



# INSIDE

Stadtwerke München GmbH  
Innovative Energie Pullach  
Karlsruher Institut für Technologie



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

---

## SEISMISCHES NETZWERK INSIDE: PLANUNGS- UND DESIGNPHASE

---

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: Planungs- und Designphase
<b>Arbeitspaket:</b>	AP1: Basisdatenerhebung und Datenaufnahme
<b>Meilenstein:</b>	M1.2.1
<b>Fälligkeitsdatum:</b>	03.2020
<b>Tatsächliches Datum:</b>	07.08.2020
<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 : J. Azzola, E. Gaucher
<b>Version:</b>	2.0

Version	Datum	Beschreibung der Ergänzungen, Änderungen, Überprüfungen
1.0	04.08.2020	Erste geteilte Version
2.0	07.08.2020	Sprachkorrekturen

# INHALTSVERZEICHNIS

1. ZUSAMMENFASSUNG.....	6
2. EINLEITUNG .....	7
3. NETZWERK DESIGN.....	7
3.1. Kriterien für die Standortwahl .....	7
3.2. Standortwahl .....	8
3.3. Seismische Beobachtungsstationen.....	9
3.3.1. Übersicht .....	9
3.3.2. Design der Oberflächenstationen .....	9
3.3.3. Design der Bohrlochstationen .....	11
3.3.4. Glasfaserkabelstationen: DAS/DTS und DTSS .....	12
3.3.5. Design der Mini-Array.....	13
3.4. Data Management .....	15
3.4.1. Datenübertragung .....	15
3.4.2. Volum der Daten.....	16
4. MESSUNG DER HINTERGRUNDBODENUNRUHE .....	17
4.1. Messverfahren .....	17
4.2. Ergebnisse.....	19
4.2.1. 195 Werte der Bodenunruhe.....	19
4.2.2. Amplitudenspektrum der Bodenunruhe.....	20
4.3. Fazit.....	26
5. THEORETISCHE MODELLIERUNG DER AUFLÖSUNGSFÄHIGKEIT DES NETZWERKS.....	27
5.1. Allgemeines zur Modellierung .....	27
5.2. Minimale Magnitude zur Detektion.....	28
5.2.1. Methode.....	28
5.2.2. Ergebnisse.....	29
5.3. Unsicherheit der Lokalisierung für eine bestimmte Magnitude .....	30
5.3.1. Methode.....	30
5.3.2. Ergebnisse.....	31
5.4. Unsicherheit der Lokalisierung für Magnitude = -1 .....	32
5.4.1. Methode.....	32
5.4.2. Ergebnisse.....	33
5.5. Fazit.....	33
LITERATURVERZEICHNIS.....	34
ANHANG.....	34
Beschreibung der Teilaufgabe AP1.2 „Seismisches Monitoring“ .....	34
Zusätzliche Figuren.....	35

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: 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. ....	8
Abbildung 2: Schematische Erläuterung des Prinzips der Installation des Seismometers an der Oberfläche (oben) und Beispiele realer Fälle (rechts).....	10
Abbildung 3: Beispiel von einem seismischen obertägigen Gehäuse. ....	11
Abbildung 4: Beispiel eines Solarpanelrahmens im Feld.....	11
Abbildung 5: Geplante Lokalisierung der 9 Seismometer, aus denen das Mini-Array besteht. ....	14
Abbildung 6: Netzwerk-Response des geplante Mini-Arrays. ....	14
Abbildung 7: Schematische Darstellung der Übertragung und Speicherung seismischer Rohdaten. Die gepunkteten Linien zeigen die manuell auf den Server zu kopierenden Daten an. Die gestrichelten Linien zeigen die automatisch (pseudo real-time) auf dem Server auflaufenden Daten an. ....	15
Abbildung 8: Lage der fünf Standorte, an denen seismische Stationen installiert werden sollen und an denen Messungen zur Ermittlung der Hintergrundbodenunruhe erfolgten. Von Süden nach Norden: Buchenhain (BUCH), Wörnbrunn (WBRU), Forstenrieder Park (FORS), Siemensallee (SIEM) und Waldfriedhof (FRIE).....	17
Abbildung 9: Bild der Ausrüstung, die zur Messung der Hintergrundbodenunruhe verwendet wird und die für mehrere Stunden vergraben wird.....	18
Abbildung 10: Gemessene Bodenunruhe an den geplanten seismischen Stationen, dargestellt als statistische Verteilung von 195 Werten in 30-minütigen Zeitfenstern über den Zeitraum der Messung (ca. zwischen 21 und 45 Stunden). Die Messungen sind für die horizontalen Komponenten ((a), die Ostkomponenten (b), die Nordkomponenten) und für die vertikalen Komponenten (c) dargestellt. Die Striche reichen bis zu den extremen Datenpunkten (min / max den 195 Daten). 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. ....	19
Abbildung 11: Links: Spektrogramme der gemessenen Bodenunruhe. Die Messzeit ist entlang der X-Achse, die Frequenz entlang der Y-Achse gezeigt. Die Farbskala der Legenden stellt die ermittelten Rauschamplituden in dB (m/s) dar. Rechts: einzelne Spektren für drei verschiedene Zeiten, dargestellt durch die gepunkteten Linien links. 50 dB werden zu jedem einzelnen Spektrum addiert, um sie zu unterscheiden. Die Standorte von oben nach unten sind: Buchenhain („BUCH“), Siemensallee („SIEM“), Wörnbrunn („WBRU“), Waldfriedhof („FRIE“) und Forstenrieder Park („FORS“).....	22
Abbildung 12: 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).....	23
Abbildung 13: Wie Abbildung 12 aber für Siemensallee. ....	24

Abbildung 14: Wie Abbildung 12 aber für Wörnbrunn. ....	24
Abbildung 15: Wie Abbildung 12 aber für Waldfriedhof. ....	25
Abbildung 16: Wie Abbildung 12 aber für Forstenrieder Park. ....	25
Abbildung 17: 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)).....	27
Abbildung 18: Spektrale Leistungsdichte für die Station in Wörnbrunn „WBRU“. 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 den Abbildungen 12 bis 16 dargestellt werden) berechnet. An diesem Standort und für die untersuchte Station wäre die limitierende Magnitude $M_{W, lim} = 0.2$ . ....	29
Abbildung 19: 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 Ereignisenergie, die mit drei verschiedenen Stationen detektiert werden kann. ....	30
Abbildung 20: 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).....	31
Abbildung 21: Die Zusammenstellung der Daten aus den Sonic-Logs und den Horizonten des GRAME-Projekts ermöglicht ein Geschwindigkeitsmodell aufzustellen, dessen horizontale Schichten einen konstanten Geschwindigkeitsgradienten aufweisen.....	32
Abbildung 22: An jedem Ort des Studiengebiets berechnen wir aus den $dT$ -Fehlern die maximale Wahrscheinlichkeitsfläche für den Ereignisort (berechnet als Konfidenz-Ellipsoid). Wir stellen der räumlichen Variation der maximale horizontale Länge des Ellipsoids dar.....	33
Abbildung 23: Wie Abbildung 19, aber für eine Tiefe von 2750 (unter MSL). ....	35
Abbildung 24: Karte in einer Tiefe von 2250 m – Wie Abbildung 20, aber für die Stationen „WBRU“, „FORS“, „SIEM“ und „FRIE“ .....	36

## TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Art der seismischen Stationen, die an den verschiedenen Standorten installiert werden. ....	9
Tabelle 2: Schätzung des Volumens der seismischen Daten, die im Rahmen des Projekts erfasst werden sollen. ....	16
Tabelle 3: Angaben zu den Messungen der Hintergrundbodenunruhe, die zwischen dem 26. und 28. Mai 2020 stattfanden. ....	18

# 1. ZUSAMMENFASSUNG

Dieses Dokument gilt als Ergebnis des Meilensteins M1.2.1 des INSIDE-Projekts und befasst sich mit der Planung und dem Entwurf des seismischen Netzwerks. 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 Netzwerk soll fünf seismische Stationen umfassen, von denen zwei in Monitoring-Bohrungen in einer Tiefe von 100 bis 200 m installiert werden.

Wir berichten hier zuerst über die Entwurfsphase des Netzes. Wir stellen die fünf Standorte vor, die die Auswahlkriterien erfüllen und deshalb 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, die für die Installation der Messstationen eingesetzt werden sollen, werden ebenfalls vorgestellt.

Wir präsentieren und diskutieren dann die Hintergrundbodenunruhe (Noise-) Messkampagne, die im Mai 2020 nach den Empfehlungen für den Themenkomplex „Seismische Überwachung“ der Arbeitsgruppe „Induzierte Seismizität“ des Forschungskollegiums Physik des Erdkörpers e.V. (FKPE, Kontakt: [www.fkpe.org](http://www.fkpe.org)) durchgeführt und im Nachgang ausgewertet wurden. Ziel der Messungen war die Validierung der vorgeschlagenen Standorte hinsichtlich der zu erwartenden Detektions- und Lokalisierungsfähigkeiten des Netzwerks. An jedem geplanten Standort wurden die Bodenunruhemessungen statistisch verarbeitet (statistische Verteilung von 195 Werten). Die Frequenzverteilung des Rausches wurde analysiert (Berechnung des Spektrogramms und der probabilistischen Leistungsdichte) und die Detektions- und Lokalisierungsfähigkeit jeder geplanten Station theoretisch ermittelt.

Unter Berücksichtigung der verschiedenen analysierten Kriterien, ist der Standort in Wörnbrunn am wenigsten von anthropogenem Geräusch betroffen. Die Messstelle in der Siemensallee ist am empfindlichsten für Bodenunruhen. In der späteren Installation kann das tatsächlich vorliegende Hintergrundrauschen jedoch geringer sein, da die Station in eine Monitoring-Bohrung installiert werden soll. In unseren Simulationen ermöglicht das aus den fünf Stationen bestehende Netz die Detektion von Ereignissen mit einer Moment-Energie von mehr als  $M_W = -1.3$  (für ein Ereignis, das innerhalb des von den fünf Stationen beschriebenen Perimeters stattfindet). Außerhalb dieses Bereichs steigt die Detektionsschwelle auf  $M_W = -0.6$ . In Anbetracht der durchgeführten Messungen und Simulationen liegen im Gebiet von Pullach die theoretischen Fehler bei der horizontalen Lokalisierung eines Ereignisses mit einer Magnituden  $M_W = -1$  im Bereich von 400 bis 1400 m.

Wir bestätigen, dass die gewählten Standorte den Empfehlungen der FKPE für den maximalen Bodenunruhepegel entsprechen. Für die Messstelle im Forstenrieder Park empfehlen wir den Abstand zur Autobahn und zur Stromleitung, die Hauptquellen von Bodenunruhen sind, zu vergrößern.

Im Bericht wurden nicht die Detektions- und Lokalisierungsfähigkeiten des Mini-Arrays und der faseroptisch basierten Messungen bewertet, weil die Sensorik noch nicht aufgebaut bzw. installiert ist. Nach Vorliegen dieser Daten, werden die Fähigkeiten dieser akustischen Messungen mit denen von Standard-Seismometern auch verglichen.

## 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. Wir konzentrieren 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). Beide Aspekte beeinflussen die Gestaltung des Netzwerks sowie die Standardempfehlungen in diesem Bereich (Baisch et al., 2011; Arbeitsgruppe „Induzierte Seismizität“ FKPE e.V. et al., 2012). Darüber hinaus werden vorhandene seismische Überwachungsstationen in der Region berücksichtigt. Das INSIDE-Netzwerk soll Beobachtungspunkte nicht duplizieren, sondern vervollständigen.

## 3. NETZWERK DESIGN

### 3.1. KRITERIEN FÜR DIE STANDORTWAHL

Die grundlegenden Kriterien für die Auswahl der Positionierung der seismischen Messpunkte sind die folgenden:

- Hauptsächlich zentriert auf das Feld Pullach, aus dem derzeit gefördert wird
- Bereitstellung von Überwachungspunkten zusätzlich zu den bereits bestehenden (die zu anderen Projekten oder Einrichtungen gehören)
- Einhaltung der FKPE-Empfehlungen (Arbeitsgruppe „Induzierte Seismizität“ FKPE e.V. et al., 2012)
- Festlegung von fünf INSIDE-Standorten, wobei an einigen Standorte weitere Überwachungssysteme (z. B. Bohrloch-, Oberflächengeophon, Glasfaserkabel, geodätische Messstation) installiert werden können.

