



INSIDE

Stadtwerke München GmbH
Innovative Energie Pullach
Karlsruher Institut für Technologie

INDUZIERT SEISMIZITÄT & BODENDEFORMATION ALS INTERFERENZASPEKTE BEIM BETRIEB VON GEOTHERMIEANLAGEN IN DER SÜDDEUTSCHEN MOLASSE

Untersuchungen zu einem verbesserten Prozessverständnis im
tiefen Untergrund und Maßnahmen zur Risikominimierung

ABSCHLUSSBERICHT

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klima unter dem Förderkennzeichen 03EE4008A gefördert und betreut vom Projektträger Jülich.

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

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Zuwendungsempfänger: Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Förderkennzeichen: 03EE4008A

Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2019 – 31.05.2024

Autoren: J. Azzola, E. Gaucher, R. Habibi, T. Kohl, M. Westerhaus

Version: 13.01.2025

*Verbundpartner: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 03EE4008A
SWM Services GmbH (SWM), 03EE4008B
Innovative Energie für Pullach GmbH (IEP), 03EE4008C*

INHALTSVERZEICHNIS

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	3
TABELLENVERZEICHNIS	7
ABKÜRZUNGEN	8
1 KURZDARSTELLUNG	9
1.1 AUFGABENSTELLUNG.....	9
1.2 VORAUSSETZUNGEN, UNTER DENEN DAS VORHABEN DURCHGEFÜHRT WURDE	12
1.3 PLANUNG UND ABLAUF DES VORHABENS	13
1.4 WISSENSCHAFTLICHER UND TECHNISCHER STAND AN DEN ANGEKNÜPFT WURDE	14
1.4.1 <i>Natürliche Seismizität, mikroseismische Überwachung & Messverfahren (AP1.2, AP3.1)</i>	14
1.4.2 <i>Geschwindigkeitsmodell zur Lokalisierung der seismischen Ereignisse (AP3.2)</i>	15
1.4.3 <i>Bodenbewegung Überwachung und Messverfahren (AP1.4, AP3.3)</i>	16
1.4.4 <i>Thermisch-hydraulisch-mechanische Modellierung (AP4.2-AP4.5)</i>	17
1.4.5 <i>Literaturverzeichnis</i>	19
1.5 ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN STELLEN	21
2 ERGEBNISSE	23
2.1 VERWENDUNG DER ZUWENDUNG MIT GEGENÜBERSTELLUNG DER VORGEGEBENEN ZIELE	23
2.1.1 <i>AP1: Basisdatenerhebung und Datenaufnahme (Leitung: KIT)</i>	23
2.1.2 <i>AP2: Datenmanagement (Leitung: SWM)</i>	39
2.1.3 <i>AP3: Monitoring und Datenbearbeitung (Leitung: KIT)</i>	41
2.1.4 <i>AP4: Reservoirmodellierung (Leitung: KIT)</i>	55
2.1.5 <i>AP5: Datenintegration (Leitung: SWM)</i>	70
2.1.6 <i>AP6: Kommunikation (Leitung IEP)</i>	80
2.1.7 <i>AP7: Projektmanagement (Leitung KIT)</i>	80
2.1.8 <i>Literaturverzeichnis</i>	81
2.2 DIE WICHTIGSTEN PUNKTE DES ZAHLENMÄßIGEN NACHWEISES.....	83
2.2.1 <i>Personal</i>	83
2.2.2 <i>Geräte und Investitionen</i>	83
2.2.3 <i>Vergabe von Austrägen</i>	83
2.2.4 <i>Mieten und Rechner</i>	84
2.3 NOTWENDIGKEIT UND ANGEMESSENHEIT DER GELEISTETEN ARBEITEN	84
2.4 VORAUSSICHTLICHER NUTZEN UND VERWERTBARKEIT DER ERGEBNISSE IM SINNE DES FORTGESCHRIEBENEN VERWERTUNGSPLANES ..	84
2.4.1 <i>Perspektiven mit dem seismischen Netzwerk</i>	84
2.4.2 <i>Perspektiven mit der Reservoirmodellierung</i>	85
2.4.3 <i>Perspektiven mit dem Reservoir Management System</i>	85
2.4.4 <i>Geodätische und fernerkundliche Perspektiven</i>	85
2.5 BEKANNTGEWORDENE FORTSCHRITTE WÄHREND DES PROJEKTES AUF DEM GEBIET DES VORHABENS BEI ANDEREN STELLEN	86
2.6 ERFOLGTE ODER GEPLANTE VERÖFFENTLICHUNGEN DES ERGEBNISSES	86
2.6.1 <i>Tagungsbeiträge</i>	86
2.6.2 <i>Konferenz-Artikel</i>	88
2.6.3 <i>Peer-reviewed Publikationen</i>	88
2.6.4 <i>Berichte</i>	88
2.6.5 <i>Sonstiges</i>	89

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Übersicht über die INSIDE Arbeitspakete und die jeweils verantwortlichen Projektpartner.9

Abbildung 2: Gebiet und geothermische Standorte, auf die sich das INSIDE-Projekt konzentrierte. ...10

Abbildung 3: Übersicht über das gesamten seismischen Messnetz im Süden von München. Die schwarzen Linien stellen die Projektion der Bohrlochpfaden an den Standorten Pullach und Schäftlarnstraße (Sendling) auf die Oberfläche dar. Weiße Rauten markieren die INSIDE- Messstellen, grüne Rauten zeigen die Positionen der Stationen des BayernNetzes betreibt bei den Geophysikalischen Observatoriums Fürstenfeldbruck (GOF)/ LMU.24

Abbildung 4: Überblick über die Messstandorte auf einer Karte des Münchner Südens mit Bildern vor Ort, um die Vielfalt der Instrumente und Konfigurationen zu illustrieren.....25

Abbildung 5: Gemessene Bodenunruhe an den seismischen Stationen des Netzes, quantifiziert als statistische Verteilung von 195 Werten. Die Messungen sind für die Ost- (a), Nord- (b) und die vertikale (c) Komponenten dargestellt. Die Striche reichen bis zu den extremen Datenpunkten (Min. und Max.). 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.....27

Abbildung 6: Simulierte Detektionsfähigkeit über dem Untersuchungsgebiet, bewertet anhand des an den INSIDE-Stationen aufgezeichneten seismischen Bodenunruhe. Die Karte zeigt die minimale nachweisbare Magnitude für Ereignisse, die sich auf dem Niveau des geothermischen Reservoirs (2300 m ü. NN) befinden.....28

Abbildung 7: Layout des Mini-Array im Siemenspark mit Beispiel einer Messstelle.29

Abbildung 8: Array- Transferfunktion des aus 9 Geophonen bestehenden Arrays im Siemens Park. Die Abbildung zeigt die relative Leistung der Array- Response normiert mit ihrem Maximum als Funktion der Wellenzahl- Differenz.29

Abbildung 9: Layout des Fiber-Optic Sensing Messstation in Buchenhain, mit dem BUCH-Seismometer an der Oberfläche (S) und der 250 Tiefe Überwachungsbohrung (W). Die gepunktete Linie zeigt den Verlauf des oberflächennah verlegten GFKs.30

Abbildung 10: Relative Leistung der Array- Response normiert mit ihrem Maximum als Funktion der Wellenzahldifferenz. Bei der Berechnung der Array- Transferfunktion wird davon ausgegangen, dass jeder DAS Messpunkt durch ein Seismometer ersetzt wird, d.h. wir vernachlässigen Effekte, die mit der Richtwirkung des Wellenfeldes und der Geometrie des GFK zusammenhängen.....31

Abbildung 11: Überblick über das Untersuchungsgebiet. Panel (a): Lage des geothermischen Gebiets im südlichen Teil der Stadt München und Projektion der sechs Bohrlochpfaden auf die Oberfläche. Rote Linien bezeichnen Förderbohrungen und blaue Linien zeigen Injektionsbohrungen. Das Gauß-Krüger-4-Koordinatensystem wird für die Markierungen Northing und Easting verwendet. Panel (b): Fokus auf das Geothermiefeld Schäftlarnstraße. Das graue Polygon zeigt die Lage des Kontrollraums, in dem das Abfrage- und Aufzeichnungssystem Febus A1-R auf dem Bohrplatz installiert wurde. Panel (c): Fertigstellung der Bohrung TH3 auf den ersten 900 m (oben) und im offenen Bohrlochabschnitt bis zur Endteufe (unten). Das TH3-Kabel, das im Mittelpunkt der Studie steht, ist hinter einer Verrohrung

zementiert. Die Installation ermöglicht es, den Abschnitt zweimal zu untersuchen, da das GFK eine U-Schleife mit einer Mikrokurve in 692 m Tiefe (TVD) bildet. Das Bohrloch verläuft in dem betreffenden Abschnitt vertikal. Das Kabel ist auf der einen Seite mit einem mit Ringraumflüssigkeit gefüllten Anker und auf der anderen Seite mit den flachen Sedimentschichten des Molassebeckens verbunden.33

Abbildung 12: Schematische Darstellung des vorgeschlagenen Überwachungssystems zur Verbindung des TH3 GFK, des Febus A1-R Systems, der entwickelten IoT-Cloud-Plattform und der Nutzer oder Entwickler der Infrastruktur. Die Schlösser sollen eine sichere Verbindung darstellen. 34

Abbildung 13: Lage der Geothermieanlage Schäftlarnstraße im Raum München (Sendling) und Trajektorie der sechs Bohrungen. Die roten Kurven zeigen die Bohrung SLS TH6, in der die Quelle betrieben wurde. Die blauen Kurven zeigen die Bohrungen SLS TH3 und SLS TH4, die die Daten mit Hilfe von GFK aufgenommen haben, die über die durch die lila Pfeile gekennzeichneten Abschnitte verlegt wurden.....35

Abbildung 14: Advanced Sparker Tool (AST) von Avalon Sciences Ltd. Source: <https://avalonsciences.com/>. 36

Abbildung 15: Standorte der vier permanenten GNSS-Referenzstationen, die im Rahmen von INSIDE installiert wurden, sowie einer SAPOS® Referenz-station der Landesvermessung (rote Symbole). Schwarze Linien geben die auf die Oberfläche projizierten Bohrfpade (in Planung für Baierbrunn) an. Grüne Symbole zeigen vermarktete Nivellement-Messpunkte.....39

Abbildung 16: Vorgeschlagene Architektur der INSIDE-Datenbank..... 40

Abbildung 17: Schematic of the IT infrastructure used to transfer in real-time the DAS data from the Schäftlarnstraße technical room to the Internet of Thing cloud platform of the SWM operator. 41

Abbildung 18: Karte der berechneten Epizentren. Die seismischen Stationen sind durch grüne Punkte und die von GOF übermittelten Beobachtungen durch schwarze Punkte dargestellt. Für jedes Epizentrum berechnen wir die Entfernung zur übermittelten Station (Hintergrundfarben), wenn kompatible Daten verfügbar sind.42

Abbildung 19: Tiefe der absoluten Hypozentren der 79 detektierten seismischen Ereignisse. Die Fehlerbalken entsprechen der Länge der großen Halbachse des 68%-Konfidenzellipsoids und verdeutlichen Unsicherheiten bei der Lokalisierung. Die blaue Linie ist ein Hinweis auf die Tiefe des Reservoirs.....43

Abbildung 20: Beispiel für seismische Signale, die mit dem 3C-Seismometer WBRU aufgezeichnet und im Frequenzband 5-40 Hz gefiltert wurden..... 43

Abbildung 21: Beispiel eines Datensatzes, der am 15. Januar 2023 an der DAS-Station Buchenhain gesammelt wurde. Panel (a) zeigt die Messpunkte an den oberflächennahen Kabelschleifen mit den gemessenen Ankunftszeiten für die erste P- (rote Linie) und S-Welle (blaue Linie). Panel (b) zeigt die Messungen des BUCH-Seismometers, das sich in Panel (a) mit dem eingekreisten S befindet. Die Aufzeichnungen sind im Frequenzband 5-50 Hz bandpassgefiltert. Panel (c) zeigt die DAS-Daten, die im Überwachungsbrunnen entlang der 250 m aufgezeichnet wurden, mit den gemessenen P- (blau) und S-Wellenankünften (rot). 45

Abbildung 22: Die Pfeile zeigen den Rückazimut (links) und die Einfallsrichtung (rechts) des Wellenfelds, gemessen mit den DAS-Aufzeichnungen an der Station Buchenhain für das seismische Ereignis vom 15. Januar 2023. Die farbige Punktwolke stellt die kumulierte Wahrscheinlichkeitsfunktion dar, die für die absolute Lage des seismischen Ereignisses mit dem

Seismometer-Netz berechnet wurde. Sie wird auf die Karte projiziert und farblich bis zu ± 1 Standardabweichung (68 % der Werte) dargestellt.	46
Abbildung 23: DAS-Daten aus der Bohrung SLS-TH3 für zwei detektierte seismischen Ereignisse. Panel (a) bezieht sich auf das Ereignis vom 9. Februar 2022 und Panel (b) auf das Ereignis vom 22. April 2022. Die Panels zeigen die gefilterten Datensätze und die Signaturen der ersten P- und ersten S-Wellen-Ankünfte.....	46
Abbildung 24: Darstellung des Untersuchungsgebietes im Verhältnis zur Abdeckung der verfügbaren Daten an der Oberfläche. Die gestrichelten roten Linien zeigen die Abdeckung an der Oberfläche der Bohrungen, aus deren Geschwindigkeitsdaten für die Modellierung zur Verfügung stehen.....	48
Abbildung 25: Für jede betrachtete Schicht werden die Koordinaten der oberen Schichtgrenzen in Form eines strukturierten Punktrasters mit einer Probenahme von 25 m dargestellt. Diese Horizonte ergeben sich aus dem GRAME-3D-Projekt.	49
Abbildung 26: Verfügbare Geschwindigkeitsdaten aus VSP-Messungen und Sonic-Logs (Punkte). Die Bohrlochmessungen werden mit den Daten aus einem bei Erdwerk erstellten Modell verglichen (grüne Linien). Für die Erstellung des Modells werden die Geschwindigkeiten an den Horizonten so festgelegt, dass die Gradienten (schwarze Linien) möglichst genau mit den Bohrlochdaten übereinstimmen. ..	49
Abbildung 27: Darstellung von zwei orthogonalen Schnitten der VP- und VS-Modelle zur Visualisierung des Geschwindigkeitsgradienten in jeder Schicht und der Struktur des Modells.....	50
Abbildung 28: Höhendifferenzen März 2022 – März 2021 in der Umgebung der Geothermieanlage am Kraftwerk München Süd (Schäftlarnstraße), abgeleitet aus Wiederholungsnivellements (Dreiecke) und dem vertikalen PSI-Produkt des EGMS (Kreise). Das rote Rechteck markiert den Bereich, aus dem die Zeitreihen links zusammengestellt wurden. Die Linie markiert den Betriebsbeginn der Geothermieanlage Schäftlarnstraße.....	54
Abbildung 29: Höhendifferenzen in der Umgebung der Geothermieanlage am Kraftwerk München Süd (Schäftlarnstraße), abgeleitet aus Wiederholungsnivellements für den Zeitraum März 2024 – März 2021 (Dreiecke) und der PSI-Analyse des GIK für den Zeitraum Dezember 2023 – März 2021 (Kreise). Neben den Hebungen im Bereich TH3/TH5 sind weitere gleichartige Hebungsgebiete zu erkennen. Dominiert wird die Deformationskarte durch Absenkungen im Bereich der Untergrundbaustelle Marienhof, die Ende 2021 mit Beginn der Bauwasserhaltung einsetzen.	55
Abbildung 30: Vertikales Profilbeispiel des Spannungsfeldes in der Nähe der Bohrlochköpfe der Geothermieanlage Schäftlarnstrasse (Osten: 690369 m UTM32, Norden: 5332710 m UTM32). Shmax, Shmin, Sv und Porendruck nach Ziegler und Heidbach (2020) sind als volle Linien (plus/minus eine Standardabweichung als gepunktete Linien) dargestellt. Der Top-Purbeck und der Top-Kristallin sind durch graue bzw. braune gepunktete Linien hervorgehoben.....	56
Abbildung 31: Schäftlarnstraße. 3D-Ansicht der normierte ST der Störungen um die Bohrungen. Konfidenzniveau von 50 %. Die offenen Bohrsektionen sind in Rot dargestellt. Die graue Fläche stellt das Top Kristallin dar.....	57
Abbildung 32: Wie Abbildung 31, jedoch aus einem anderen Blickwinkel.	57
Abbildung 33: Schäftlarnstraße. Boxplots von ST für die Konfidenzniveaus 10% (blau), 50% (orange) und 90% (gelb), sobald eine Störungsfläche innerhalb des angegebenen Radius von der entsprechende Bohrung gefunden wird.	58
Abbildung 34: FE-Mesh des Pullach Geothermiereservoirs. Zu sehen ist die Oberkante des Malm Epsilon (grün) und im Hintergrund die Ränder bis an die Geländeoberkante (lila). Darüber hinaus die	

explizite Darstellung der Bohrungen als Linien und der Riffstruktur innerhalb des Malm Zeta im Bereich von Pullach TH3 (rot).	61
Abbildung 35: Temperaturänderungen (a) und Porendruckänderung (b) nach 50 Betriebsjahren.	62
Abbildung 36: Porosität (a) und Permeabilität (b) im Malm Zeta Reservoir im Bereich der Bohrung Pullach TH3 nach 50 Betriebsjahren.	62
Abbildung 37: Bodenbewegung nach 50 Betriebsjahren.	63
Abbildung 38: Konzept für die Modellierung der THM-Seismizität. Das durch die THM-Reservoirmodellierung (TIGER) vorgegebene Versagenskriterium an einer Störung löst die erdbebendynamische Modellierung (SeisSol) aus.	65
Abbildung 39: Illustration der Kopplung zwischen TIGER und SeisSol.	66
Abbildung 40: Geometrie des synthetischen Modells mit der Störung (grüne Ebene), dem Reservoir (blaues Volumen) und dem restlichen Medium (violette Volumen): a) Draufsicht, b) 3D-Gesamtansicht und c) Zoom in der Nähe der Störung mit Anzeige des Injektionspunkts (rotes Kreuz). Die vertikale schwarze Linie, die durch die Punkte A an der Oberfläche, B am Fuß der Störung und C am Modellboden definiert ist, gehört zur Störungsebene und kreuzt den Injektionspunkt.	67
Abbildung 41: Horizontaler Abschnitt zentriert auf den Injektionspunkt. Oben: Veränderung der Spannung-zz nach dem ersten seismischen Ereignis, berechnet mit SeisSol. Negative Spannungswerte entsprechen einer Kompression. Unten: Verschiebung entlang der Störung in x-Richtung nach dem ersten seismischen Ereignis. (Beachten Sie die Änderung des Maßstabs zwischen den beiden Diagrammen.)	69
Abbildung 42: Statistische Darstellung (mittels Boxplot) der für jedes detektierte Ereignis berechneten Scores, basierend auf SNR-Werten und Entfernungen zwischen Quelle und Sensor. Die mittlere horizontale Linie zeigt den Median und das Kreuz den Mittelwert. Die Whiskers zeigen das obere und untere Quartil.	72
Abbildung 43: SNR-Werte im Frequenzbereich von 5-40 Hz am SIEM-Sensor (schwarze Linie) und am Mini-Array (rote Linie). Die Y-Achse zeigt alle Ereignisse, die während des Betriebs des Mini-Arrays im Siemens-Park detektiert wurden. Die Ereignisse sind nach dem am SIEM-Seismometer beobachteten SNR sortiert.	73
Abbildung 44: Entwicklung mit Tiefe des SNR [-] der ersten Ankünfte, die für die Ereignisse vom 9. Februar und 22. April aufgezeichnet wurden. Es werden unterschiedliche Filterstrategien angewendet. Die Datensätze sind nur BP-gefiltert zwischen 5 und 40 Hz (rote Punkte) oder BP- und f-k-gefiltert durch Auswahl des f-k-Bereichs, der mit aufwärts gerichteten Wellenfeldern verbunden ist (blaue Punkte) oder BP- und f-k-gefiltert durch Auswahl des f-k-Bereichs, der mit den sich entlang des Kabels ausbreitenden P-Wellen verbunden ist (schwarze Punkte). Die ungefilterten Datensätze werden unten im f-k-Bereich angezeigt. Die durchgezogenen, gestrichelten und gepunkteten Linien entsprechen jeweils scheinbaren Geschwindigkeiten von 3500, 1600 und 500 m/s.	74
Abbildung 45: Vergleich der seismischen Signale, die von der DAS-Station in Buchenhain in der Überwachungsbohrung und auf der vertikalen Komponente des BUCH-Seismometers erfasst wurden, für das Ereignis am 15. Januar 2023 (nach der Datentyp-Konvertierung).	75

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Liste der Arbeitspakete und Angabe des Abschlussbericht des Partners, in dem die detailliertesten Informationen zu finden sind.....	11
Tabelle 2: Übersicht über die Messstandorte im INSIDE-Projekt mit Standort, Stations-ID und Instrumentierung.....	25
Tabelle 3: Übersicht über die mit Seismometern ausgestatteten Messstellen mit Stationskennung, Standort (im Gauß-Krüger-4-Koordinatensystem, EPSG 31468), Datum der Inbetriebnahme und Abtastrate.....	26
Tabelle 4: Minimale und maximale lokale Magnituden der Ereignisse in den Hauptclustern.....	43
Tabelle 5: Eigenschaften des synthetischen Fallmodells.....	68

ABKÜRZUNGEN

AP: Arbeitspaket
BBD: Bodenbewegungsdienst Deutschland
DAS: Verteilt akustische Sensorik (engl. Distributed Acoustic Sensing)
DSS: Verteilt Dehnungsmessung (engl. Distributed Strain Sensing)
DTS: Verteilt Temperaturmessung (engl. Distributed Temperature Sensing)
DTSS: Verteilt Temperatur- und Dehnungsmessungen (engl. Distributed Temperature and Strain Sensing)
DLR: Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DT: Dilation-Tendency
EGMS: Europäische Bodenbewegungsdienst
f-k: Frequenz-Wellenzahl
GAB: Geothermie-Allianz-Bayern
GFK: Glasfaserkabel
GNSS: Globale Navigationssatellitensystem
GOF: Geophysikalischen Observatorium Fürstfeldbruck
GtV: Bundesverband Geothermie e.V.
IEP: Innovativen Energie für Pullach GmbH
InSAR: Radarinterferometrie
KIT: Karlsruher Institut für Technologie
LMU: Ludwig-Maximilians-Universität
PPSD: Probabilistic Power Spectral Density
PS: Persistent-Scatterer
PSI: Persistent-Scatterer-SAR-Interferometrie
SLS: Schäftlarnstraße (Sendling)
SNR: Signal-Rausch-Verhältnis
ST: Slip-Tendency
SWM: Stadtwerke München Services GmbH
TH: Thermo-hydraulische (*Modellierung*)
THM: Thermo-hydraulisch-mechanische (*Modellierung*)
TUM: Technische Universität München
VSP: Vertikale seismische Profil

1 KURZDARSTELLUNG

1.1 AUFGABENSTELLUNG

Das Forschungs- und Entwicklungsprojekt INSIDE (Induzierte Seismizität und Bodendeformation als Interferenzaspekt beim Betrieb von Geothermieranlagen in der süddeutschen Molasse) hatte zum Ziel, das Verständnis der Prozesse im tiefen Untergrund im Zusammenhang mit der geothermischen Nutzung zu verbessern. Wichtige Aufgaben waren die Untersuchung von induzierter Seismizität und Bodenbewegungen im Zusammenhang mit der Gewinnung von geothermischer Energie mittels innovativer Beobachtungstechniken und Reservoirmodellierung sowie eine Integration der Monitoring- und Modellierungsergebnisse, um die Entwicklung eines Prototyps für ein Reservoir-Management-System zu initiieren.

Zu diesem Zweck wurden im Verbundprojekt INSIDE gemeinsam mit den Verbundpartnern Stadtwerke München Services GmbH (SWM) und der Innovativen Energie für Pullach GmbH (IEP) sieben Arbeitspakete (AP) bearbeitet (Abbildung 1). Das KIT leitete das gesamte Projekt und die AP1, AP3, AP4 und AP7, war aber auch an den übrigen Arbeitspaketen beteiligt.

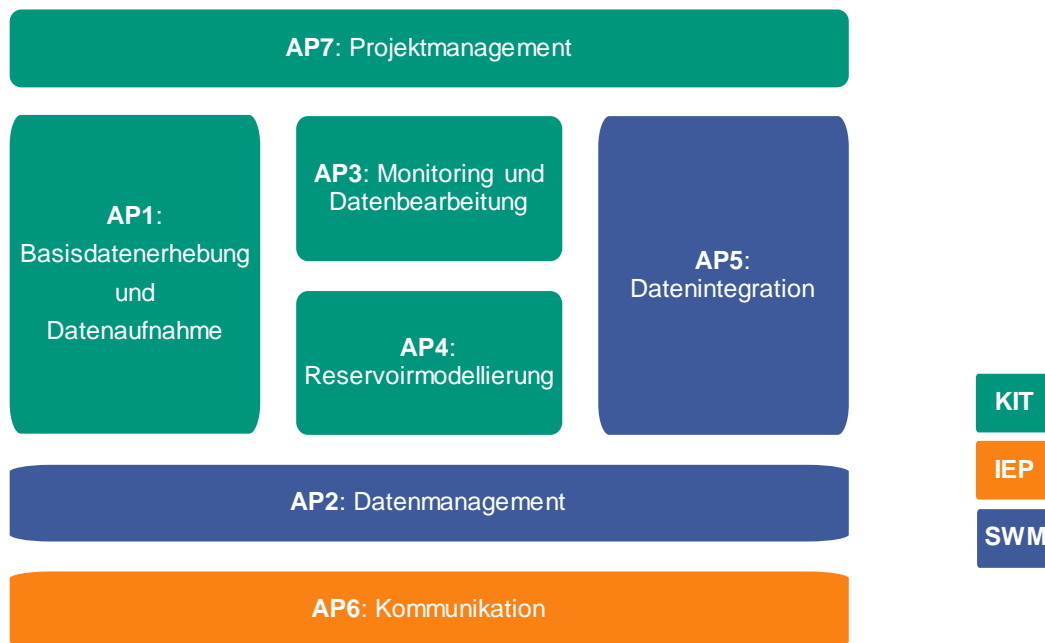


Abbildung 1: Übersicht über die INSIDE Arbeitspakete und die jeweils verantwortlichen Projektpartner.

Drei geothermische Standorte standen im Mittelpunkt des Projekts: Pullach i. Isartal, Schäftlarnstraße (Heizkraftwerk Süd), der sich während des Projekts in der Endphase der Entwicklung befand und seit 2021 in Produktion ist, und der Standort Baierbrunn, der sich in der Planung befindet (Abbildung 2).

Das Ziel des AP1 bestand darin, eine umfassende Datenbasis als Grundlage zur Bearbeitung der verschiedenen Aspekte zusammenzustellen. Dies beinhaltete zum einen die Zusammenführung vorhandener Daten zur Beschreibung des Untergrunds der Standorte, zum anderen die Bereitstellung und Gewinnung neuer Daten. Für das KIT bestand die Hauptaufgabe im AP1 darin, ein hoch-sensitives seismologisches Netzwerk auf der Grundlage von Oberflächenseismometern, Bohrlochseismometern, einem Mini-Array und mehrere Glasfaserkabel, sowie ein geodätisches Netzwerk auf der Grundlage

von GNSS-Stationen, Radarsatellitendaten und Nivellierungsmessungen zur Überwachung von induzierter Seismizität und Oberflächendeformationen einzurichten. Die Zusammenführung all dieser Daten, einschließlich der Verwaltung von Zugriffsrechten, um sie für andere APs verfügbar zu machen, war das Hauptthema des AP2, das sich auf die beste Art und Weise der Datenverwaltung konzentrierte. AP3 befasste sich mit der Verarbeitung und Analyse der seismologischen und geodätischen Daten, die im Laufe des Projekts gesammelt wurden. Eines der erwarteten Ergebnisse war die Kalibrierung von Reservoirmodellen, die in AP4 entwickelt wurden. In AP4 sollten neben Slip- und Dilation Tendency Analysen auch dynamische thermo-hydro-mechanische Modelle von geothermischen Reservoirs entwickelt und eine Kopplung dieser Modelle mit der induzierten Seismizität initiiert werden, mit dem Ziel, diese simulieren zu können. In AP5 sollten die erzielten Ergebnisse ausgewertet und verglichen werden, sofern dies möglich war. Eine weitere wichtige Aufgabe des AP5 war die Integration der Monitoring- und Modellierungsergebnisse, um die Entwicklung eines Prototyps für ein Reservoir-Management-System zu initiieren, das den Betrieb von geothermischen Anlagen steuert, um die potenziellen Risiken von Seismizität und Deformation zu mindern. AP6 schließlich sorgte für die Kommunikation über das Projekt, seine Ziele und die erzielten Ergebnisse. Das AP7 war dem Projektmanagement gewidmet.

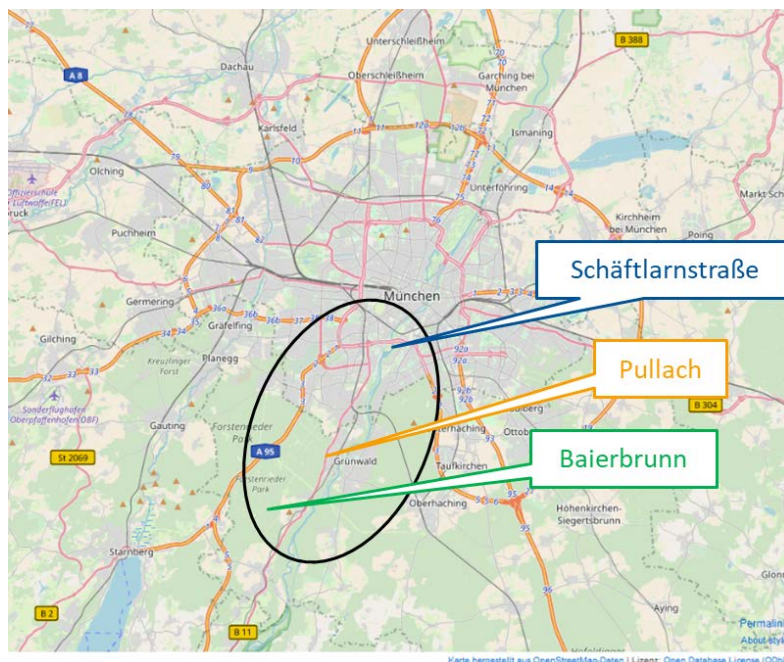


Abbildung 2: Gebiet und geothermische Standorte, auf die sich das INSIDE-Projekt konzentrierte.

Jedes der sieben Arbeitspakete des INSIDE-Projektes wurde von einem der Partner hauptverantwortlich betreut, jedoch waren an jedem Arbeitspaket auch alle anderen Partner beteiligt. Folglich hat jeder Partner zwar unterschiedliche, aber sich ergänzende Beiträge zum selben Zweck geleistet. Die Vielfalt an Beiträgen wird in dem von jedem einzelnen Partner vorgelegten Projektabschlussbericht deutlich. Der hier vorliegende Bericht betrifft den Beitrag des KIT und kann daher nicht die gesamte Arbeit widerspiegeln, die in dem gemeinsamen Projekt geleistet wurde. In Tabelle 1 sind alle im Projekt definierten Aufgaben sowie die verantwortlichen Partner und Hauptakteure aufgeführt, deren Berichte das jeweilige Thema abdecken.

Tabelle 1: Liste der Arbeitspakete und Angabe des Abschlussbericht des Partners, in dem die detailliertesten Informationen zu finden sind.

