umfassendere Bewertung der Kapazitäten der Messstation und des Geräuschpegels ist in diesem Bericht nicht enthalten.

## LITERATURVERZEICHNIS

- Arbeitsgruppe „Induzierte Seismizität“ FKPE e.V., Baisch, S., Fritschen, Ralf, Groos, J.C., Kraft, T., Plenefisch, Thomas, Plenkens, K., Ritter, J., Wassermann, J., 2012. Empfehlungen zur Überwachung induzierter Seismizität: Positionspapier des FKPE. DGG - Mitteilung 17–31.
- Baisch, S., Fritschen, R., Groos, J.C., Kraft, T., Plenefisch, T., Ritter, J., Wassermann, J., 2011. Richtlinie GtV 1101: Seismizität bei Geothermieprojekten, Blatt 1 “Seismische Überwachung,” <http://www.geothermie.de/service/publikationen/richtlinien-studien-hintergrund-und-positionspapiere.html>. GtV-Bundesverbandes Geothermie e.V.
- Boatwright, John. , 1980. A spectral theory for circular seismic sources: Simple estimates of source dimension, dynamic stress drop and radiated energy. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 70. 1-27.
- Del Pezzo, E., Bianco, F., Castellano, M., Cusano, P., Galluzzo, D., La Rocca, M., Petrosino, S., 2013. Detection of Seismic Signals from Background Noise in the Area of Campi Flegrei: Limits of the Present Seismic Monitoring. *Seismological Research Letters* 84, 190–198. <https://doi.org/10.1785/0220120062>
- Groos, J.C., Ritter, J.R.R., 2009. Time domain classification and quantification of seismic noise in an urban environment. *Geophysical Journal International* 179, 1213–1231. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04343.x>
- Lomax, A., Michelini, A., Curtis, A., 2009. Earthquake Location, Direct, Global-Search Methods, in *Complexity In Encyclopedia of Complexity and System Science*, Part 5, Springer, New York, pp. 2449-2473, doi:10.1007/978-0-387-30440-3.),
- Peterson, J.R., 1993. Observations and modeling of seismic background noise, Open-file report. U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/ofr93322>

## ANHANG

### BESCHREIBUNG DER TEILAUFGABE AP1.2 „SEISMISCHES MONITORING“

Wie im Teilvorhaben beschrieben (INSIDE\_AGW\_4), enthält das Arbeitspaket AP1.2 „Seismisches Monitoring“ folgenden Inhalt:

- *Konzeptionierung*, Design und Auslegung der seismischen Monitoring-Netzwerke unter Berücksichtigung der lokalen Anforderungen und Regularien (GtV-Richtlinien, FKPE-Positionsplan) und den bekannten Reservoir Daten (AP1.1). Bereitstellung und temporärer Einbau zusätzlicher, seismischer Stationen während der gesamten Projektlaufzeit, um die Detektions- und Lokalisierungsempfindlichkeit des Netzwerkes zu erhöhen und damit einen zusätzlichen Mehrwert zur Reservoir Charakterisierung liefern zu können.
- *Identifikation* und Auswahl von geeigneten Standorten für die Installation von seismischen Stationen im Feld auf Basis der Bewertung des seismischen Hintergrundrauschens (*seismic noise*). Modellierung der Detektions- und Lokalisierungsempfindlichkeit des vorgeschlagenen Netzwerk-Designs unter Verwendung weiterer Stationen außerhalb des Projektes, z.B. DIN-FKPE Oberflächen Stationen, MAGS Stationen.
- *Standortsuche* für eine neu niederzubringenden Monitoringbohrung (Tiefe ca. 200 m) und Installation einer noise-armen seismischen Tiefenstation.
- *Aufbau* eines geeigneten, seismischen Echtzeit-Monitoring-Netzwerks in der Umgebung der Geothermiestandorte Schäftlarnstrasse, Pullach und des noch in der Entwicklung befindlichen Standorts Baierbrunn (Emissionsnetzwerk). Nutzung und Installation von verschiedenen technischen Lösungen zum seismischen Monitoring: Oberflächen-Geophone; Oberflächen-Mini-Netzwerk (Mini-Array), Bohrloch-Geophone in der Monitoringbohrung (Tertiärbohrung) und die DAS / DSS / DTS Sensorik in der Monitoringbohrung.
- *Wartung* des installierten seismischen Echtzeit-Monitoring-Netzwerks zur Qualitätssicherung der durchgeführten Messungen.

Diese Arbeiten werden in Übereinstimmung und in Kooperation (Daten-, Ergebnis-, Erfahrungsaustausch) mit der LMU durchgeführt, welche das regionale, permanente Monitoring-Netzwerk in der Region errichtet und eine Reihe von seismologischen Detailstudien durchgeführt haben. Dadurch können die Ergebnisse beider Monitoring-Netze einheitlich interpretiert und gebündelt werden.