Neben diesen allgemeinen Kriterien sollten auch folgende berücksichtigt werden:

- minimale Hintergrundbodenunruhe (z.B. Standort so weit wie möglich von Hauptstraßen, Eisenbahnschienen entfernt)
- Nutzungsberechtigungen für ca. drei Jahre
- Zugang zur Stromversorgung (nicht alle Stationen)
- GPS, 3G/4G Empfang

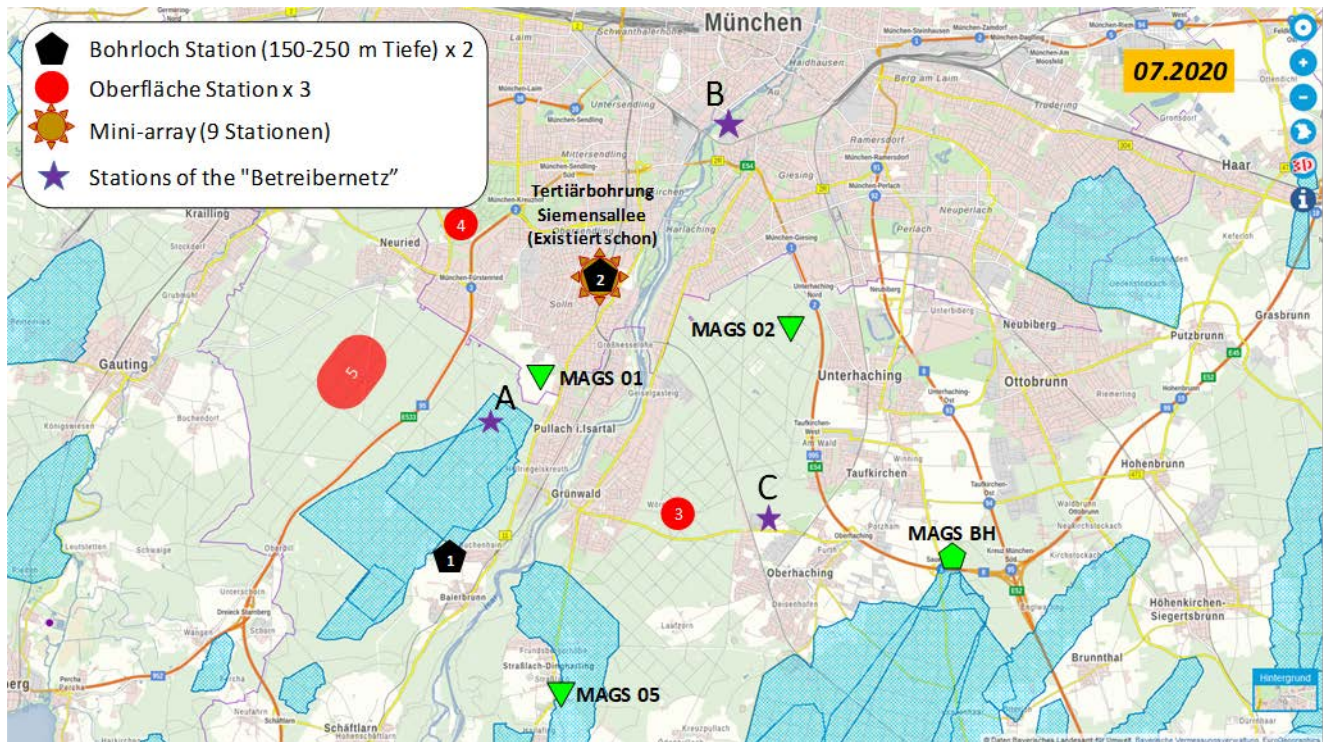
Sowie, spezifische für das INSIDE-Projekt:

- Installation von fünf Standard- oder Bohrloch-Seismik Stationen
- Niederbringung einer Bohrung (bis ca. 200 m), um die auf Glasfaserkabeln (GFK) basierende Technologie zu installieren
- Installation eines Mini-Arrays mit mindestens 6 unabhängigen Stationen

Der Zweck des Mini-Arrays und der Bohrlochstationen besteht darin, ein höheres Signaldetektionsvermögen als mit einem einzelnen Oberflächengeophon zu erhalten. Beide Techniken werden im Projekt verglichen und ihre Vor- und Nachteile beschrieben. Weiterhin ist die Eignung von Glasfaserkabeln zur Aufzeichnung von akustischen- und Dehnungssignalen zu bewerten.

### 3.2. STANDORTWAHL

Abbildung 1 zeigt die ausgewählten Standorte.



**Abbildung 1: 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.**

Die Identifizierung möglicher Standorte in den vorausgewählten Gebieten und die Anfragen zur vorläufigen Zustimmung zur Grundstücksnutzung, erfolgen durch die Partner IEP und SWM.



### 3.3. SEISMISCHE BEOBACHTUNGSSTATIONEN

#### 3.3.1. ÜBERSICHT

Insgesamt werden 3 Oberflächenstationen, 2 Bohrlochstationen, 1 Mini-Array und ein *Distributed Acoustic Sensing* (DAS) sowie ein *Distributed Temperatur and Strain Sensing* (DTSS) installiert.

Tabelle 1 zeigt die Art der seismischen Stationen in Abhängigkeit vom Standort.

Am Standort Buchenhain wird voraussichtlich ein Bohrlochseismometer zusammen mit den faseroptisch basierten DAS- und DTSS-Dehnungs- und Dehnungsratenüberwachungsgeräten installiert.

Am Standort Siemensallee soll die 2. Bohrlochstation zusammen mit dem Mini-Array installiert werden.

Tabelle 1: Art 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			
Forstenreider Park	FORS	1			
Buchenhain	BUCH		1	DAS + DTSS	
Siemens Allee (Sendling)	SIEM		1		1 (9)

#### 3.3.2. DESIGN DER OBERFLÄCHENSTATIONEN

##### *Seismische Ausrüstung*

Hersteller: Nanometrics

Geophone: Trillium Compact Surface Vault 20 s, 750 V/m/s,  $\pm 10^\circ$  Neigungstoleranz, 3-Komponenten

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

##### *Installation*

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 2 zeigt eine schematische Erläuterung des Prinzips der Installation des Seismometers an der Oberfläche. Abhängig von den realen Feldbedingungen kann sich das endgültige Design der Station ändern.

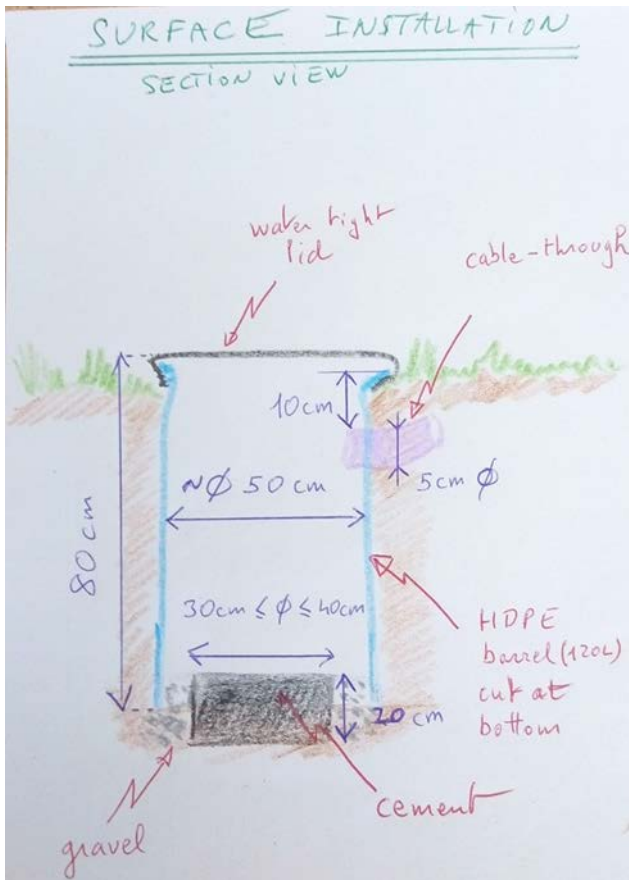


Abbildung 2: Schematische Erläuterung des Prinzips der Installation des Seismometers an der Oberfläche (oben) und Beispiele realer Fälle (rechts).

An der Oberfläche enthält ein wasserdichtes Gehäuse (z. B. Schaltschrank) die folgenden Geräte:

- Datenlogger
- Ladegeräte und Batterie (auch wenn Stromversorgung verfügbar ist)
- Modem: für Echtzeit-Datenübertragung
- GPS-Antenne

Abbildung 3 zeigt ein typisches Beispiel im Feld.



Abbildung 3: Beispiel von einem seismischen obertägigen Gehäuse.

Ohne Stromversorgung (wahrscheinlich wie im Forstenrieder Park der Fall) werden Solarmodule aufgestellt. Die Solarmodule werden zusammen an einem Metallrahmen befestigt, der am Boden befestigt wird (Abbildung 4).



Abbildung 4: Beispiel eines Solarpanelrahmens im Feld.

### 3.3.3. DESIGN DER BOHRLOCHSTATIONEN

#### *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

## Installation

An der Oberfläche wird die Anlage wie eine Oberflächenstation aussehen. Das Geophon wird jedoch in einem speziellen Bohrloch eingesetzt.

Im INSIDE-Projekt sind zwei Standorte für eine solche Installation vorgesehen:

- In der Siemensallee-Bohrung, die der SWM gehört. Das Geophon wird bei ca. 172 m eingesetzt
- In einem neuen Bohrloch in Buchenhain, das von der IEP gebohrt werden soll. Das Geophon wird zwischen 120 und 200 m Tiefe eingesetzt.

### 3.3.4. GLASFASERKABELSTATIONEN: DAS/DTS UND DTSS

#### Ausrüstung

Glasfaserkabel (GFK) und entsprechende Erfassungsgeräte sind für GFK-Stationen erforderlich.

Bei DAS/DTS ist das Ziel, die Dehnungsrate des an die Erde gekoppelten Kabels zu messen. Bei DTSS ist das Ziel, die Dehnung des ebenfalls an die Erde gekoppelten Kabels zu messen. Für jede Messung ist ein eigenes Single-Mode-GFK und eine eigene Erfassungsausrüstung erforderlich.

Es ist vorgesehen, mit der Ausrüstung von Febus-Optics zu arbeiten, die die Aufzeichnung der Rohsignale ermöglicht. Dies erlaubt die Entwicklung von geeigneten Signalverarbeitungsmethoden.

Hersteller: Febus-Optics

DAS und DTS Datenlogger: A1-R

- Single-ended
- Gauge Länge: 1 – 50 m
- Abtast-Intervall: 0.8 – 10 m
- Maximale Detektionsfrequenz: > 2.5 kHz
- Optical connector 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  $\mu\text{m}/\text{m}$  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 2), die mit der DAS/DTS-Überwachung verbunden sind, muss ein RAID10-Speichersystem implementiert werden.

DAS und DTS Kabel: Single-mode, Metallfreies Kabel, Durchmesser 12.0 mm

DTSS Kabel: Single-mode, Metallfreies Kabel, Durchmesser 3.2 mm

### **Installation**

Die GFK werden hinter der Verrohrung des neuen Bohrlochs in voraussichtlich Buchenhain (das zu diesem Zweck gebohrt wird) zementiert. Am Boden des Bohrlochs wird eine U-Schleufe für beide Kabel hergestellt. Die Kabel werden schließlich in einem Graben an der Oberfläche um das Bohrloch herum verlegt. Dadurch können vertikale und horizontale Deformationen und Bewegungen überwacht werden.

An der Oberfläche ist für die Datenrekorder ein Gehäuse (klimatisierter 19"-Schaltschrank) sowie weitere technische Komponenten (u.a. 220V Steckdosen) erforderlich. Der Schrank muss für Erfassungsausrüstung der Bohrlochstation ausgerichtet sein.

### **3.3.5. DESIGN DER MINI-ARRAY**

Das Mini-Array soll in der Nähe der Bohrlochstation Siemensallee installiert werden, um beide Arten der Überwachungssensorik zu vergleichen. Das Mini-Array wird aus neun Oberflächenseismometern bestehen.

### **Ausrüstung**

Hersteller: DiGOS Potsdam GmbH

Seismometer: Lennartz LE3D Lite, 1 Hz, 800 V/m/s, 3-Komponenten, Durchmesser: 97 mm

Datenerfassung: DATA-CUBE<sup>3</sup>

### **Installation**

Der Installationsaufbau ähnelt dem einer seismischen Standard-Oberflächenstation (siehe Teil 3.3.2 „Design der Oberflächenstationen“). Der Schrank wird jedoch kleiner sein sowie der Platz, der zum Eingraben des Seismometers benötigt wird. Da keine Echtzeit-Datenübertragung (d.h. kein Modem notwendig ist) durchgeführt wird, ist zur Stromversorgung nur eine Batterie erforderlich. Die manuelle Datenauslesung soll turnusmäßig alle 3 bis 4 Monate erfolgen.

### **Geplantes Layout**

Abbildung 5 zeigt das vorgeschlagene Layout des Mini-Arrays im Bereich der Siemensallee. Das Mini-Array besteht aus 3 gekrümmten Armen, wodurch die in Abbildung 6 gezeigte Netzwerk-Response erreicht wird. Der östlichste Punkt liegt in der Nähe der geplanten Bohrlochstation Siemensallee.

Das endgültige Design hängt von der Installationsgenehmigung und der effektiven Machbarkeit vor Ort ab. Dies soll bei einem Besuch vor Ort überprüft werden.



Abbildung 5: Geplante Lokalisierung der 9 Seismometer, aus denen das Mini-Array besteht.

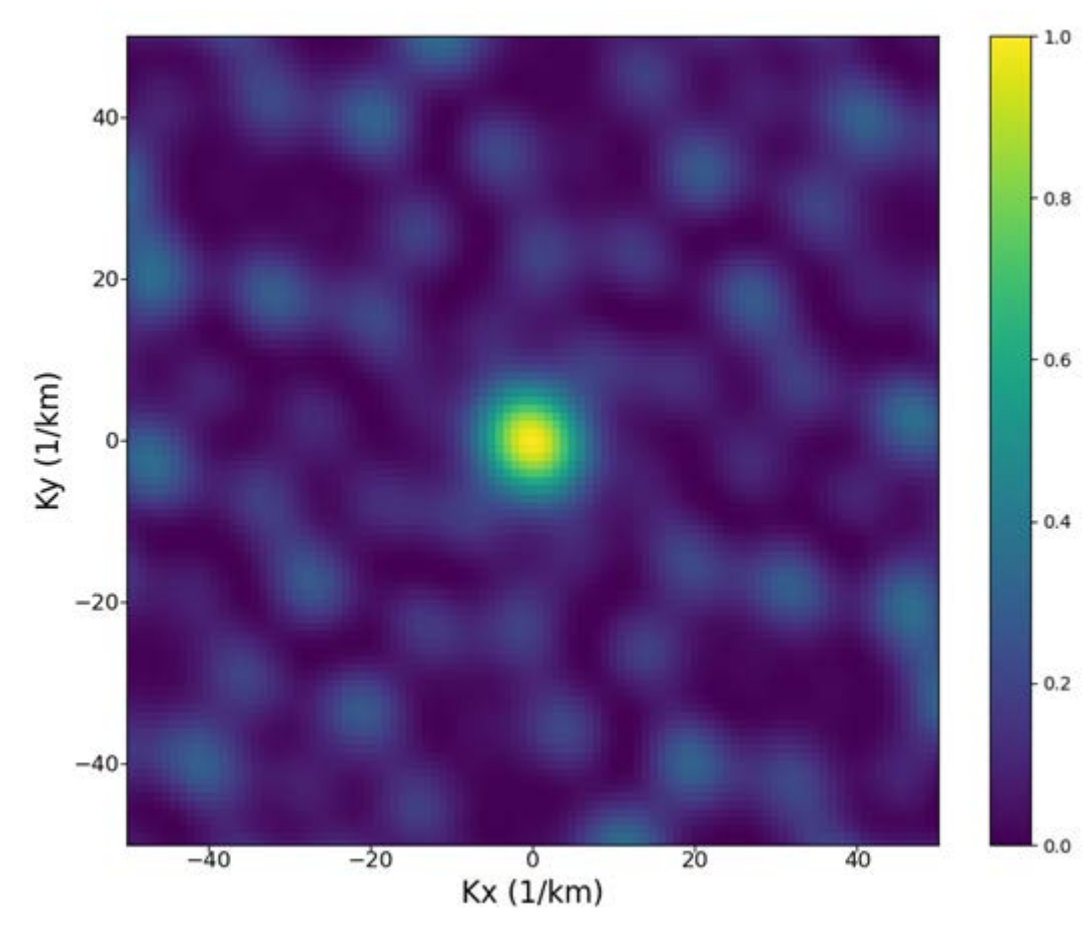


Abbildung 6: Netzwerk-Response des geplante Mini-Arrays.