Arbeitspakete	Bericht
AP1 Basisdatenerhebung und Datenaufnahme (Leitung: KIT)	
AP1.1 Regionale Geologie und geophysikalische Daten für die Reservoircharakterisierung	SWM/IEP
AP1.2 Seismisches Monitoring	Alle
AP1.3 Bohrlochmessungen Sparker-Kampagne Pullach TH3 VSP	SWM/KIT IEP
AP1.4 Deformationsmessungen an der Oberfläche	KIT
AP1.5 Tracerversuche	SWM
AP1.6 Kernuntersuchungen	SWM
AP2 Datenmanagement (Leitung: SWM)	
AP2.1 Anforderungsanalyse an Hardware und Software, Konzepte & Design des Datenmanagements	SWM
AP2.2 Aufbau eines Datenmanagement-Systems	SWM
AP2.3 Konzeptentwicklung Datenmanagement	SWM
AP3 Monitoring und Datenbearbeitung (Leitung: KIT)	
AP3.1 Post-Prozessieren der aufgezeichneten mikroseismischen Daten	KIT
AP3.2 Prozessieren der Bohrloch-Logging Daten	Alle
AP3.3 Prozessieren von Deformationsmessungen an der Oberfläche	KIT
AP3.4 Datenauswertung der Kernuntersuchungen	SWM
AP4 Modellierung (Leitung: KIT)	
Schäftlarnstraße	
AP4.1 Geologische und Strukturgeologische Modellierung	SWM
AP4.2 Geomechanische Modellierung	SWM/KIT
AP4.3 TH Modellierung nach Abteufen der Bohrungen	SWM
AP4.4 Gekoppelte THM Modellierung nach Abteufen der Bohrungen	SWM
Baierbrunn (vor Bohrbeginn)	
AP4.1 Geologische und Strukturgeologische Modellierung	IEP
AP4.2 Geomechanische Modellierung vor Bohrbeginn	IEP/KIT
Pullach	
AP4.1 Geologische und Strukturgeologische Modellierung	IEP
AP4.2 Geomechanische Modellierung	KIT
AP4.3 TH Modellierung	KIT
AP4.4 THM Modellierung	KIT
Synthetic	
AP4.5 THM-S Modellierung	KIT
AP5 Datenintegration (Leitung: SWM)	
AP5.1 Kosten-/Nutzenanalyse der seismischen Aufzeichnungen	KIT
AP5.2 Integration Deformationsdaten und Kosten-/Nutzenanalyse	KIT
AP5.3 Interpretation der Seismizität und der In-Situ Daten hinsichtlich betrieblicher Abläufe und geologisch/tektonischer Gegebenheiten	Alle
AP5.4 Vergleich der numerischen Modellierungsergebnisse und der beobachteten Daten	Alle
AP5.5 Verfahrensentwicklung zur Integration der Ergebnisse in ein dynamische RMS und zum Aufbau der techn. Umsetzung in die Leitzentrale	Alle
AP5.6 Mögliche operative Empfehlungen	Alle
AP6 Kommunikationsstrategie (Leitung: IEP)	
AP6.1 Entwicklung von Kommunikationskonzepten und einer Kommunikationsstrategie zur Erhöhung der Akzeptanz der Geothermie	IEP/SWM
AP6.2 Umsetzung der Kommunikationsstrategie	IEP/SWM
AP6.3 Bewertung der Kommunikationsstrategie in Zusammenarbeit mit externen Partnern	IEP
AP6.4 Wissenstransfer u.a. peer-reviewed Publikationen, wissenschaftliche Konferenzen, Workshops	Alle
AP7 Projektmanagement (Leitung: KIT)	

1.2 VORAUSSETZUNGEN, UNTER DENEN DAS VORHABEN DURCHGEFÜHRT WURDE

Die Bundesregierung hat mit ihrem Energiekonzept die Weichen für die zukünftige Energieversorgung in Deutschland gestellt und das zentrale Ziel formuliert, bis 2050 die Treibhausgasemissionen um mindestens 80% gegenüber dem Jahr 1990 zu senken. Kernpunkt des Energiekonzeptes und ein Hauptziel des 7. Energieforschungsprogrammes des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) ist die verlässliche und umweltverträgliche Bereitstellung von Energie zu bezahlbaren Preisen und ihr effizienter Einsatz als Grundlage der deutschen Wirtschafts- und Energiepolitik. Mit der Dekarbonisierung des Energiesystems setzt die Politik auf den Einsatz regenerativer Energieträger, wobei der Geothermie für die Bereitstellung von Wärme und Elektrizität eine große Bedeutung zukommt.

Das Projekt INSIDE möchte daher zu einer sicheren und nachhaltigen Entwicklung der geothermischen Energienutzung im Molassebecken für die Stadt München und Umgebung beitragen. Der Projektpartner SWM hat sich das ehrgeizige Ziel gesetzt, im Jahr 2019 den Wärmebedarf der Stadt München zu 100% aus erneuerbaren Energien zu decken. Die Geothermie soll dabei einen wesentlichen Bestandteil der Versorgung darstellen. Dementsprechend findet derzeit eine große Erschließungsstrategie im Münchner Großraum statt. Deshalb verbindet INSIDE als Verbundvorhaben eine Forschungseinrichtung (KIT) mit kommunalen Energieversorgern und Geothermie-Betreibern (SWM & IEP), um anwendungsorientierte Forschungsthemen dabei gezielt durch Demonstrationsvorhaben zu flankieren.

In diesem Kontext befand sich die Geothermieanlage Schäftlarnstraße (Sendling/München) zu Beginn des Projekts in der letzten Entwicklungsphase. Diese von den SWM betriebene Anlage ist einer der Standorte, die im Rahmen des Projekts im Mittelpunkt stehen (Abbildung 2). An diesem Standort wurden sechs abgelenkte Bohrungen angeteuft. Die Anlage wurde im July 2021 in Betrieb genommen. Im Süden der Stadt München war die Geothermieanlage Pullach im Isartal, die von IEP, dem anderen INSIDE-Projektpartner, betrieben wird, ebenfalls ein Schwerpunkt des Projekts. Diese Anlage ist seit 2005 in Betrieb. Weiterhin hatten SWM und IEP zu Beginn des Projekts die Absicht, gemeinsam einen neuen Geothermiestandort in Baierbrunn (südlich von Pullach) zu erschließen, der ebenfalls Ziel des Projekts war. Leider wurde die Erschließung des Standorts Baierbrunn verschoben und mehrere damit verbundene Aufgaben konnten während der Laufzeit des Projektes nicht mehr durchgeführt werden. Daher wurden die Anstrengungen, die diesem Standort gewidmet waren, auf die Standorte Pullach und Schäftlarnstraße umverteilt. Damit konzentrierte sich das INSIDE-Projekt auf einen sehr neuen und einen alten Geothermiestandort sowie gleichzeitig auf eine innerstädtische Anlage und eine Vorortanlage.

Zu Beginn des Projekts war aus dem Bereich des im Aufbau befindlichen Standortes Schäftlarnstraße keine Seismizität bekannt. Am Geothermiestandort Pullach bestand eine schwache seismische Aktivität, die aber nie zu spürbaren Ereignissen führte. Das Niveau der seismischen Aktivität in Pullach war nicht vergleichbar mit der Seismizität, die an den nahe gelegenen Geothermiestandorten Unterhaching und Oberhaching induziert wird. Ziel des seismischen Monitorings im Rahmen des INSIDE-Projekts war es daher, mögliche Veränderungen mit der Inbetriebnahme des Standorts Schäftlarnstraße zu beobachten und die seismische Ruhe des Standorts Pullach zu überprüfen. Dies konnte nur durch die Einrichtung eines hochempfindlichen seismischen Netzes in den Untersuchungsgebieten erreicht werden, das das bestehende vom Erdbebendienst Bayern (das Geophysikalische Observatorium in Fürstenfeldbruck) verwaltete Überwachungsnetz ergänzen sollte.

1.3 PLANUNG UND ABLAUF DES VORHABENS

Alle in den APs definierten Aufgaben (s. Tabelle 1) wurden bearbeitet, mussten aber zum Teil angepasst werden, entsprachen nicht unseren Erwartungen oder wurden später als erwartet ausgeführt. Aufgrund der Corona-Virus-Pandemie und der damit verbundenen Lockdown-Phasen kam es zu Verzögerungen bei der Durchführung der ursprünglichen Aufgaben des Projekts, insbesondere AP1 und in der Folge AP3 und AP5 betreffend. Dies führte dazu, dass eine erste kostenneutrale Verlängerung des Projekts um ein Jahr beantragt und akzeptiert wurde. Dies wurde auch mit der Schwierigkeit begründet, einen Doktoranden für die Durchführung der Aufgabe AP4.5 zu finden. Somit wurde das Projekt bis zum 31.08.2023 verlängert. Ein zweiter Antrag auf eine kostenneutrale Projektverlängerung wurde im Mai 2023 gestellt. Dies wurde vom KIT beantragt und von den Partnern akzeptiert. Die Hauptbegründungen waren die geringe Seismizität, die bisher mit dem installierten seismischen Netzwerk beobachtet wurde und der Verlust von AP3.3-Ergebnissen aufgrund eines Server-Hacks verbunden mit der Notwendigkeit, die Rohdaten neu zu verarbeiten. Die Verlängerung wurde akzeptiert und der Projektabschluss auf den 31.05.2024 festgelegt.

Da die Entwicklung des Standorts Baierbrunn verschoben wurde, konnten mehrere damit verbundene Aufgaben nicht durchgeführt werden. Daher wurden die Anstrengungen, die diesem Standort gewidmet waren, auf die Standorte Pullach und Schäftlarnstraße umverteilt. So wurde ein Cross-Well-Survey zur besseren Beschreibung des Geschwindigkeitsmodells in der Schäftlarnstraße mit einer Sparker-Quelle und verteilt akustischer Sensorik (DAS) durchgeführt wurde (AP1.3 und AP3.2). Das für Baierbrunn geplante vertikale seismische Profil (VSP) wurde in der Bohrung Pullach TH3 angewendet.

Zu Beginn konzentrierte sich das Projekt auf die Erfassung von Daten aus den in Frage kommenden geothermischen Standorten: Schäftlarnstraße und Pullach (AP1). Ein wesentlicher Teil bestand in der Konzeption und dem Aufbau von seismischen und geodätischen Messnetzen (AP1.2, AP1.4). Das in der Umgebung von Pullach eingerichtete seismische Netz ergänzt die bestehenden seismischen Messnetze. Die erste Oberflächenstation begann mit der Erfassung am 26.11.20, die nächsten drei am 26.03.21 und die fünfte am 10.06.21. Das geodätische Netz wurde entlang einer fast in Nord-Süd-Richtung verlaufenden Linie konzipiert, die in der Nähe der Schäftlarnstraße beginnt und in Baierbrunn endet. Die Datenaufzeichnungen begannen am 25.03.21 in Pullach, es folgten Marie-Einsiedel-Bad am 26.03.21, Baierbrunn am 04.08.22 und Schäftlarnstraße am 15.09.22. Am 16-20.11.20 fand das Crosswell survey in der Schäftlarnstraße zwischen TH6 und TH3/TH4 statt, um das Geschwindigkeitsmodell an diesem Standort besser zu beschreiben (AP1.3).

Sobald die erste seismische Station in Betrieb genommen wurde, begann die Überwachung und wurde bis zum Ende des Projekts fortgesetzt (AP3.1). Alle seismischen Daten, die zwischen März 2021 und Dezember 2023 durch das permanente Netzwerk erfasst wurden, wurden verarbeitet.

Die kontinuierlich erfassten GNSS-Daten wurden bis 14.11.23 (Baierbrunn 29.11.23) prozessiert und ausgewertet (AP 3.3). Zu Beginn des Projektes wurde eine erste Teillieferung der ausgewerteten TerraSAR-X-Daten durch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) zur Verfügung gestellt. Die zweite Teillieferung mit einer homogenisierten Auswertung für den Zeitraum Nov. 2015 bis Dez. 2021 erfolgte verabredungsgemäß im April 2022. Der Beitrag des DLR beschränkte sich damit auf die ursprünglich geplante Projektlaufzeit. Am GIK wurde in der ersten Hälfte des Jahres 2021 eine Persistent-Scatterer-Analyse der Radarszenen der Satellitenmission Sentinel-1 durchgeführt. Diese Ergebnisse sowie die im weiteren Verlauf erfolgte Verlängerung der interferometrischen Radarzeitreihen ging infolge des Server-Hacks im Nov. 2022 verloren. Im März 2024 wurden die Sentinel-1 Szenen für den Zeitraum Jan. 2019 bis Dez. 2023 neu prozessiert und analysiert. Die durch

die Betreiber zur Verfügung gestellten Nivellementdaten wurden projektbegleitend aufbereitet und analysiert; die letzte nivellistische Messkampagne wurde im Mai 2024 eingebunden.

Die seismische Datenverarbeitung erforderte die Erstellung von seismischen Geschwindigkeitsmodellen für P- und S-Wellen (AP3.2) aus den in AP1 gewonnenen Daten. Leider war die Cross-Well-Vermessung nicht erfolgreich und diese Daten konnten im Gegensatz zu den Pullach-VSP (AP1.3) und anderen Bohrlochdaten nicht integriert werden. Alle projektbezogenen Daten wurden in einem gemeinsamen Datenspeicher abgelegt (bwsync&share), der zu Beginn des Projektes vom KIT eingerichtet wurde. Jeder Partner hatte Zugang zu dieser Datenbank.

1.4 WISSENSCHAFTLICHER UND TECHNISCHER STAND AN DEN ANGEKNÜPFT WURDE

1.4.1 NATÜRLICHE SEISMIZITÄT, MIKROSEISMISCHE ÜBERWACHUNG & MESSVERFAHREN (AP1.2, AP3.1)

Seit 2008 wurden am Geothermiestandort Unterhaching seismische Ereignisse mit Magnituden bis zu 2,4 gemessen (Megies and Wassermann, 2014), was die Region ins Zentrum nationaler Forschungsprogramme zur induzierten Seismizität (Megies and Wassermann, 2017) rückte. Weitere Ereignisse, darunter bekannte Beben in Poing 2016 und 2017, wurden ebenfalls registriert (Seithel et al., 2019). Die Ursachen und Auswirkungen der induzierten Seismizität, besonders in Bezug auf geochemische Effekte, sind noch nicht vollständig verstanden und werden international erforscht. Es zeigt sich, dass diese Seismizität nicht nur bei Störungsteuert (z.B. Enhanced Geothermal Systems), sondern auch bei hydrothermalen Systemen auftreten kann, was den Bedarf an weiterführenden Untersuchungen unterstreicht.

Im MAGS-Projekt wurden bereits fünf seismische Stationen installiert, und das INSIDE-Projekt plant, zusätzliche Stationen in der Nähe der Geothermiestandorte Schäftlarnstraße, Pullach und Baierbrunn zu errichten, um das bestehende Netzwerk zu verstärken. Dies ist wichtig, da die Erschließung an der Schäftlarnstraße von vielen anthropogenen Störquellen beeinflusst wird. Die Stationen sollen auch mikroseismische Ereignisse mit Magnituden unter 1 erfassen, die oft durch den anthropogenen Noise verdeckt werden. Zur Erreichung der INSIDE-Ziele ist eine kontinuierliche, ungefilterte Datenerfassung erforderlich, die mit anderen Stationen kombiniert ausgewertet wird. Aktuell genügen die existierenden, meist getriggerten Messstationen nicht, um diese Anforderungen zu erfüllen. Viele der derzeit betriebenen Stationen entsprechen den Vorgaben des FKPE-Positionspapiers (FKPE, 2016), zeichnen jedoch nur bei über einem bestimmten Schwellenwert ausgelösten Ereignissen auf, was für eine detaillierte Untersuchung der mikroseismischen Aktivitäten nicht ausreicht.

In Deutschland regelt die DIN 4150 die Installation von Messstationen zur Überwachung von Erschütterungen, die z.B. bei der Nutzung geothermischer Reservoirs auftreten können (Deutsches Institut für Normung e. V., 2016). Diese Norm reicht jedoch nicht aus, um induzierte Seismizität für wissenschaftliche Zwecke zu erfassen, da sie keine ausreichenden Daten zur Risikominderung oder Reservoircharakterisierung liefert. Daher haben die GtV und das FKPE Richtlinien entwickelt, die vorsehen, dass mit mindestens fünf seismischen Stationen Erdbeben mit Magnituden größer $M_L \geq 1$ in 2 bis 5 km Tiefe erfasst werden können (Arbeitsgruppe „Induzierte Seismizität“ FKPE e.V., 2012). Das INSIDE-Projekt folgt dieser Vorgabe und konzentriert sich auf seismische Emissionen.

Ein Hauptaspekt von INSIDE ist der Einsatz und Vergleich von Instrumentierung und Konfiguration mit dem Ziel, eine effiziente aber kostengünstige Monitoring-Strategie für die geowissenschaftlichen, operativen und technischen Randbedingungen im Großraum München zu ermitteln (vgl. Barth and Gaucher, 2012). Daher ist im INSIDE Vorhaben neben der Nutzung und der Kombination etablierter Instrumentierung (Oberflächen- und Bohrlochgeophonen, Mini-Array Netzwerk) auch verteilt

akustische Sensorik (DAS, engl. Distributed Acoustic Sensing) über Glasfaserkabel (GFK) eingesetzt. In zwei Geothermiebohrungen in der Schäftlarnstraße wurde von Geothermie-Allianz-Bayern (GAB) und Technische Universität München (TUM) ein GFK verlegt. Damit wird innerhalb von INSIDE eine DAS zur seismischen Überwachung möglich. Die Aufnahme passiver seismischer Daten über glasfaseroptische DAS-Systeme in Bohrungen ist bereits Gegenstand aktueller Forschungsvorhaben (Daley et al., 2016; Reinsch et al., 2015); deren mögliche Anwendung, betriebliche und technische Eignung für die seismische Überwachung tiefer Geothermiestandorte ist jedoch noch nicht umfassend beantwortet. Durch die Installation von Oberflächen- und Bohrlochgeophonen, einem Mini-Array und glasfaseroptischen Kabeln (DAS, DSS, DTS) in aktiven Geothermiebohrungen und separaten, ungestörten Monitoringbohrungen ergibt sich im vorgeschlagenen INSIDE Forschungsvorhaben die einzigartige Gelegenheit, den Einsatz, die Eignung und die Leistungsfähigkeit dieser verschiedener Monitoringgeräte und -konfigurationen umfassend zu testen und zu vergleichen und deren Mehrwert (Kosten-Nutzen-Analyse) für die Geothermiebranche zu analysieren.

1.4.2 GESCHWINDIGKEITSMODELL ZUR LOKALISIERUNG DER SEISMISCHEN EREIGNISSE (AP3.2)

Die exakte vertikale Lokalisierung von Erdbeben ist für die Analyse der geomechanischen Prozesse von hoher Bedeutung, um geologische Aussagen über die Charakteristik des Ereignisses treffen zu können. Die optimale Datenverfügbarkeit (3D Seismik) ist an beiden Untersuchungsstandorten der IEP und der SWM gegeben. Messungen, die das Geschwindigkeitsfeld im Untergrund Münchens betreffen, wurden z. T. in den Projekten GRAME und GEOmaRe durchgeführt. Hierzu wurden VSP Messungen an Bohrungen in Freiham und Riem gemessen. Akustische Logs stellen eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung der Geschwindigkeit von P- und S-Wellen im Untergrund dar, wurden bisher in der Molasse noch nicht durchgehend über eine ganze Bohrungslänge gemessen.

An der Schäftlarnstraße ist eine VSP-Messkampagne mit DAS entlang der verlegten GFK geplant. Diese ist Teil des Projekts GEOmaRe (Partner SWM) und soll zu einer besseren Beschreibung der seismischen Geschwindigkeit an diesem Standort entlang der Bohrung führen. Zu beachten ist, dass über diese Ausbreitungseigenschaft seismischer Wellen, insbesondere über die S-Wellengeschwindigkeiten, im Untersuchungsgebiet bislang nur wenige Informationen verfügbar sind.

Ergänzend zu der VSP-Messkampagne ist es angedacht, in einer Geothermiebohrung in der Schäftlarnstraße (SWM Partner) aktive Sparkerschüsse durchzuführen. Ein Sparker ist dabei eine Wireline-Sonde, welche in einer Bohrung in verschiedene Tiefen abgelassen werden kann. Ein Sparker erzeugt in einer gewünschten Tiefe zwischen zwei Elektroden einen elektrischen Bogen mit einem Hochspannungsimpuls. Dieser führt in einem lokalen Volumen zur schlagartigen Verdampfung von Wasser, welcher expandiert und ein Druckwellen an die Umgebung abgibt. Die erzeugten Frequenzen liegen dabei im Bereich von 50 bis 4000 Hz. Da die Prozedur detailliert wiederholt werden kann, kann der Sparker als reproduzierbare, wohl definierte, seismische Quelle betrachtet werden, welche zusätzlich die Integrität der Bohrung nicht gefährdet. Diese Sparkerschüsse können somit ideale Kalibrationssignale für seismische Monitoringgeräte aller Art abgeben (Geophone, DAS-Kabel etc.). Zusätzlich können damit 1) P- und S-Wellengeschwindigkeiten gemessen werden; 2) Geschwindigkeitsmodelle erstellt bzw. angepasst werden; 3) eine Qualitätskontrolle der Ergebnisse der VSP-Messung stattfinden. Letztendlich verbessern sich damit die Genauigkeit und die Leistungsfähigkeit aller seismischen Monitoringgeräte und -konfigurationen im Untersuchungsgebiet.

1.4.3 BODENBEWEGUNG ÜBERWACHUNG UND MESSVERFAHREN (AP1.4, AP3.3)

Das geodätische Telexperiment zum Bodenbewegungs-Monitoring knüpft an klassische und moderne geodätische und fernerkundliche Verfahren an:

Nivellement: das Nivellement besitzt von allen geodätischen Verfahren die höchste Genauigkeit ($< 1 \text{ mm}$) bei der Bestimmung von Höhen und Höhenunterschieden. Messpunkte werden auf der Basis geodätischer, bergmännischer und vermessungstechnischer Expertise angelegt und fest vermarktet. Die Lage der Punkte kann mit cm-Genauigkeit bzgl. eines geeigneten Referenzsystems eingemessen werden. Die Messwerte werden ohne aufwändige Prozessierungsschritte in ein standardisiertes Ausgleichsmodell eingeführt. Nivellements werden durch die Landesvermessung und Vermessungsbüros zur Vermessung und rechtskräftiger Dokumentation von natürlichen und anthropogenen Deformationsereignissen mit einem weiten Anwendungsbereich durchgeführt.

Globale Navigation Satellite Systems (GNSS): Im Gegensatz zum Nivellement misst GNSS alle drei Komponenten des Verschiebungsvektors am Erdboden (NS, EW, vertikal) mit mm- bis cm-Genauigkeit. Da bei einem Bodenbewegungsereignis mit einer Quelle im Untergrund grundsätzlich 3-dimensionale Verschiebungen an der Erdoberfläche auftreten, kann GNSS somit wichtige Zusatzinformationen liefern. Bodenverschiebungen können kontinuierlich mit einem Abtastintervall von bis zu einer Sekunde aufgezeichnet werden. Das Messverfahren ist nicht auf lokale Referenzpunkte angewiesen, sondern koppelt an globale Referenzrahmen an. GNSS ist in Navigationssystemen und technischen Geräten aller Art verbaut. Die Landesvermessung betreibt ein Netz aus permanenten GNSS-Stationen, um Korrekturdaten für genaue und hochgenaue Positionierung von Fahrzeugen und Maschinen bereitzustellen. Im wissenschaftlichen Bereich findet GNSS Anwendung bei der Vermessung von tektonischen und vulkanischen Prozessen, Hangrutschungen und Oberflächendehformationen durch anthropogene Eingriffe in den Untergrund.

Radarinterferometrie: Radarinterferometrische Verfahren liefern eine vergleichsweise sehr hohe räumliche Dichte von Messpunkten. Die Anzahl für Deformationsmessungen nutzbarer Messpunkte in urbanen Gebieten wie München liegt bei einigen 10.000 bis über 1.000.000, bei einer dem GNSS vergleichbaren Messgenauigkeit. Im Gegensatz zu den klassischen geodätischen Verfahren ist die Lage der Messpunkte nur mit Meter-Genauigkeit bekannt, da sie nicht a-priori angelegt und vermarktet werden. Durch die simultane Auswertung einer großen Anzahl von Bildstapeln, die über mehrere Jahre akquiriert werden, kann für jeden einzelnen PS-Punkt eine Zeitreihe mit einem Abtastintervall von wenigen Tagen abgeleitet und die Historie der (ggf. nicht-linearen) Bodenverschiebungen nachvollzogen werden. Die Persistent-Scatterer-SAR-Interferometrie (PSI) zur hochgenauen Deformationsmessung unter Nutzung der Phase der Radarechos ist seit ca. 20 Jahren etabliert und hat ihr Potential zum Erkennen und Messen von Bodenbewegungen durch eine Serie von Fallbeispielen nachgewiesen (Ferretti et al., 2001; Bamler et al., 2008; Crosetto et al., 2010). Die Bandbreite reicht von der Beobachtung natürlicher Deformationsereignisse durch Erdbeben, Vulkanismus und Hangrutschungen bis hin zu kleinräumigen, anthropogenen Prozessen, die durch eine Bewirtschaftung des Untergrundes hervorgerufen werden (Rohstoffförderung, Geothermie, Grundwasserentnahme).

Die Radarinterferometrie hat von allen Verfahren das größte Innovationspotential, sowohl was die technische Entwicklung neuer Satellitenmissionen als auch die methodische Weiterentwicklung der Auswertalgorithmen angeht. Auf Grund des hohen Prozessierungsaufwandes ist die Methode bei Behörden und Wirtschaftsunternehmen allerdings noch nicht weit verbreitet. Das könnte sich ändern durch den Bodenbewegungsdienst Deutschland (BBD), den die Bundesanstalt für Geowissenschaft

und Rohstoffe betreibt um die operationelle Nutzung der SAR-Interferometrie zu fördern. Zu Beginn des INSIDE-Projektes war eine deutschlandweite Bewegungskarte auf der Basis einer Persistent-Scatterer „Wide-Area“-Auswertung der C-Band Satelliten Sentinel 1a und 1b in Vorbereitung. Eine erste Teillieferung seitens des DLR, die noch nicht das volle Potential des avisierten Produktes ausschöpft, war erfolgt und befand sich in der Validierungsphase durch ausgewählte Landesämter und Behörden. Die vorliegenden Ergebnisse wurden kontrovers diskutiert. Fortschritte bei den Produkten des BBD während der Projektlaufzeit sollten geprüft und gegebenenfalls berücksichtigt werden.

Neben der Auswertung der C-Band Radarszenen der Satellitenmission Sentinel-1 wurden am Earth Observation Center des DLR bereits seit mehreren Jahren die Aufzeichnung von X-Band Daten im Großraum München prozessiert und auf einem Workshop zum Potential von PSI als Hilfsmittel bei der Einwirkungsbereichsfestlegung für Tiefengeothermie am 20.09.18 an der TU München präsentiert wurde. Vor Beginn des Projekts wurde die Bereitschaft der DLR geklärt, diese Ergebnisse im Rahmen eines Unterauftrages für das Projekt INSIDE nutzbar zu machen. Im Zuge dieser Vereinbarung sollten auch während der Laufzeit des Projektes bis 2021 weitere TerraSAR-X-Aufnahmen seitens des DLR beauftragt und die bestehenden PSI-Produkte und Zeitreihen bis 2021 verlängert werden.

Das Geodätische Institut (GIK) des KIT-Karlsruhe hat eine langjährige Erfahrung bei der Auswertung und der methodischen Weiterentwicklung der Analysealgorithmen für alle vorgestellten Messverfahren. Dies betrifft insbesondere die Radarinterferometrie, die am GIK im Rahmen verschiedener Projekte erfolgreich zur Untersuchung von Deformationsprozessen eingesetzt wurde und wird (Fuhrmann et al., 2015; Kubanek et al. 2017; Schenk und Westerhaus, 2012). Der Einsatz der vorgestellten Messverfahren in INSIDE hat das Ziel, eine Fallstudie für ein modernes, kostengünstiges Verfahren zur umfassenden Bestimmung und Überwachung des Einwirkungsbereiches durch Geothermieanlagen zu erarbeiten und zu evaluieren. Eine mathematische Vorgehensweise zur Fusion verschiedener geodätischer Messverfahren wurde am GIK entwickelt und das Potential des Kombinationsansatzes in mehreren Veröffentlichungen nachgewiesen (Fuhrmann et al. 2013, 2014, 2015). Die Fusion der Messverfahren soll durch den Einsatz von künstlicher Rückstreuer (Corner-Reflektoren und elektronische Transponder) verbessert werden. Sie können in unmittelbarer Nähe einer GNSS-Station installiert und präzise in Bezug auf das Phasenzentrum der GNSS-Antenne eingemessen werden. Sie unterstützen die Integration der PSI-Datensätze in das globale geodätische Datum (Mahapatra et al., 2015). C-Band Transponder konnten erst kurz vor Beginn des Projektes käuflich erworben werden, über die Langzeitstabilität und den Nutzen zur Deformationsüberwachungen lagen noch wenig Erfahrungsberichte vor.

1.4.4 THERMISCH-HYDRAULISCH-MECHANISCHE MODELLIERUNG (AP4.2-AP4.5)

Statische geomechanische Modelle: Ein grundlegender Eingangsdatensatz eines statischen geomechanischen Standortmodells ist der tektonische Spannungszustand im Reservoir. Er definiert, neben weiteren Schlüsselparametern, die Bruchbedingungen existierender Trennflächen (Klüfte, Störungen) im natürlichen, ungestörten Zustand und ergibt sich i.d.R. aus den überregionalen, tektonischen Kontext und den lokalen strukturgeologischen Lagerungsverhältnissen (Heidbach et al., 2010; Meixner et al., 2014; Seithel et al., 2015). Bei der Erschließung neuer geothermischer Reservoirs liefern diese statischen geomechanischen Modelle erste Prognosen über potenzielle Bruchprozesse im Reservoir, welche z.B. durch die Injektion von Fluiden während der Bohr- oder Betriebsphase induziert werden könnten. Es sind üblich vorab Slip Tendency- und Dilation Tendency-Analysen durchzuführen (Ferrill et al., 1999; Morris et al., 1996). Eine erfolgreiche Anwendbarkeit dieser Analysen wurde sowohl bei Studien von neotektonischen Störungsaktivitäten auf überregionaler Skala (Worum et al., 2004), als auch auf Reservoirskala (Meixner et al., 2016; Moeck et al., 2009)

nachgewiesen und seitens des KIT für die Geothermiestandorte Bruchsal (D), Sauerlach (D) und Riehen (CH) angewendet. Am KIT wurde kürzlich die geomechanische Analyse der potenziell seismisch aktiven Störungszonen im Münchner Raum durch eine probabilistische Untersuchung erweitert (Seithel et al., 2019). Für die geplanten Bohrungen in der Schäftlarnstrasse wurden von bereits geomechanische Simulationen durchgeführt (Savvatis, 2018).

Thermisch-hydraulische Modelle: Die thermisch-hydraulische (TH) Modellierung ist mittlerweile ein fester Bestandteil im Planungsprozess geothermischer Anlagen; sowohl in der Vorabsimulation mit der Prognose verschiedener Bohrfeld-Geometrien oder Betriebsszenarien, als auch in der behördlichen Genehmigung mit dem Wärmebergbaumodell nach Niederbringung der Bohrung und den Ergebnissen aus den hydraulischen Zirkulationstests. Für die Modellierung ist ein umfangreiches Reservoirverständnis mit einer entsprechenden Systemcharakterisierung aus geologischen und geophysikalischen Daten Voraussetzung. Hierfür liegen für den Großraum München Daten aus über 30 Geothermiebohrungen vor, wobei aufgrund von Eigentumsrechten nicht alle Daten öffentlich zugänglich sind. Im Rahmen der Geothermie-Allianz Bayern arbeitet die Abteilung für Hydrogeologie der TUM daran, geologische und geophysikalische Betreiberdaten zu erfassen und für eine einheitliche Reservoircharakterisierung zu bearbeiten.

Üblicherweise wird bei der geologischen Modellierung im Reservoir eine Differenzierung von durchlässigen und weniger durchlässigen Bereichen vorgenommen, die Vorgehensweise für den Oberjurassischen Malm als Thermalwasseraquifer ist in umfangreichen Grundlagenstudien und Arbeiten der letzten Jahre (z.B. FKZ 0327671 A&B, FKZ 0325469) entstanden. Ein Resultat dieser Arbeiten ist das sog. „Großraum-München-Modell“, das, als Behördenwerkzeug für die Bewertung der Beeinflussungen von Projekten untereinander, 2008 initiiert wurde und seitdem weitergeführt wird.