### 3.4. DATA MANAGEMENT

Die Verwaltung der vom Netzwerk erfassten Daten verfolgt zwei Ziele:

1. Ermöglichung einer sicheren Langzeitspeicherung der Daten,
2. Ermöglichung der Übertragung seismologischer Daten in Echtzeit zur Überwachung und Verarbeitung.

#### 3.4.1. DATENÜBERTRAGUNG

Abbildung 7 zeigt eine schematische Darstellung der Übertragung und Speicherung seismischer Rohdaten.

Nur die Daten, der mit Modem/ Router und SIM-Karten etc. ausgelegten Stationen, werden in Echtzeit übertragen. Jeder Datenlogger generiert zwei Datenflüsse:

- Ein Datenfluss erfolgt zum KIT-Server, wo eine automatische Datenverarbeitung implementiert wird. Dieser Prozess wird vor der manuellen Überprüfung und Nachbearbeitung der Daten geplant. Es ist vorgesehen den Partnern ein freier Zugang zu den Daten zu gewähren.
- Der zweite Datenfluss soll voraussichtlich zum Server des Geophysikalischen Observatoriums Fürstfeldbruck (GOF) auf dem ebenfalls die seismologischen Daten des Betreiber-netzes in München und andere Daten zusammenlaufen.

Die Daten des Mini-Arrays werden mindestens alle 3 bis 4 Monate, manuell heruntergeladen, z.B. bei Wartungsbesuchen. Danach werden sie auf den KIT Server kopiert.

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 2). Das GFK-DTSS wird zunächst nicht in Echtzeit angebunden. Im Laufe des Projekts könnte man sich vorstellen, die zugehörigen Daten in Echtzeit zu übertragen.

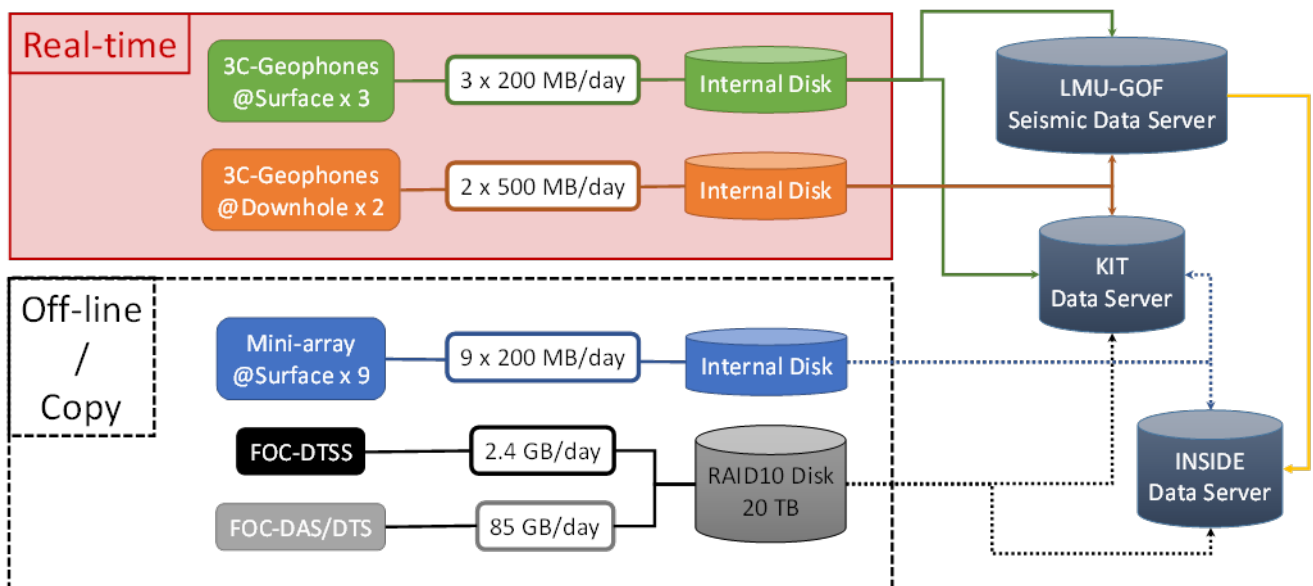


Abbildung 7: Schematische Darstellung der Übertragung und Speicherung seismischer Rohdaten. Die gepunkteten Linien zeigen die manuell auf den Server zu kopierenden Daten an. Die gestrichelten Linien zeigen die automatisch (pseudo real-time) auf dem Server auflaufenden Daten an.

### 3.4.2. VOLUM DER DATEN

Tabelle 2 enthält eine Schätzung des Volumens der seismischen Daten, die im Rahmen des Projekts erfasst werden sollen.

Tabelle 2: Schätzung des Volumens der seismischen Daten, die im Rahmen des Projekts erfasst werden sollen.

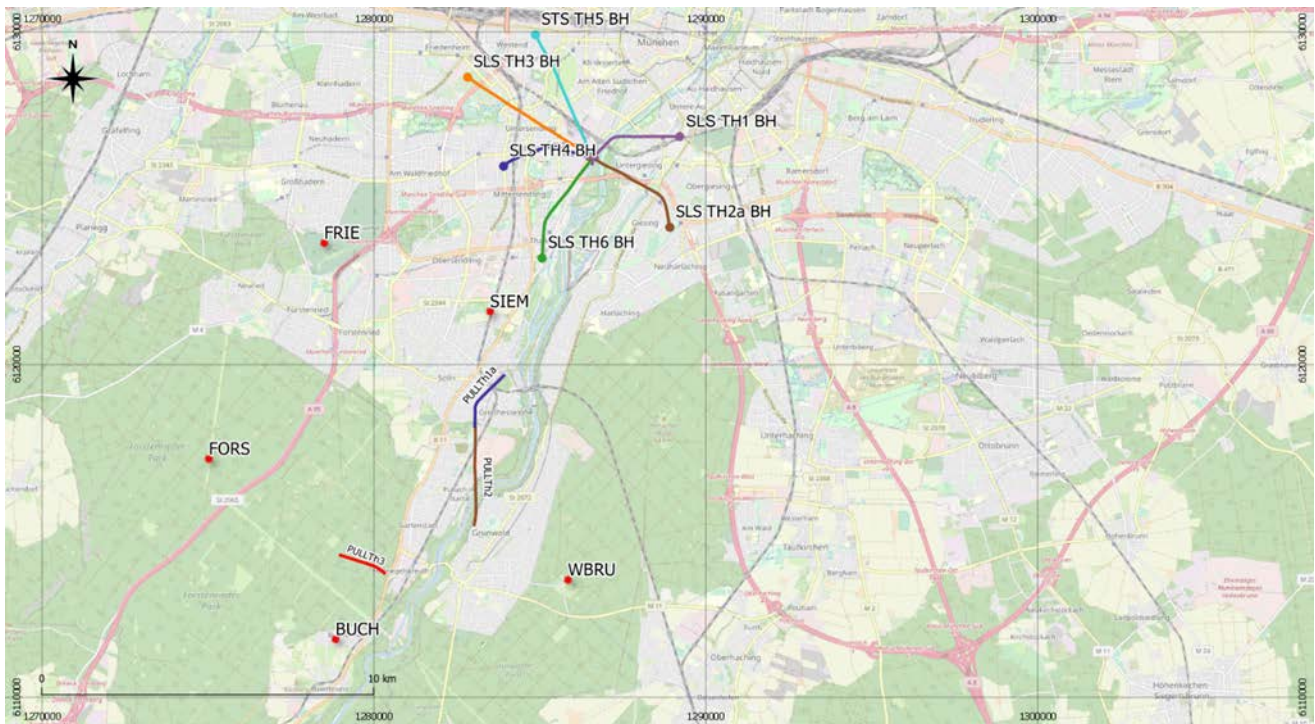
	Rohdaten				
	Oberflächen-Stationen	Bohrloch-Stationen	Mini-Array	DAS	DTSS
	On-line	On-line	Off-line	Off-line	Off-line
<b>Station Nummer</b>	3	2	9	für 1000 m	für 1000 m
<b>Abtastrate (Hz)</b>	200	500	200		
<b>Übertragungsrate (kbit/s)</b>	58.176	96.96	174.528		
<b>Speicherung MB/Tag</b>	599.2	998.7	1797.6	8640000.0	2477.4
<b>Speicherung GB/Tag</b>	0.6	1.0	1.8	8437.5	2.4
<b>Speicherung GB/Monat</b>	18.1	30.2	54.4	261562.5	75.0
<b>Speicherung TB/Monat</b>	0.0	0.0	0.1	255.4	0.1
<b>Speicherung GB/Jahr</b>	217.7	362.8	653.0	3138750.0	900.0
<b>Speicherung TB/Jahr</b>	0.2	0.4	0.6	3065.2	0.9



## 4. MESSUNG DER HINTERGRUNDBODENUNRUHE

Anthropogenes Hintergrundrauschen (Noise) und unsichtbare Geräuschquellen können einen starken Einfluss auf die Qualität der Aufzeichnung und Verarbeitung der Seismizität haben.

Das Ziel der Messung besteht darin, für jeden geplanten Standort die Fähigkeit zur Feststellung der Seismizität zu quantifizieren. Die Positionen, an denen seismische Sensoren voraussichtlich installiert werden, sind in Abbildung 8 dargestellt.



**Abbildung 8:** Lage der fünf Standorte, an denen seismische Stationen installiert werden sollen und an denen Messungen zur Ermittlung der Hintergrundbodenunruhe erfolgten. Von Süden nach Norden: Buchenhain (BUCH), Wörnbrunn (WBRU), Forstenrieder Park (FORS), Siemensallee (SIEM) und Waldfriedhof (FRIE).

### 4.1. MESSVERFAHREN

Für jeden Standort, der getestet wurde, ist das Verfahren wie folgt:

1. ein Graben wird ausgehoben (etwa 80 cm lang, 50 cm breit und 50 cm tief);
2. die Messinstrumente werden für etwa 24 bis 48 Stunden im verfüllten Graben belassen;
3. dann werden die Messinstrumente geholt; der Graben wird aufgefüllt;
4. die aufgezeichneten Wellenformen werden analysiert, um den Geräuschpegel zu bewerten.

Die genutzten Messinstrumente waren:

- Seismometer Lennartz LE3D Lite, 1 Hz, 800 V/m/s, 3-Komponenten
- DATA-CUBE<sup>3</sup> Datenlogger
- Batterie, Anschlusskasten, GPS-Antenne.

Abbildung 9 zeigt die Messinstrumente, die bei der Installation verwendet wurden. Die Tabelle 3 enthält Details zu den Messungen der Hintergrundbodenunruhe, die zwischen dem 26. und 28. Mai 2020 stattgefunden haben.

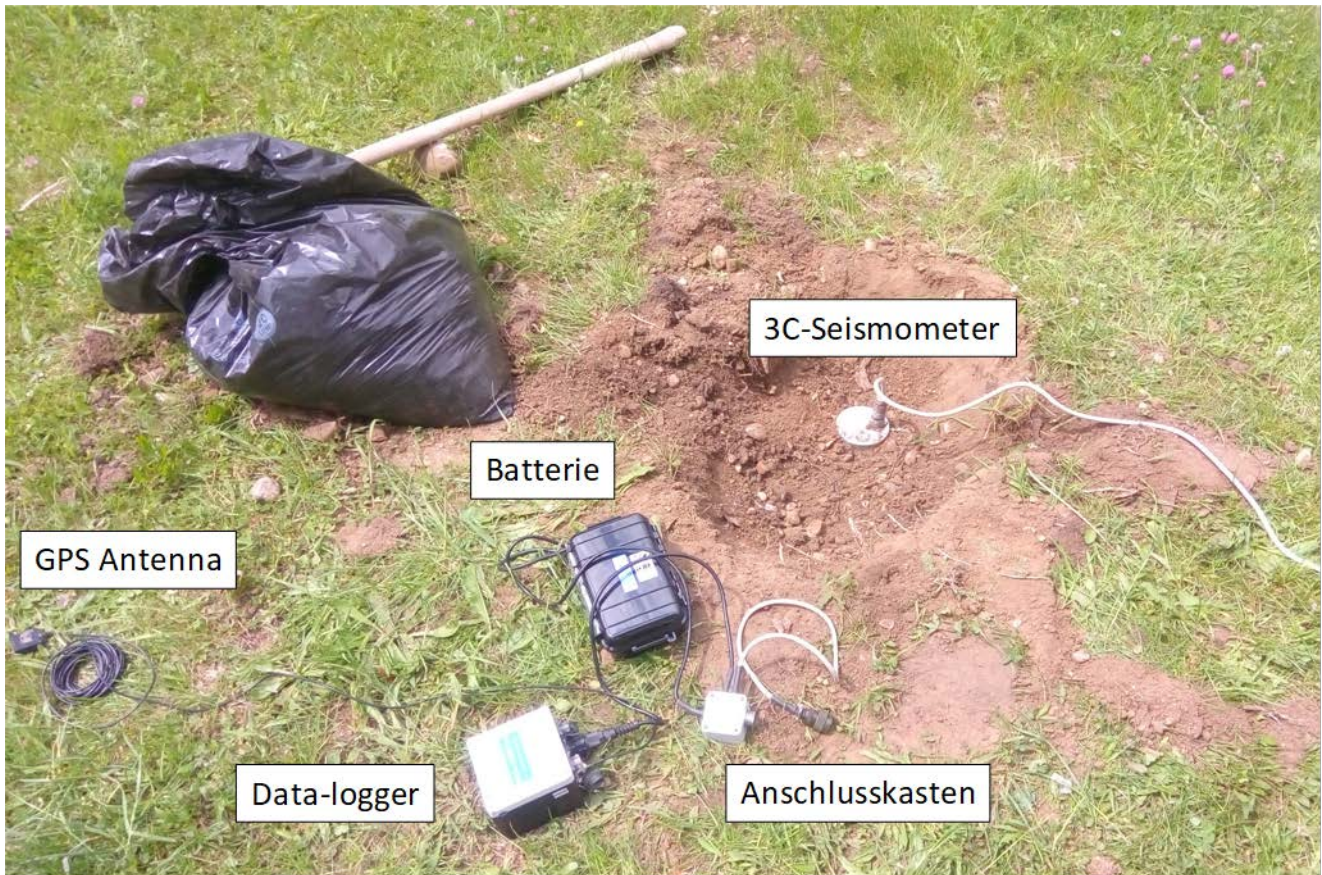


Abbildung 9: Bild der Ausrüstung, die zur Messung der Hintergrundbodenunruhe verwendet wird und die für mehrere Stunden vergraben wird.

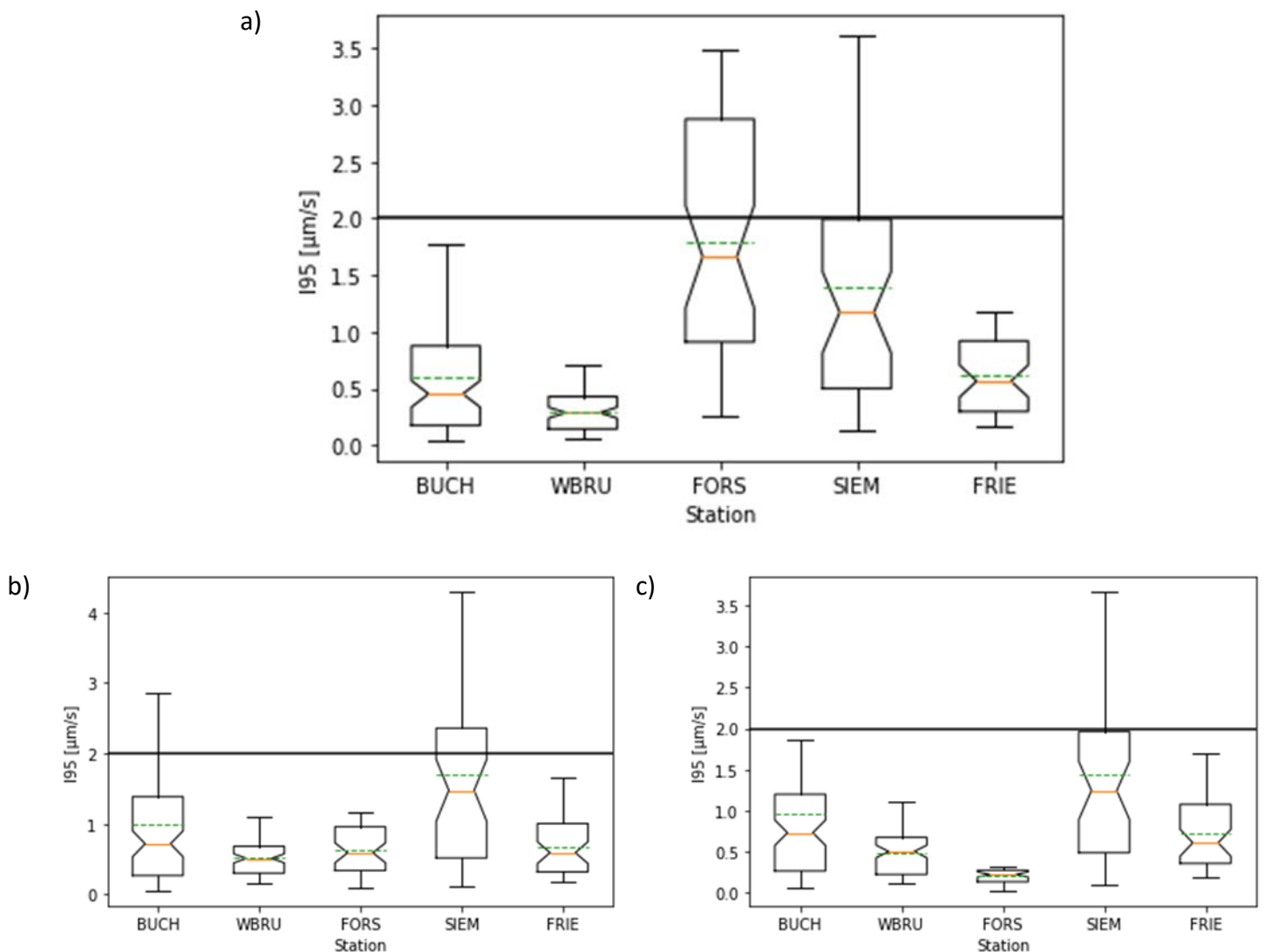
Tabelle 3: Angaben zu den Messungen der Hintergrundbodenunruhe, die zwischen dem 26. und 28. Mai 2020 stattfanden.

Standort	Buchenhain BUCH	Woernbrunn WBRU	Siemensallee SIEM	Forstenrieder Park FORS	Waldfriedhof FRIE
Lat (° WGS84)	48.02938	48.04011	48.08853	48.06195	48.10089
Lon (° WGS84)	11.48802	11.55093	11.52986	11.45374	11.48496
Anfang (Tag - Uhr)	26 - 11:59	26 - 13:32	26 - 14:39	27 - 10:15	27 - 13:34
Ende (Tag - Uhr)	28 - 08:56	28 - 08:25	27 - 11:49	28 - 09:27	28 - 12:50
Dauer	ca. 45 St.	ca. 43 St.	ca. 21 St.	ca. 23 St.	ca. 23 St.
Abtastrate (Hz)	200				
Kiste ID	3	1	2	4	2
Datenlogger ID	AAN	AM1	AHJ	AZO	AHJ
LE3D0 XXX	191	195	209	206	209

## 4.2. ERGEBNISSE

### 4.2.1. I95 WERTE DER BODENUNRUHE

Die Hintergrundbodenunruhe wird hier als I95-Werte quantifiziert (Arbeitsgruppe „Induzierte Seismizität“ FKPE e.V. et al., 2012; Groos and Ritter, 2009). Dieser Analyseparameter ergibt das 95% Amplitudenintervall des Seismogramms, nach Filterung zwischen 5 und 40 Hz. Diese Werte werden aus 30-minütigen Zeitfenstern der Messungen an den einzelnen Stationen ermittelt. Die Arbeitsgruppe „Induzierte Seismizität“ FKPE e.V. et al. (2012) empfiehlt, dass der I95-Wert zwischen  $\pm 2 \mu\text{m/s}$  liegen sollte. Abbildung 10 stellt die statistische Verteilung von I95 Werten dar.



**Abbildung 10: Gemessene Bodenunruhe an den geplanten seismischen Stationen, dargestellt als statistische Verteilung von I95 Werten in 30-minütigen Zeitfenstern über den Zeitraum der Messung (ca. zwischen 21 und 45 Stunden). Die Messungen sind für die horizontalen Komponenten ((a), die Ostkomponenten (b), die Nordkomponenten) und für die vertikalen Komponenten (c) dargestellt. Die Striche reichen bis zu den extremen Datenpunkten (min und max den I95 Daten). Die unteren und oberen Ränder des Rahmens geben das 25. bzw. 75. Perzentil an und die orangefarbene Linie die Medianen. 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.**

Für die Wörnbrunn („WBRU“) und Neuried („FRIE“) Messstellen 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 Siemensallee („SIEM“) liegen der Mittelwert und der Median I95 ebenfalls unter dem  $\pm 2 \mu\text{m/s}$ -Grenzwert. An diesen Standorten sind die gemessenen Bodenbewegungsamplituden jedoch im Laufe des Tages variabel, und sie wirken sich unterschiedlich auf die drei aufgezeichneten Komponenten aus. U.a. wird an der Messstelle „SIEM“ der Schwellenwert in Abhängigkeit des Zugverkehrs oder, wie im Fall der Messstelle „FORS“, aufgrund des variablen Autobahnverkehrs in einem gegebenen 30-Minuten Zeitbereich überschritten. Die Differenz zwischen dem Mittelwert (in Grün) und dem Median (in Orange) ist ein zusätzlicher Indikator für die Verteilung der Messungen, sowie der hohe Wert der Standardabweichung.

Während der Zugverkehr alle drei Komponenten betrifft, ist die östliche Komponente besonders wegen des Autobahnverkehrs gestört. Diese Quellen von Bodenunruhe erklären den Bereich der I95-Werte, die während der gesamten Aufzeichnungsperiode gemessen wurden. Die Lage der Messstelle Buchenhain, die in einem Wohngebiet liegt, erklärt die hohen Störungspegel, die besonders an der nördlichen Komponente ermittelt worden. Für die Messstellen in Siemensallee und in Buchenhain werden diese Störungen wahrscheinlich reduziert, weil die Stationen in einer Monitoringbohrung installiert werden.

Ein Aspekt, der bei diesen Messungen nicht berücksichtigt wird, ist daher die Tiefe, in der das Messgerät installiert wird (sowohl in Siemensallee als auch in Buchenhain). Der Einfluss des anthropogenen Geräusches wird an diesen Standorten voraussichtlich reduziert werden, im Vergleich zur hier analysierten Situation.

#### 4.2.2. AMPLITUDENSPEKTRUM DER BODENUNRUHE

Hier wird die Frequenzverteilung des Rausches gezeigt.

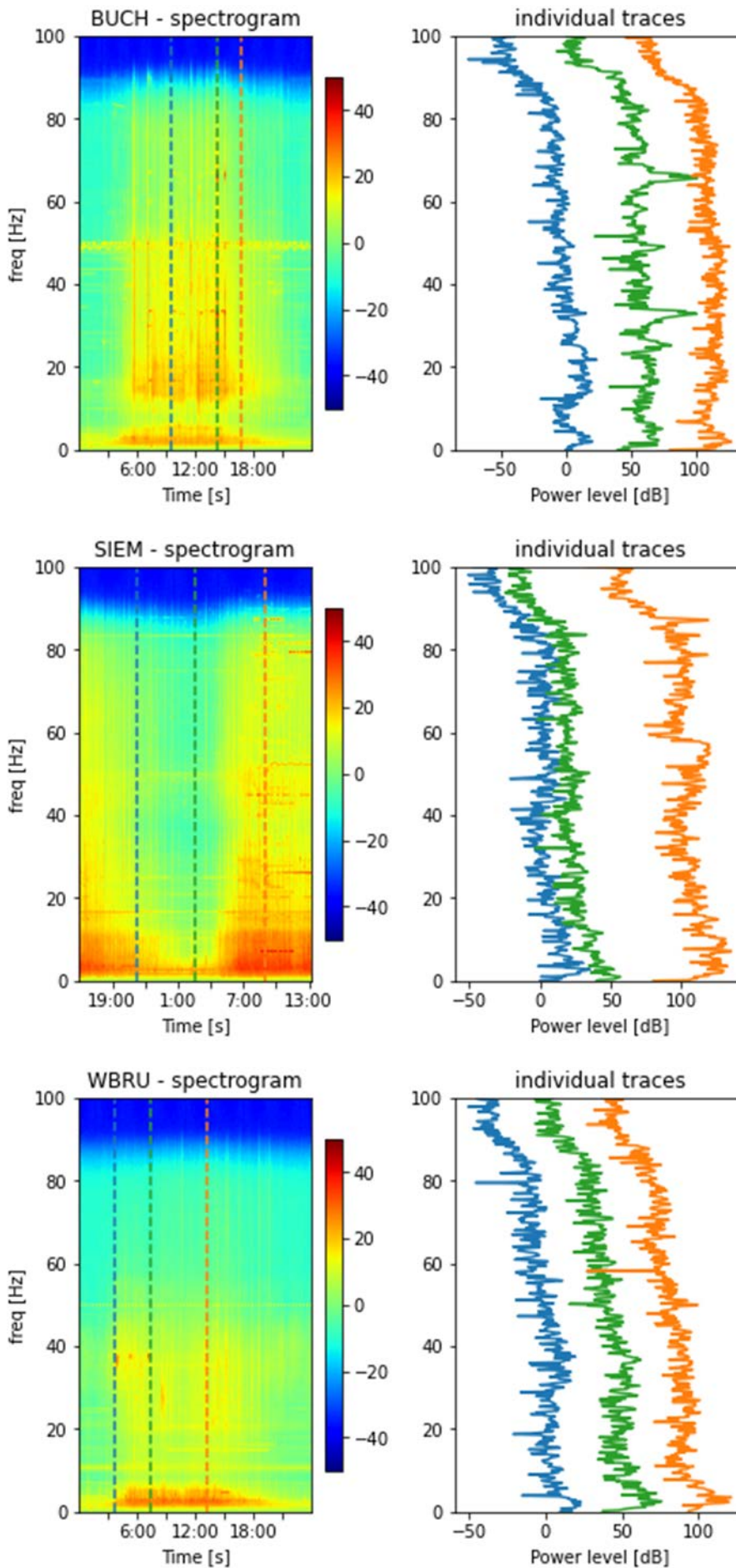
##### *Spektrogramm*

Aus der Abbildung 11 kann man deutlich den Einfluss der anthropogenen Aktivität (Tag/Nacht) auf die Rauschamplitude erkennen. Dieser Effekt zeigt sich besonders zwischen 1 und 20 Hz, obwohl dieser Trend über den gesamten Frequenzbereich sichtbar ist.

Der Standort im Forstenrieder Park ist am stärksten betroffenen. Dies ist auf die relative Nähe (900 m) der Autobahn A95 zurückzuführen.

Der Standort in Wörnbrunn scheint am wenigsten betroffen zu sein.

Das elektrische Rauschen bei 50 Hz ist ebenfalls leicht an den Abbildungen zu erkennen. Auch hier ist der Standort im Forstenrieder Park am stärksten betroffenen, da sich die Messgeräte unterhalb einer Hochspannungsleitung befanden. Dieses beständige Signal ist auch am Standort Buchenhain sichtbar (wegen der Nähe eines Trafo). Für die „WBRU“ Messstelle zeigt Abbildung 11, dass dieses Signal in geringerem Maße zu beobachten ist.