Üblicherweise entscheidet die Auswertung des Langzeit Pump- und Injektionsversuches in einem Geothermieprojekt über die Energie (ermittelt aus der Fluidmenge und Temperaturskopplung), die dem Reservoir innerhalb eines Erlaubnisfeldes entzogen werden kann. Dementsprechend werden die verfügbaren Eingangsdaten in ein hydraulisch-thermisches Modell eingesetzt, um anhand einer Prognose die langfristige Bewirtschaftung zu genehmigen und eine mögliche Beeinflussung von Nachbarprojekten weitgehend auszuschließen. Die Modellierungen, die im Zuge der behördlich vorgeschriebenen Wärmebergbaumodelle erfolgen, zeigen, dass mit der Verdichtung der Bohrstandorte und intensiveren Nutzung sowohl die Daten umfangreicher, als auch die Zusammenhänge zwischen den Bohrungen und Projekten komplexer werden.

Gekoppelte THM und THM-S Modelle: Insbesondere zur strategischen Planung bei der Bewirtschaftung des geothermischen Reservoirs im Raum München, aber auch in anderen nationalen Projekten, müssen die zu konzipierenden Modelle an räumliche, zeitliche und technische Standortbedingungen angepasst und optimiert werden. Dies beinhaltet u.a. die Prognose induzierter THM Prozesse im Reservoir basierend auf der Art und des Ausmaßes der gekoppelten Prozesse (Gaucher et al., 2015; Kohl and Mégel, 2007; Schoenball et al., 2010; Ucar et al., 2017).

Das KIT hat einen eigenen numerischen Reservoir-Simulator, TIGER (THMS simulator for GEoscientific Research), entwickelt, der in der Lage ist, gekoppelte thermisch-hydraulische und mechanische Prozesse in geklüfteten anisotropen heterogenen porösen Medien, z.B. geothermischen Reservoirs, zu simulieren (Egert et al., 2018; Gholami Korzani, 2019; Gholami Korzani and Kohl, 2018). TIGER ist ein Open-Source-Code, der in der Sprache C++ entwickelt wurde (<https://www.m2clab.com/tiger>). Es handelt sich um einen Finite-Elemente-Code, der auf einem objektorientierten Rahmen namens MOOSE basiert. MOOSE ist ein Berechnungswerkzeug für gekoppelte Systeme nichtlinearer Gleichungen und wurde im Idaho National Laboratory entwickelt (Gaston et al., 2009). Es bietet eine flexible, massiv-parallele (einschließlich MPI und Multi-Threading) Plattform zur Lösung vollständig

gekoppelter multiphysikalischer Probleme unter Verwendung der Galerkin-FEM in vollständig impliziter Weise. Alle diese Fähigkeiten werden von TIGER übernommen, um THMS-Prozesse effizient zu simulieren. TIGER ist in der Lage, Störungen und Bohrlochpfade als (niederdimensionale) diskrete eingebettete Merkmale zu modellieren und nichtlineare Zustandsgleichungen, Viskositäten und Netzadaptivität zu berücksichtigen. Der Code wurde anhand mehrerer vorhandener analytischer Lösungen und numerischer Ergebnisse validiert.

Auf dieser Basis von TIGER soll die Erzeugung von Erdbeben über ein mechanisches Bruchkriterium auf Verwerfungen (z.B. Mohr-Coulomb) gekoppelt werden.

1.4.5 LITERATURVERZEICHNIS

- Arbeitsgruppe „Induzierte Seismizität“ FKPE e.V., 2012. Empfehlungen zur Überwachung induzierter Seismizität: Positionspapier des FKPE. DGG - Mitteilung 17–31.
- Azzola, J., Gaucher, E., 2024. Seismic Monitoring of a Deep Geothermal Field in Munich (Germany) Using Borehole Distributed Acoustic Sensing. *Sensors* 24, 3061. <https://doi.org/10.3390/s24103061>
- Bamler, R., Adam, N., Hinz, S., Eineder, M. (2008): SAR-Interferometrie für geodätische Anwendungen, /2008, 243-252, 2008.
- Barth, A., Gaucher, E., 2012. Monitoring geothermaler Felder durch seismische Netzwerke: Vorgaben und Chancen. *BBR - Leitungsbau Brunnenbau Geothermie* 12, 56–61.
- Crosetto, M., Monserrat, O., Iglesias, R., Crippa, B. (2010): Persistent Scatterer Interferometry: Potential, Limits and Initial C-and X-band Comparison. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. Vol. 76, N. 9, pp. 1061-1069, 2010.
- Daley, T.M., Miller, D.E., Dodds, K., Cook, P., Freifeld, B.M., 2016. Field testing of modular borehole monitoring with simultaneous distributed acoustic sensing and geophone vertical seismic profiles at Citronelle, Alabama. *Geophysical Prospecting* 64, 1318–1334. <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12324>
- Deutsches Institut für Normung e. V., 2016. DIN 4150-3: Erschütterungen im Bauwesen - Teil 3: Einwirkungen auf bauliche Anlage (Ersatz für DIN 4150-3:1999-02).
- Egert, R., Gholami Korzani, M., Held, S., Kohl, T., Stober, I., 2018. Hydro-thermal modeling of a deep fault-related fracture system in the Upper Rhine Graben (URG), in: GSA Annual Meeting. Presented at the GSA Annual Meeting, Indianapolis, Indiana, USA.
- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F. (2001): Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 39(1):8-20.
- Ferrill, D.A., Winterle, J., Wittmeyer, G., Sims, D.W., Colton, S., Armstrong, A., Morris, A.P., 1999. Stressed rock strains groundwater at Yucca Mountain, Nevada. *GSA Today* 9, 1–8.
- Fuhrmann, T., Caro Cuenca, M., Knöpfler, A., van Leijen, F. J., Mayer, M., Westerhaus, M., Hanssen, R. F., Heck, B., (2015): Estimation of small surface displacements in the Upper Rhine Graben area from a combined analysis of PS-InSAR, levelling and GNSS data. *Geophys. J. Int.*, 203(1):614–631
- Fuhrmann, T., Westerhaus, M., Zippelt, K., Heck, B., 2014. Vertical displacement rates in the Upper Rhine Graben area derived from precise leveling, *J. Geod.*, 88(8): 773–787. DOI 10.1007/s00190-014-0721-0.

- Gaston, D., Newman, C., Hansen, G., Lebrun-Grandié, D., 2009. MOOSE: A parallel computational framework for coupled systems of nonlinear equations. *Nuclear Engineering and Design* 239, 1768–1778. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2009.05.021>
- Gaucher, E., Schoenball, M., Heidbach, O., Zang, A., Fokker, P.A., van Wees, J.-D., Kohl, T., 2015. Induced seismicity in geothermal reservoirs: A review of forecasting approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 52, 1473–1490. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.026>
- Gholami Korzani, M., 2019. The development of a coupled wellbore-reservoir simulator for geothermal applications, in: DEEPEGS Symposium.
- Gholami Korzani, M., Kohl, T., 2018. TIGER: New High-Performance Simulator for Nonlinear Coupled THMC Processes, in: European Geothermal Workshop 6th. Strasbourg, France.
- Heidbach, O., Tingay, M., Barth, A., Reinecker, J., Kurfeß, D., Müller, B., 2010. Global crustal stress pattern based on the World Stress Map database release 2008. *Tectonophysics* 482, 3–15. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.07.023>
- Kohl, T., Mégel, T., 2007. Predictive modeling of reservoir response to hydraulic stimulations at the European EGS site Soultz-sous-Forêts. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 44, 1118–1131. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2007.07.022>
- Kubaneck J., Westerhaus, M., & Heck B., 2017. TanDEM-X time series analysis reveals lava flow volume and effusion rates of the 2012–2013 Tolbachik, Kamchatka fissure eruption. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122, 7754–7774. DOI:10.1002/2017JB014309.
- Megies, T., Wassermann, J., 2017. MAGS2 - Einzelprojekt 2 - Untersuchungen zur optimierten seismischen Überwachung hydrogeothermaler Systeme bei dichter räumlicher Lage der Bohrerlaubnisfelder am Beispiel der Situation im Süden Münchens, Mikroseismische Aktivität geothermischer Systeme 2 - Vom Einzelsystem zur großräumigen Nutzung. Endbericht.
- Megies, T., Wassermann, J., 2014. Microseismicity observed at a non-pressure-stimulated geothermal power plant. *Geothermics* 52, 36–49. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.01.002>
- Meixner, J., Schill, E., Gaucher, E., Kohl, T., 2014. Inferring the in situ stress regime in deep sediments: an example from the Bruchsal geothermal site. *Geothermal Energy* 2, 7. <https://doi.org/10.1186/s40517-014-0007-z>
- Meixner, J., Schill, E., Grimmer, J.C., Gaucher, E., Kohl, T., Klingler, P., 2016. Structural control of geothermal reservoirs in extensional tectonic settings: An example from the Upper Rhine Graben. *Journal of Structural Geology* 82, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2015.11.003>
- Moeck, I., Kwiątek, G., Zimmermann, G., 2009. Slip tendency analysis, fault reactivation potential and induced seismicity in a deep geothermal reservoir. *Journal of Structural Geology* 31, 1174–1182. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2009.06.012>
- Morris, A., Ferrill, D.A., Henderson, D.B., 1996. Slip-tendency analysis and fault reactivation. *Geology* 24, 275–278. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1996\)024<textless0275:staafr>textgreater2.3.co;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1996)024<textless0275:staafr>textgreater2.3.co;2)
- Reinsch, T., Henniges, J., Götz, J., Jousset, P., Bruhn, D., Lüth, S., 2015. Distributed acoustic sensing technology for seismic exploration in magmatic geothermal areas, in: World Geothermal Congress 2015. IGA.
- Savvatis, A., 2018. Geothermie Schäftlarnstrasse Geomechanische Simulation vor Bohrbeginn - Unveröffentlichter Bericht Auftraggeber SWM. München.

- Schenk, A., Westerhaus, M. (2012): SAR-Interferometrie zur Bestimmung des vollständigen Bewegungsvektors - Möglichkeiten und Grenzen, *Tagungsband Geomonitoring 2012*, Wolfgang Niemayer (Ed.), 207-218, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Braunschweig.
- Schoenball, M., Müller, T.M., Müller, B.I.R., Heidbach, O., 2010. Fluid-induced microseismicity in pre-stressed rock masses. *Geophysical Journal International* 180, 813–819. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04443.x>
- Seithel, R., Gaucher, E., Mueller, B., Steiner, U., Kohl, T., 2019. Probability of fault reactivation in the Bavarian Molasse Basin. *Geothermics* 82, 81–90. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2019.06.004>
- Seithel, R., Steiner, U., Müller, B., Hecht, C., Kohl, T., 2015. Local stress anomaly in the Bavarian Molasse Basin. *Geothermal Energy* 3, 77. <https://doi.org/10.1186/s40517-014-0023-z>
- Ucar, E., Berre, I., Keilegavlen, E., 2017. Postinjection Normal Closure of Fractures as a Mechanism for Induced Seismicity. *Geophysical Research Letters* 44, 9598–9606. <https://doi.org/10.1002/2017GL074282>
- Worum, G., van Wees, J.-D., Bada, G., van Balen, R.T., Cloetingh, S., Pagnier, H., 2004. Slip tendency analysis as a tool to constrain fault reactivation: A numerical approach applied to three-dimensional fault models in the Roer Valley rift system (southeast Netherlands). *Journal of Geophysical Research* 109, B02401. <https://doi.org/10.1029/2003jb002586>

1.5 ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN STELLEN

Dieses Projekt hätte ohne die enge und gute Zusammenarbeit mit unseren Partnern SWM und IEP nicht realisiert werden können. Die jeweiligen Projektteams waren immer ansprechbar und aktiv, der Austausch von Daten und Wissen war einfach. Viele Aufgaben wurden gemeinsam, als ein Team, durchgeführt, was wir sehr zu schätzen wussten. Dies war insbesondere bei den zahlreichen Datenerfassungskampagnen (AP1, AP2) oder Kommunikationsveranstaltungen (AP6) der Fall. Wir möchten uns besonders herzlich bedanken, von den SWM: Bernhard Betzl, Doris Betzl, Maximilian Hansinger, Michael Meinecke, Katja Thiemann, vom IEP: Ralph Baasch, Gudrun Bergdolt, Peter Goblirsch, Helmut Mangold, Johanna Zollner.

Die Firma Erdwerk GmbH war als Drittpartei ebenfalls ein wichtiger Akteur in diesem Projekt. Sie stellte viele Hinweise und Daten zur Verfügung, die zur Einleitung des Projekts benötigt wurden (AP1.1, AP3.2, AP4.1). Die zahlreichen Diskussionen im Zusammenhang mit den Aspekten der Reservoirmodellierung (AP4) oder dem Geschwindigkeitsmodell waren sehr fruchtbar. Wir danken insbesondere Alexandros Savvatis.

Eine Zusammenarbeit fand auch mit Mitarbeitern der Fakultät für Erd- und Umweltwissenschaften der Ludwig-Maximilians-Universität München statt. Es fanden mehrere Diskussionen über die Gestaltung des seismischen Überwachungsnetzes INSIDE (AP1.2) und die bestehenden lokalen seismologischen Netze (z.B. Betreibernetz oder Netz des Geophysikalischen Observatoriums in Fürstenfeldbruck) sowie über den periodischen Austausch von seismischen Daten (AP3.1) statt. Vielen Dank an Tobias Megies und Joachim Wassermann. Das zunächst in AP4.5 umgesetzte Konzept der Kopplung der thermohydraulisch-mechanischen Modellierung eines geothermischen Reservoirs mit der erdbebendynamischen Bruchsimulation (AP4.5) resultierte ebenfalls aus Diskussionen mit LMU-Mitarbeitern und führte zu einer starken Zusammenarbeit mit Thomas Ulrich. Ihm sowie Alice Gabriel und Joachim Wassermann sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

Die Zusammenarbeit mit der Firma Febus Optics erfolgte beim Einsatz (AP1.2) oder der Verwendung von GFK für DAS. Es fanden viele technische Diskussionen statt und Febus Optics hat uns vor Ort bei der Erfassung des Sparker-Tests in der Schäftlarnstraße (AP3.2) oder außerhalb des Geländes durch die Anpassung von Software an unsere Bedürfnisse oder durch Beratung bei der 6-monatigen Echtzeit-Erfassung von DAS-Daten in der Schäftlarnstraße (AP1.2 und AP2) sehr unterstützt. Wir danken vor allem Étienne Almoríc, Gaétan Calbris, Camille Jestin und Vincent Lanticq.

Mehrere Diskussionen und ein Datenaustausch fanden auch mit GAB und TUM, Lehrstuhl für Hydrogeologie, statt, die das Projekt leiteten, das zur Installation der GFK in TH3 und TH4 des Standorts Schäftlarnstraße führte. Diese GFK wurden für den Sparker-Test (AP3.2) und den 6-monatigen DAS-Monitoring-Test (AP1.2 und AP3.1) verwendet. Wir danken Felix Schölderle, Daniela Pfrang und Kai Zosseder.

Beim Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt wurde eine Persistent-Scatterer-Auswertung von Radarszenen der Satellitenmission TerraSAR-X beauftragt und für das Projekt INSIDE verfügbar gemacht. Wir danken Christian Minet, der als Ansprechpartner fungierte und bei diversen Rückfragen zum Produkt zur Verfügung stand.

2 ERGEBNISSE

2.1 VERWENDUNG DER ZUWENDUNG MIT GEGENÜBERSTELLUNG DER VORGEgebenEN ZIELE

2.1.1 AP1: BASISDATENERHEBUNG UND DATENAUFNAHME (LEITUNG: KIT)

2.1.1.1 AP1.2: Seismisches Monitoring

Einführung

Das INSIDE-Projekt zielt auf ein besseres Verständnis der Prozesse der induzierten Seismizität im südlichen Münchner Raum ab. Das seismische Monitoring ist ein zentraler Aspekt dieses Vorhabens. Im Rahmen des INSIDE-Projekts liegt der Schwerpunkt auf den Standorten Sendling/Schäftlarnstraße, Pullach und Baierbrunn (Großraum München, Bayern). Eines der Hauptziele des Projekts ist die Erweiterung des seismischen Netzwerks für die kontinuierliche Überwachung der Seismizität, die durch geothermische Aktivitäten verursacht wird.

Das gesamten INSIDE-Netz soll bestehende Beobachtungspunkte ergänzen und nicht duplizieren, d.h. es soll das vom Geophysikalischen Observatorium Fürstenfeldbruck (GOF)/LMU betriebene BayernNetz ergänzen (Department of Earth and Environmental Sciences, Geophysical Observatory, University of Munchen, 2001). Ein weiteres Ziel des Projekts besteht darin, Standardüberwachungsmethoden mit innovativen Ansätzen zu vergleichen. Daher umfasst die Überwachung im Rahmen von INSIDE neben ergänzenden Seismometer-Stationen auch die Planung eines Mini-Arrays von 9 Geophonen und den Einsatz von faseroptischen Sensortechnologien auf speziellen Überwachungsinfrastrukturen oder direkt in geothermischen Bohrungen. Diese weniger etablierten Messmethoden werden am gleichen Standort wie die Seismometer eingesetzt, um einen Vergleich der Überwachungsmöglichkeiten zu ermöglichen (s. AP5.1 – Kap. 2.1.5.1). Diese beiden Aspekte – Ergänzung des bestehenden Netzes und Überschreitung der Überwachungsstandards – bestimmten die Konzeption des Netzes.

Abbildung 3 zeigt eine Karte des Untersuchungsgebiets mit den Bohrlochverläufen der betrachteten Anlagen und den Standorten der seismischen Überwachung. Das im Rahmen des Projekts betrachtete Überwachungsgebiet wurde östlich der Standorte Baierbrunn, Pullach und Sendling in Richtung Oberhaching und Unterhaching erweitert. Dies resultiert aus der Beobachtung, dass ein Großteil der gemessenen Seismizität aus dieser Zone kommt. Das Untersuchungsgebiet wurde erweitert, um ausreichend Beobachtungen zu sammeln, die zur Erreichung der Ziele des Projekts im Bereich der Datenverarbeitung erforderlich sind.

Fünf Messstandorte (weiße Rauten in Abbildung 3) wurden im Rahmen des INSIDE-Projekts ausgewählt, getestet und für seismische Messungen instrumentiert. Die fünf Standorte ergänzen das größere BayernNetz, das auf der Karte mit den grünen Punkten dargestellt ist, insbesondere im Hinblick auf die zukünftigen geothermischen Erschließungen in Pullach und Baierbrunn nach Westen. Außerhalb der geometrischen Aspekte des Messnetzes erfolgte die Auswahl der Messstandorte nach Standardempfehlungen (Arbeitsgruppe „Induzierte Seismizität“ FKPE e.V., 2012). Die Eignung der ausgewählten Standorte wurde durch die Standardanalyse der Bodenunruhemessungen bewertet, die vor der Instrumentierung der Messstandorte durchgeführt wurde. Die Messungen und Ereignisse sind in Azzola & Gaucher (2020) beschrieben.

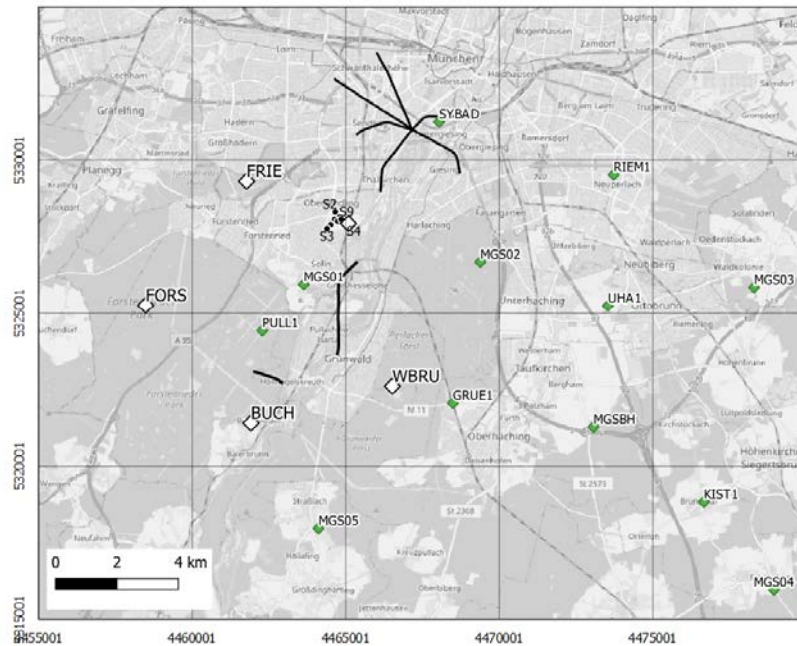


Abbildung 3: Übersicht über das gesamten seismischen Messnetz im Süden von München. Die schwarzen Linien stellen die Projektion der Bohrlochpfaden an den Standorten Pullach und Schäfflarnstraße (Sendling) auf die Oberfläche dar. Weiße Rauten markieren die INSIDE- Messstellen, grüne Rauten zeigen die Positionen der Stationen des BayernNetzes betreibt bei den Geophysikalischen Observatoriums Fürstenfeldbruck (GOF)/ LMU.

Die Messgeräte für die fünf Standorte wurden so ausgewählt, dass sie die Ziele des Projekts hinsichtlich des Vergleichs von Überwachungsinstrumenten und -konfigurationen erfüllen. Alle Messstandorte wurden mit 3-Komponenten- Breitband- Seismometern ausgestattet, die als Standardmessgerät für die Überwachung dienen. Für die Siemenshalle (SIEM) ist es in einem Überwachungsbohrloch in 170 Metern Tiefe installiert. Ein Mini-Array wurde zusätzlich zu den Seismometer-Netz im Siemens-Park installiert. Darüber hinaus werden in Buchenhain faseroptische Sensing-Technologien auf oberflächennah verlegten GFK und in einer Überwachungsbohrung eingesetzt. Zusätzlich wurde das von der Geothermie-Allianz Bayern/Technische Universität München, Lehrstuhl für Hydrogeologie (TUM) hinter der Verrohrung der SLS TH3 (Schäfflarnstraße, Sendling) installierte GFK über einen Zeitraum von 6 Monaten zur Überwachung des Geothermie Standortes eingesetzt. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die Messstandorte und die dazugehörige Instrumentierung. Abbildung 4 gibt einen Überblick auf einer Karte des Münchner Südens mit zusätzlichen Bildern.

Die folgenden Kapitel befassen sich mit den einzelnen Messstationen. Weitere Details zu den Installationschritten und Stationeigenschaften sowie eine Analyse der Leistung des Seismometer-Netzes sind in Azzola & Gaucher (2021a) enthalten.

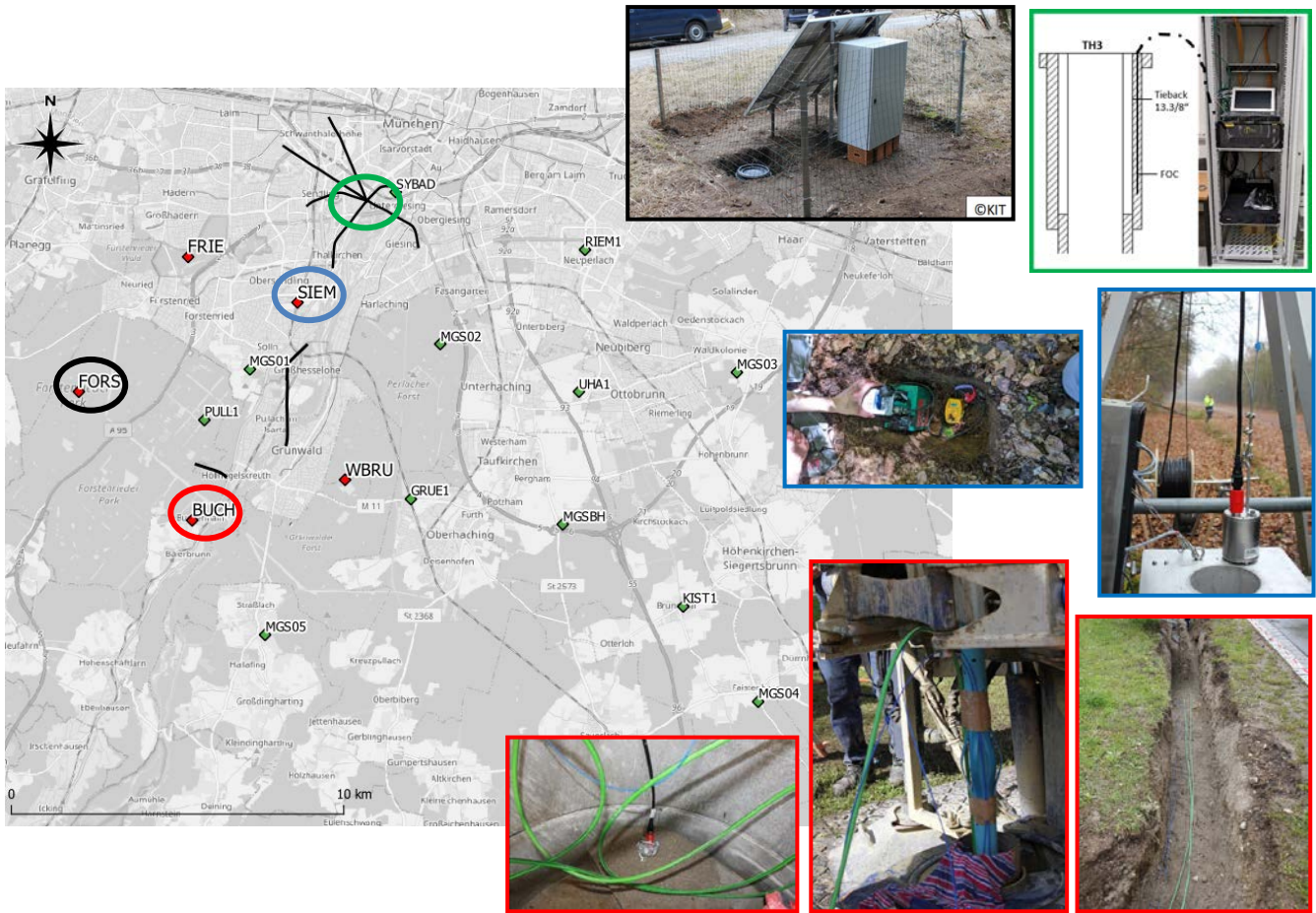


Abbildung 4: Überblick über die Messstandorte auf einer Karte des Münchner Südens mit Bildern vor Ort, um die Vielfalt der Instrumente und Konfigurationen zu illustrieren.

Tabelle 2: Übersicht über die Messstandorte im INSIDE-Projekt mit Standort, Stations-ID und Instrumentierung.

Location of stations	Station ID	Surface seismometer	Borehole seismometer	Fiber Optic Sensing	Mini-Array
Waldfriedhof (Neuried)	FRIE	1 Trillium Compact Vault 120s			
Wörnbrunn (Grünwald)	WBRU	1 Trillium Compact Vault 120s			
Forstenrieder Park	FORS	1 Trillium Compact Vault 120s			
Buchenhain	BUCH	1 Trillium Compact Vault 120s		DAS + DTSS	
Siemensallee (Sendling)	SIEM		1 Trillium Compact Posthole 20s		9 Geophonen
Schäftlarnstraße	SLS			DAS (6 Monaten)	

Oberflächen und Bohrloch Seismometer-Stationen

In Tabelle 3 sind die Eigenschaften der fünf seismischen Stationen gelistet. Diese Standorte befinden sich am Rande eines Kreises mit einem Radius von etwa 4 km. Die technischen Aspekte für die

Installation der Seismometer Messstationen sind in Azzola & Gaucher (2021a) ausführlich beschrieben.

Tabelle 3: Übersicht über die mit Seismometern ausgestatteten Messstellen mit Stationskennung, Standort (im Gauß-Krüger-4-Koordinatensystem, EPSG 31468), Datum der Inbetriebnahme und Abtastrate.

Station ID	BUCH	WBRU	SIEM	FORS	FRIE
Easting [m]	4461914	4466521	4465091	4458486	4461772
Northing [m]	5321385	5322589	5327929	5325249	5329311
Commissioning	10 June 2021	27 March 2021	26 Nov. 2020	28 March 2021	28 March 2021
Powering	Electrical grid	Electrical grid	Electrical grid	Solar panels	Electrical grid
Sampling (Hz)	250				

Die Fähigkeiten dieses Netzes werden zunächst durch die Standardverarbeitung von Bodenunruhemessungen analysiert (Azzola and Gaucher, 2021a). Es konzentriert sich zunächst auf die Amplituden und die Frequenzverteilung der Bodenstörungen. Die Amplituden werden statistisch behandelt, indem die statistische Verteilung der I95-Werte analysiert (Groos and Ritter, 2009). Die Arbeitsgruppe „Induzierte Seismizität“ FKPE e.V. et al. (2012) empfiehlt, dass I95-Werte zwischen $\pm 2 \mu\text{m/s}$ liegen sollte. Abbildung 5 basiert auf einer statistischen Analyse eines einmonatigen Datensatzes, der nach der Inbetriebnahme erfasst wurde. Der Fokus der Abbildung liegt auf der vertikalen Komponente der Bodenbewegung. Sie zeigt, dass die einzelnen Standorte des seismischen Netzes die FKPE-Empfehlungen für die maximale Hintergrund-Bodenstörung erfüllen. Zusätzliche Informationen, einschließlich der Analyse für andere aufgezeichnete Komponenten, sind in Azzola & Gaucher (2021a) enthalten.

Die Frequenzverteilung des Bodenunruhes wird durch Berechnung des Spektrogramms und der „Probabilistic Power Spectral Densities“ (PPSD) analysiert. Insgesamt zeigen die Stationen eine geringe Empfindlichkeit gegenüber Bodenunruhe in dem Frequenzbereich zwischen 5 und 40 Hz, der für die Detektion von Ereignissen vorgesehen ist. Die Messungen der Bodenunruhen werden schließlich dazu verwendet, die Erkennungs- und Lokalisierungsfähigkeiten des Netzes zu bewerten. Wir folgen der von (Del Pezzo et al., 2013) vorgeschlagenen Methodik. Der Ansatz basiert auf der Berechnung der Quellspektren anhand eines von (Boatwright, 1980) entwickelten theoretischen Quellenmodells. Die Analyse schätzt die räumliche Entwicklung der minimalen Magnitude, die durch das Seismometer-Netz nachgewiesen werden kann (Azzola and Gaucher, 2021a). Diese theoretischen Simulationen zeigen, dass das Netz die Detektion von Ereignissen in der Tiefe des Reservoirs mit einer kinetischen Energie äquivalent zur eine Moment-Magnitude von -0,9 ermöglicht (s. Abbildung 6). Für ein Ereignis, das innerhalb des von den fünf Stationen beschriebenen Perimeters stattfindet, liegt dieser Schwellenwert m Allgemeinen bei einer Magnitude von -0,7. Außerhalb dieses Bereichs steigt die Detektionsschwelle auf einer Magnitude von 0,5 an. Dies entspricht den Empfehlungen der FKPE, die die Detektion von Ereignissen der Magnitude 1 empfiehlt (Arbeitsgruppe „Induzierte Seismizität“ FKPE e.V., 2012). Die Simulationsbemühungen werden auf den Fehler bei der Messung der Ankunftszeiten erweitert. In Anbetracht der durchgeführten Messungen und Simulationen liegen die theoretischen Fehler im Raum Pullach bei der Detektion eines Ereignisses mit einer Magnitude von -0,7 im Bereich von 10 bis 60 ms. Die Anpassung dieser theoretischen Abschätzungen, an die im Rahmen des Projekts durchgeführten Beobachtungen wird in einem nachfolgenden Arbeitspaket behandelt (s. AP3.1 - Kap. 2.1.3.1).