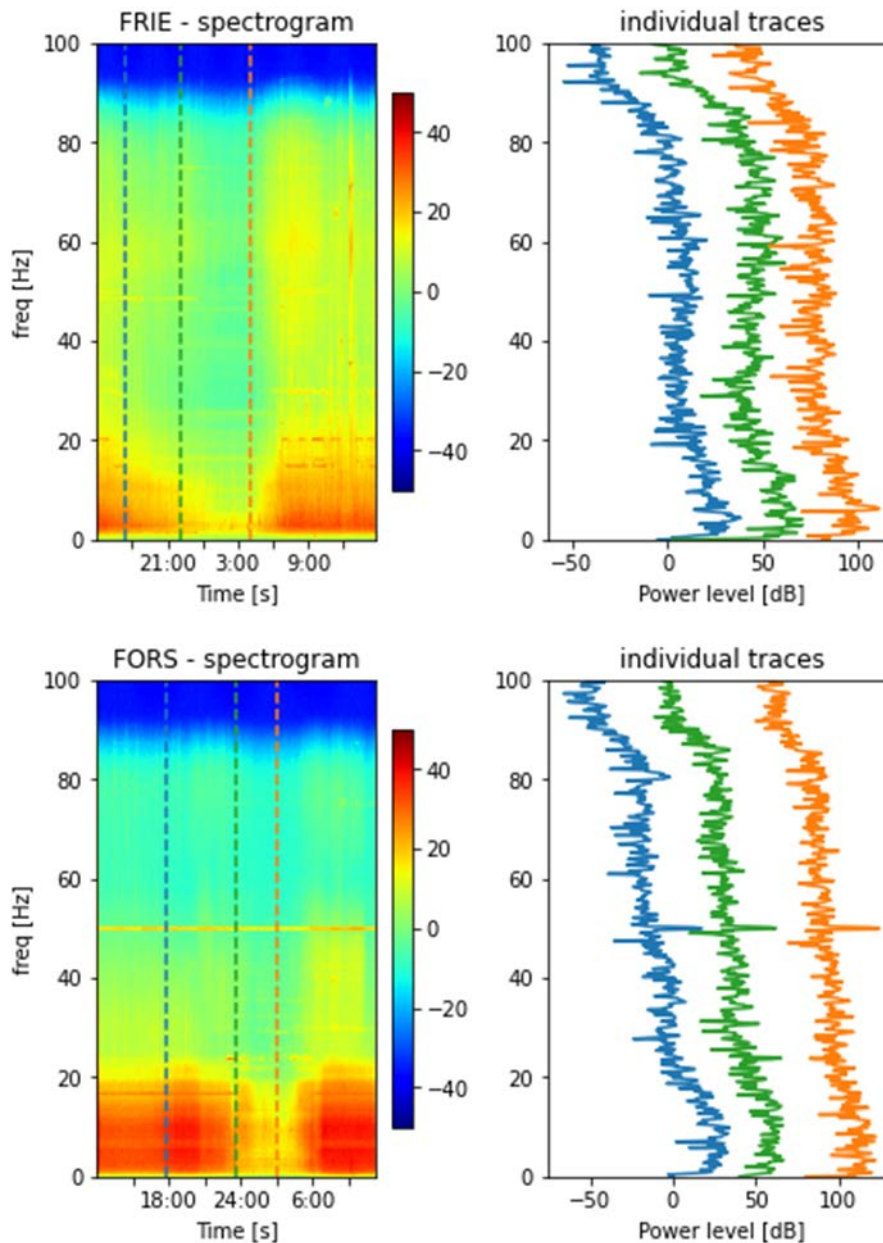


Abbildung 11: Links: Spektrogramme der gemessenen Bodenunruhe. Die Messzeit ist entlang der X-Achse, die Frequenz entlang der Y-Achse gezeigt. Die Farbskala der Legenden stellt die ermittelten Rauschamplituden in dB (m/s) dar. Rechts: einzelne Spektren für drei verschiedene Zeiten, dargestellt durch die gepunkteten Linien links. 50 dB werden zu jedem einzelnen Spektrum addiert, um sie zu unterscheiden. Die Standorte von oben nach unten sind: Buchenhain („BUCH“), Siemensallee („SIEM“), Wörnbrunn („WBRU“), Waldfriedhof („FRIE“) und Forstenrieder Park („FORS“).

### Probabilistische spektrale Leistungsdichte

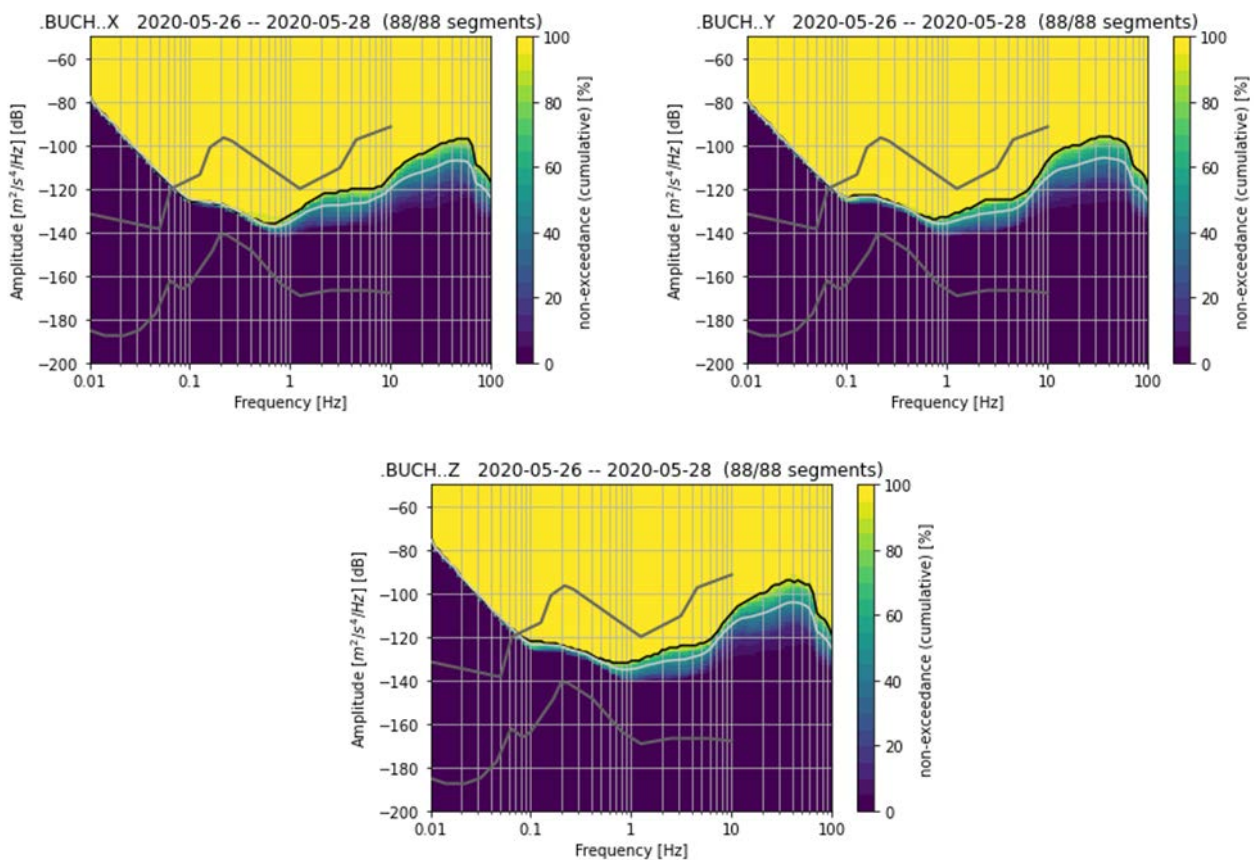
Abbildung 12, Abbildung 13, Abbildung 14, Abbildung 15 und Abbildung 16 zeigen die Pseudoprobabilistische spektrale Leistungsdichte der Bodenunruhe, die an den Standorte Buchenhain („BUCH“), Siemensallee („SIEM“), Wörnbrunn („WBRU“), Waldfriedhof („FRIE“) und Forstenrieder Park („FORS“) gemessen wurden.

Wir sind in den ermittelten Leistungsdichten besonders an einer lokalen Seismizität interessiert, die in einer Tiefe von etwa 3 km induziert wird. Der Frequenzbereich des seismischen Signals an der Oberfläche sollte zwischen 2 bis 5 Hz und 40 Hz liegen.

Wie beobachtet, liegt das durchschnittliche Rauschen an allen Standorten unter dem New High-Level Modell (hellgraue Linien) in diesem Frequenzband. Das 95-Perzentil (schwarze Linie) überschreiten an manchen Stationen (Waldfriedhof und Siemensallee) das untersuchte Modell. Dies ist für den gewählten Standort im Forstenrieder Park unter 3 oder 4 Hz der Fall, sowie am getesteten Standort in Waldfriedhof und in Siemensallee. Dieses Verhalten wird hauptsächlich bei den horizontalen Komponenten beobachtet.

An der Siemensallee wird die Installation der Station im Bohrloch wahrscheinlich eine geringere Rauschamplitude aufweisen.

Im Forstenrieder-Park hat die vertikale Komponente eine relativ niedrige Rauschamplitude. Die Ostkomponente, die in Richtung der Autobahn orientiert ist, ist jedoch am geräuschstärksten.



**Abbildung 12:** 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).

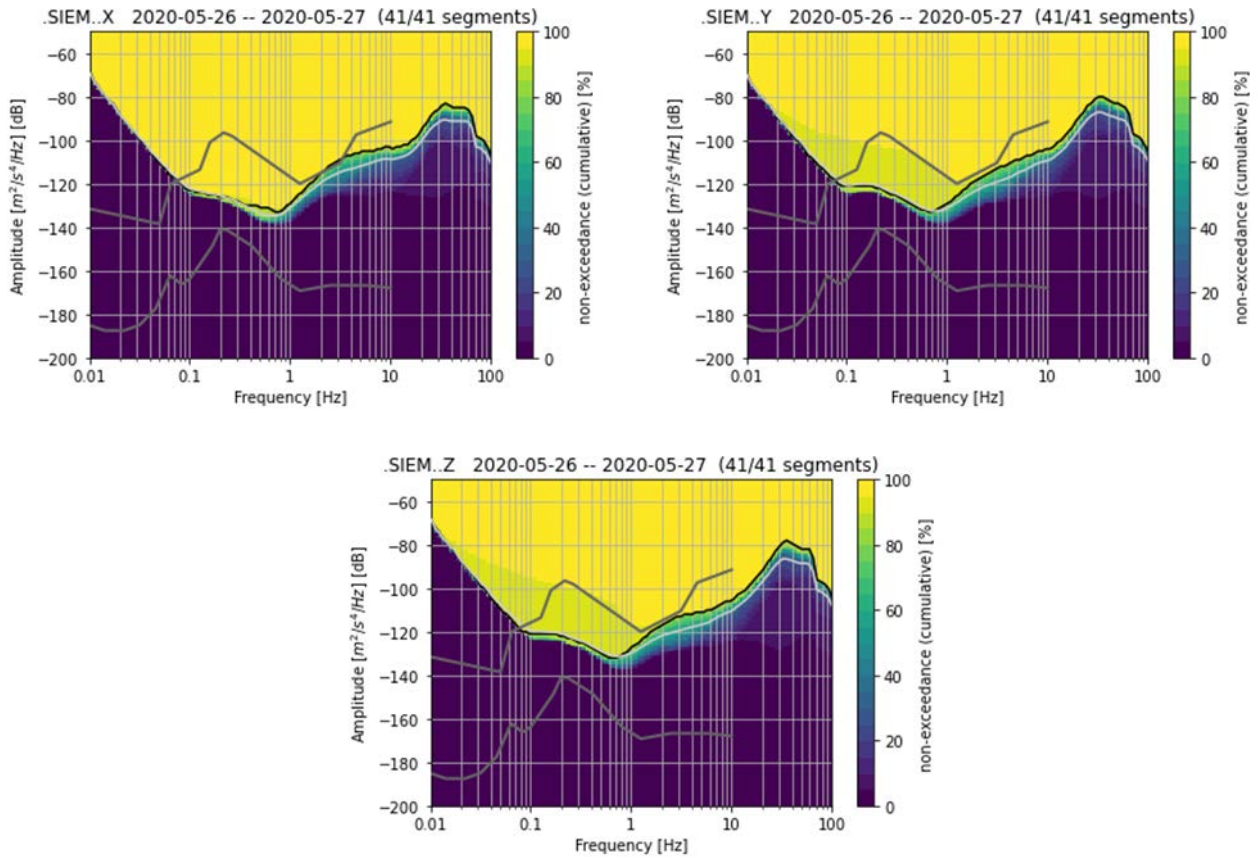


Abbildung 13: Wie Abbildung 12 aber für Siemensallee.