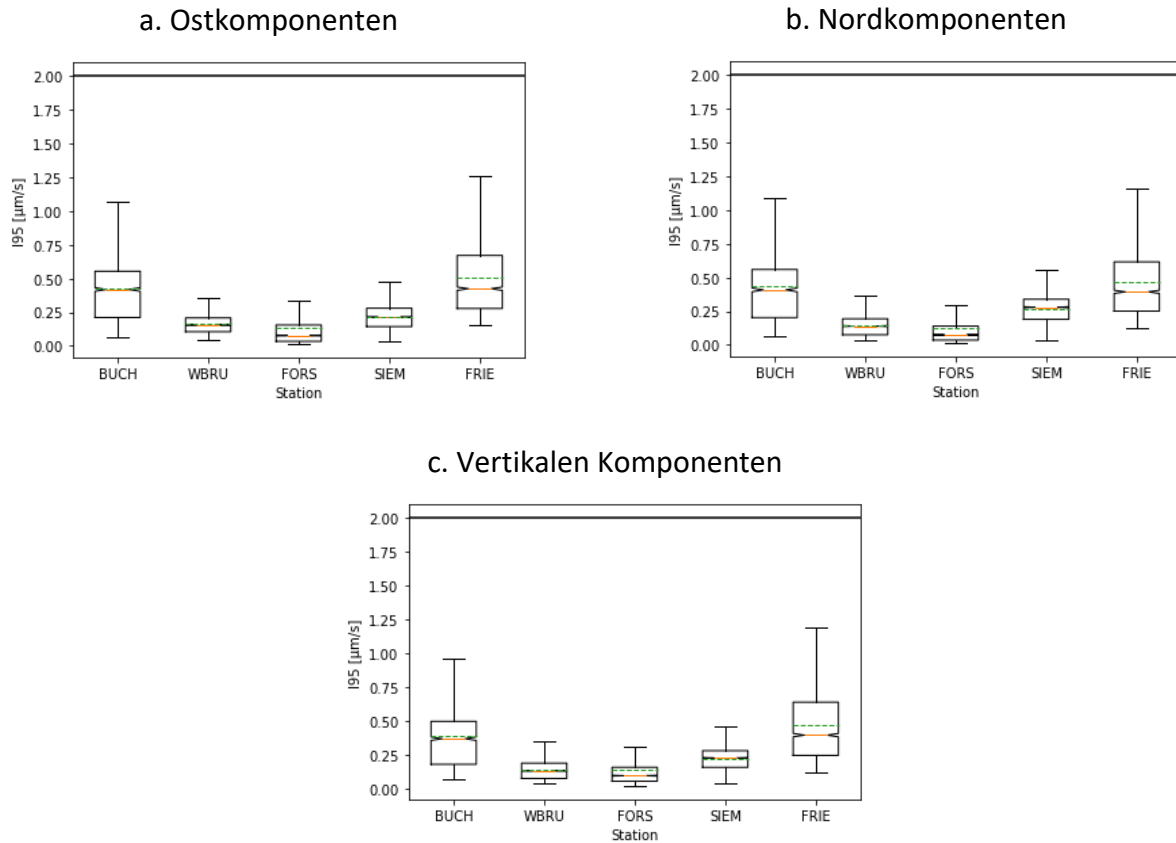


Abbildung 5: Gemessene Bodenunruhe an den seismischen Stationen des Netzes, quantifiziert als statistische Verteilung von 195 Werten. Die Messungen sind für die Ost- (a), Nord- (b) und die vertikale (c) Komponenten dargestellt. Die Striche reichen bis zu den extremen Datenpunkten (Min. und Max.). Die 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.

Mini-array am Siemens Park

Das Mini-Array wurde in der Nähe der Bohrlochstation Siemensallee installiert. Das Ziel des Mini-Arrays ist es, eine höhere Signalerfassungskapazität als ein einzelnes Oberflächengeophon zu erreichen, indem die Verarbeitung der gemeinsam erfassten Daten das stochastische Rauschen auf allen Spuren unterdrückt, um eine höhere Signalerfassungskapazität zu erreichen.

- Das Mini-Array besteht aus neun Oberflächen-Geophonen (s. Abbildung 7).
- Die Installation erfolgte am 11.05.2022 nach Zustimmung der Nutzungsvereinbarungen der Grundstücke (zwischen KIT, SWM und der Landeshauptstadt München).
- Es besteht aus 3 Armen. Der östlichste Punkt (Station S4) liegt in der Nähe der Bohrlochstation Siemensallee (SIEM).
- Die Geophone erfassen Daten mit einer Abtastfrequenz von 200 Hz.
- Die Geophone werden mit Batterien betrieben, deren Autonomie etwa 6 Monate beträgt. Die Daten werden lokal auf einer SD-Karte gespeichert. Dies führt zu Wartungsanforderungen, die aufgrund der Entfernung zwischen der verantwortlichen Stelle (KIT - Karlsruhe) und dem Messstandort (München) nicht vollständig erfüllt werden konnten. Dies wirkte sich auf die Vollständigkeit des Datensatzes aus.

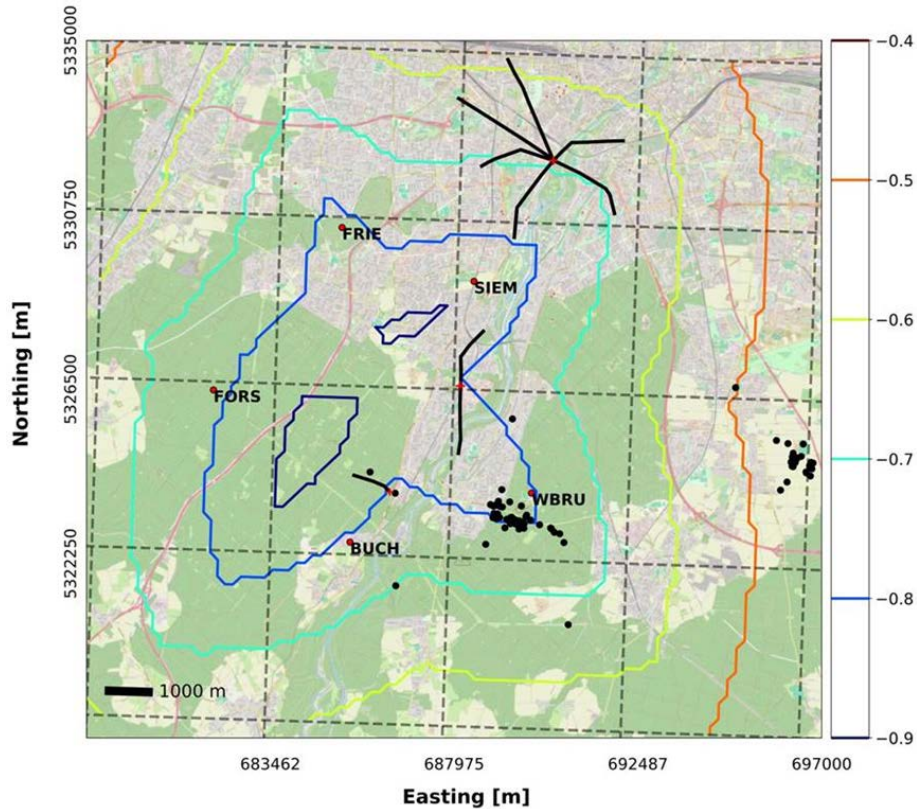


Abbildung 6: Simulierte Detektionsfähigkeit über dem Untersuchungsgebiet, bewertet anhand des an den INSIDE-Stationen aufgezeichneten seismischen Bodenunruhe. Die Karte zeigt die minimale nachweisbare Magnitude für Ereignisse, die sich auf dem Niveau des geothermischen Reservoirs (2300 m ü. NN) befinden.

Im Zusammenhang mit der Verarbeitung von Array-Daten wird die Fähigkeit des Arrays, zwischen verschiedenen seismischen Wellen aufzulösen und zu unterscheiden, durch die Array-Transferfunktion definiert. Im Falle eines Arrays aus 3-Komponenten-Geophonen wird die Array-Response durch die Geometrie des Arrays bestimmt. Für das Siemens-Park Array zeigt Abbildung 8 die theoretische Transferfunktion als Funktion der Wellenzahldifferenzen, normalisiert mit ihrem Maximum. Die Abbildung zeigt, dass die Hauptzone aufgrund der großen Öffnung des Arrays schmal ist. Dies führt zu einer höheren Auflösung bei der Messung der scheinbaren Geschwindigkeiten. Die Eigenschaften in der Array-Transferfunktion sind jedoch nicht symmetrisch, was unterstreicht, dass das Array aufgrund seiner Geometrie Unterschiede in der Auflösung für verschiedene Azimute aufweist. Die zahlreichen Nebenmaxima in der Übertragungsfunktion sind auf die größeren Abstände zwischen den verschiedenen Standorten des Arrays zurückzuführen.

Azzola & Gaucher (2023) beschreiben die Inbetriebnahme des Mini-Arrays.



Abbildung 7: Layout des Mini-Array im Siemenspark mit Beispiel einer Messstelle.

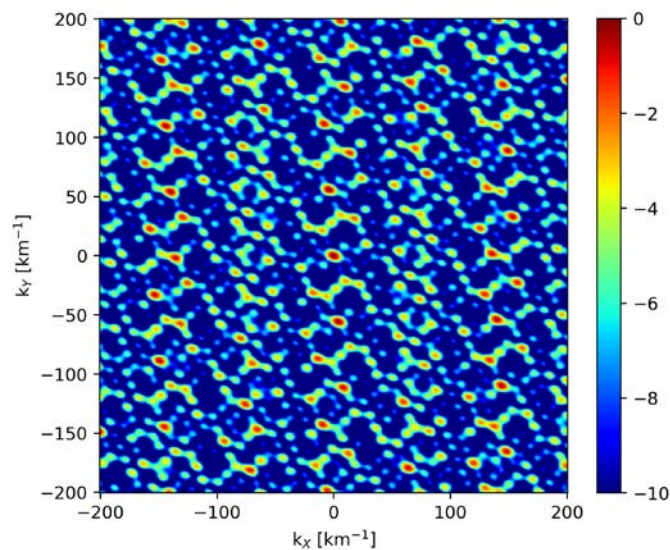


Abbildung 8: Array- Transferfunktion des aus 9 Geophonen bestehenden Arrays im Siemens Park. Die Abbildung zeigt die relative Leistung der Array- Response normiert mit ihrem Maximum als Funktion der Wellenzahl- Differenz.

Faseroptische Messstation in Buchenhain

Faseroptische Sensortechnologien werden in Buchenhain auf einer dedizierten Infrastruktur eingesetzt. Die Station steht in einem Park in einem Wohngebiet des Dorfes. Für diesen Messpunkt werden zusätzlich zum BUCH-Seismometer durch den Einsatz eines GFKs und das entsprechende Recording-System folgende Daten erfasst:

- seismische Daten, aufgezeichnet als Dehnungsrate, unter Verwendung der verteilt akustische Sensorik (DAS) Technologie und einer Febus Optics A1R DAS-System,
- statische Dehnungsdaten unter Verwendung der verteilt Temperatur- und Dehnungsmessung (DTSS) Technologie und einer Febus Optics G1R DTSS-System.

Für diese Art der Datenerfassung werden die Glasfasern an einem einzigen Ende mit den Systemen verbunden. Diese Systeme analysieren das von kleinen Heterogenitäten in der Glasfaser rückgestreute optische Signal und werten die entsprechende physikalische Größe über die Länge des angeschlossenen GFKs an verschiedenen Messpunkten aus. Die Systeme werden vor Ort in einem Schrank mit einem Regal gelagert (Abbildung 9). Der Schrank verfügt über

- ein Belüftungssystem, das an die Belüftung dieser Geräte angepasst ist,
- ein USV-System (unterbrechungsfreie Stromversorgung),
- eine Schalldämmung, um eine minimale Störung der Nachbarschaft zu gewährleisten,
- einen Router für die Verbindung zum Internet und die Fernsteuerung,
- aufgrund der großen räumlichen und zeitlichen Probenahme und damit der großen Datenmenge, die mit der DAS/DTSS-Überwachung verbunden sind, muss ein RAID10-Speichersystem gleichzeitig benutzt werden.

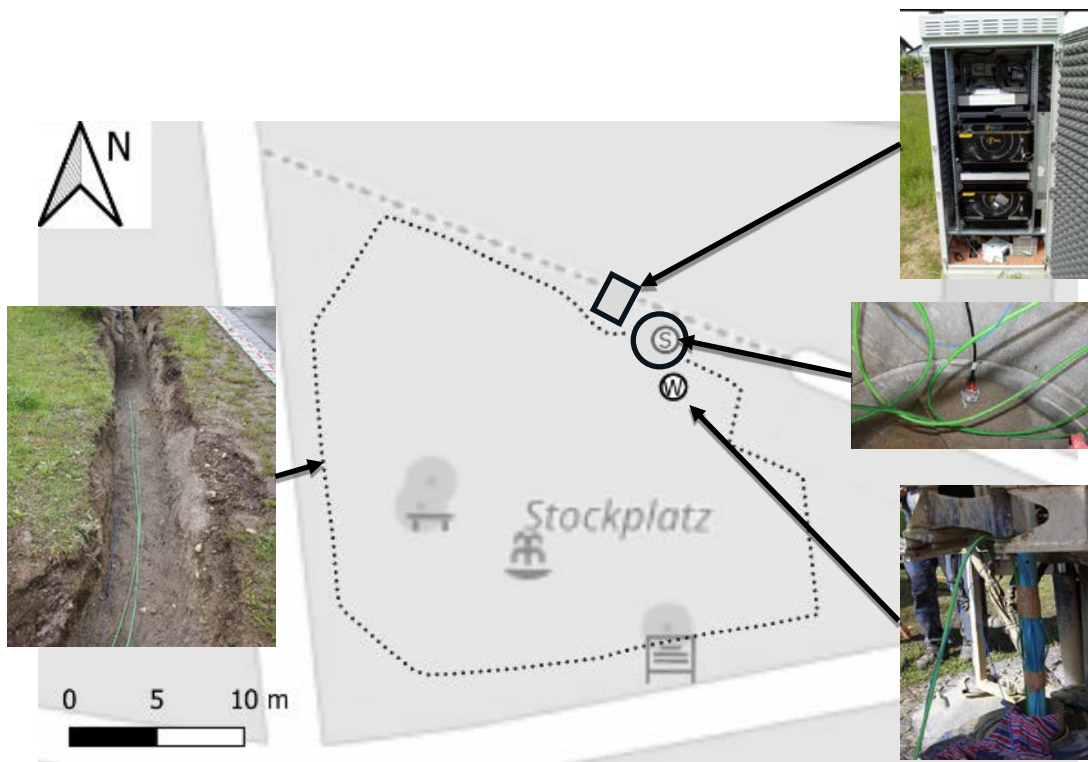


Abbildung 9: Layout der Fiber-Optic Sensing Messstation in Buchenhain, mit dem BUCH-Seismometer an der Oberfläche (S) und der 250 Meter tiefen Überwachungsbohrung (W). Die gepunktete Linie zeigt den Verlauf der oberflächennah verlegten Glasfasern (GFKs).

Die Kabelführung ist für DAS-Anwendungen vorgesehen und besteht aus:

- einen ~90 m langen Graben, in dem die Glasfasern (GFK) nahe der Oberfläche verlegt werden, mit Redundanz (zwei parallelaufende Kabeln). Der Graben bildet eine Schleife an der Oberfläche
- es wird in ein 250 Meter tiefes vertikales Überwachungsbohrloch geführt. In der Überwachungsbohrung werden die GFK an einem Rohr befestigt, bevor sie in das Bohrloch abgesenkt werden (Abbildung 9). Die Kabel werden zementiert, wodurch die Verbindung zwischen dem Kabel und der umgebenden Bodenschicht gewährleistet wird, und die Datenqualität verbessert wird.

- Das Management der Verbindungen zwischen den verschiedenen Teilen der Kabelleitung (d.h. der Teil im Bohrloch, die Schleife an der Oberfläche und der Teil, der zum Kabinett führt) wird in einem unterirdischen Schacht realisiert, in dem das Seismometer installiert ist (Abbildung 9).

Die Konfiguration mit den Schleifen und die Bohrung ermöglicht die Anwendung von DAS auf einem Kabel mit einem breiten Spektrum von Ausrichtungen. Das Design zielt darauf ab, die inhärenten Beschränkungen der DAS in Bezug auf die Richtungsempfindlichkeit zu überwinden, da die DAS-Dehnungsmessungen auf die Orientierung des GFKs beschränkt sind, im Gegensatz zu Standard-Seismometern, die Drei-Komponenten-Bewegungen aufzeichnen. Weitere Details über das Design und die Installationsschritte sind in Azzola & Gaucher (2021a) enthalten. Darin werden auch die Tap-Tests beschrieben, die durchgeführt wurden, um die Messpunkte, an denen Daten entlang der Faser gesammelt werden, räumlich zu lokalisieren.

Die Messpunkte, die in regelmäßigen Abständen entlang der mit dem DAS-System verbundenen Glasfaser verteilt sind, bilden ebenfalls ein Array von Messpunkte, so wie das Mini-Array im Siemens-Park. Abbildung 10 zeigt die Array- Transferfunktion, die berechnet wird, wenn man davon ausgeht, dass jeder DAS Messpunkt auf den Oberflächenschleifen mit einem Seismometer besetzt ist. Die Geometrie des DAS-Arrays an der Oberfläche ergibt eine gute azimutale Auflösung mit einer isolierten Hauptzone, die aus den eng beieinander liegenden Messpunkten resultiert, was geringe Unterschiede in der Auflösung für verschiedene Azimute bedeutet. Das Design des Arrays bringt zu einer höheren Empfindlichkeit für hochfrequente Signale und nahe seismische Quellen. Dieses Array kann aufgrund der kleinen Apertur nicht zwischen Wellen mit kleinen Wellenzahlunterschieden unterscheiden, was an der relativ breiten Hauptzone der Transferfunktion zu erkennen ist. Das DAS-Array zeichnet sich durch eine relativ hohe räumliche Auflösung und geringe Abstände zwischen den Messpunkten aus. Diese hohe räumliche Auflösung bedeutet, dass das Array zwischen eng beieinander liegenden Strukturen in der Wellenfront unterscheiden kann, wodurch hochfrequente Signale effektiv aufgelöst werden können.

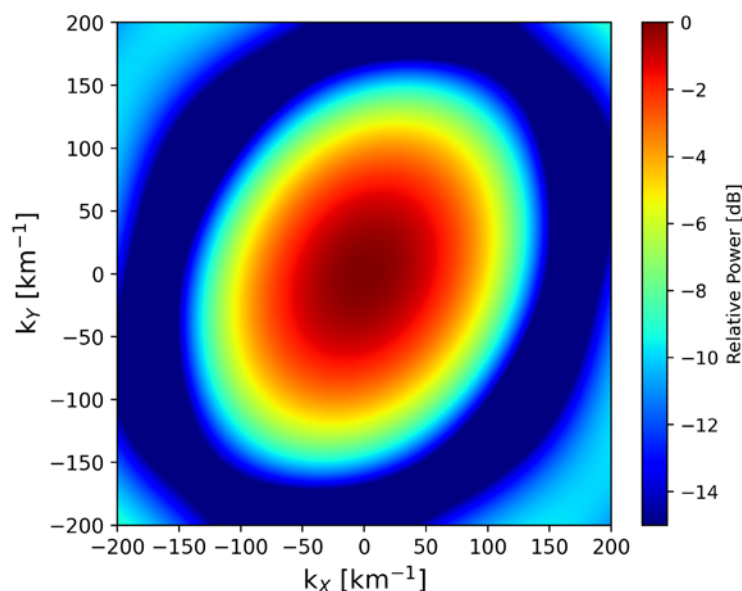


Abbildung 10: Relative Leistung der Array- Response normiert mit ihrem Maximum als Funktion der Wellenzahldifferenz. Bei der Berechnung der Array- Transferfunktion wird davon ausgegangen, dass jeder DAS Messpunkt durch ein Seismometer ersetzt wird, d.h. wir vernachlässigen Effekte, die mit der Richtwirkung des Wellenfeldes und der Geometrie des GFK zusammenhängen.

Verteilt akustische Sensorik (DAS) in der Schäftlarnstraße / Sendling

Ziel der Studie ist es, das Potenzial von DAS-Daten, die hinter geothermischen Bohrungen erfasst werden, für die kontinuierliche seismische Überwachung in einem städtischen und betrieblichen Kontext zu bewerten. Dabei werden die Vorteile der hohen Dichte von DAS Messpunkte entlang des Kabels, der größeren Nähe zum Überwachungsziel und der größeren Entfernung von der unruhigen Oberfläche genutzt.

Die Studie basiert auf der Infrastruktur, die in Zusammenarbeit mit der Geothermie-Allianz Bayern/TUM (Technische Universität München, Lehrstuhl für Hydrogeologie) in zwei geothermischen Bohrungen in München-Sendling (Schäftlarnstraße, SLS) installiert wurde. Aufgrund eines Defekts des bis zur Endteufe verlegten Kabels in der Förderbohrung TH4 wurde die INSIDE DAS-Studie ausschließlich mit dem hinter dem Ringraum der Injektionsbohrung TH3 zementierten Kabel durchgeführt. Dieses Kabel deckt die ersten 696.7 m des Bohrlochs TH3 ab. Abbildung 11, aus Azzola et al. (2023), beschreibt den Rahmen der Studie.

Die Infrastruktur vor Ort umfasst das in TH3 verlegte GFK und den für sechs Monate an Febus vermieteten DAS A1R- System, der sich im nahen gelegenen Kontrollraum befindet. Es ist an eine USV und an das SWM-Netzwerk angeschlossen.

Die hohe räumliche und zeitliche Auflösung der DAS-Datensätze führt dazu, dass bei der kontinuierlichen Erfassung erhebliche Datenmengen anfallen. Dies erfordert eine effiziente Behandlung der Daten, einschließlich der Übertragung, Verarbeitung und möglichen Speicherung. Um diese Herausforderungen zu überwinden, wurde ein dediziertes DAS-Überwachungssystem entwickelt (Abbildung 12). Die Erfassungsinfrastruktur vor Ort ist über das SWM-Netzwerk mit einer „Cloud-Internet-of-Things“ (IoT)-Plattform verbunden. Die Vernetzung erfolgt über eine physische kabelgebundene Verbindung, die hohe Datenübertragungsraten verarbeitet und die Firewall des SWM-Unternehmens passiert.

Im Rahmen dieses Projekts wurde vorgeschlagen, die dem Operator zur Verfügung stehenden Werkzeuge zu verwenden. Die Cloud-Lösung zur Behandlung des Datenflusses wird deshalb auf Microsoft Azure[®] gehostet. Die Cloud-Plattform ist so konzipiert, dass sie sowohl eine sichere Speicherumgebung für die DAS-Aufzeichnungen als auch optimierte Rechenressourcen für deren Verarbeitung bietet. Die vorgeschlagene Lösung wurde über einen Zeitraum von sechs Monaten, von Februar bis Ende Juli 2022, unter den Betriebsbedingungen des geothermischen Feldes getestet. Azzola et al. (2023) berichten ausführlich über die Studie. In diesem Open-Access-Artikel, der im Rahmen des INSIDE-Projekts veröffentlicht wurde, zeigen die Autoren die Machbarkeit einer effizienten Übertragung und Verarbeitung des großen kontinuierlichen DAS- Datenflusses.

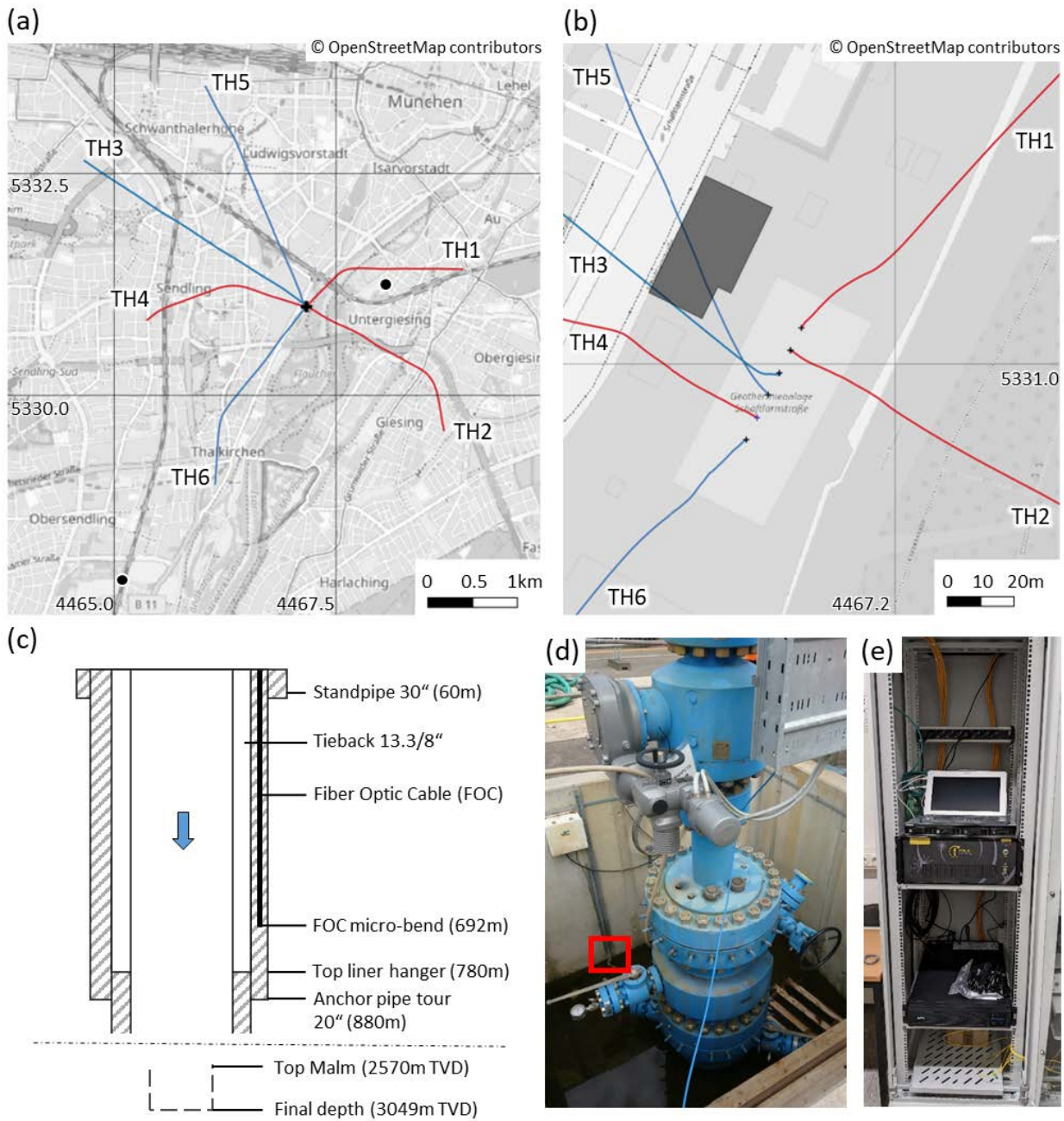


Abbildung 11: Überblick über das Untersuchungsgebiet. Panel (a): Lage des geothermischen Gebiets im südlichen Teil der Stadt München und Projektion der sechs Bohrlochpfaden auf die Oberfläche. Rote Linien bezeichnen Förderbohrungen und blaue Linien zeigen Injektionsbohrungen. Das Gauß-Krüger-4-Koordinatensystem wird für die Markierungen Northing und Easting verwendet. Panel (b): Fokus auf das Geothermiefeld Schäftlarnstraße. Das graue Polygon zeigt die Lage des Kontrollraums, in dem das Abfrage- und Aufzeichnungssystem Febus A1-R auf dem Bohrplatz installiert wurde. Panel (c): Fertigstellung der Bohrung TH3 auf den ersten 900 m (oben) und im offenen Bohrlochabschnitt bis zur Endteufe (unten). Das TH3-Kabel, das im Mittelpunkt der Studie steht, ist hinter einer Verrohrung zementiert. Die Installation ermöglicht es, den Abschnitt zweimal zu untersuchen, da das GFK eine U-Schleife mit einer Mikrokurve in 692 m Tiefe (TVD) bildet. Das Bohrloch verläuft in dem betreffenden Abschnitt vertikal. Das Kabel ist auf der einen Seite mit einem mit Ringraumflüssigkeit gefüllten Anker und auf der anderen Seite mit den flachen Sedimentschichten des Molassebeckens verbunden.

Diese Studie eröffnet auch Perspektiven für ein Upscaling des Konzepts auf weitere Überwachungskomponenten, z.B. DAS, Seismometer, aber auch Feldbetriebsparameter. Dies ist auf die Flexibilität der vorgeschlagenen Infrastruktur in Bezug auf die Datenspeicherkapazität und die Hochleistungs-Verarbeitungsressourcen zurückzuführen. Darüber hinaus könnte sie das Fundament eines Reservoir-Management-Systems bilden, das darauf abzielt, den Betrieb des geothermischen Reservoirs zu steuern, um das induzierte seismische Risiko zu mindern (s. AP2 – Kap. 2.1.2).

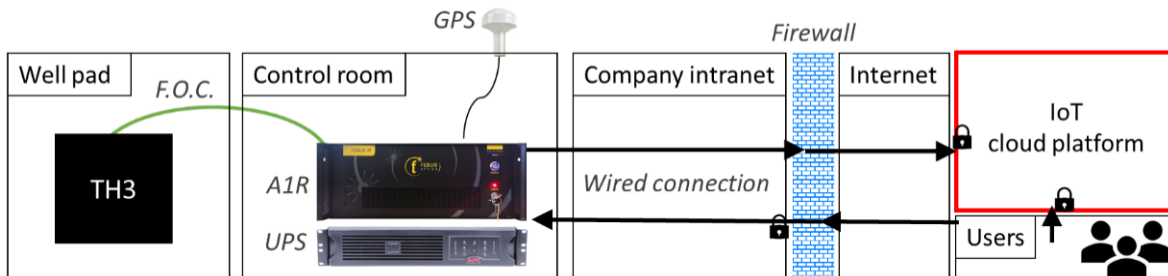


Abbildung 12: Schematische Darstellung des vorgeschlagenen Überwachungssystems zur Verbindung des TH3 GFK, des Febus A1-R Systems, der entwickelten IoT-Cloud-Plattform und der Nutzer oder Entwickler der Infrastruktur. Die Schlösser sollen eine sichere Verbindung darstellen.

Wartung und Datenverfügbarkeit

Die Wartung der Stationen ist ein entscheidender Aspekt für die kontinuierliche Datenaufzeichnung. Datenlücken an verschiedenen Stationen, wie beispielsweise im Mini-Array, schränken die Datenverarbeitungsmöglichkeiten ein und reduzieren die Empfindlichkeit des Netzwerks. Die Datenverfügbarkeit wird in Azzola & Gaucher (2021a) ausführlich dokumentiert. Die wichtigsten Beobachtungen sind wie folgt:

Seismometer-Netz: Die meisten Seismometer-Stationen verfügen über kontinuierliche Daten. Größere Ausfallzeiten traten an der Station Forstenrieder Park (FORS) auf, die mit Solarpanels betrieben wird und aufgrund von Diebstahl oder widrigen Wetterbedingungen im Winter stromlos war. Aufgrund der gewählten Stromversorgung und der minimalen Schutzmaßnahmen (z.B. nur ein einfacher Zaun) erforderte diese Station einen erheblichen Wartungsaufwand. Die Station FRIE in der Nähe von Neuried verzeichnete kürzere Ausfallzeiten, die ebenfalls auf Stromunterbrechungen zurückzuführen waren.

Mini-Array im Siemenspark: Das Mini-Array war von Mai 2022 bis September 2023 installiert. Eine effiziente Wartung der Stationen konnte nicht gewährleistet werden und fand nur alle 3 bis 4 Monate statt. Es wurden zahlreiche Ausfallzeiten beobachtet, die auf volle Speicherkarten, leere Batterien oder äußere Einflüsse (z.B. von Passanten aus dem Boden entfernte Stationen) zurückzuführen sind. Positiv zu vermerken ist, dass keine Komponenten gestohlen wurden. Insgesamt war das gesamte Netzwerk (9 Stationen) nur selten gleichzeitig in Betrieb.

DAS: In Buchenhain wurden von Juli 2021 bis zum Ende des INSIDE-Projekts kontinuierlich DAS-Daten aufgezeichnet und auf einem lokal mit dem DAS-System verbundenen 24-TB-Speicher gespeichert. Geringfügige Unterbrechungen waren auf GPS-Verbindungsabbrüche zurückzuführen, größere Ausfallzeiten auf Hardwarewartungen. In der Schäftlarnstraße wurden, während der DAS-Messkampagne von Februar bis August 2022, über 4.000 Stunden DAS-Daten aufgezeichnet, die in der MS Azure-Cloud gespeichert wurden. Auch hier wurden kleinere Ausfallzeiten aufgrund von GPS-Verbindungsabbrüchen verzeichnet.

Zusammenfassung

Die Anforderungen des INSIDE-Projekts beinhalten die Installation und Inbetriebnahme eines Messnetzes, das den Vergleich etablierter und nicht standardisierter seismischer Messmethoden ermöglicht und das bestehende Netz ergänzt. Die Ergebnisse dieses Arbeitspaketes zeigen, dass ein Messnetz, das den Anforderungen des INSIDE-Projektes entspricht, erfolgreich installiert wurde und das bestehende BayernNetz ergänzt. Methodik wurde angewandt, um die Leistung des Messnetzes zu bewerten. Die Konzeption des Messnetzes und der Aufbau der Messstationen bringen neue Expertise in innovativen Messmethoden, wie z.B. faseroptischen Technologien. Das Arbeitspaket unterstreicht die Bedeutung einer sorgfältigen Planung in Bezug auf

- den Standort der Stationen im Hinblick auf das Ziel der seismischen Überwachung,
- die individuellen Anforderungen der Stationen (z.B. Stromversorgung und Sicherheit, die bei der FORS-Station unterschätzt wurden).

2.1.1.2 AP1.3: Bohrlochmessungen – Cross-Well-Survey bei Schäftlarnstraße

Um die P- und S-Wellen-Geschwindigkeitsmodelle besser einzuschränken und die Genauigkeit der Lokalisierung der induzierten Seismizität zu verbessern, wurden zwei aktive seismische Kampagnen durchgeführt: eine Cross-Well-Survey bei Schäftlarnstraße und eine Multioffset-VSP über Pullach TH3. Das KIT war hauptsächlich am ersten Punkt beteiligt.

Die Kampagne fand vom 16. bis 20.11.2020 statt, bevor die sechs Bohrungen des Geothermiestandorts in Betrieb genommen werden. Dank des Projekts GAB, TUM und SWM wurden in der Geothermieranlage Schäftlarnstraße zwei GFK verlegt (Abbildung 13). Ein Kabel ist hinter der Verrohrung des 1. Abschnitts des Bohrlochs TH3 zementiert, das andere ist an einer Pumpstange („sucker rod“) befestigt, die im Inneren des Bohrlochs TH4 von oben nach unten verlegt ist. Es wurde DAS entlang dieser GFK durchgeführt. Auf der anderen Seite wurde die aktive Quelle in der Bohrung TH6 eingesetzt. Bei der Quelle handelt es sich um eine Sparkerquelle (Abbildung 14), die in der Tiefe einen Funken sprüht, der eine hochenergetische und reproduzierbare Dampfblase im Bohrloch erzeugt.

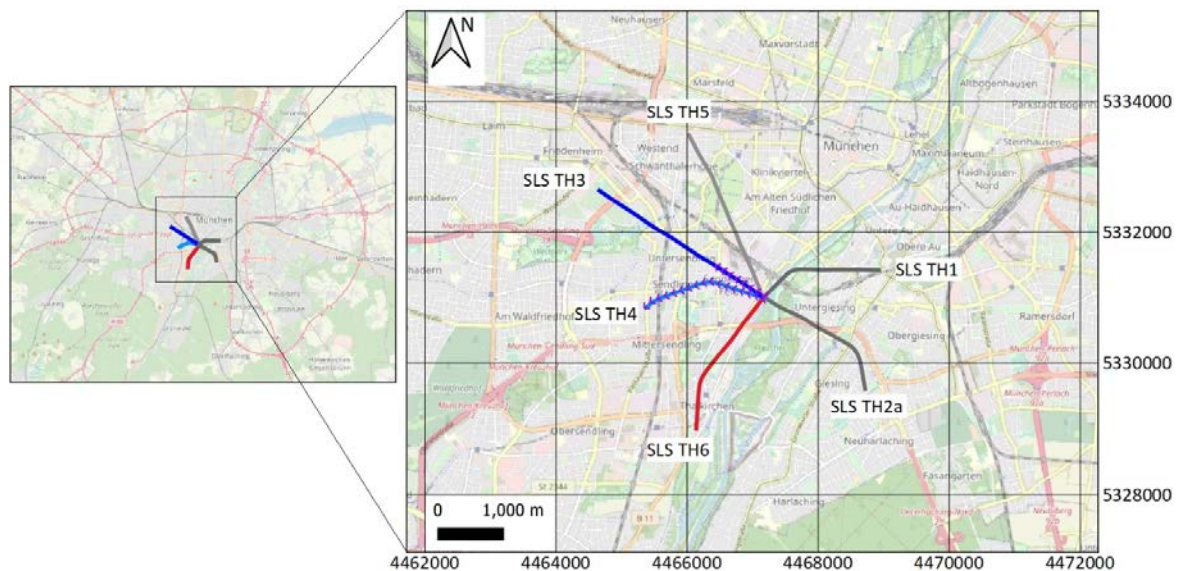


Abbildung 13: Lage der Geothermieranlage Schäftlarnstraße im Raum München (Sendling) und Trajektorie der sechs Bohrungen. Die roten Kurven zeigen die Bohrung SLS TH6, in der die Quelle betrieben wurde. Die blauen Kurven zeigen die Bohrungen SLS TH3 und SLS TH4, die die Daten mit Hilfe von GFK aufgenommen haben, die über die durch die lila Pfeile gekennzeichneten Abschnitte verlegt wurden.

Auf den Aufzeichnungen, die von TH3 oder TH4 GFK erfasst wurden, konnte kein seismisches Signal im Zusammenhang mit den Sparkerschüssen festgestellt werden. Auch die Summierung von bis zu tausend Aufnahmen aus der gleichen Einschusstiefe und für unterschiedliche Messlängen („Gauge length“ von 2, 5, 10, 20 und 50 m) ergab kein Signal. Im Rahmen der Verarbeitungssequenz wurden zeitliche und spektrale Inspektionen des Signals mit erweiterten Visualisierungsverfahren durchgeführt. Die Kohärenz des aufgezeichneten Signals auf der Faser wurde ebenfalls in Zeit und Raum analysiert.

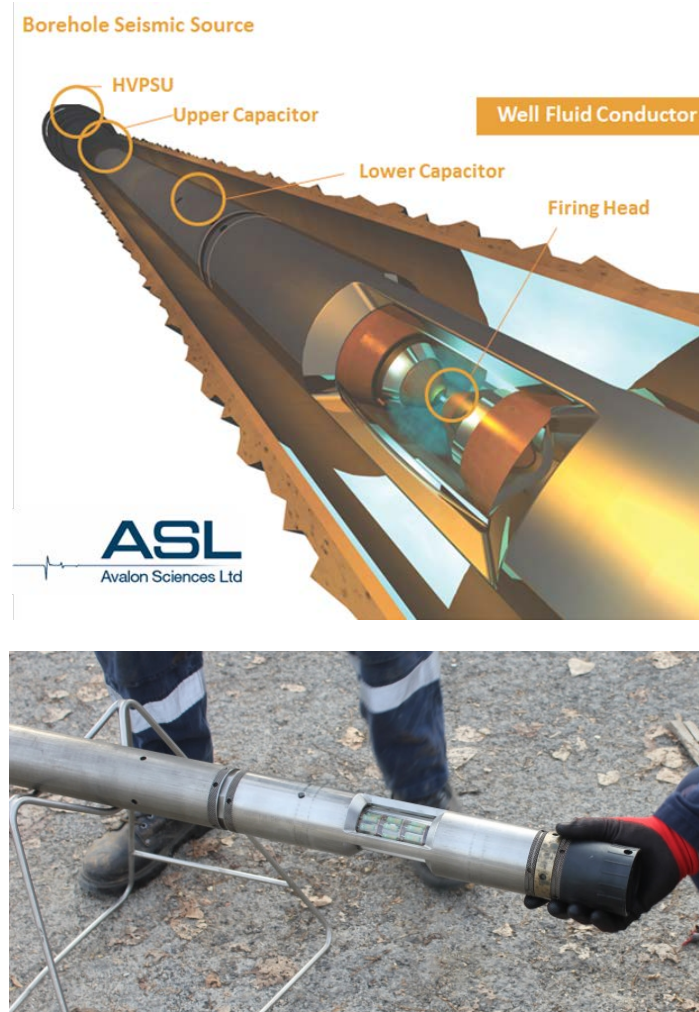


Abbildung 14: Advanced Sparker Tool (AST) von Avalon Sciences Ltd. Source: <https://avalonsciences.com/>.

Trotzdem konnten Hammerschläge, die am TH4-Bohrkopf durchgeführt wurden, deutlich unterschieden und analysiert werden. Dieser Tap-Test wurde verwendet, um die Vorverarbeitungssequenzen zu validieren, einschließlich der Umwandlung der Rohdaten in Dehnungsraten-Daten und des Summationsverfahrens. Die weiteren Verarbeitungssequenzen konnten ebenfalls an diesem Datensatz bewertet werden. Unsere Ergebnisse zeigen, dass, wenn das seismische Signal im Zusammenhang mit den Sparkerschüssen in den Aufzeichnungen vorhanden ist, die entsprechenden Dehnungsraten-Amplituden sehr klein sind, kleiner als 100 Nanostrain/s, unterhalb des Rauschpegels. Darüber hinaus sind die Drittel-Quartile der Dehnungsraten-Amplituden die über Faserlängen und Zeiträume aufgezeichnet wurden, in denen das seismische Signal erwartet wurde und in denen es nicht vorhanden war, gleichwertig. Dies stützt weiter die Annahme, dass das seismische Signal, wenn es existiert, nicht vom Hintergrundrauschen unterschieden werden kann.

Während des Tests wurde die Sparkerquelle in drei verschiedenen Tiefen im TH6 positioniert: 400 m, 920 m und 1200 m MD. Für die Positionen 920 und 1200 m wurden mehr als 200 Schüsse durchgeführt.

Neben der Auswirkung des Abstands zwischen Quelle und Empfänger und der Richtungsempfindlichkeit der Glasfasern, die bei der Planung der Untersuchung berücksichtigt wurden, könnten andere Faktoren erklären, warum die Energie des Sparkersschusses nicht größer ist als das auf den GFK aufgezeichnete Rauschen:

- Die Energie der Quelle könnte zu schwach sein und durch Wiederholung der Schüsse in der gleichen Tiefe nicht kompensiert werden. Frühere Erfahrungen der Firma Febus-Optics, dem Anbieter des DAS-Interrogators, zeigen jedoch, dass unter ähnlichen Bedingungen in Bezug auf den Quellentyp, die Abstände zwischen den Bohrlöchern und die Erfassungsparameter das Sparker-Signal bereits nach einigen Dutzend Schüssen sichtbar sein könnte. Der Unterschied in der Schäftlarnstraße könnte daher auf die Fertigstellung von TH6, wo die Quelle positioniert ist, die Signaldämpfung in den geologischen Formationen oder die Kopplung der GFK oder eine Kombination davon zurückzuführen sein.
- Die Fertigstellung des TH6-Bohrlochs könnte einen Einfluss haben. In dem Schussintervall zwischen 400 m und 1200 m beträgt der Bohrlochdurchmesser 13 3/8" und der Durchmesser der Sparker 3". Da das Größenverhältnis relativ groß ist, würde der größte Teil der von der Sparkerquelle freigesetzten Energie im Bohrloch verbleiben und nur ein kleiner Teil davon an die Formation übertragen werden. Darüber hinaus gibt es entlang der ersten 770 m des Bohrlochs TH6 eine „Tie-back“. Daher sind zwei Stahlrohre mit einem Durchmesser von 13 3/8" bzw. 20" eingesetzt und durch einen mit Fluid gefüllten Ringraum getrennt. Für dieses Intervall würde dies letztendlich die effektive Energiemenge, die in die Formation bis zum GFK übertragen wird, verringern, was durch die ~1500 oder ~1800 Schüsse (die das Signal-Rausch-Verhältnis um etwa 40 erhöhen) nicht kompensiert würde.
- Aktive VSP-Daten wurden erfolgreich entlang der TH4 GFK aufgezeichnet, die mit dem Gewicht einer Pumpstange („sucker-rod“) an die Bohrlochverrohrung gekoppelt ist. Die Kopplung der TH3 GFK wird durch die Zementierung hinter der Ankerrohrtor gewährleistet. Folglich ist die Kopplung der TH3- oder TH4-GFK höchstwahrscheinlich nicht der Grund dafür, dass die Schüsse von TH6 nicht aufgezeichnet werden.

Das wissenschaftliche Ziel des Sparker Tests konnte nicht erreicht werden. Dennoch wurden Erfahrungen und Lehren daraus gezogen. Insbesondere wurde eine Reihe von Verarbeitungsverfahren für die Analyse von DAS-Daten entwickelt, die später bei der passiven DAS-Überwachung (s. Kap. 2.1.1.1) eingesetzt wurden. Darüber hinaus wird empfohlen, bei der Planung zukünftiger Cross-Well-Experimente neben dem geometrischen Effekt und der Strahlenverfolgung auch den detaillierten Bohrlochaufbau und Impedanzkontraste in der Nähe der Bohrlochquelle zu berücksichtigen.

Azzola & Gaucher (2021b) geben alle Einzelheiten über den Design des Cross-Well-Tests, das Experiment, die Datenverarbeitung und die Ergebnisse.

2.1.1.3 AP1.4: Deformationsmessungen an der Oberfläche

Zur Erfassung von Oberflächendeformationen, hervorgerufen durch die tiefe Geothermie im Münchner Stadtgebiet, wurde ein integriertes geodätisches Messnetz eingerichtet, bestehend aus den Komponenten Globale Navigationssatellitensystemen (GNSS), Radarinterferometrie (InSAR) und Nivellement. Das Ziel war es, ein modernes Monitoringsystem zur Bestimmung und Überwachung des Einwirkungsbereiches der geothermischen Aktivitäten im Untergrund zu konzipieren und zu erproben.

Die Hauptaufgabe im AP 1.4 bestand im Aufbau und Betrieb von vier permanent arbeitenden GNSS-Referenzstationen mit unterschiedlicher technischer Ausstattung, bestehend aus einer vollausgerüsteten Hauptstation und drei Stationen mit einfacheren Empfängern und Antennen. Die Ausstattung wurde gewählt, um die Leitungsfähigkeit eines kostengünstigen hybriden Netzwerkes für die Monitoringaufgaben im Großraum München zu evaluieren. Die Standorte der Permanentstationen wurden im Verlaufe mehrerer Vorort-Besichtigungen zusammen mit den Projektpartnern ausgewählt. Dabei waren verschiedene Kompromisse notwendig bezüglich der Horizontfreiheit für die Empfangsantennen, der Lage der Stationen bezüglich der Geothermiebohrungen und der erwarteten Deformationssignale sowie der Verfügbarkeit von geeigneten Gebäuden und Grundstücken inklusive logistischer Fragen wie Spannungsversorgung und Sicherheit. Letztendlich konnten drei „Dachstationen“ und eine „Pfeilerstation“ realisiert werden. Während bei der Pfeilerstation durch bodennahe Aufstellung eine sehr gute Ankopplung an den Erdboden gewährleistet werden kann, werden Dachstationen an den Wänden oder im Dachbereich von Gebäuden installiert, deren potentielle Eigenbewegungen Bestandteil der Messsignale sein können, was die Genauigkeit unter Umständen reduziert.

Das realisierte Profil von GNSS-Stationen verläuft in Südsüdwest-Nordnordost-Richtung, erstreckt sich über eine Gesamtentfernung von 12.6 km und verbindet die beiden Untersuchungsgebiete Schäftlarnstraße und Pullach (Abbildung 15). Die innerhalb des Profils liegende Station Pullach wurde mit einem Zweifrequenz-Empfänger und einer hochwertigen Choke-Ring-Antenne ausgerüstet. Außerdem wurde in unmittelbarer Nähe zur GNSS-Antenne ein Transponder zur Unterstützung der Integration von GNSS- und Radardaten installiert. Die anderen drei Stationen sind mit Einfrequenz-Empfängern und kostengünstigen Antennen ausgerüstet. An der Station Maria-Einsiedel-Bad wurde zusätzlich ein zweiter Transponder eingerichtet. Die kontinuierlichen Messungen begannen am 25./26.03.2021 in Pullach und Maria-Einsiedel-Bad, am 04.08./15.09.22 folgten Baierbrunn und Schäftlarnstraße. Die Daten werden mit einer Taktrate von 30 Sekunden erfasst; einmal pro Tag werden sie mittels einer GSM-Routers an einen Server des GIK übertragen.

Die zweite Komponente des geodätischen Messnetzes ist die Radarinterferometrie, deren Leistungsfähigkeit anhand einer aktuellen Fallstudie für München evaluiert werden sollte. Hier wurden verschiedenen Datensätze beschafft und für Analyse, Vergleich und Interpretation vorbereitet:

- 1070 Szenen der C-Band-Radar-Satellitenmission Sentinel-1 aus je zwei benachbarten Beobachtungstreifen im aufsteigenden und im absteigenden Orbit. Diese Daten wurden in zwei Abschnitten (Okt. 2014 – April 2020, Jan. 2019 – Dez. 2023) am Geodätischen Institut des KIT prozessiert.
- Ergebnisse einer Persistent-Scatterer-Analyse (PSI) von X-Band-Radarszenen der Satellitenmission TerraSAR-X aus dem aufsteigenden Orbit, prozessiert und zur Verfügung gestellt vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) im Rahmen eines Unterauftrages. Der Datenstapel umfasst den Zeitraum Nov. 2015 – Dez. 2021, er enthält 128 Radarszenen.
- Ortho-Produkte (Vertikalkomponente und EW-Horizontalkomponente) des Europäischen Bodenbewegungsdienstes (EGMS), der im Frühjahr 2022 in seine operative Phase eintrat und PS-Prozessierungen der Sentinel-1 Daten kostenfrei zum Download über einen Webserver anbietet. Der Zeitraum der verwendeten EGMS-Datensätze erstreckt sich über das Intervall Jan. 2018 – Dez. 2022.

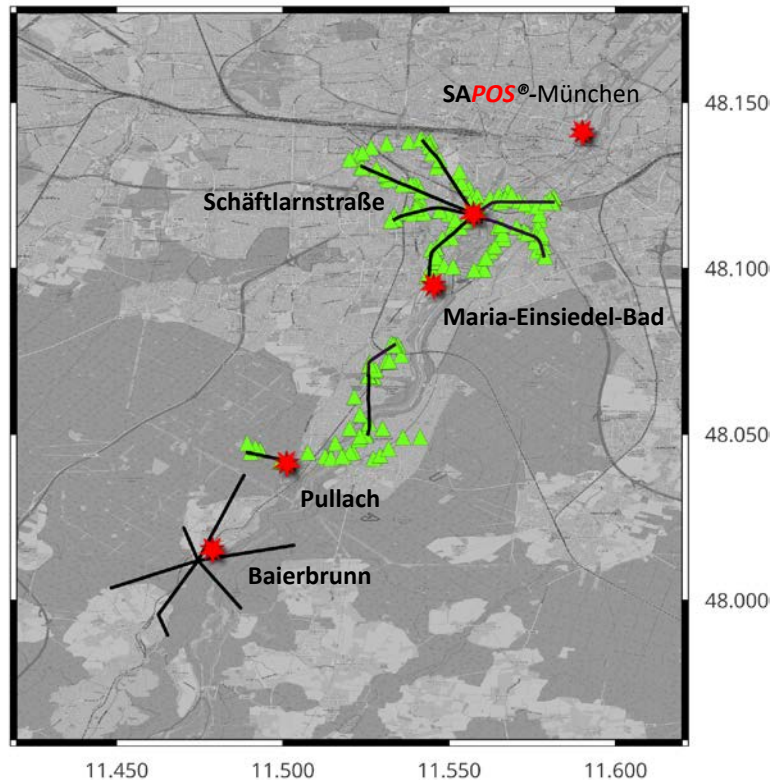


Abbildung 15: Standorte der vier permanenten GNSS-Referenzstationen, die im Rahmen von INSIDE installiert wurden, sowie einer SAPOS® Referenz-station der Landesvermessung (rote Symbole). Schwarze Linien geben die auf die Oberfläche projizierten Bohrpfade (in Planung für Baierbrunn) an. Grüne Symbole zeigen vermarkte Nivellement-Messpunkte.

Für Vergleichs- und Evaluierungszwecke wurden ausgeglichene Messwerte der Wiederholungs-Nivellements zur Verfügung gestellt, die durch die Betreiber zum Zwecke der Erfassung und Kontrolle des Einwirkungsbereiches in Auftrag gegeben wurden. Nivellementdaten liegen vor von den von SWM betriebenen Geothermieanlagen Freiham, Riem, Kirchstockach und Schäftlarnstraße, für die Anlage der IEP in Pullach, sowie für die von der Wärmeversorgung Ismaning GmbH & Co. KG betriebene Anlage in Ismaning.

Weitere Details finden Sie in Westerhaus & Ambrus (2024).

2.1.2 AP2: DATENMANAGEMENT (LEITUNG: SWM)

Obwohl die SWM die Leitung des Arbeitspakets übernahm, fanden mehrere Diskussionen zwischen allen Partnern statt.

Eine der ersten Aufgaben bestand darin, alle Arten von Daten zu identifizieren, die für ein Geothermieprojekt gesammelt werden müssen und ein Datenbankkonzept vorzuschlagen (AP2.1). Abbildung 16 verdeutlicht den Unterschied zwischen statischen Daten, die nicht oft aktualisiert werden, und dynamischen Daten, die eher regelmäßig aktualisiert werden sollten. Letztere enthalten beispielsweise die Rohdaten des vorhandenen Überwachungsnetzes, die Ergebnisse der Verarbeitung dieser Rohdaten und auch die Echtzeit-Modellierung des Verhaltens des geothermischen Reservoirs. Die statischen Daten enthalten die Informationen, die zur Verarbeitung der (dynamischen) Rohdaten und zur Darstellung der Ergebnisse erforderlich sind.

Ein Teil dieses Datenbankkonzepts wurde während des temporären (sechs Monaten) DAS-Monitorings in der Schäftlarnstraße getestet (AP2.2 und AP2.3).

Diese temporär Überwachung ermöglichte es, zu prüfen, ob die DAS-Daten in Echtzeit in die Datenbank integriert und automatisch verarbeitet werden können, um Ergebnisse zu liefern, die in ein künftiges Reservoir-Management-System integriert werden können. Ein erster Schritt bestand darin, die DAS-Daten aus dem Technikraum in der Schäftlarnstraße, in dem der DAS-Interrogator installiert - und mit der GFK verbunden - war, in die damals von den SWM genutzte Dateninfrastruktur, die auf einer Internet-of-Things (IoT)-Cloud-Plattform basierte, zu übertragen. Abbildung 17 beschreibt den implementierten gesicherten Datenfluss, der während des gesamten Überwachungszeitraums, d. h. 6 Monate, erfolgreich funktionierte. Es wurde ein gesicherter Zugriff auf die Daten mit spezifischen Berechtigungen für bestimmte Benutzer vergeben. Ein wichtiger Aspekt dieser Einrichtung ist die Tatsache, dass die DAS-Daten dem SWM-Betreiber in Echtzeit in seiner eigenen Datenbank und über seine eigene Infrastruktur ohne zusätzliche Schnittstelle zur Verfügung gestellt werden konnten. Ein zweiter wichtiger Aspekt dieses Konzepts ist die Fähigkeit, die Daten, die im „Datensee“ der IoT-Plattform landen, in Echtzeit zu verarbeiten; dies wird in Azzola & Gaucher (2024a) diskutiert.

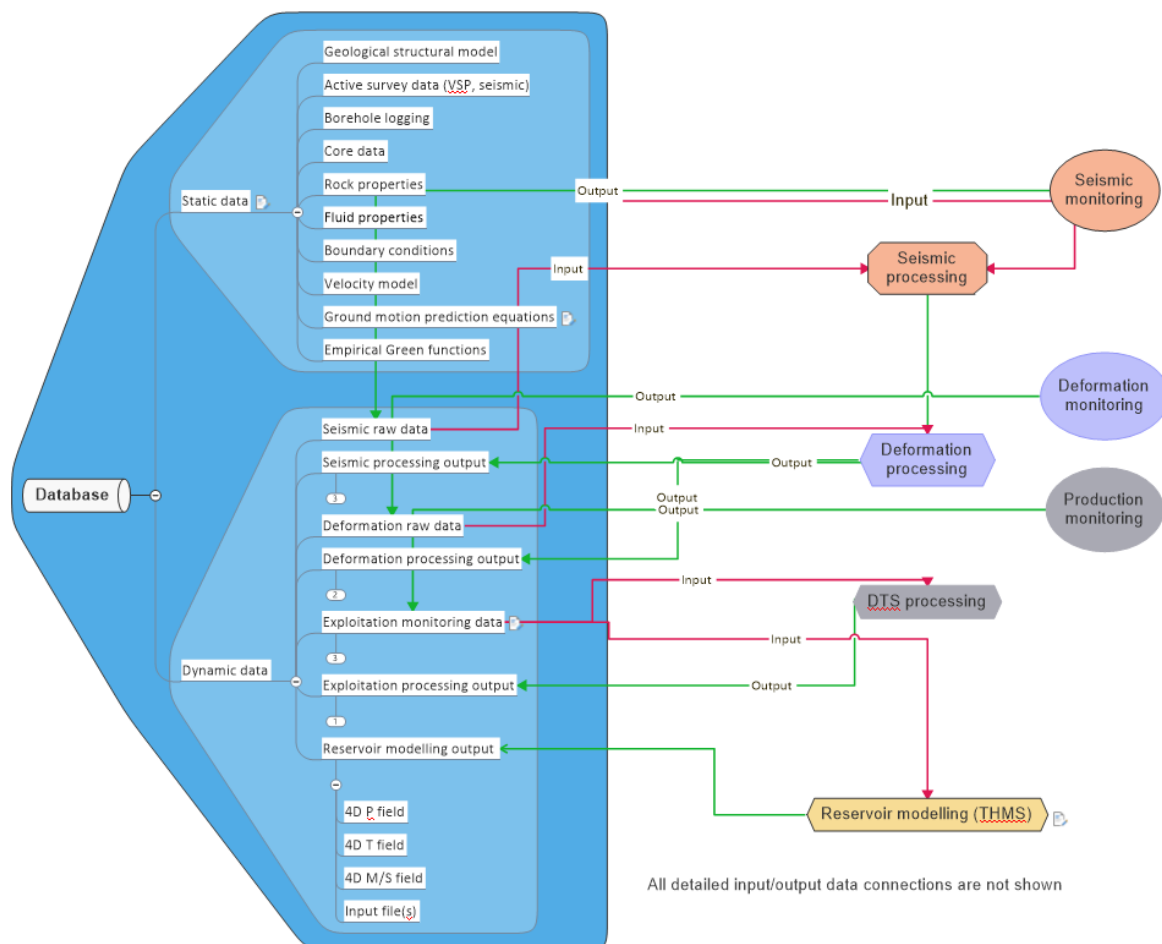


Abbildung 16: Vorgeschlagene Architektur der INSIDE-Datenbank.

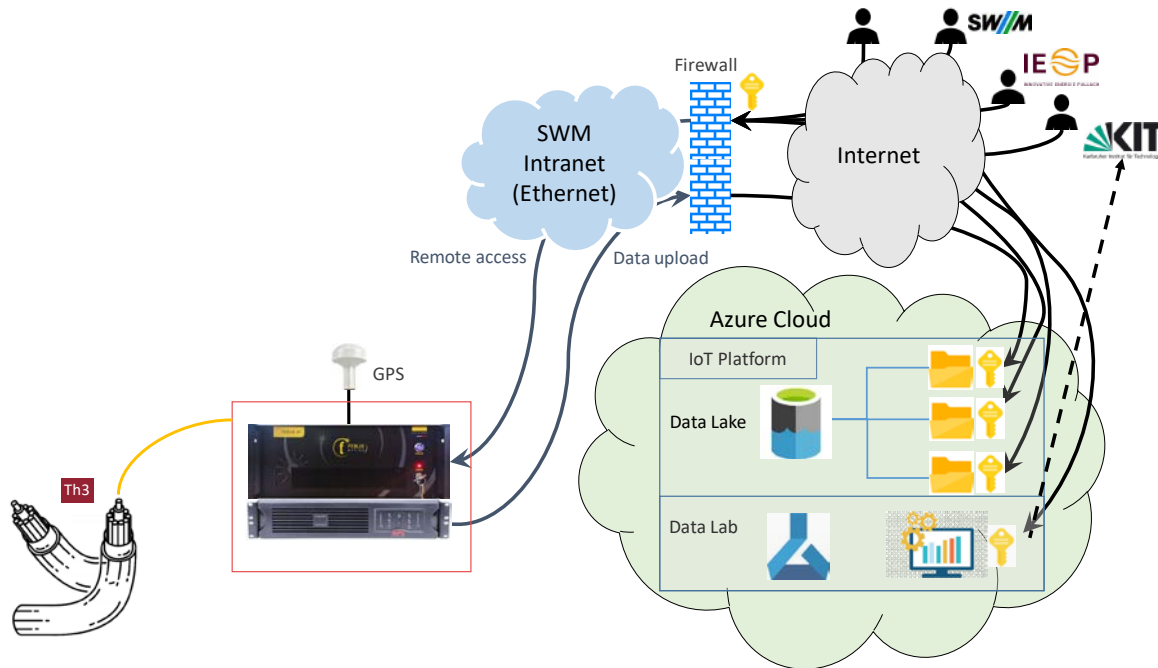


Abbildung 17: Schematic of the IT infrastructure used to transfer in real-time the DAS data from the Schäftlarnstraße technical room to the Internet of Thing cloud platform of the SWM operator.

2.1.3 AP3: MONITORING UND DATENBEARBEITUNG (LEITUNG: KIT)

2.1.3.1 AP3.1: Post-Prozessieren der aufgezeichneten mikroseismischen Daten

Dieses Arbeitspaket konzentriert sich auf die Verarbeitung der passiven seismischen Daten, die während der Betriebszeit der INSIDE-Stationen mit der in AP1.2 – Kapitel 2.1.1.1 beschriebenen Infrastruktur aufgezeichnet wurden. Die Ergebnisse dieser Datenverarbeitung sind eine wichtige Basis für den Vergleich von Messtypen und -konfigurationen (s. AP5.1 – Kap. 2.1.5.1) sowie für die Validierung des erstellten Geschwindigkeitsmodells durch die Lokalisierung der detektierten Seismizität und die Analyse der damit verbundenen Lokalisierungsfehler und Unsicherheiten (s. AP3.2 – Kap. 2.1.3.2).

Einschätzung des Katalogs seismischer Ereignisse

Das Seismometer-Netz wurde verwendet, um die lokale Seismizität im Hinblick auf die geschätzte Empfindlichkeit des Netzes zu detektieren. Die Datenerfassung durch das Seismometer-Netz erfolgte kontinuierlich zwischen März 2021 und Dezember 2023, mit gelegentlichen Ausfallzeiten, die hauptsächlich die Stationen FORS und FRIE betrafen. Die Detektionsmethodik basierte auf einem „network coincidence trigger“ unter Verwendung des STA/LTA-Algorithmus und wurde durch einen „template-matching“ Analyse unterstützt. Die Analyse der detektierten seismischen Ereignisse und die Aktualisierung des seismischen Katalogs erfolgt jeweils am Monatsende. Der Detektions-Workflow ist im zugehörigen Bericht beschrieben (Azzola and Gaucher, 2025).

Insgesamt wurden im Untersuchungsgebiet zwischen März 2021 und Dezember 2023 79 lokale seismische Ereignisse detektiert und lokalisiert. Sowohl absolute als auch relative Lokalisierungen wurden mit dem entwickelten Geschwindigkeitsmodell untersucht. Die Ergebnisse des seismischen Monitorings wurden mit den Daten des Geophysikalischen Observatoriums Fürstenfeldbruck (GOF) verglichen. Ein vollständiger Katalog sowie ein detaillierter Vergleich mit den GOF-Ergebnissen sind in Azzola & Gaucher (2025) enthalten.

Abbildung 18 zeigt die absoluten Lokalisierungen und stellt die Abweichung zu den vom GOF gemeldeten Epizentren als Farbcode dar, sofern zutreffend. Die im Rahmen des INSIDE-Projekts detektierten Ereignisse ergänzen das Monitoring des GOF, was die Bedeutung der neu installierten seismischen Stationen unterstreicht. In diesem Zusammenhang erweist sich die Station WBRU als besonders hilfreich, da sie aufgrund ihrer Nähe zum Geothermie-Standort Oberhaching eine hohe Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) aufweist. Im Gegensatz dazu tragen die Aufzeichnungen des Seismometers SIEM trotz seiner Installation in einer Tiefe von etwa 180 m nur geringfügig zur Detektion seismischer Ereignisse bei. Dies wird vermutlich mit Problemen der Kopplung zwischen Boden und Sensor in Verbindung gebracht.