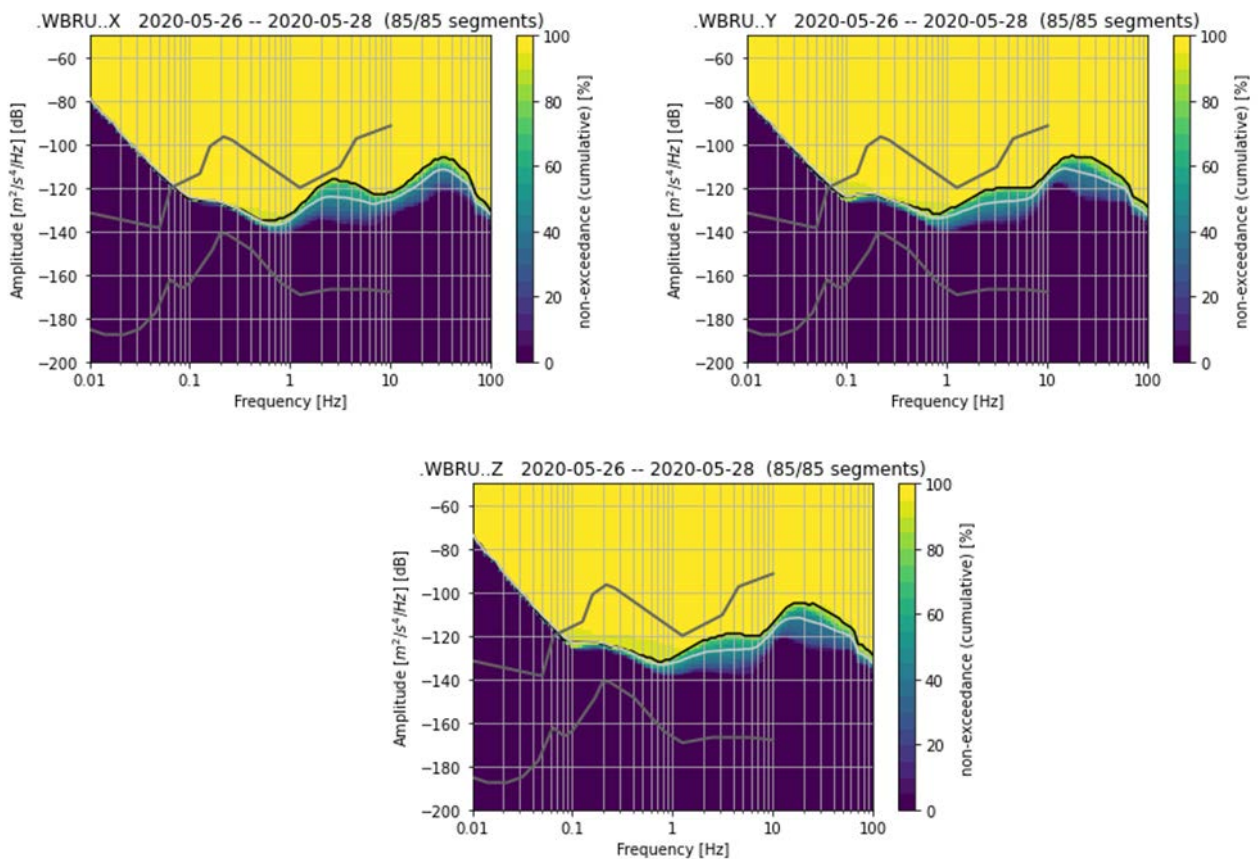


Abbildung 14: Wie Abbildung 12 aber für Wörnbrunn.



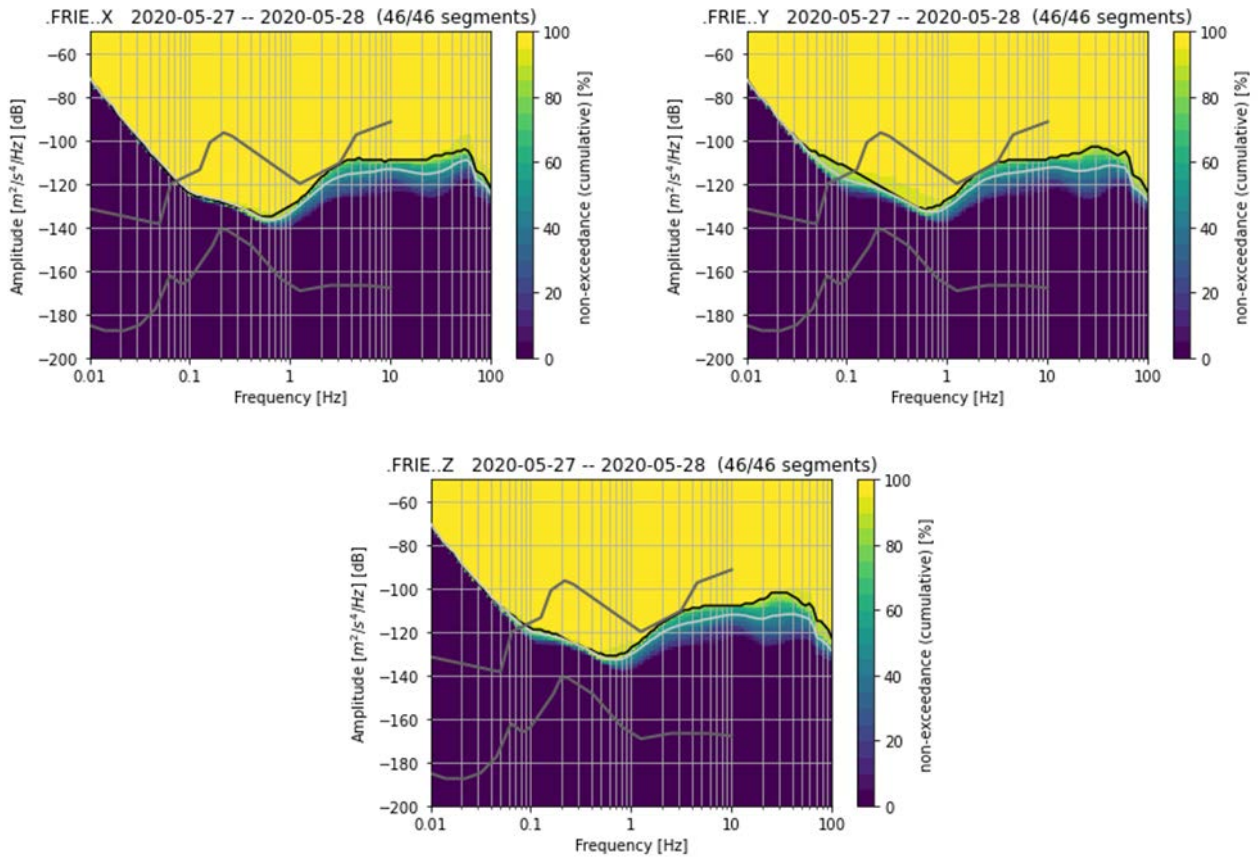


Abbildung 15: Wie Abbildung 12 aber für Waldfriedhof.

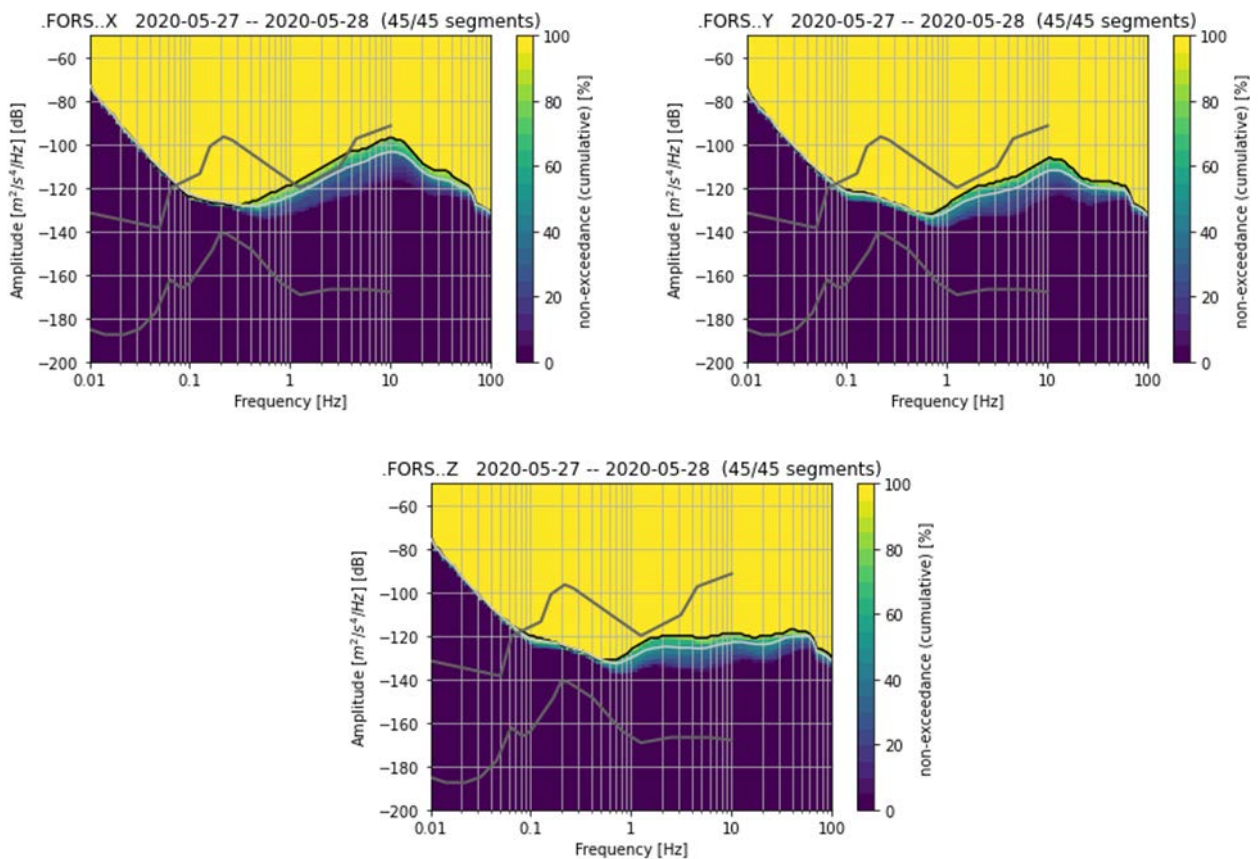


Abbildung 16: Wie Abbildung 12 aber für Forstenrieder Park.

### 4.3. FAZIT

Unter Berücksichtigung der Messkampagne bestätigen wir, dass die gewählten Standorte den Empfehlungen der FKPE für den maximalen Bodenunruhepegel entsprechen.

Im Forstenrieder Park (Messstelle „FORS“) sollte jedoch der Abstand zur Autobahn und zur Stromleitung, die Hauptquellen von Bodenunruhen sind, vergrößert werden. Ein Standort, der weiter von diesen Quellen entfernt ist (ca. 900 m nordwestlich entfernt) sollte schließlich gewählt werden. Am getesteten Standort zeigen die Aufzeichnungen der vertikalen Komponente dennoch relativ geringe Niveaus von Bodenunruhe. Durch eine Verdoppelung der Entfernung zur Autobahn sollen die Aufzeichnungen des auf diese Quelle gerichteten Komponenten verbessert werden.

In der Siemensallee (Messstelle „SIEM“) zeigen die Aufzeichnungen über die drei Komponenten, dass diesen Standort am empfindlichsten für Bodenunruhe im Zielfrequenzbereich ist. Die Störung könnte jedoch verringert werden, da die Station in einem Monitoring-Bohrloch installiert werden soll.

Das getestete Standort in Wörnbrunn (Messstelle „WBRU“) weist die niedrigsten Rauschamplituden auf.

Das finale Netzdesign und Stationsaufbau hängen von Bewilligungen (Validierung des Projekts bei Eigentümern / lokalen Gemeinschaften) und technischen Zwängen (z.B. Niederbringung der Bohrung in Buchenhain) ab.

## 5. THEORETISCHE MODELLIERUNG DER AUFLÖSUNGSFÄHIGKEIT DES NETZWERKS

### 5.1. ALLGEMEINES ZUR MODELLIERUNG

In diesem Abschnitt gehen wir davon aus, dass die untersuchten Standorte das zu prüfende seismische Netz bilden. Aus den Bodenunruhemessungen, die in Teil 4.2.2 vorgestellt 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 testen.

Diese Parameter werden innerhalb eines Volumens theoretisch bewertet. An der Oberfläche deckt dieses Volum den Bereich von Pullach (ABB. 17) ab. In der Tiefe erstreckt sich diese Zone von 2250 m bis 2750 m (unter dem Meeresspiegel - MSL), und zielt auf das Reservoir. Es wird in der Simulation durch ein regelmäßiges Mesh mit einem Knotenabstand von 100 m dargestellt.

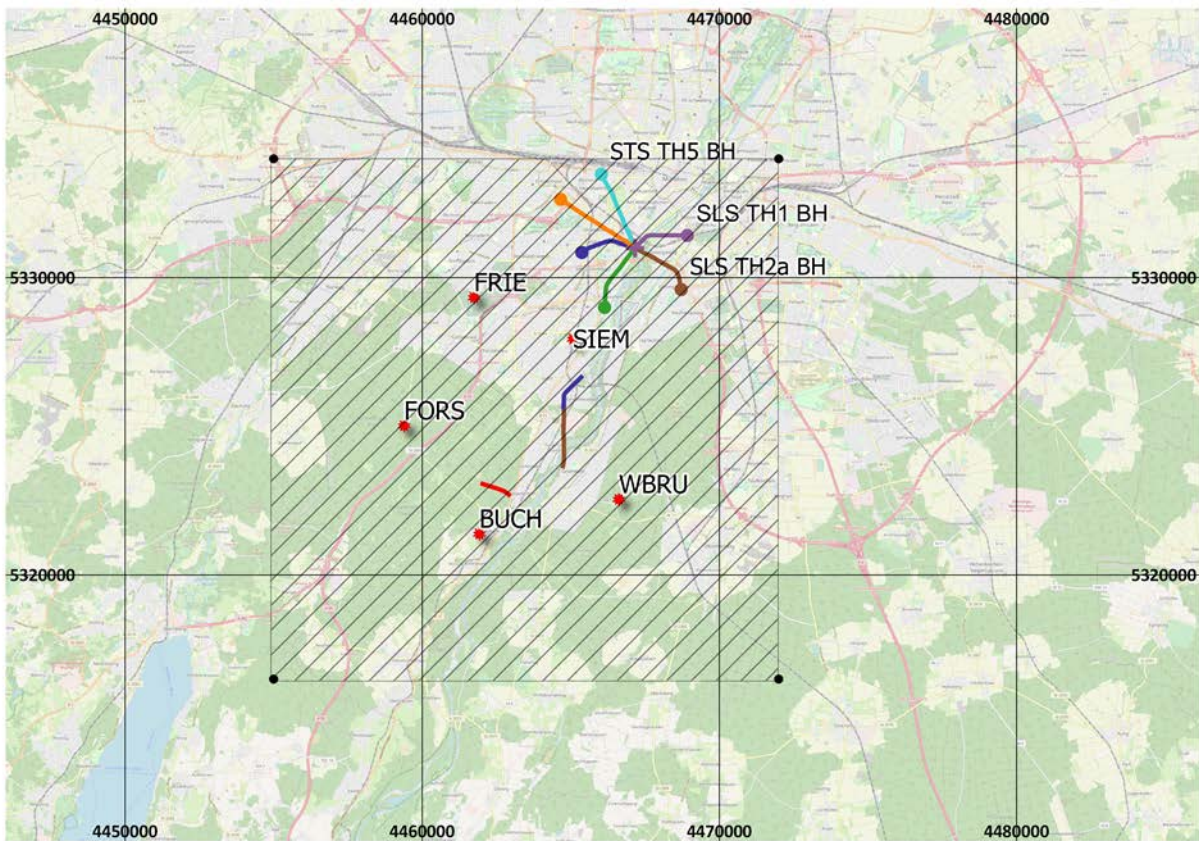


Abbildung 17: Das gestreifte Quadrat stellt den Oberflächenbereich dar, wo die Parameter ermittelt werden. Das Quadrat ist 16,5 km lang. Das Untersuchungsgebiet umfasst das Gebiet von Pullach und zielt auf das Reservoir in der Tiefe (von 2250 bis 2750 m, unter dem Meeresspiegel (MSL)).