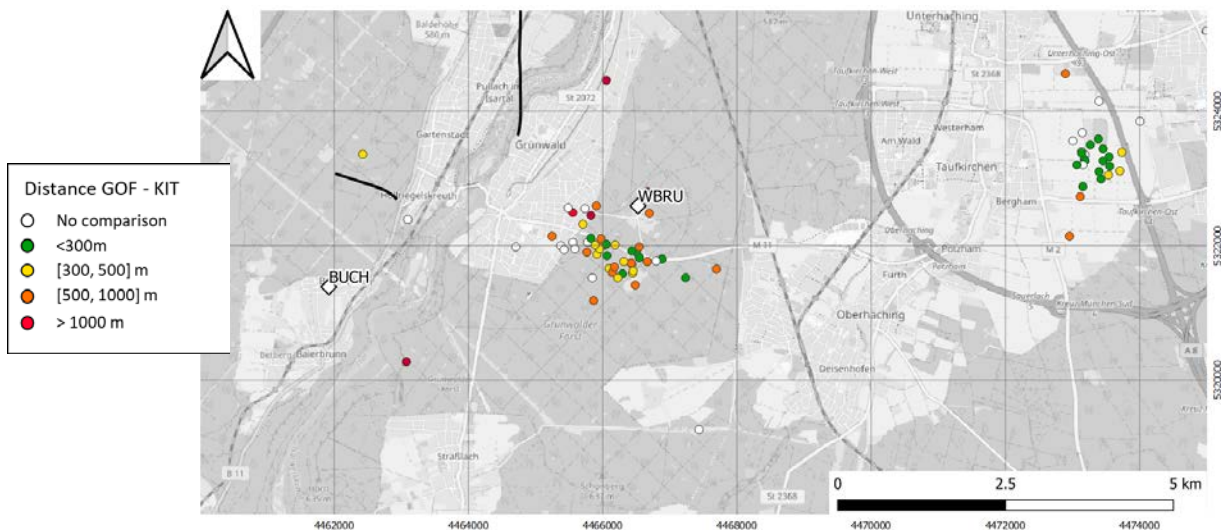


Abbildung 18: Karte der berechneten Epizentren. Die seismischen Stationen sind durch grüne Punkte und die von GOF übermittelten Beobachtungen durch schwarze Punkte dargestellt. Für jedes Epizentrum berechnen wir die Entfernung zur übermittelten Station (Hintergrundfarben), wenn kompatible Daten verfügbar sind.

Die Tiefen der Hypozentren sind in Abbildung 19 im Verhältnis zu einer Richttiefe des Reservoirs dargestellt. Die Unsicherheiten der Lokalisierung sind ebenfalls in Form von Fehlerbalken angegeben. Die absoluten Lokalisierungen zeigen, dass die Ereignisse im Reservoir oder darunter lokalisiert werden. Einige Ereignisse werden in den oberflächennahen Sedimentschichten lokalisiert, insbesondere mit größeren Unsicherheiten bei der Positionsbestimmung. Für diese Ereignisse liegen nur wenige Ankunftszeitmessungen vor, da sie vom Seismometer-Netz nur schwach erfasst werden, was zu einer möglichen Ungenauigkeit bei der Lokalisation führen kann.

Zur Korrektur der Auswirkungen auf die Messstellen wird die relative Lokalisierung der Ereignisse berücksichtigt. Die Analyse der relativen Hypozentren zeigt keine signifikanten zeitlichen Trends in den Epizentren oder Magnituden. Die Analyse identifiziert zwei signifikante Cluster, die mit den Standorten Unterhaching und Oberhaching in Verbindung stehen, sowie ein drittes Cluster mit nur zwei Ereignissen in der Nähe des Bohrpfad Pullach TH3. Diese Cluster sind in Abbildung 18 dargestellt. Für jeden Cluster weisen die Wellenformen eine relativ konsistente Signatur auf, die für die Template Matching Analyse verwendet werden kann. Abbildung 20 zeigt ein typisches Beispiel für Aufzeichnungen der Station WBRU von Ereignissen aus jedem dieser Cluster.

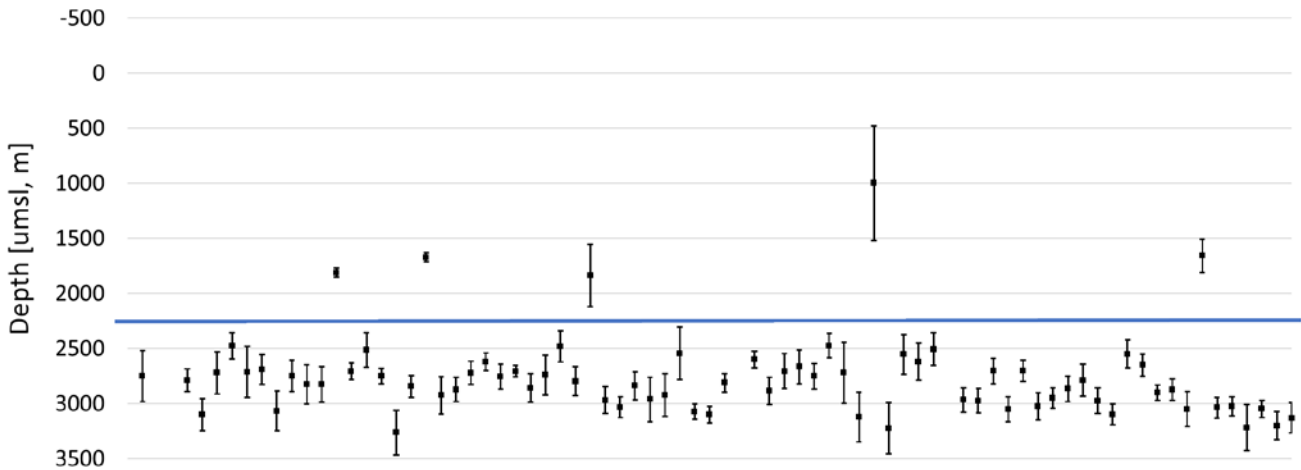


Abbildung 19: Tiefe der absoluten Hypozentren der 79 detektierten seismischen Ereignisse. Die Fehlerbalken entsprechen der Länge der großen Halbachse des 68%-Konfidenzellipse und verdeutlichen Unsicherheiten bei der Lokalisierung. Die blaue Linie ist ein Hinweis auf die Tiefe des Reservoirs.

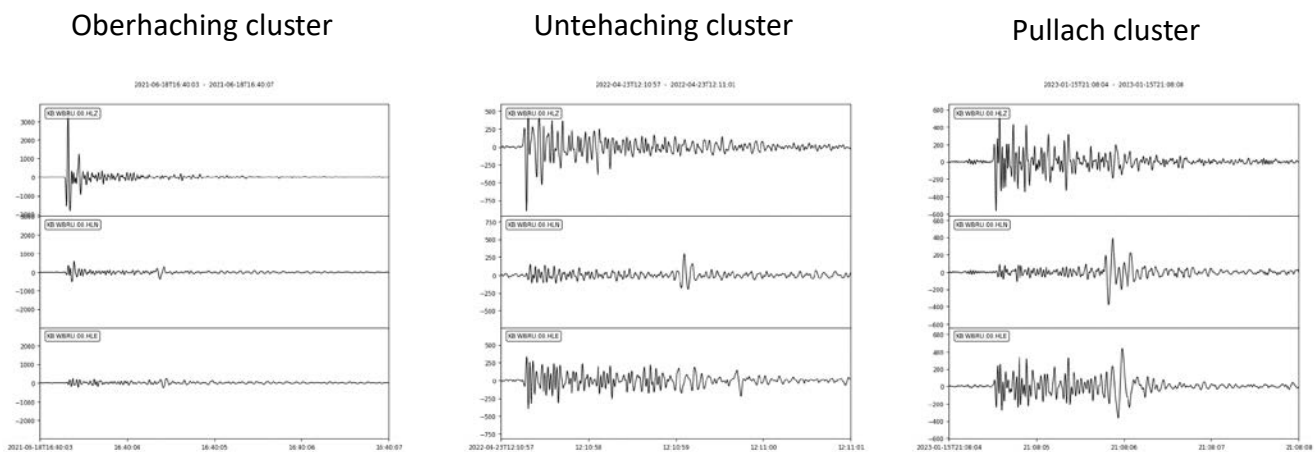


Abbildung 20: Beispiel für seismische Signale, die mit dem 3C-Seismometer WBRU aufgezeichnet und im Frequenzband 5-40 Hz gefiltert wurden.

Tabelle 4 zeigt die minimalen und maximalen Magnituden der Ereignisse für die Cluster Unterhaching und Oberhaching. Diese Werte werden mit den prognostizierten Netzwerkfähigkeiten verglichen, die auf der Basis von Rauschmessungen modelliert wurden (s. AP1.2 – Kap. 2.1.1.1). Die Ergebnisse des seismischen Monitorings zeigen, dass das Netzwerk mit einer Detektionsempfindlichkeit arbeitet, die den Erwartungen entspricht. Dies deutet darauf hin, dass das im Rahmen von INSIDE installierte Seismometer-Netz in der Lage ist, Ereignisse mit einer Magnitude von -0,9 auf Reservoir Höhe im Bereich der fünf Stationen zu detektieren. Während der dreijährigen Betriebszeit wurde jedoch praktisch keine Seismizität unterhalb dieser Zone beobachtet.

Tabelle 4: Minimale und maximale lokale Magnituden der Ereignisse in den Hauptclustern.

	Minimum	Maximum
Untehaching	-0.55	1.6
Oberhaching	-0.75	0.8

Die Ergebnisse des seismischen Monitorings wurden den Projektpartnern bei den Projektzwischen-treffen vorgestellt. Aufgrund der Lokalisierung der beobachteten Seismizität und der wenigen Ereignisse, die in der Nähe der Zielstandorte beobachtet wurden, konnte keine Korrelation zwischen seismischen Aktivitäten und betrieblichen Prozessen hergestellt werden.

Sensibilitätsanalyse für Netzgeometrie und Geschwindigkeitsmodell

Eine Analyse der Sensitivität der Ergebnisse der Lokalisierung gegenüber dem Geschwindigkeitsmodell wird in Azzola & Gaucher (2025) vorgeschlagen. Zur Validierung der Hypothesen, die der Konstruktion des Geschwindigkeitsmodells zugrunde liegen (s. AP3.2 – Kap. 2.1.3.2), vergleichen wir die Ergebnisse der Lokalisierung, die bei der Betrachtung einer linearen gegenüber einer schrittweisen Geschwindigkeitsentwicklung mit der Tiefe und einer Zunahme gegenüber einer Abnahme der Geschwindigkeiten in die Ton-Mergel Schicht flacher als der Reservoir („Liegenden Tonmergel“) erzielt wurden. Die Analyse führt zur Auswahl eines Gradienten-Geschwindigkeitsmodells, das gut mit den Logging-Daten übereinstimmt. Unter Berücksichtigung des entwickelten Modells führen die Lokalisierungsergebnisse zu relativ geringen Zeitresiduen. Die Messungen stimmen auch mit den von der GOF berichteten Epizentren und den in Pullach TH3 beobachteten VSP-Laufzeiten überein.

Azzola & Gaucher (2025) enthalten abschließend eine umfassende Analyse der Sensitivität der Lokalisierungsergebnisse in Bezug auf die Netzgeometrie. Die fünf im Rahmen von INSIDE installierten Stationen decken die seismische Cloud der beiden Hauptcluster nicht vollständig ab, was die Lokalisierungsergebnisse verfälschen kann. Der Bericht analysiert die Sensitivität der Ereignislokalisierungen in Abhängigkeit von der Netzgeometrie, indem die Ergebnisse des INSIDE-Netzwerks allein mit den Ergebnissen verglichen werden, die unter Einbeziehung der öffentlichen Stationen des BayernNetzes erzielt wurden. Es wurde eine Verschiebung der Epizentren von 50 bis 950 m im Vergleich zu den GOF-Epizentren beobachtet, wenn die BayernNetz-Stationen und das entwickelte Geschwindigkeitsmodell verwendet wurden. Der Ausschluss der BayernNetz-Stationen führt zu einer signifikanten Ungenauigkeit mit einer Verschiebung der Lokalisationen nach Westen und in geringere Tiefen. Diese Analyse unterstreicht die Bedeutung der Einbeziehung der öffentlichen Daten des BayernNetzes zur Lokalisierung der detektierten Ereignisse. Er unterstreicht die Bedeutung der Netzabdeckung und der optimalen Positionierung der Stationen, die mit der Verwendung zuverlässiger Geschwindigkeitsmodelle, die die Eigenschaften des Untergrunds korrekt beschreiben, einhergehen muss.

Zusätzlichen Beitrag bei „unkonventionellen“ Messstellen

Die DAS-Messstellen und das Mini-Array im Siemens-Park liefern zusätzliche Datensätze, die zur weiteren Untersuchung der detektierten Seismizität verwendet werden. Diese Datensätze werden nicht auf standardisierte Weise verarbeitet und erfordern den Einsatz and die Entwicklung von Methoden, um die Dichte und das Design des Arrays optimal zu nutzen. Die Mehrfach-Messpunkte der DAS-Station und des Mini-Arrays arbeiten zusammen, um an einem gegebenen Messort eine größere Messkapazität zu liefern als ein Einzelpunkt-Sensor wie z.B. ein Seismometer.

Azzola & Gaucher (2024b) stellen die entwickelten Methoden zur Analyse der Direktionalität des Wellenfeldes von Mini-Array-Aufzeichnungen mittels Beamforming vor. Die Methodik wird am Beispiel des Ereignisses vom 25. September 2022 illustriert, bei dem an den Mini-Array-Stationen relativ hohe SNR-Werte beobachtet wurden. Der Bericht präsentiert die Ergebnisse für jedes Ereignis im Katalog, für das Daten mit dem Mini-Array gesammelt wurden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Schätzungen des Mini-Arrays im Allgemeinen mit den Lokalisierungen des Seismometer-Netztes übereinstimmen.

Die entwickelte Methodik zur Verarbeitung von DAS-Daten aus einem vertikalen Bohrloch, einschließlich der Schätzung von Ankunftszeiten, der Umrechnung von Dehnungsraten in Bodenbewegungsdaten und der Bestimmung von Quellparametern wie Momentmagnitude und Stress-Drop, wird auch in Azzola & Gaucher (2024b) dargestellt. Die Verteilung der Messpunkte im Bohrloch ermöglicht die Anwendung erweiterter Filtertechniken im Frequenz- und Wellenzahlbereich, die auch zu einer automatischen Bestimmung der Ankunftszeiten von P- und S-Wellen bringt. Der Bericht befasst sich auch mit den Methoden zur Abschätzung der Direktionalität des Wellenfeldes (Rückazimut und Einfallswinkel) auf der Grundlage der Gesamtverarbeitung der DAS-Daten, die an der Oberfläche und im Überwachungsbohrung aufgezeichnet werden. Für die Station Buchenhain wird die Methodik anhand der Aufzeichnungen des seismischen Ereignisses vom 15. Januar 2023 demonstriert, dass in der Nähe von Pullach TH3 lokalisiert wurde (Abbildung 21).

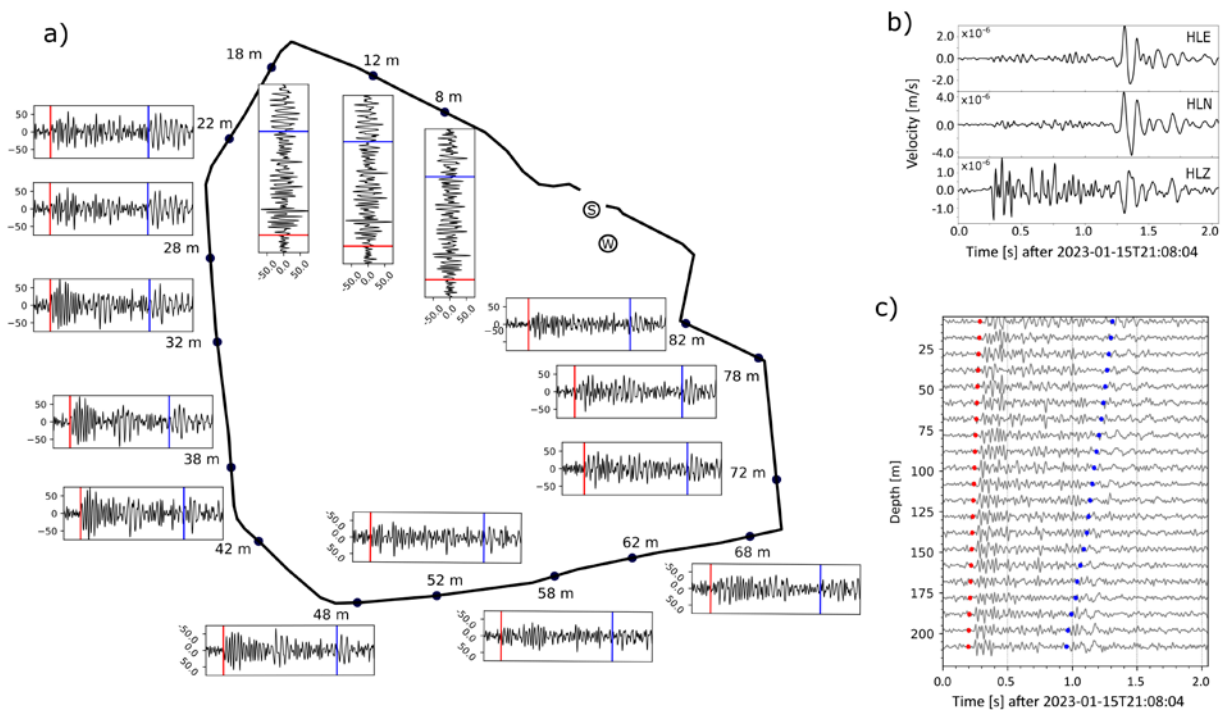


Abbildung 21: Beispiel eines Datensatzes, der am 15. Januar 2023 an der DAS-Station Buchenhain gesammelt wurde. Panel (a) zeigt die Messpunkte an den oberflächennahen Kabelschleifen mit den gemessenen Ankunftszeiten für die erste P- (rote Linie) und S-Welle (blaue Linie). Panel (b) zeigt die Messungen des BUCH-Seismometers, das sich in Panel (a) mit dem eingekreisten S befindet. Die Aufzeichnungen sind im Frequenzband 5-50 Hz bandpassgefiltert. Panel (c) zeigt die DAS-Daten, die im Überwachungsbrunnen entlang der 250 m aufgezeichnet wurden, mit den gemessenen P- (blau) und S-Wellenankünften (rot).

Für dieses lokale Ereignis zeigt die Analyse, dass die Ergebnisse aus den DAS-Daten gut mit den Ergebnissen des gesamten Seismometer-Netzes übereinstimmen (Abbildung 22). Bei der Anwendung auf den gesamten Katalog zeigt die Analyse jedoch, dass die Übereinstimmung zwischen den Seismometer- und DAS-Messungen weniger konsistent ist als beim Mini-Array. Diese Unterschiede werden in AP5.1 – Kapitel 2.1.5.1 weiter untersucht, indem die Leistungen der verschiedenen Ansätze zur seismischen Überwachung verglichen werden.

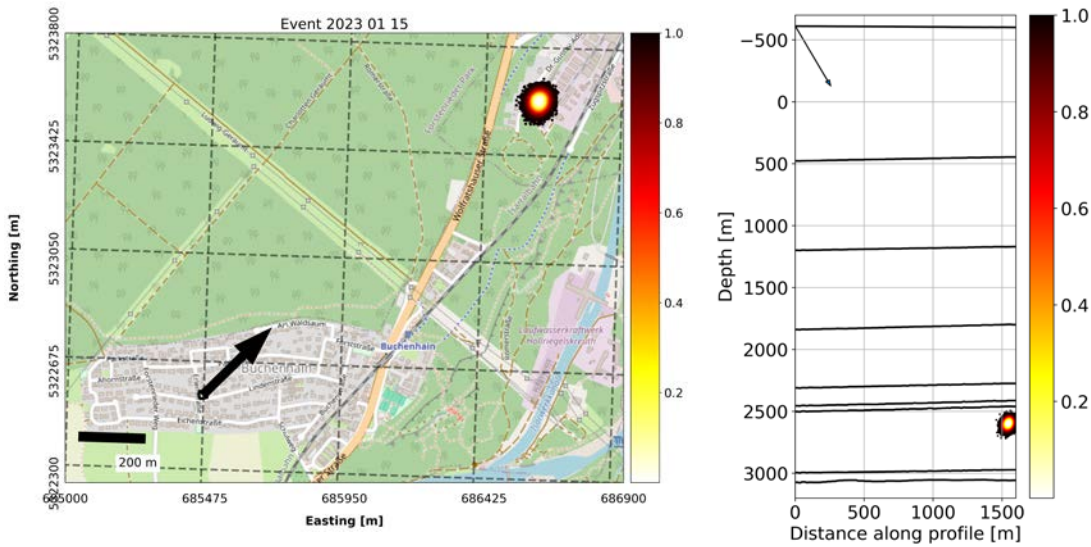


Abbildung 22: Die Pfeile zeigen den Rückazimut (links) und die Einfallsrichtung (rechts) des Wellenfelds, gemessen mit den DAS-Aufzeichnungen an der Station Buchenhain für das seismische Ereignis vom 15. Januar 2023. Die farbige Punktwolke stellt die kumulierte Wahrscheinlichkeitsfunktion dar, die für die absolute Lage des seismischen Ereignisses mit dem Seismometer-Netz berechnet wurde. Sie wird auf die Karte projiziert und farblich bis zu ± 1 Standardabweichung (68 % der Werte) dargestellt.

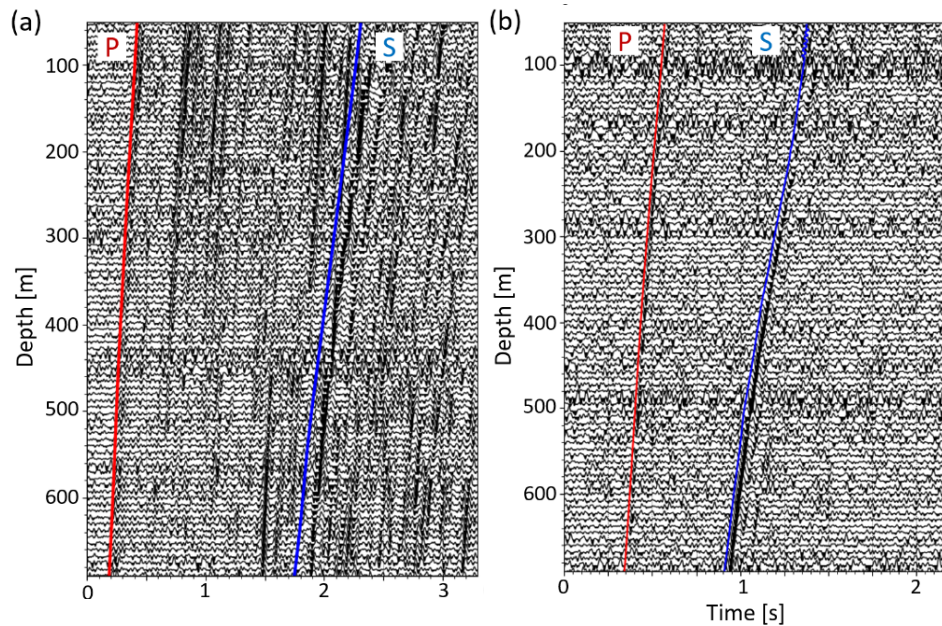


Abbildung 23: DAS-Daten aus der Bohrung SLS-TH3 für zwei detektierte seismische Ereignisse. Panel (a) bezieht sich auf das Ereignis vom 9. Februar 2022 und Panel (b) auf das Ereignis vom 22. April 2022. Die Panels zeigen die gefilterten Datensätze und die Signaturen der ersten P- und ersten S-Wellen-Ankünfte.

Die Erhöhung der Empfindlichkeit zur Detektion seismischer Ereignisse mit DAS wurde im Experiment Schäftlarnstraße untersucht. Azzola et al. (2023) zeigen, dass die DAS-Überwachung, die mittels der vertikalen Kabel hinter der Injektionsbohrung TH3 durchgeführt wurde, zeigte eine höhere Empfindlichkeit für die Detektion seismischer Ereignisse im Vergleich zum Oberflächennetzwerk (Abbildung 23). Dies ermöglichte die Erkennung und Verarbeitung des lokalen Ereignisses vom 22. April 2023 mit einer Momentmagnitude von MW -0,1. Das Seismometer-Netz hätte das Ereignis nicht detektiert. Azzola & Gaucher (2024a) stellen einen umfassenden Workflow für die automatisierte

Verarbeitung von DAS-Daten vor, der auf die Überwachung des Standorts Schäftlarnstraße angewendet wurde. Der Workflow umfasst die Ereignisdetektion, die Bestimmung der Ankunftszeiten, Hypozentrum und Ursprungszeit. Nach der Umrechnung der DAS-Dehnungsrate in Beschleunigung werden wellenformbasierte Parameter berechnet (seismisches Moment und Stress-Drop).

Zusammenfassung

Dieses Arbeitspaket demonstriert und validiert die Leistungsfähigkeit des im Rahmen von INSIDE installierten Seismometer-Netzes. Der resultierende Ereigniskatalog wird zur Validierung des entwickelten Geschwindigkeitsmodells verwendet. Darüber hinaus wird der Katalog zum Vergleich der im Projekt installierten Messmethoden verwendet. Schließlich zeigt dieses Arbeitspaket, dass das Projekt zur Entwicklung innovativer Methoden für das Management und die Verarbeitung von Daten aus nicht standardisierten Messmethoden wie DAS geführt hat.

Diese nicht etablierten Mess-Methoden komplettieren das Messnetz und können zu einer erhöhten Empfindlichkeit gegenüber der Detektion von seismischen Ereignissen führen, wie das Beispiel des Experiments in der Schäftlarnstraße zeigt.

In Zukunft wird das INSIDE-Messnetz das bestehende Netz der GOF ergänzen.

2.1.3.2 AP3.2: Prozessieren der Bohrloch-Logging Daten und Ermittlung von Geschwindigkeitsmodellen

Ein Ziel dieses Arbeitspaketes ist die Entwicklung eines 3D-Geschwindigkeitsmodells, das die Ausbreitung von Kompressionswellen (P-Wellen) und Scherwellen (S-Wellen) im Untergrund des in AP1.2 – Kapitel 2.1.1.1 beschriebenen Untersuchungsgebietes zuverlässig beschreibt. Dieses Modell unterstützt die Lokalisierung der detektierten seismischen Ereignisse mit minimalem Positionsfehler. Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse der Erstellung und Validierung des Geschwindigkeitsmodells zusammengefasst und aus Azzola & Gaucher (2024c) entnommen.

Verfügbare Datensätze für die Erstellung des Modells

Abbildung 24 gibt einen Überblick über die verwendeten Datensätze und zeigt deren Abdeckung in Bezug auf das Untersuchungsgebiet und die detektierten seismischen Ereignisse (schwarze Punkte). Zur Strukturierung des Modells stehen für das Untersuchungsgebiet seismische Horizonte aus dem Projekt GRAME-3D zur Verfügung, die die Grenzflächen der Schichten vom „Aquitain“ bis auf dem Reservoir definieren, an denen starke Geschwindigkeitsänderungen auftreten können (Abbildung 25). Die Topographie wird ebenfalls als Randbedingung berücksichtigt.

Die Geschwindigkeitsänderungen mit der Tiefe werden lokal durch Bohrlochmessungen beschrieben. Die durch gestrichelte rote Linien markierten Pfade in Abbildung 24 zeigen die Bohrungen, aus dem Bohrlochmessungen zur Verfügung stehen. Zu diesen Messungen gehören Offset- und Zero-Offset-VSP sowie Sonic-Logs aus den Bohrungen des Schäftlarnstraße Gebiets (SLS) und aus der Bohrung Pullach TH3. Die Bohrlochdaten liefern sowohl Kompressions- als auch Scherwellengeschwindigkeiten. Zusätzlich wird ein von Erdwerk entwickelter Geschwindigkeitsblock analysiert, der auf mechanischen Eigenschaften basiert. Dieser Block deckt jedoch nicht das gesamte Untersuchungsgebiet ab.

Abbildung 24 verdeutlicht eine zentrale Herausforderung bei der Entwicklung des Geschwindigkeitsmodells: die Notwendigkeit, Lücken durch Extrapolation und Interpolation der Untergrundeigenschaften zu schließen, um ein vollständiges 3D-Modell zu erhalten. Wir stellen eine Methodik vor, die die geologische Komplexität sowie die Verfügbarkeit und Variabilität von Daten berücksichtigt.

Abbildung 26 zeigt die Geschwindigkeitsmessungen aus sechs Bohrungen im Untersuchungsgebiet und stellt die Kompressions- und Scherwellengeschwindigkeiten entlang der Bohrlochpfade mit den Schnittpunkten der seismischen Horizonte dar. Die Bohrlochdaten zeigen eine Konsistenz der Geschwindigkeiten an den beobachteten Schichtgrenzen zwischen den Bohrungen SLS und Pullach TH3, trotz signifikanter Unterschiede in der Tiefe der Schichtgrenzen aufgrund der Neigung der Horizonte nach Süden. Dies deutet darauf hin, dass die Geschwindigkeiten an den tiefsten Grenzflächen nur geringfügig durch Faktoren wie erhöhte Überlagerung und Kompaktion beeinflusst werden.

Methodologie für die Erstellung des Modells

Auf der Grundlage dieser Beobachtung wird eine Hypothese aufgestellt, um die begrenzte Datenabdeckung im Untersuchungsgebiet zu überwinden: Das Modell geht davon aus, dass die Scher- und Kompressionsgeschwindigkeiten an den einzelnen Schichtgrenzen konstant sind. Für die Extrapolation der entsprechenden Geschwindigkeiten innerhalb der identifizierten Schichten schlagen wir einen gradienten-basierten Geschwindigkeitstrend vor, der gut mit den Bohrlochdaten übereinstimmt. Dieser Trend beinhaltet insbesondere den Geschwindigkeitsabfall in der Tonmergelschicht über dem Malm-Reservoir, dem „Liegenden Tonmergel“ (schwarze Linien in Abbildung 26).

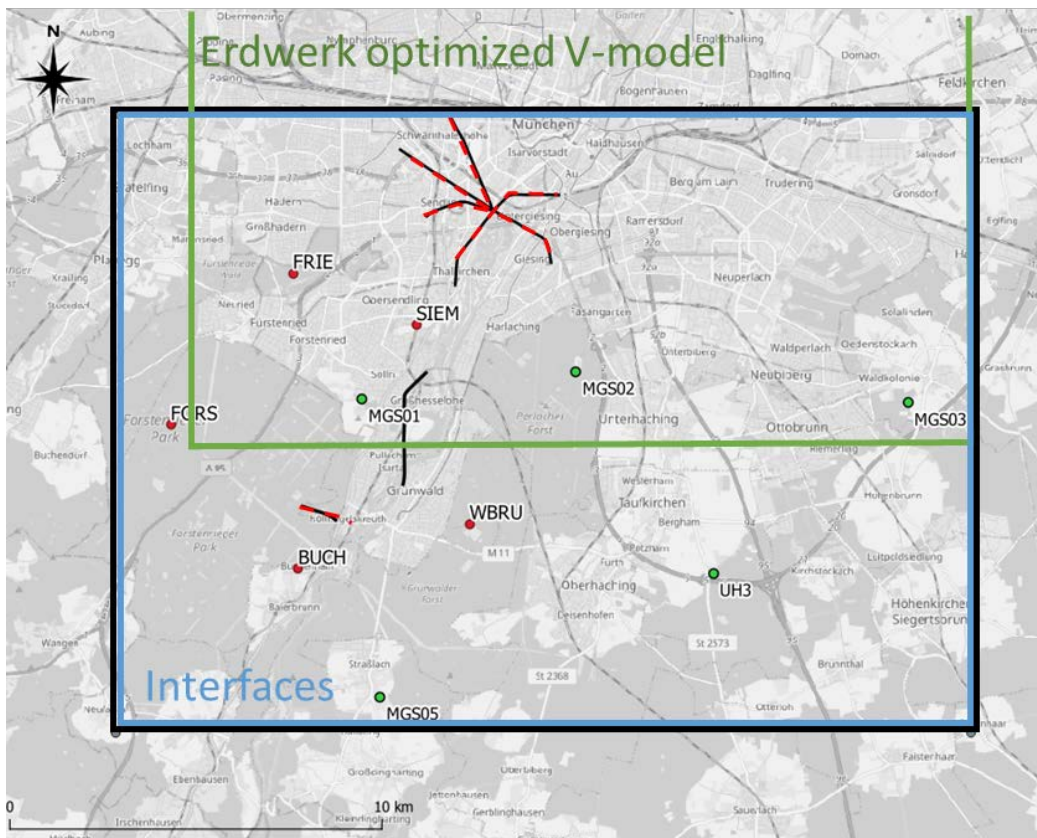


Abbildung 24: Darstellung des Untersuchungsgebietes im Verhältnis zur Abdeckung der verfügbaren Daten an der Oberfläche. Die gestrichelten roten Linien zeigen die Abdeckung an der Oberfläche der Bohrungen, aus deren Geschwindigkeitsdaten für die Modellierung zur Verfügung stehen.

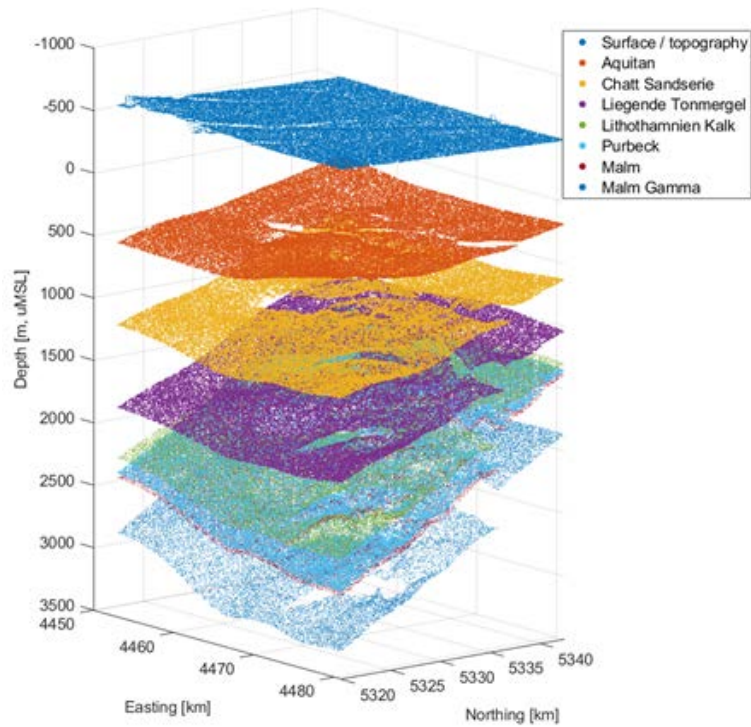


Abbildung 25: Für jede betrachtete Schicht werden die Koordinaten der oberen Schichtgrenzen in Form eines strukturierten Punktrasters mit einer Probenahme von 25 m dargestellt. Diese Horizonte ergeben sich aus dem GRAME-3D-Projekt.

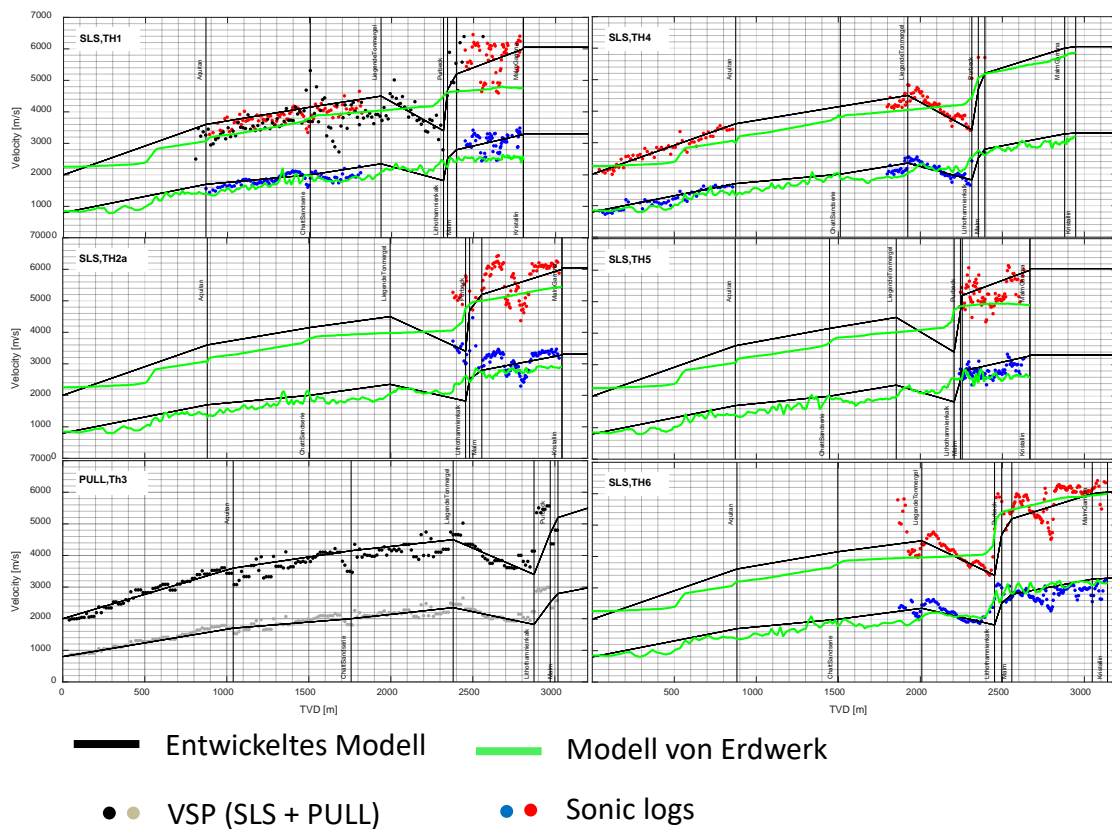


Abbildung 26: Verfügbare Geschwindigkeitsdaten aus VSP-Messungen und Sonic-Logs (Punkte). Die Bohrlochmessungen werden mit den Daten aus einem bei Erdwerk erstellten Modell verglichen (grüne Linien). Für die Erstellung des Modells werden die Geschwindigkeiten an den Horizonten so festgelegt, dass die Gradienten (schwarze Linien) möglichst genau mit den Bohrlochdaten übereinstimmen.

Die Validierung des Geschwindigkeitsmodells zeigt, dass die lineare Interpolation mit der Tiefe keine Artefakte in die Geschwindigkeitsentwicklung einbringt. Angesichts der Variabilität der Eingangsdaten testen wir unsere Hypothesen, indem wir zwei Optionen für die Modellierung der „Liegenden Tonmergel“ Schicht untersuchen: lineare Zunahme oder Abnahme der Geschwindigkeiten. Zwei Extrapolationsansätze werden ebenfalls untersucht - konstante Geschwindigkeiten und gradientenbasierte Entwicklung. Beide nachfolgenden Analysen zeigen, dass das Modell mit einer linearen Entwicklung und einer Abnahme der Geschwindigkeiten im „Liegenden Tonmergel“ die Untergrundeigenschaften zuverlässiger beschreibt, was zur Validierung dieses Modells führte:

- Vergleich der Laufzeiten mit den am VSP Pullach TH3 beobachteten Werten.
- Die absolute seismische Lokalisierung der während des INSIDE-Projekts detektierten Ereignisse und die Analyse der damit verbundenen Unsicherheiten und Fehler, sowie eine ein Vergleich mit den Messungen von den Geophysikalischen Observatoriums Fürstenfeldbruck (GOF).

Diese Analysen sind in Azzola & Gaucher (2025) detailliert beschrieben.

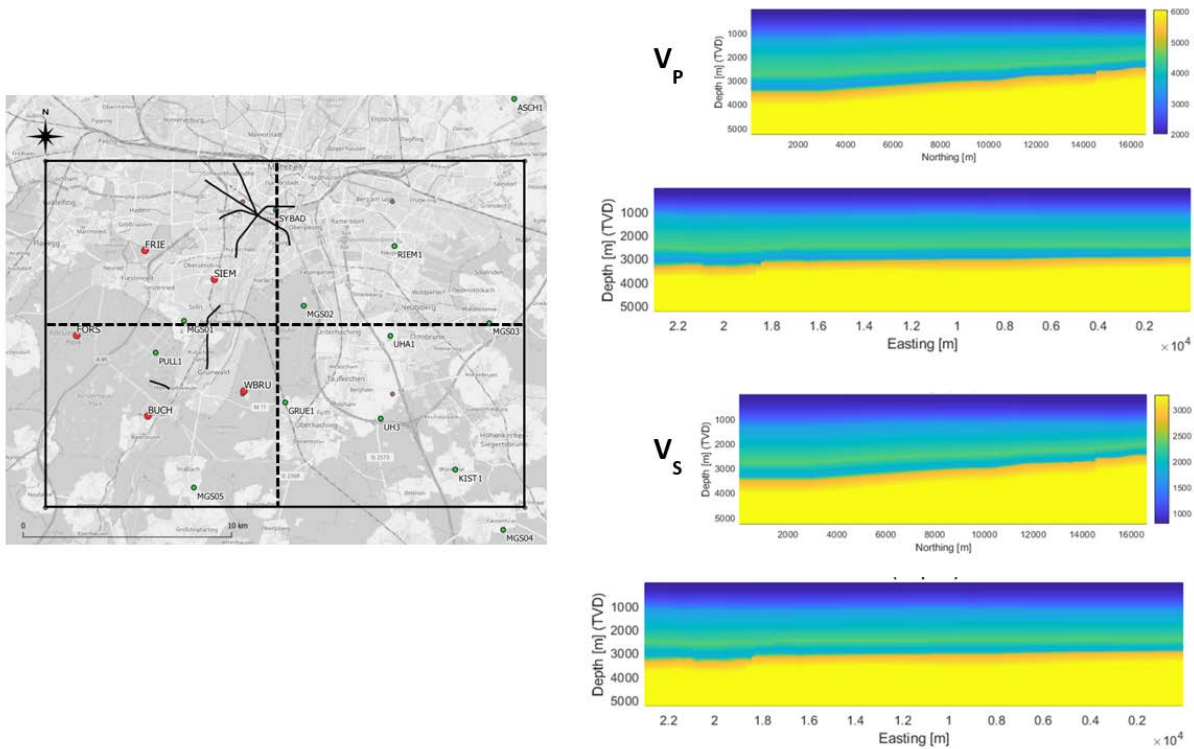


Abbildung 27: Darstellung von zwei orthogonalen Schnitten der VP- und VS-Modelle zur Visualisierung des Geschwindigkeitsgradienten in jeder Schicht und der Struktur des Modells.

Das entwickelte Geschwindigkeitsmodell besteht aus 3D-Blöcken, die die Entwicklung der Kompressions- und Scherwellengeschwindigkeiten mit einer Knotendichte von 25 m beschreiben. Es ist in Abbildung 27 durch zwei vertikale, orthogonale Schnitte dargestellt. Diese Schnitte zeigen insbesondere die lineare Geschwindigkeitszunahme mit der Tiefe, die Neigung der Schichten nach Süden und den Einfluss einer bedeutenden Störungszone auf die Struktur des Reservoirs im nördlichen Teil.

Perspektiven

Die im Rahmen des Projektes installierten Messstellen, insbesondere die mit hoher räumlicher Abtastung der Messpunkte, ermöglichen die Anwendung und Entwicklung weiterer Methodiken zur Bewertung der Untergrundeigenschaften.

Durch die hohe Messpunktdichte entlang des GFKs kann die DAS-Technologie entweder entlang einer Monitoring- (Buchenhain) oder Geothermiebohrung (Schäftlarnstraße) wertvolle Informationen über die Eigenschaften der Bohrung bzw. der umgebenden Schichten liefern. Diese Möglichkeiten wurden insbesondere durch die Datenerfassung hinter der Verrohrung der Bohrung TH3 in SLS untersucht (s. Azzola et al. (2023)). Die Möglichkeit, eine Wellenfront über die gesamte Länge des Kabels zu beobachten, erlaubt eine Bewertung der räumlichen Entwicklung der beobachteten Geschwindigkeit sowie die Analyse von Tiefenfluktuationen, die möglicherweise mit geologischen Grenzflächen korreliert sind. Darüber hinaus wurde eine teilweise Korrelation zwischen den niederfrequenten DAS-Daten und der Bohrlochverrohrung (CBL-Log) festgestellt.

Seismische Wellenfelder der Umgebung, die von Sensornetzwerken aufgezeichnet werden, können ebenfalls zur Charakterisierung von Untergrundeigenschaften und Oberflächenreaktionen verwendet werden. Dies gilt insbesondere für die Analyse des Dispersionsverhaltens von Oberflächenwellen durch Verfahren wie Frequenz-Wellenzahl (f-k) Analysen und Beamforming. Die Analyse der Dispersionskurve erlaubt dann die Inversion von Untergrundeigenschaften wie z.B. die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Scherwellen. Die im Rahmen des Projektes durchgeführte Analyse auf Basis der Aufzeichnungen des Mini-Arrays im Siemens-Park sowie des Seismometer-Netzwerks ist in Azzola & Gaucher (2024b) detailliert dargestellt. Das dispersive Verhalten der Rayleighwellen der Grundschiwingung wurde im Frequenzbereich von 0.8 bis 5 Hz beobachtet. Die Inversion der Dispersionskurve mit der Software *dinver* aus dem GEOPSY-Paket (Wathelet et al., 2020) ermöglicht die Abschätzung von Scherwellengeschwindigkeitstrends bis in 1000 m Tiefe. Die Analyse unterstützt die Datensätze, die für die Entwicklung des Geschwindigkeitsmodells verwendet wurden, in dem die Ereignisse mit dem gewählten vertikalen Trend (Abbildung 26) stimmen.

Bei Verwendung von 3-Komponenten-Sensoren können die seismischen Wellenfelder der Umgebung auch zur Bewertung der Oberflächenreaktionen durch Analyse des Verhältnisses zwischen horizontalen und vertikalen Spektren (H/V-Methode) verwendet werden. Diese Analysen sind entscheidend für die Vorhersage der Verstärkung seismischer Wellen und deshalb die Minderung der seismischen Gefährdung (emg. Hazard). Eine Analyse der spektralen Verhältnisse wurde sowohl für das Mini-Array im Siemens-Park als auch für das Seismometer-Netzwerk durchgeführt (Azzola and Gaucher, 2024b). Über das im Projekt installierte Netzwerk wurden Grundfrequenzen f_0 zwischen 10 Hz (BUCH) und 17 Hz (SIEM/Mini-Array) beobachtet. Diese Daten können zu Modellen zur Vorhersage von Bodenbewegungen beitragen.

Zusammenfassung

Die Lokalisierungsergebnisse (s. AP3.1 – Kap. 2.1.3.1) zeigen, dass das entwickelte Gradienten-Modell für die Ereignislokalisierung auf der Skala des Untersuchungsgebietes effektiv ist. In Richtung einer zuverlässigeren Lokalisierung von Ereignissen können künftige Arbeiten ein großes Modell für das gesamte Untersuchungsgebiet durch detailliertere Modelle, die die Untergrundeigenschaften vor Ort um die betreffenden geothermischen Standorte herum besser beschreiben, ergänzt werden (sofern solche Daten verfügbar sind). Gleichzeitig wird empfohlen, das Modell durch zusätzliche Datenerhebungen weiter zu verfeinern. Dies schließt die Planung von VSP-Kampagnen im Rahmen zukünftiger Bohrprojekte ein, die mit aktiven seismischen Kampagnen an der Oberfläche kombiniert

werden können. Eine weitere Perspektive ist die Nutzung von Methoden, die auf dem seismischen Umgebungsruschen basieren und die Integrierung der Ereignisse in die Model Entwicklung.

2.1.3.3 AP3.3: Prozessieren von Subsidenz-/Hebungsmessungen an der Oberfläche

In AP3.3 wurden die verschiedenen geodätischen und Fernerkundungs-Datensätze aufbereitet, analysiert und in verschiedenen Zusammenhängen miteinander verglichen und interpretiert. Im Folgenden werden die wesentlichen Resultate und Schlussfolgerungen unter zwei Gesichtspunkten zusammengefasst.

Schlussfolgerungen zu Genauigkeiten, Stabilität und Einsatzmöglichkeiten

GNSS: Die GNSS-Datensätze wurden mit der frei verfügbaren Software RTKLIB prozessiert. Der Workflow konnte weitgehend automatisiert werden. Eine Kurzanleitung mit Hinweisen zur Installation verschiedener Software-Komponenten, dem Download von Daten und Produkten des Internationalen GNSS Dienstes (IGS) sowie geeigneten Vorgehensweise zur Berechnung von Tagesmittelwerten wurde erstellt. Die Daten wurden im differentiellen Modus ausgewertet relativ zur IGS-Station Oberpfaffenhofen ca. 20 km westlich der INSIDE-Stationen. Die Zeitreihen der Tagesmittelwerte in Vertikal-, Nord- und Ostrichtung zeigen generell stabile Verhältnisse an, mit einem leicht negativen Trend in der Ostkomponente von -3 mm/Jahr bis -6 mm/Jahr . Das geringste Datenrauschen mit Standardabweichungen von 8 mm , 3 mm , 5 mm in den Komponenten V, N, O wird an der Pfeilerstation Baierbrunn beobachtet. Die Station erfüllt damit die Genauigkeitsvorgaben der Markscheider-Bergverordnung (MarkschBergV) für die Klasse III, die zur Überwachung gering empfindlicher baulicher Anlagen ausreicht. Auch die Datenqualität an der Station Maria-Einsiedel-Bad ist in Anbetracht der Abschattungseffekte durch benachbarte Gebäude und Bäume zufriedenstellend. Weniger zufriedenstellend ist eine Standardabweichung von 25 mm , 13 mm , 21 mm (V, N, O) an der Station Pullach, an der die hochwertigste Ausrüstung installiert wurde. Wir vermuten, dass die Stabilität des Betriebsgebäudes, an dem die solide Antennenhalterung angebracht wurde, nicht ausreicht. Trotz verschiedener Einschränkungen empfehlen wir den Betrieb permanenter GNSS-Stationen als lokale Referenz- und Höhenanschlusspunkte im Stadtgebiet München, wo großräumige Deformationsprozesse auf räumlichen Skalen von $30 - 50 \text{ km}$ durch Überlagerung der Aktivitäten verschiedener Geothermieanlagen zu erwarten sind. Da die durch die tiefe Geothermie angeregten thermo-hydraulischen Prozesse im Untergrund sehr langsam ablaufen, kann die Messgenauigkeit einer als langfristige Höhenreferenz eingesetzten GNSS-Station durch längere Mittelbildung (z. B. Übergang von Tages- auf Jahresmittel) und/oder Tiefpassfilterung der Beobachtungsreihen deutlich verbessert werden. Explizite Vorgaben für eine solche Vorgehensweise sollten in die MarkschBergV aufgenommen werden.

C-Band Transponder: Die Transponder erzeugen ein prägnantes Signal in den Sentinel-1 Radarbildern mit sehr guten Werten für den Amplitudendispersionsindex D_A von $0.09 - 0.11$ und zeitlichen Kohärenzen von $\gamma \geq 0.9$, was für eine sehr gute Phasenstabilität spricht. Sie sind daher hervorragend als künstliche, genau einmessbare Radar-Deformationsmesspunkte verwendbar. Allerdings bestehen zwei Einschränkungen: Signale vom absteigenden Orbit an der Station Maria-Einsiedel-Bad sind von deutlich schlechterer Qualität, vermutlich aufgrund von Abschattungseffekten durch umliegende Bäume, und in Pullach trat Mitte März 2023 ein technischer Defekt auf, der zum Ausfall des Transponders führte. Die Frage nach der Langzeitstabilität der Instrumente kann daher nicht abschließend beurteilt werden.

Persistent-Scatterer SAR-Interferometrie: Ein Vergleich von Persistent-Scatterer-Analysen (PSI) der Sentinel-1 Radarbilder im C-Band (Wellenlänge $\lambda = 5.88 \text{ cm}$) mit den TerraSAR-X Ergebnissen im X-Band ($\lambda = 3.10 \text{ cm}$) brachte das erwartete Ergebnis: auf Grund der ca. 10 mal besseren räumlichen

Auflösung der X-Band Daten ist die Abdeckung mit für Deformationsmessungen verwendbaren PS-Punkten erheblich dichter als im C-Band. Ein instruktives Beispiel für die Leistungsfähigkeit von TerraSAR-X Beobachtungen ist die Geothermieranlage Kirchstockach, wo die PS-Punkte sehr plausibel Strukturen auf zwei langgestreckten Metalldachkonstruktionen zuzuordnen sind, und Absenkungen einzelner Gebäudeteile detektiert werden können. Die mittlere Standardabweichung der 134 PS-Zeitreihen auf der Anlage beträgt 1.7mm . Die beobachteten Bewegungen haben nicht direkt mit geothermischer Produktion zu tun, sondern sind vermutlich auf Instabilitäten der Struktur oder lokale Bodenkompaktion zurückzuführen. Sie lassen aber das Potential von X-Band für das Monitoring sensibler Gebäude und Infrastrukturobjekte innerhalb eines Einwirkungsbereiches (Klasse II nach MarkscheidBergV) erkennen. Ein entsprechender Einsatz wäre jedoch vor dem Hintergrund der erwarteten Großräumigkeit der Oberflächendeformationen und der mit der Beschaffung von TerraSAR-X Radarszenen verbundenen Kosten zu prüfen.

Fallstudie zu Oberflächenbewegungen in München

Auf Basis einer gemeinsamen Auswertung von Wiederholungsnivellements und Radarinterferometrie wurde eine Fallstudie zu Bodendeformationen in München und den Randbezirken erarbeitet. Dazu wurde im ersten Schritt das vertikale Ortho-Produkt des Europäischen Bodenbewegungsdienstes EGMS herangezogen. Dieser frei verfügbare Datensatz wird aus einer Kombination der verfügbaren Radarszenen des Satelliten Sentinel-1 aus auf- und absteigenden Überflugbahnen gewonnen und über Daten des Europäischen Permanenten GNSS Netzwerkes (EUREF) kalibriert. Es ergibt sich eine gute Übereinstimmung von Nivellements und PSI, wobei in den Außenbezirken und Gemeinden Freiam, Riem, Ismaning, Pullach und Kirchstockach keine signifikanten Hebungen oder Senkungen auftreten. Das Messrauschen (Standardabweichung) der PSI-Verschiebungszeitreihen wird nominell mit 2.1mm angegeben und ist damit um einen Faktor von ca. 4 größer als im Nivellement. Für die genannten Beispiele ergibt sich ein etwas geringerer Unterschied von ca. 2 – 3. Die PSI-Ergebnisse erfüllen damit die Vorgaben der MarkscheidBergverordnung für die Klassen II und III, und mit lokalen Einschränkungen auch der Klasse I.

Im Zentrum von München ergibt sich ein anderes Bild. Auf der um die Bohrungen der Geothermieranlage Schäftlarnstraße herumführenden Nivellementlinie wird in der Höhendifferenz zwischen den Messkampagnen März 2022 und März 2021 eine zusammenhängende, signifikante Hebungstendenz in nordwestlicher Richtung deutlich, mit Maximalwerten von 3.4mm im Bereich der Endpunkte der Re-Injektionsbohrungen TH3 und TH5 (Abbildung 28). Auf der Karte der PSI-Vertikalverschiebungen lässt sich eine vergleichbare Hebungstendenz mit Maximalwerten von 2.4mm erkennen. Obwohl es sich dabei um eine zusammenhängende Fläche von ca. 1km^2 handelt, ist ein Signal dieser Größenordnung in den PSI-Resultaten nur schwach signifikant. Daher wurde zu Vergleichszwecken der Sentinel-1 Datensatz am GIK mit einer vollkommen unabhängigen Software und einer anderen Auswertestrategie erneut prozessiert. Das Ergebnis bestätigt bei leichten Unterschieden die EGMS-Resultate, womit nachgewiesen wurde, dass das Hebungsbild kein Artefakt der Prozessierungsstrategie ist. In den PSI-Zeitreihen wird deutlich, dass das Hebungseignis im Juli 2021 beginnt und zeitlich mit dem Betriebsbeginn der Geothermieranlage Schäftlarnstraße zusammenfällt. Ein hydraulischer Effekt durch die seit Mitte Juli re-injizierte Wassermenge Wasser ist daher qualitativ ein plausibles Modell.

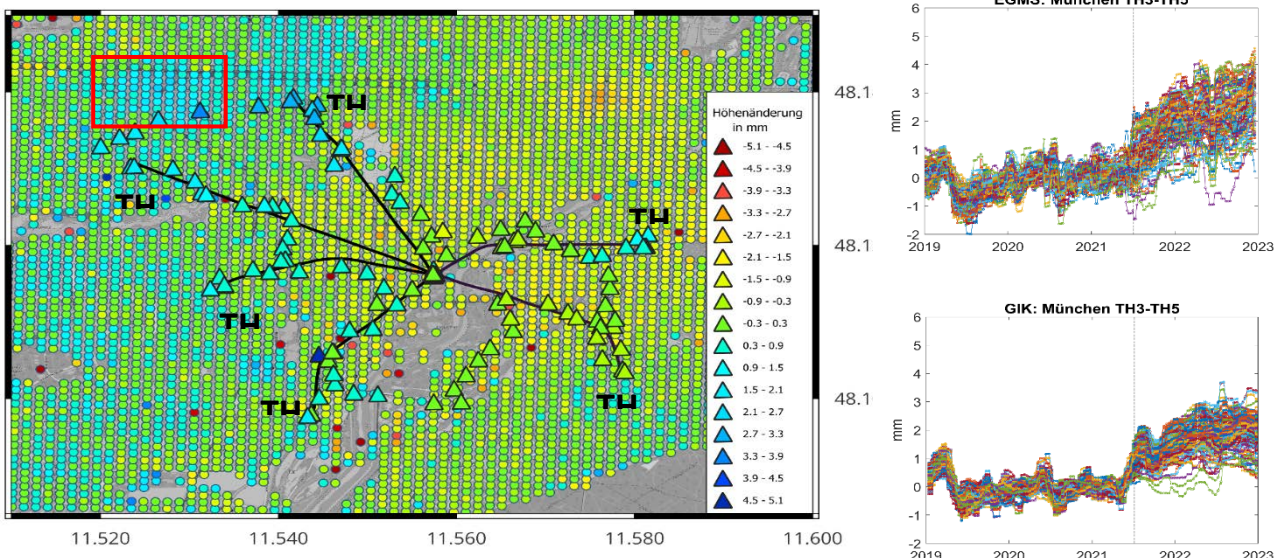


Abbildung 28: Höhendifferenzen März 2022 – März 2021 in der Umgebung der Geothermieanlage am Kraftwerk München Süd (Schäftlarnstraße), abgeleitet aus Wiederholungsnivellements (Dreiecke) und dem vertikalen PSI-Produkt des EGMS (Kreise). Das rote Rechteck markiert den Bereich, aus dem die Zeitreihen links zusammengestellt wurden. Die Linie markiert den Betriebsbeginn der Geothermieanlage Schäftlarnstraße.

Einschränkend ist zu sagen, dass auf der Karte der PSI-Höhendifferenzen zwischen Dezember 2023 und März 2021 weitere zusammenhängende Hebungsgebiete mit vergleichbaren Amplituden erkennbar sind, die geothermischen Aktivitäten nicht ohne weiteres zugeordnet werden können. Auch die nivellierte Höhendifferenz zwischen den Kampagnen März 2024 und März 2022 zeigt deutliche Höhenänderungen mit Senkungen von bis zu -4mm in der Gegend um den Kronepark. Möglicherweise sind diese Beobachtungen symptomatisch für das niederfrequente Hintergrundsignal in der Oberflächendeformation, für das verschiedene Bautätigkeiten im flachen Untergrund in Frage kommen. Ein sehr prominentes Beispiel ist das dominante Absenkungsgebiet im Bereich der Baustelle für die Untergrundstation Marienhof auf der 2. Stammstrecke München (Abbildung 29). Ursache für diese Absenkungen, die im Zentrum -8.6mm erreicht, ist die Ende des Jahres 2021 einsetzende großflächige Bauwasserhaltung. Informationen dazu sind der Webseite der Bundesbahn zur 2. Stammstrecke zu entnehmen.

Auch wenn dieses Absenkungsereignis nichts mit tiefer Geothermie zu tun hat, so ist es doch ein sehr eindrucksvolles Beispiel für das Potential der C-Band SAR-Interferometrie zur signifikanten Bestimmung und dem Monitoring des Einwirkungsbereiches sowie des erweiterten Einwirkungsbereiches, sofern die Höhenänderungen einen Grenzwert überschreiten, den man bei 6mm ansetzen kann. Da auf Grund der Tiefe einer einzelnen Geothermiebohrung von ca. 3000m sowie einer Überlagerung der Oberflächenwirkung vieler aktueller und geplanter Bohrungen ein großräumiges Deformationsgebiet mit einer Dimension von $30 - 50\text{km}$ erwartet werden kann, empfehlen wir nachdrücklich, die kostenfrei zur Verfügung gestellten Produkte des EGMS für diesen Zweck zu nutzen.

Weitere Details finden Sie in Westerhaus et al. (2024a).

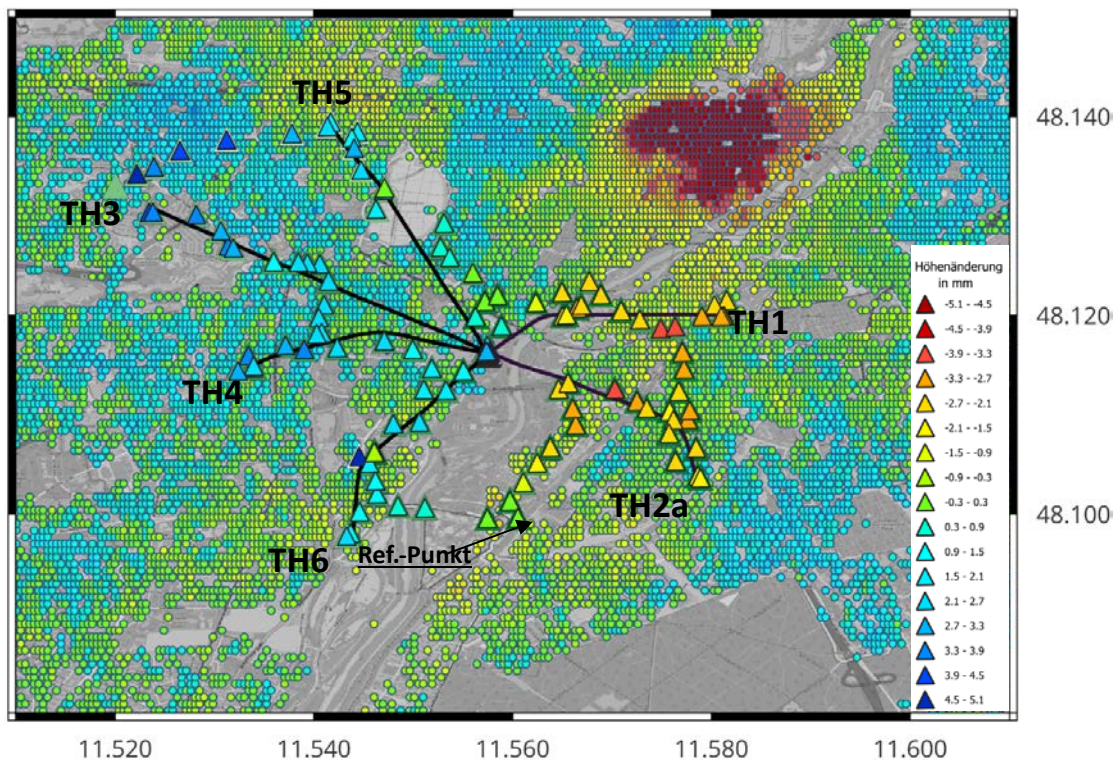


Abbildung 29: Höhendifferenzen in der Umgebung der Geothermieanlage am Kraftwerk München Süd (Schäftlarnstraße), abgeleitet aus Wiederholungsnivellements für den Zeitraum März 2024 – März 2021 (Dreiecke) und der PSI-Analyse des GIK für den Zeitraum Dezember 2023 – März 2021 (Kreise). Neben den Hebungen im Bereich TH3/TH5 sind weitere gleichartige Hebungsgebiete zu erkennen. Dominiert wird die Deformationskarte durch Absenkungen im Bereich der Untergrundbaustelle Marienhof, die Ende 2021 mit Beginn der Bauwasserhaltung einsetzen.