Die in den folgenden Abschnitten besprochenen Modellierungsparameter sind hier zusammengefasst

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

- über die 5 - 40 Hz Frequenzbereich bewertet;
- das Quellsignal muss die dreifache Amplitude der Bodenunruhe überschreiten;
- Bodenunruhe wird durch die gemessene vertikale Komponente beschrieben. Die Bodenunruhe wird durch das 95. Perzentil der Daten bewertet, die während der Aufzeichnungsdauer an einer Messstelle erfasst wurden;
- Quellsignal wird theoretisch bewertet (Boatwright et al., 1980)
- mindestens 3 Pickings für eine Detektion.

### Lokalisierungskriterium:

- die Momentmagnitude des Ereignisses ist auf  $M_W = -1$  festgelegt;
- P-Wellen-Ankünfte werden in der vertikalen Komponente beobachtet, wobei die Unsicherheiten vom Signal-Rausch-Verhältnis abhängen;
- Das Bereich der Unsicherheiten geht von 10 ms (für ein Signal-Stör-Verhältnis größer als oder gleich 5), 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 gewählten Kriterien).

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 (vgl. Teil 0). Für jede Station berechnen wir einen Schwellenwert, der das Dreifache des 95. Perzentils der spektralen Leistungsdichte (PSD) beträgt. Dieses Verhältnis von drei bedeutet, dass die Detektion eines Ereignisses ein Signal-Stör-Verhältnis 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 „WBRU“ und einen gegebenen Ereignisort veranschaulicht Abbildung 18 das Verfahren zur Definition der Magnituden-Detektionsschwelle.

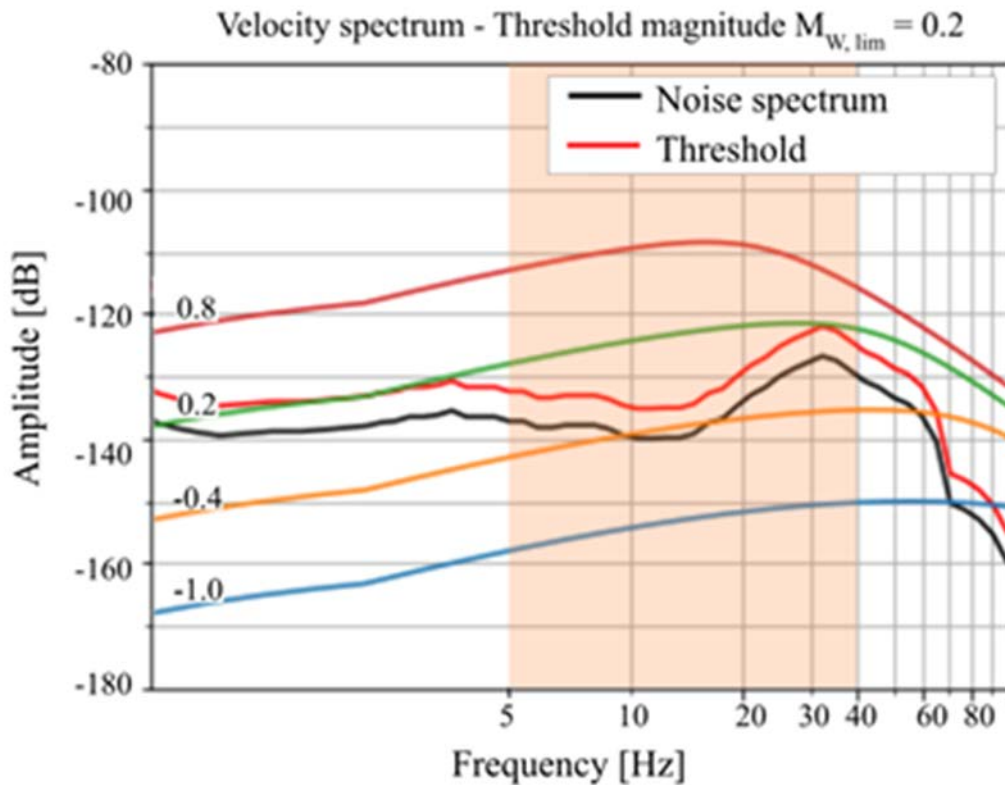


Abbildung 18: Spektrale Leistungsdichte für die Station in Wörnbrunn „WBRU“. Für eine gegebene Entfernung zu der Station zeigen die farbigen Linien das Spektrum, das für Quellen unterschiedlicher Momentmagnitude  $M_w$  berechnet wurde. Die rote Linie zeigt das Cut-Off-Spektrum, das aus dem Bodenunruhemessungen an der Zielstation berechnet wurde. Es wurde 3-mal das 95. Perzentil der gemessenen Rauschamplituden (d.h. die schwarze Linie, die bereits in den Abbildungen 12 bis 16 dargestellt werden) berechnet. An diesem Standort und für die untersuchte Station wäre die limitierende Magnitude  $M_{w,lim} = 0.2$ .

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 18 für jede Station im Netz erhalten haben. Abbildung 19 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 im Anhang 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  $M_w = -1.3$ . Außerhalb des Stationsbereichs erreicht dieser Parameter einen Wert von  $-0.6$ , 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. ABB. 22, im Anhang)

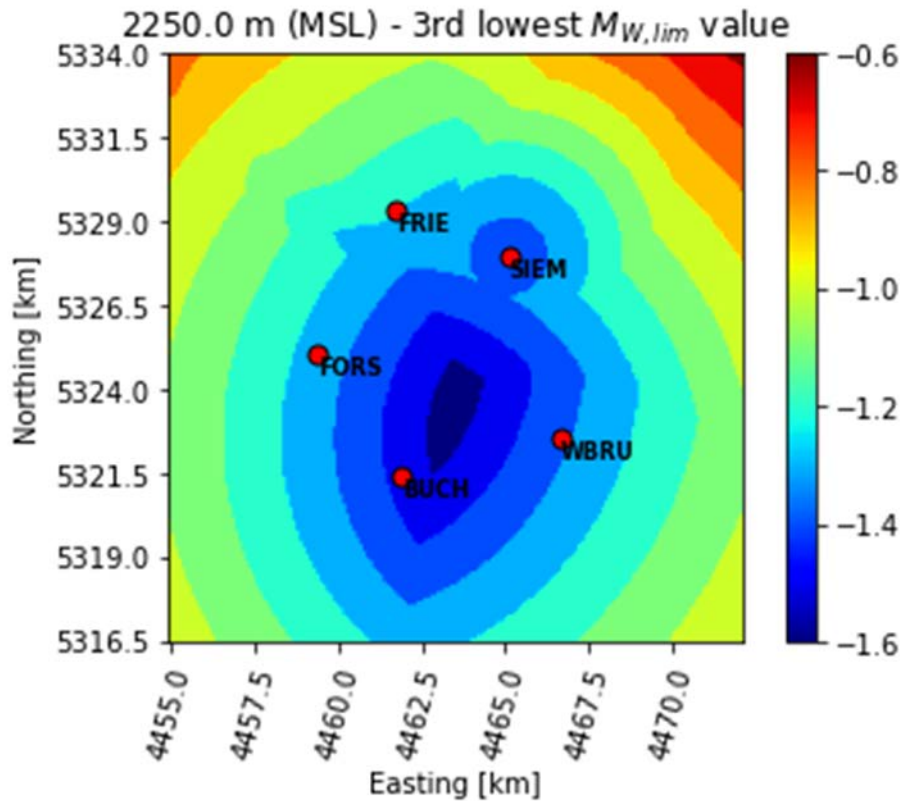


Abbildung 19: Karte in einer Tiefe von 2250 m - An jedem Ort des Studiengebiets berechnen wir für jede Station einen Schwellenwert für die Detektion eines Ergebnisses (hier  $M_{W,lim}$  notiert). Der drittniedrigste Wert gilt als die minimale Ereignisenergie, die mit drei verschiedenen Stationen detektiert werden kann.

### 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  $M_W = -1$ , d.h. ein Grenzwert für das Studiengebiet, entsprechend der Abbildung 19.

An jeden Standort benutzen wir das entsprechende Quellenspektrum und die Bodenunruhemessungen einer gegebenen Station, um das Signal-Stör-Verhältnis (SNR) abzubilden (ABB. 20, links).

Die Verhältnisse werden schließlich in Fehler bei der Erfassung der Ankünfte des P-Wellenzuges,  $dT$ , umgerechnet (ABB. 20, rechts). Zu diesem Zweck verwenden wir eine inverse Funktion, so dass:

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

Diese Karten sind daher von den Geräuschpegeln abhängig, die an einem bestimmten Messstelle aufgezeichnet wurden.

### 5.3.2. ERGEBNISSE

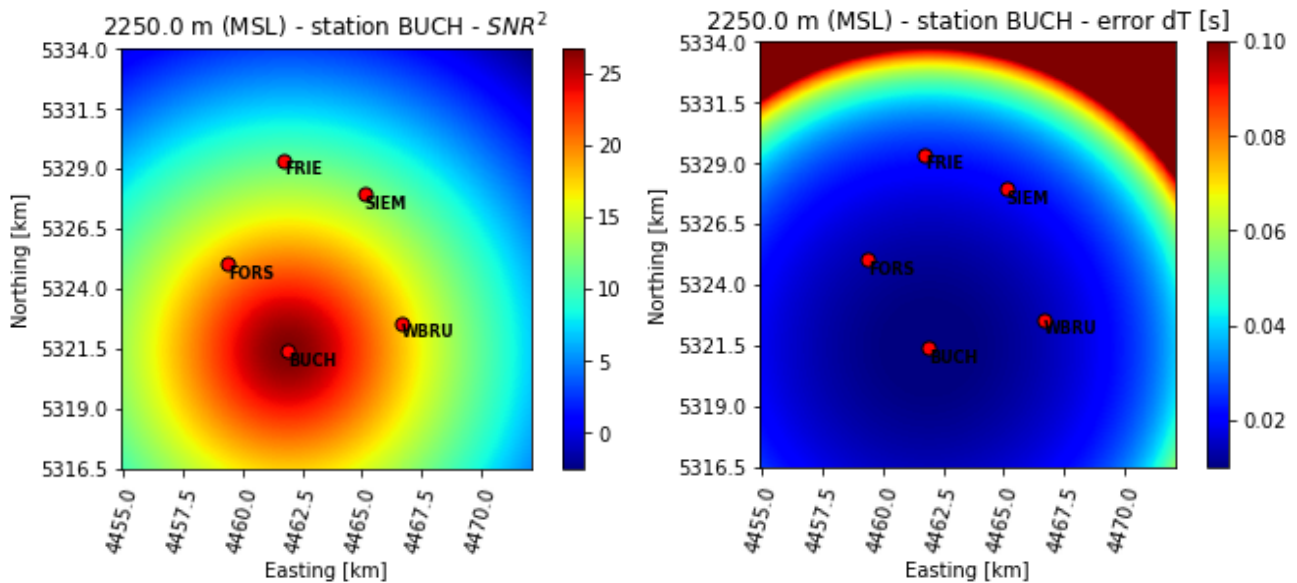


Abbildung 20: Karte in einer Tiefe von 2250 m - Station Buchenhain („BUCH“) - An jedem Ort des Studiengiebts vergleichen wir die Bodenunruhemessungen einer bestimmten Station mit dem theoretischen Spektrum eines Erdbebens einer gegebenen Magnitude. Aus den Bodenunruhe- und Quellenspektren erstellen wir 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.

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

Für jede Station bewerten wir die räumliche Entwicklung des Fehlers bei dem Picking der P-Wellen Ankünfte, für ein Ereignis der Magnitude  $M_W = -1$ . Für Station „BUCH“ evolviert dieser Fehler im Bereich des Netzes von 10 ms bis zu 40 ms.

Die Karten, die für die anderen Stationen erhalten wurden, sind im Anhang dargestellt (ABB. 24). Für die „WBRU“ und „FORS“ Stationen bleibt dieser Fehler im gesamten Studiengiebt gering. Für die „WBRU“ Station ist dieses Ergebnis mit den niedrigen Amplituden der Bodenunruhe verbunden. Bei der „FORS“ Station wurden niedrige Amplituden der Bodenunruhe in der Vertikalkomponente beobachten (z.B. ABB. 16), was dieses Ergebnis rechtfertigt.

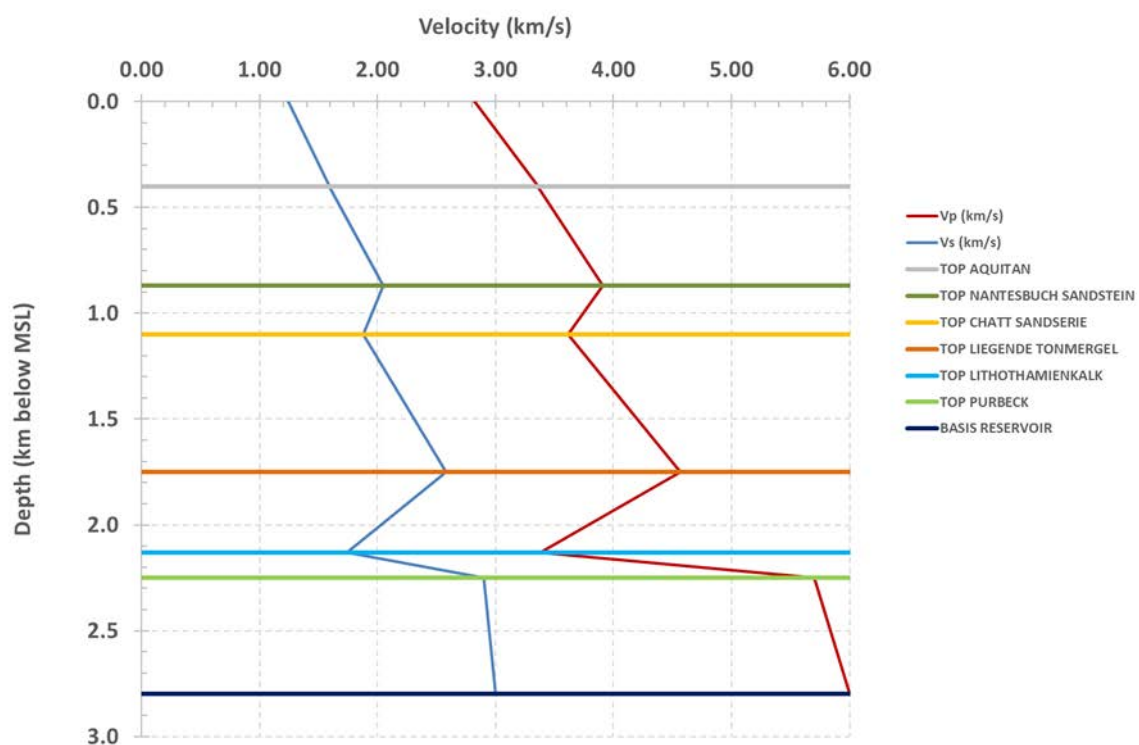
Im Studiengiebt verursacht die Station in Siemensallee die höchsten  $dT$ -Fehlern, in dem untersuchten Frequenzband. Es ist zu beachten, dass sich unsere Analyse auf das Frequenzband von 5 bis 40 Hz konzentriert, wo für die Station „SIEM“ die Amplituden des Spektrums relativ hoch liegen (ABB. 16).

## 5.4. UNSICHERHEIT DER LOKALISIERUNG FÜR MAGNITUDE = -1

### 5.4.1. METHODE

Der nächste Schritt in der Simulation konzentriert sich auf die Quantifizierung des Fehlers bei der Lokalisierung eines Ereignisses einer bestimmten Magnitude, d.h. hier  $M_W = -1$ .

Dazu nutzen wir die  $dT$ -Fehlern und attribuieren jeder Position des Netzes die entsprechenden Fehler in *Non-Lin-Loc* (z.B. Lomax et al., 2009). Das Paket *Non-Lin-Loc* umfasst eine Sammlung von Dienstprogrammen für die Konstruktion von Geschwindigkeitsmodellen, die Berechnung der Laufzeiten und die probabilistische Ermittlung des Erdbebenstandorts in 3D-Strukturen. Als Grundlage für unsere Modellierung werden die Sonic-Logs, die in den Geothermiebohrungen an der Schäftlarnstraße erfasst wurden, verwendet. Sie werden benutzt, um das Geschwindigkeitsmodell zu definieren und theoretischen Laufzeiten zu rechnen.



**Abbildung 21:** Die Zusammenstellung der Daten aus den Sonic-Logs und den Horizonten des GRAME-Projekts ermöglicht ein Geschwindigkeitsmodell aufzustellen, dessen horizontale Schichten einen konstanten Geschwindigkeitsgradienten aufweisen

Der Fehler über die Lokalisierung des Ereignisses wird durch die Länge des Konfidenz-Ellipsoids, das den Bereich maximaler Wahrscheinlichkeit für den Ereignisort beschreibt, quantifiziert. Die Ergebnisse der Rechnung werden durch Karten in der Abbildung 22 dargestellt. Aus Berechnungsgründen reduzieren wir das Studiengebiet auf den Bereich, den die Stationen einrahmen und in dem die  $dT$ -Fehler angemessen bleiben, insbesondere für die „SIEM“ Station (vgl. ABB. 24).



## 5.4.2. ERGEBNISSE

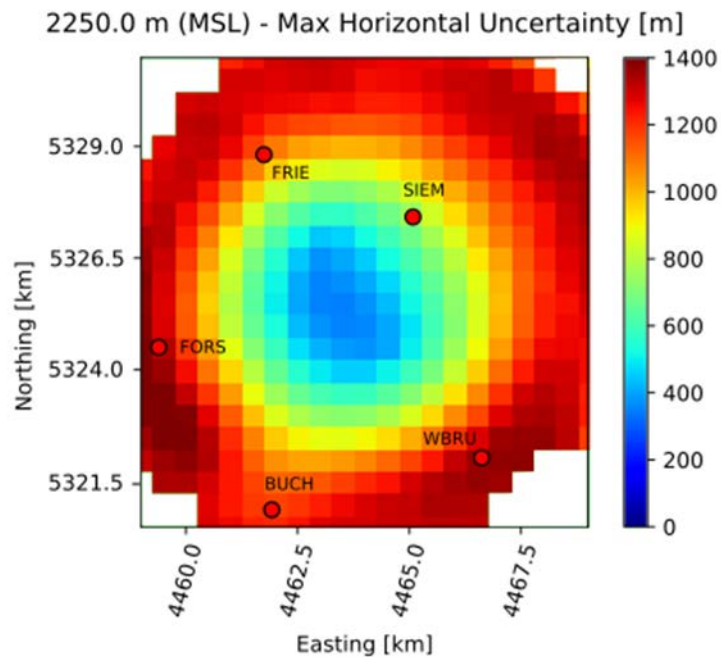


Abbildung 22: An jedem Ort des Studiengebiets berechnen wir aus den  $dT$ -Fehlern die maximale Wahrscheinlichkeitsfläche für den Ereignisort (berechnet als Konfidenz-Ellipsoid). Wir stellen der räumlichen Variation der maximale horizontale Länge des Ellipsoids dar.

Theoretische Fehler über die horizontale Lokalisierung eines Ereignisses der Magnitude -1 variieren innerhalb der Stationsbereiche von 400 bis zu 1400 m. Die Karte veranschaulicht die Gewichtung des relativen Abstands einer der Stationen des Netzes an dem Ort des Ereignisses. Die Lokalisierung eines Ereignisses außerhalb des Stationsbereichs ist deshalb von einem großen Fehler begleitet.

## 5.5. FAZIT

Wir haben einen theoretischen Ansatz vorgeschlagen, der die Nutzung von theoretischen Kriterien voraussetzt. Es wird interessant sein zu sehen, wie diese Kriterien und Ergebnisse mit realen Daten umgesetzt werden.

Die vorgeschlagene Methode erlaubt die Detektions- und Lokalisierungsfähigkeiten des Netzes innerhalb eines Umkreises von fast 10 km zu beurteilen, mit Fokus auf das Frequenzband von 5 bis 40 Hz und auf die Erfassung der P-Wellen-Ankünfte. Innerhalb des Netzwerks schätzen wir auf  $M_W = -1.3$ , die minimale Ereignisenergie, die von drei Stationen im Netzwerk detektiert werden kann und für jede Station bewerten wir die räumliche Entwicklung des Fehlers bei dem Picking der P-Wellen Ankünfte für ein Ereignis der Magnitude  $M_W = -1$ . Für Station „BUCH“ evolviert zum Beispiel dieser Fehler im Bereich des Netzes von 10 ms bis zu 40 ms.

## 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., Micheline, 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-Positionspapier) und den bekannten Reservoirdaten (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 Reservoircharakterisierung 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.

## ZUSÄTZLICHE FIGUREN

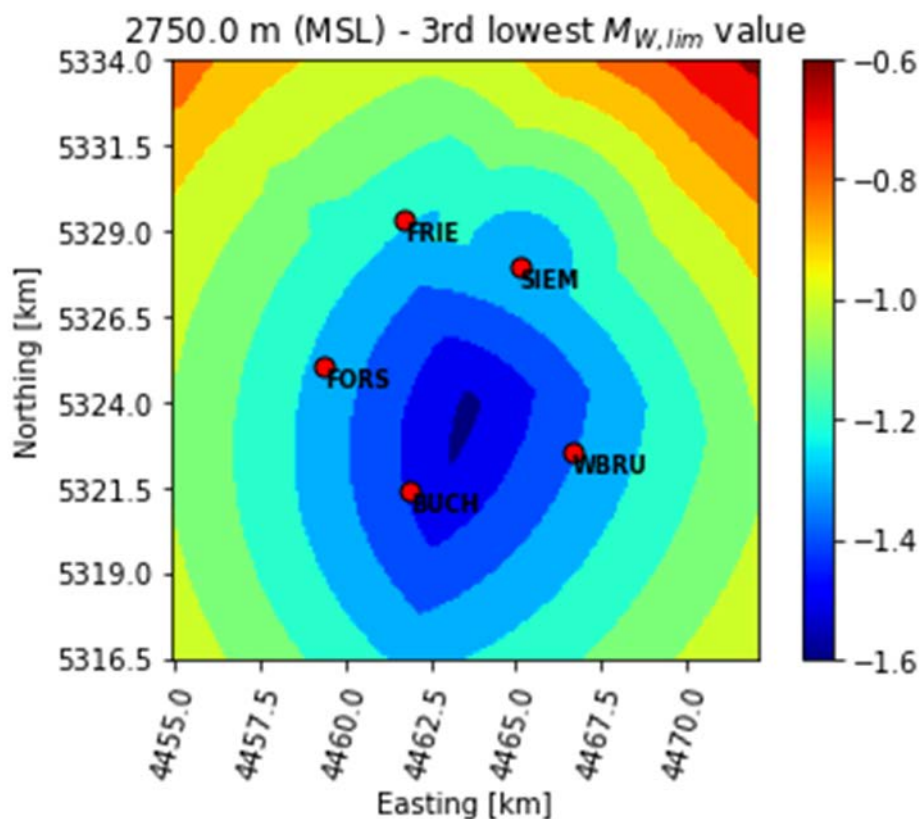


Abbildung 23: Wie Abbildung 19, aber für eine Tiefe von 2750 (unter MSL).

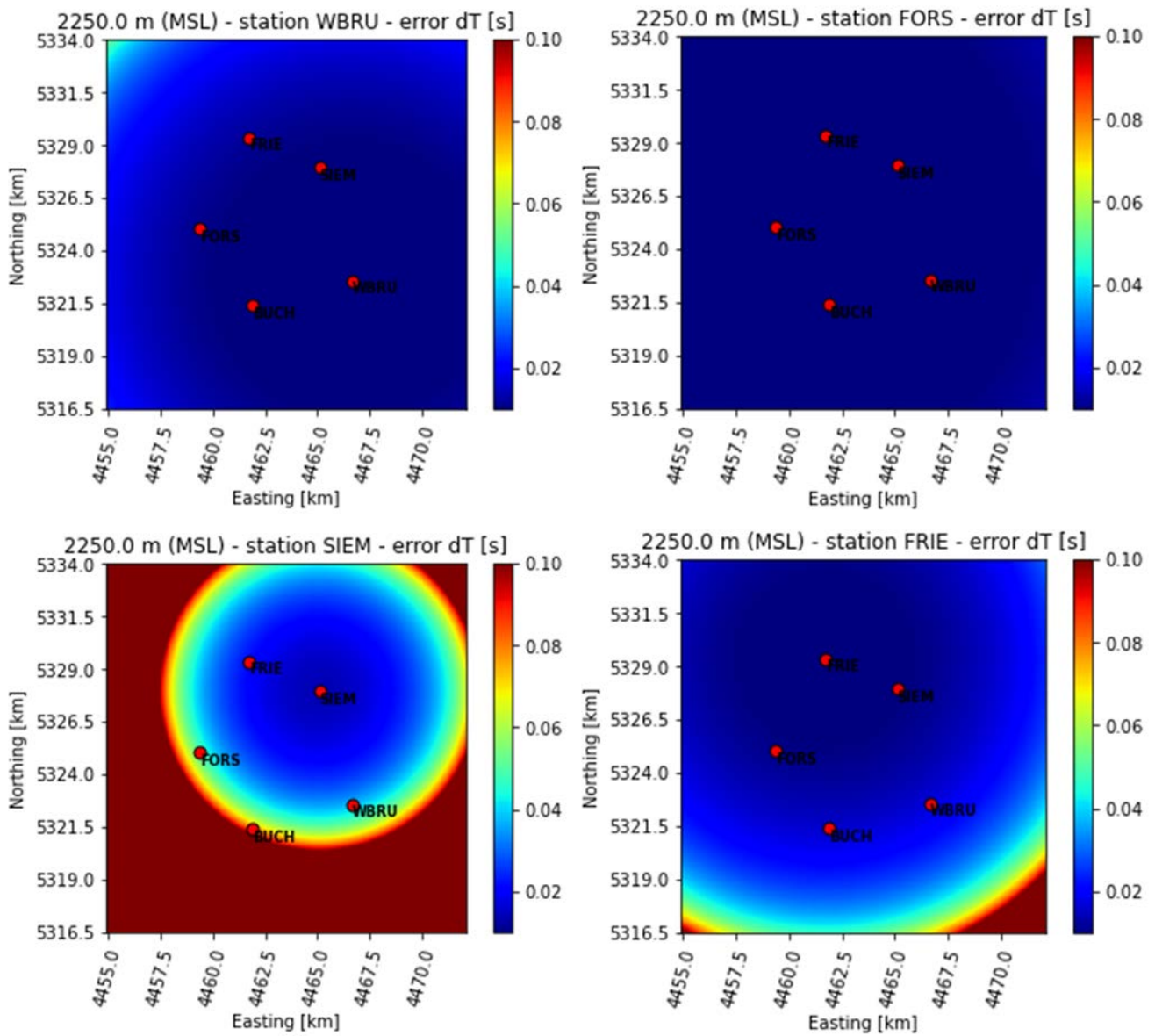


Abbildung 24: Karte in einer Tiefe von 2250 m – Wie Abbildung 20, aber für die Stationen „WBRU“, „FORS“, „SIEM“ und „FRIE“