2.1.4 AP4: RESERVOIRMODELLIERUNG (LEITUNG: KIT)

2.1.4.1 AP4.2: Geomechanische Modellierungen

Die geomechanische Modellierung bestand in der Abschätzung der normalisierten Slip-Tendency (ST) und Dilation-Tendency (DT) von Verwerfungen, die in der Untergründe von Schäftlarnstraße, Pullach und Baierbrunn identifiziert wurden. Die ST ist besonders interessant, um die Störungszonen hervorzuheben, die am anfälligsten für die Aufnahme von Seismizität sein könnten, wenn das Verhältnis zwischen der effektiven Scher- und Normalspannung aufgrund der durch den geothermischen Betrieb induzierten Spannungsänderungen zunehmen würde. Diese Analyse ist jedoch „statisch“ und sollte nur als Vorstufe, als Anfangszustand, betrachtet werden. Sie kann die Fragen beantworten: Wie hoch ist die mechanische Belastung der Verwerfungen vor einer geothermischen Nutzung, und wo sollt man eine geothermische Bohrung abteufen oder wo sollt man sie nicht abteufen?

In diesem Bericht wird die ST-Analyse für den Studienfall Schäftlarnstraße zusammengefasst und aus Gaucher & Egert (2022) entnommen.

Normalisierte Slip-Tendency ist gleich der Scherspannung (τ) minus der Kohäsion (C) dividiert durch die effektive Normalspannung ($\bar{\sigma}_n$) und den Reibungskoeffizient (μ):

$$ST = \frac{\tau - C}{\bar{\sigma}_n \cdot \mu} \quad (\text{Gl. 1})$$

Ein Wert von 1 bedeutet, dass die Störung kritisch gespannt ist und bereit zum Abscheren ist. Für die Schäftlarnstraße, der Kohäsion wurde gleich 3 MPa angenommen und der Statischer Reibungskoeffizient gleich 0,85.

In der Modellierung wird **das regionale Spannungsfeld** nach Ziegler und Heidbach (2020) genutzt, welches durch geomechanische Modellierung unter Verwendung offengelegter Spannungsmessungen und geomechanischer Parameter für den Großraum München quantifiziert wurde. Neben der durchschnittlichen Amplitude der sechs Spannungsfeldkomponenten werden auch Unsicherheiten bereitgestellt. Dies ermöglicht die Berücksichtigung alternativer regionaler Spannungsfeldszenarien, wodurch, bei unveränderter Störungsgeometrie, Unsicherheiten für die ST evaluiert werden können.

Abbildung 30 zeigt ein vertikales Profil des Spannungsfeldes im Bereich der Bohrungen des Geothermiekraftwerks Schäftlarnstraße (Ost: 690369 m UTM32, Nord: 5332710 m UTM32). SHmax, Shmin, Sv sind extrahiert aus Ziegler und Heidbach (2020) und als volle Linien plus oder minus einer Standardabweichung (als gepunkteten Linien) dargestellt. Ebenfalls dargestellt ist der Porendruck nach Seithel et al. (2015) (blaue Linie).

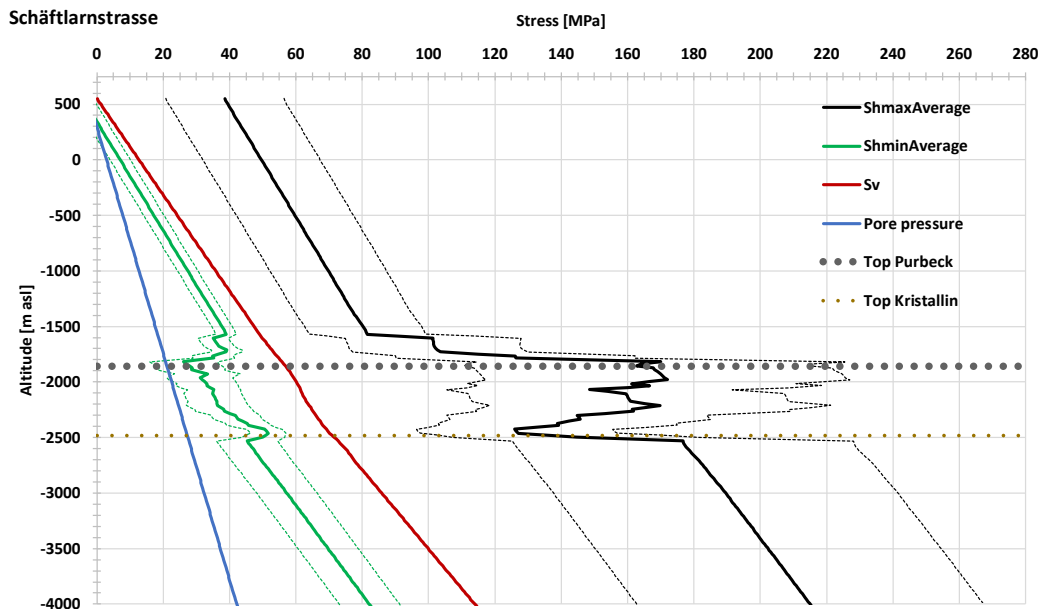


Abbildung 30: Vertikales Profilbeispiel des Spannungsfeldes in der Nähe der Bohrlochköpfe der Geothermieranlage Schäftlarnstraße (Osten: 690369 m UTM32, Norden: 5332710 m UTM32). Shmax, Shmin, Sv und Porendruck nach Ziegler und Heidbach (2020) sind als volle Linien (plus/minus eine Standardabweichung als gepunktete Linien) dargestellt. Der Top-Purbeck und der Top-Kristallin sind durch graue bzw. braune gepunktete Linien hervorgehoben.

Die maximale horizontale Spannungsrichtung beträgt 1,7°NE und das Regime ist ein Blattverschiebungsregime.

Zur **Berechnung** der normierten ST werden die Gleichung 1 für jedes Element der Störungsflächen angewendet. Dies impliziert insbesondere die Abschätzung des Porendrucks in Abhängigkeit von der Tiefe und die Berechnung der Normal- und Scherspannung in Abhängigkeit von der Lage und Orientierung der einzelnen Elemente der Störung.

Die Unsicherheiten der Spannungstensoramplitude wurden verwendet, um den Bereich der möglichen ST zu berechnen. Dazu werden 10 000 Zufallsziehungen des Spannungsfeldes nach einer Normalverteilung mit den vorgegebenen mittleren Spannungen und zugehörigen

Standardabweichungen vorgenommen. Dieser Ansatz führt zu einer probabilistischen Verteilung von ST.

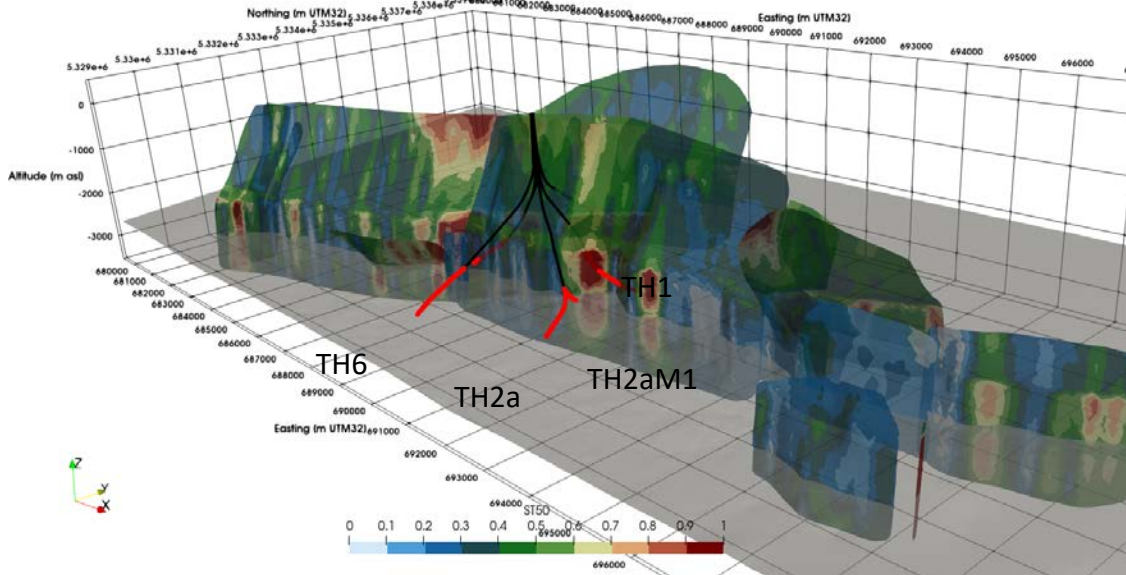


Abbildung 31: Schäftlarnstraße. 3D-Ansicht der normierte ST der Störungen um die Bohrungen. Konfidenzniveau von 50 %. Die offenen Bohrsektionen sind in Rot dargestellt. Die graue Fläche stellt das Top Kristallin dar.

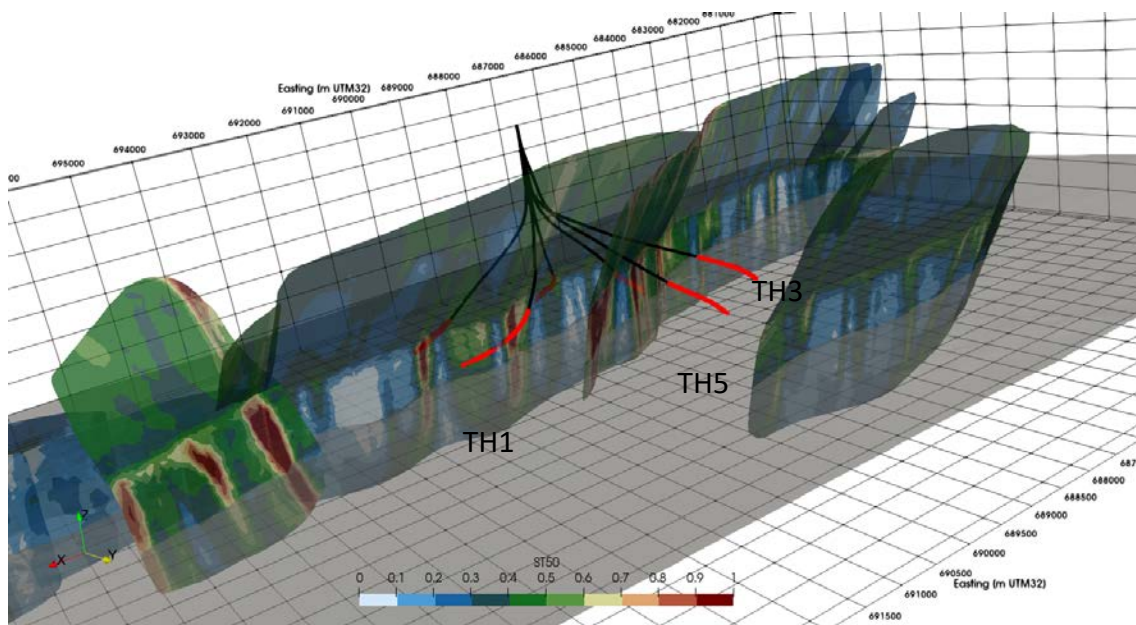


Abbildung 32: Wie Abbildung 31, jedoch aus einem anderen Blickwinkel.

Abbildung 31 und Abbildung 32 zeigen in 3D die normierte ST der Störungen der Schäftlarnstraße, mit einem Konfidenzniveau von 50%. Die sechs Bohrungen des Feldes sind mit ihren offenen Bohrsektionen dargestellt. Wie zu beobachten ist, sind mehrere Teile der Störungen kritisch beansprucht, insbesondere diejenigen, die $\sim 30^\circ$ von der horizontalen Hauptspannungsrichtung, d.h. etwa 32° NO, ausgerichtet sind. ST ist auch in den stark neigenden Teilen der Störungen größer, was

im Reservoir, aber auch bis zum Top-Lithotamnienkalk (wo die Störung gebogen wird) und im Kristallin der Fall ist. Die Änderung der mechanischen Eigenschaften zwischen dem Malm und dem Kristallin erklärt die Abnahme der ST an der Kontaktfläche. Abgesehen von dieser lokalen Veränderung gibt es keinen großen Unterschied in der ST zwischen dem Malm und dem Kristallin.

Um die Ergebnisse besser quantifizieren zu können, wird die Verteilung der ST für Störungsflächen in einem bestimmten Abstand zum offenen Bohrsektion evaluiert. Abbildung 33 zeigt Boxplots von ST für die Konfidenzniveaus 10 %, 50 % und 90 %, sobald eine Störungsfläche innerhalb des angegebenen Radius vom entsprechenden Bohrloch gefunden wird. Der Median der ST ist als horizontales Segment im Kasten dargestellt, dessen Grenzen dem ersten und dritten Quartil entsprechen. Die Förderbohrungen TH1 und TH4 sind weniger als 250 m von Störungen entfernt, bei allen anderen Bohrungen sind die Störungen mindestens 750 m (Injektionsbohrungen TH3 und TH5) oder 1000 m (Förderbohrung TH2a(M) und Injektionsbohrung TH6) entfernt.

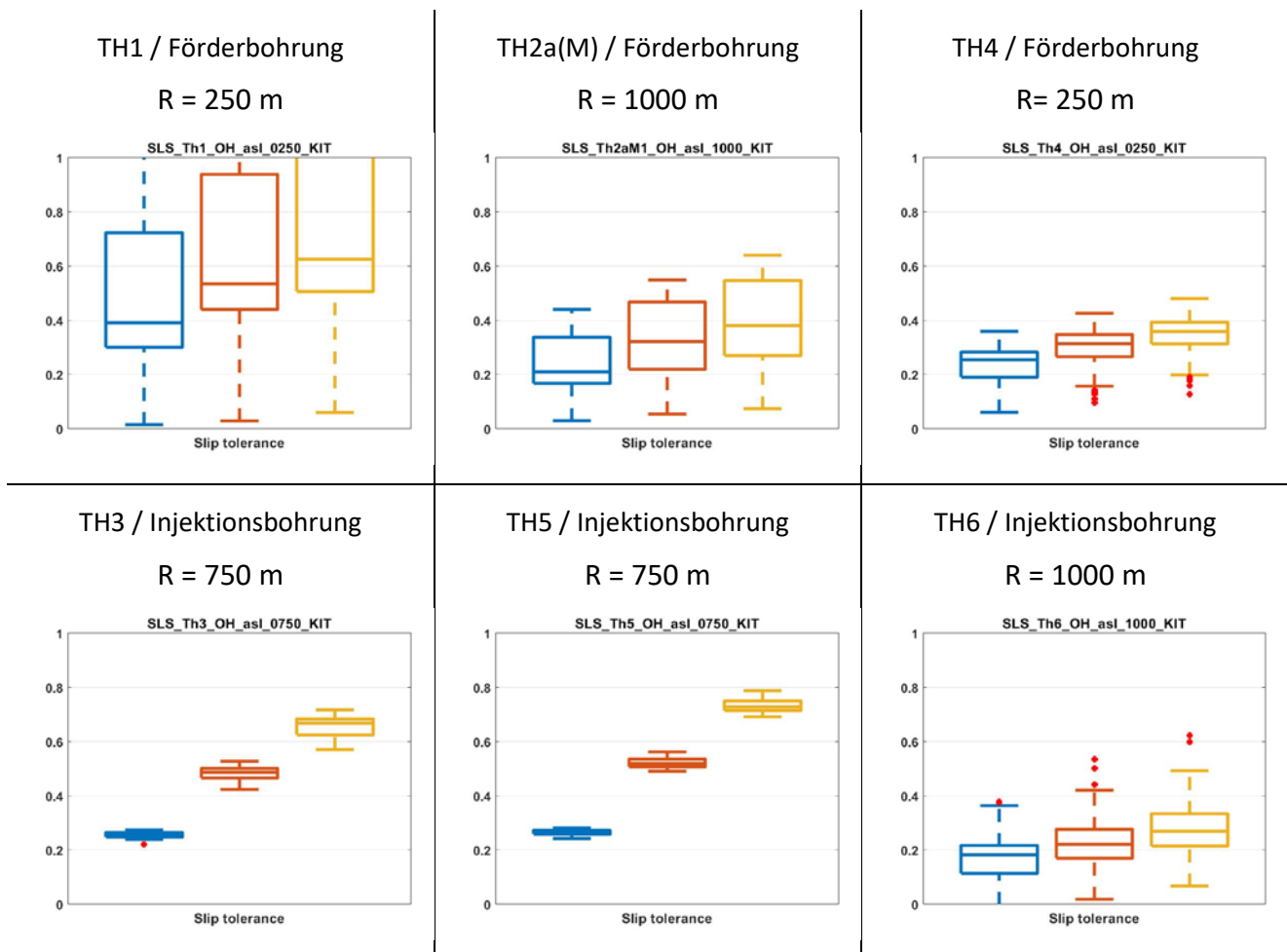


Abbildung 33: Schäftlarnstraße. Boxplots von ST für die Konfidenzniveaus 10% (blau), 50% (orange) und 90% (gelb), sobald eine Störungsfläche innerhalb des angegebenen Radius von der entsprechende Bohrung gefunden wird.

In der Schäftlarnstraße wurden die Förder- und Injektionsbohrungen bereits ausgewählt. Die ST-Ergebnisse bestätigen, dass TH1 und TH4 als Förderbohrungen die beste Wahl sind (unabhängig von zusätzlichen Informationen), da sie am nächsten zu den kritisch vorgespannten Zonen der umliegenden Störungen liegen. Durch die Förderung wird der Porendruck an der/den Bohrung(en) und

in der Umgebung nicht ansteigen, sondern eher abnehmen, was eine Erhöhung der ST in der Umgebung verhindert.

Schlussfolgerung

Während der Erzeugung des geothermischen Feldes das Spannungsfeld aufgrund von hydraulischen und thermischen Effekten zweifellos mit der Zeit variieren wird. Daher wird sich das im statischen Ansatz als konstant betrachtete Spannungsfeld im Laufe der Zeit ändern. Um die Auswirkungen der statischen geomechanischen Modellierung zu minimieren, besteht eine Lösung darin, eine dynamische thermo-hydrmechanische Modellierung durchzuführen.

Die vollständige Analyse und alle Details finden Sie in Gaucher & Egert (2022).

2.1.4.2 AP4.3 & AP4.4: Thermo-hydraulisch-mechanische (THM) Modellierungen

Das KIT befasste sich mit der thermohydraulisch-mechanischen (THM) Modellierung des Geothermiestandorts Pullach. Schäftlarnstraße lag in der Verantwortung der SWM und Baierbrunn in der Verantwortung des IEP.

Es wird eine numerische Simulation des derzeitigen Betriebsszenarios des Geothermiestandortes Pullach mit der open-source Finite Element (FE) Anwendung MOOSE/TIGER (THMC simulator for GEoscience Research) vorgestellt.

Vergleich von Moose/TIGER und COMSOL Multiphysics®

TIGER wurde in vielerlei Hinsicht getestet und genutzt (Egert et al., 2020; Gholami Korzani et al., 2020). Zur Verifikation der Implementierung der hydraulisch-mechanischen (poroelastischen) Kopplung innerhalb des TIGER Codes wurde ein Validierungsfall nach Altmann et al. (2010) gewählt, welcher auf der analytischen Lösung nach Rudnicki (1986) basierte. Die Ergebnisse wurden mit denen der kommerziellen COMSOL Multiphysics® Software (<https://www.comsol.de/>) verglichen. Dieser Benchmark Fall besteht aus einem dreidimensionalen Zylinder mit 25 km Tiefe/Radius bei dem in einer Tiefe von 5 km Fluid mit einer konstanter Fließrate von 20 l/s in ein homogenes Reservoir injiziert wird (Altmann et al., 2010). Die Unter- und Außenseite werden gegen einen Versatz in Normalenrichtung fixiert (Roller-BC), während sich die Oberfläche frei deformieren kann. Hydraulisch stellt das Modell ein undrainiertes Reservoir dar, bei dem weder Fluid in noch aus dem Modell fließen kann (No-Flow-BC). Schwerkraft wird vernachlässigt. Das Modell berücksichtigt weder einen initialen Porendruck noch eine initiale Vorspannung. Ziel ist es, die durch die Injektion hervorgerufenen Spannungsänderungen zwischen den einzelnen Modellen/Software und der analytischen Lösung zu vergleichen. Dieser Benchmark wurde erfolgreich abgeschlossen.

Um die praktische Umsetzung der thermo-hydraulisch-mechanischen Kopplung sowie weitere softwarespezifische numerische Umsetzungen zu vergleichen, wurde ein Produktionsszenario innerhalb des geothermischen Reservoirs in Pullach mit TIGER und mit COMSOL unter identischen Rahmenbedingungen und bei identischem Elementgitter simuliert. Zum Vergleich wurde das numerische Modell des geothermischen Reservoirs von Pullach genutzt und ein kontinuierliches Produktionsszenario über 50 Jahre hinweg simuliert. Angenommen wurden hierbei konstante Fließraten und Reinjektionstemperaturen. Die Fließraten betragen in der Produktion 24 l/s bzw. 26 l/s und in der Reinjektion 50 l/s bei einer Injektionstemperatur von 62 °C. Als Produktionstemperatur wurde die jeweilige lokale Temperatur (>100 °C) angenommen. Das Modell dehnte sich bis in eine Tiefe von ca. 1,5 bis 4,5 km TVD unter der Geländeoberkante aus und umfasste die stratigraphischen Einheiten zwischen dem oberen Kristallin und dem Tertiär. Besonderer Fokus lag auf den geothermisch nutzbaren Horizonten innerhalb des mesozoischen Malms, welcher in drei individuelle Lithologien

unterteilt war. Alle Details sind in Egert (2022) angegeben. Die Ergebnisse zeigten dass nach 50 Betriebsjahren die Unterschiede zwischen den mit TIGER und den mit COMSOL berechneten Temperaturen weniger als ± 10 °C sind und sich im Nahbereich von Injektionsbohrung Pullach TH3 konzentrieren. Die Unterschiede in der Druckberechnung zwischen den beiden Softwares liegen innerhalb von $\pm 0,2$ MPa und konzentrieren sich auf die Förder- und Injektionsbohrungen. Die Temperatur- und Druckunterschiede sind höchstwahrscheinlich auf die unterschiedliche Integration von Bohrungen und Fließbeziehungen zurückzuführen. Die Vernachlässigung der vertikalen Bohrlochströmung im Comsol Modell führt zu einer lateral gleichmäßigen Ausbreitung der Druck- und Temperaturfront über das gesamte Reservoir, während im TIGER-Modell zu Beginn der offenen Filterstrecke der größte Druckgradient und eine verstärkte Temperatúrausbreitung stattfindet, während in tieferen Reservoirbereichen bedingt durch kleinere Druckgradienten verringerte Konvektion stattfindet.

Schließlich sind diese Unterschiede nicht eine Folge der zu lösenden Gleichungen, sondern eine direkte Folge dieser geothermie-bezogenen Besonderheiten und ihrer unterschiedlichen Integration in die jeweilige Modellierungsplattform, und sie würden im Vergleich zu typischen geologischen und lithofaziellen Unsicherheiten gering bleiben.

Weitere Details zum Vergleich zwischen TIGER und COMSOL finden Sie in Egert (2022).

Numerische Modellierung der Reservoir- und Oberflächenveränderungen am Standort Pullach

Der Simulation des kontinuierlichen Kraftwerksbetriebs wird anhand des Geothermiereservoirs Pullach durchgeführt. Auf eine Beschreibung der thermo-hydro-mechanischen Grundlagen wird verzichtet. Die Darstellung der thermo-hydraulischen Prozesse findet sich in Gholami Korzani et al. (2020) oder Egert et al. (2021). Darüber hinausführende Gleichungen für die Porositäts- und Permeabilitäts-veränderungen folgen den Gleichungen nach Chen et al. (2009) bzw. Carman (1956).

Angenommen werden hierbei konstante Fließraten und Reinjektionstemperaturen, die dem Jahresmittel des Jahres 2020 entsprechen. Die Fließraten betragen in der Produktion 24 l/s (TH2) bzw. 26,5 l/s (TH1a) und in der Reinjektion 50,5 l/s (TH3) bei einer Injektionstemperatur von 62°C. Als Produktions-temperatur wird die jeweilige lokale Temperatur (>100 °C) angenommen. Das Modellgebiet besitzt einen quadratischen Aufbau mit der Ausdehnung 12,6 x 12,6 x 4,39 km und reicht von der Geländeoberkante bei 590 m ü. NN. bis in eine Tiefe von 3,9 km, und es ist in Richtung des lokalen Spannungsfeldes um 1,7° gegen den Uhrzeigersinn rotiert (Ziegler and Heidbach, 2020) (Abbildung 34). Enthalten sind die stratigraphischen Einheiten zwischen dem oberen Kristallin und der Geländeoberkante. Die Schichten des Malms sind unter Berücksichtigung bekannter Fazies- und Permeabilitätsunterschiede in den unteren (Alpha, Beta und Gamma), mittleren (Delta und Epsilon) und oberen Malm (Zeta) unterteilt. Der untere Malm entspricht im Modellgebiet dabei vornehmlich der undurchlässigen Schichtfazies, während der mittlere Malm dagegen als homogene, großflächige und moderat-permeable Massenfazies ausgebildet ist, welche sich lediglich in deren Mächtigkeit unterscheidet (Dussel et al., 2016). Der Malm Zeta weist im Modellgebiet eine stark heterogene interne Struktur mit beiden Faziestypen und dem auftreten lokaler Riffstrukturen auf. Im Übergangsbereich beider Faziestypen konnte darüber hinaus oftmals starke Verkarstung nachgewiesen werden (Fadel et al., 2022). In weiterführenden 3D seismischen Untersuchungen sowie Zirkulationsexperimenten wurde eine hochpermeable Riffstruktur im Bereich der Bohrung Pullach TH3 identifiziert, welche im numerischen Modell daher explizit berücksichtigt ist (rote Box in Abbildung 34). Eine künstliche Schichtgrenze knapp 200 m unter GOK auf Höhe des erwarteten Grundwasserspiegels ermöglicht Porendruckeffekte zu berücksichtigen. Im Modell werden tiefenabhängige Temperatur-, Porendruck sowie Spannungsbedingungen als Initial- (IC) und

Randbedingungen (BC) berücksichtigt, welche das Resultat verschiedener experimenteller Messungen und Kalibrationschritte sind. Die initialen tektonischen Spannungen wurden dabei gegenüber Seithel et al. (2015) um die tatsächliche höhere Gesteinsdichte der einzelnen Lithologien korrigiert und kann dadurch höhere Werte sowie Gradienten aufweisen. Egert (2023) gibt alle Details zur Parametrisierung des Reservoirfluids und der lithofaziellen Einheiten.

Das numerische FE-Modell wurde mittels der Software MeshIt erzeugt (Cacace and Blöcher, 2015). Das hieraus resultierende Elementgitter besteht final aus ca. 290'000 Knoten und 1'115'000 Elementen (Abbildung 34). Das Elementgitter weist einen feinen Gitterabstand im Nahbereich der Bohrungen sowie im Malmreservoir von mindestens 5 m auf, welcher zu den Außenrändern hin auf bis zu 400 m (im Tertiär und Kristallin) zunimmt.

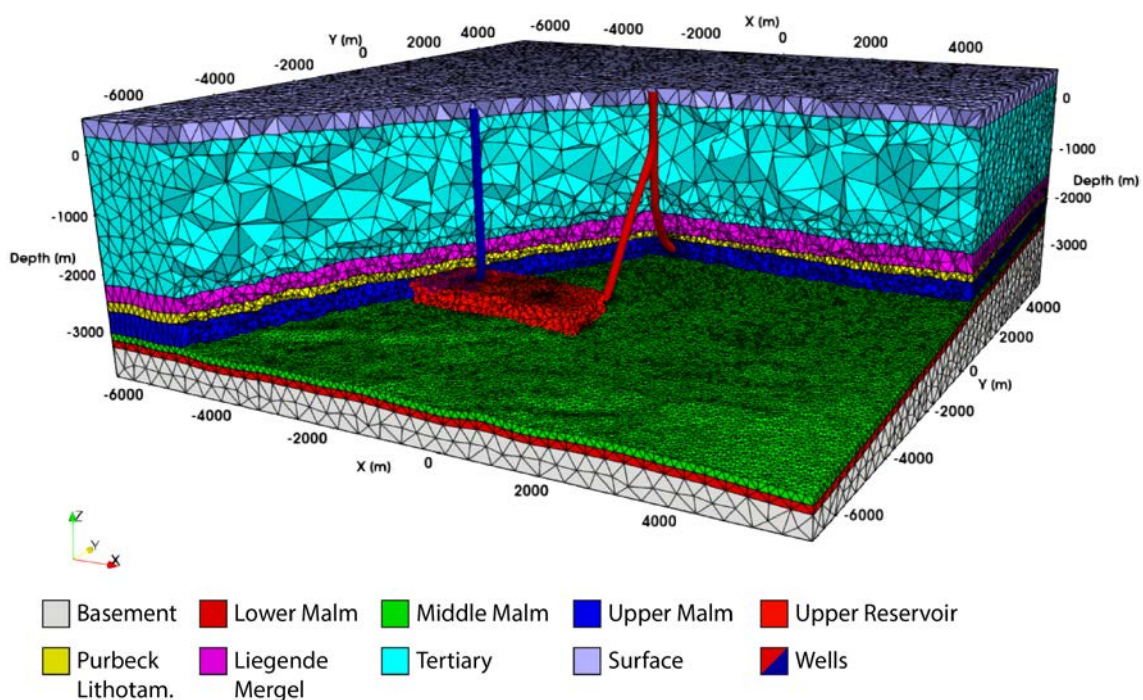


Abbildung 34: FE-Mesh des Pullach Geothermiereservoirs. Zu sehen ist die Oberkante des Malm Epsilon (grün) und im Hintergrund die Ränder bis an die Geländeoberkante (lila). Darüber hinaus die explizite Darstellung der Bohrungen als Linien und der Riffstruktur innerhalb des Malm Zeta im Bereich von Pullach TH3 (rot).

Die Abbildung 35a zeigt die Veränderungen der Reservoirtemperaturen durch konduktive und advective Prozesse. Durch die Kaltwasserinjektion wird das Reservoir im Bereich der Bohrung Pullach TH3 um ca. 60°C abgekühlt. Nach 50 Jahren erreicht die Abkühlungsfront (-2°C von der ursprünglichen Reservoirtemperatur) eine Ausdehnung von ca. 700 m im Bereich des durchlässigen Malm Zeta Reservoirs. Die Produktionsbohrungen sind dagegen nur geringfügig beeinflusst, indem wärmeres Wasser aus den tieferen Bereichen des Reservoirs in flachere Bereiche gezogen wird und sich die Produktionstemperatur aus dem Reservoir um ca. 4-5°C erhöht. Ein thermischer Durchbruch zwischen den beiden nächstgelegenen Bohrungen (Pullach TH3 zu TH2) ist daher unter den derzeitigen operativen Bedingungen unter Berücksichtigung des hydraulisch kalibrierten Modells nicht zu erwarten.

Die Abbildung 35b zeigt die Ausbreitung der Porendruckveränderungen nach 50 Betriebsjahren. Im Bereich der Injektionsbohrung Pullach TH3 ist dabei eine maximale Zunahme des Porendrucks um ca. 0,8 MPa zu beobachten, die sich frühzeitig im Riffkörper des Malm Zeta ausbreitet und erst nach

einigen Jahren auch in den weniger durchlässigen Malm Delta-Epsilon propagiert. Um die Bohrungen Pullach TH1a und TH2 findet eine Abnahme des Porendrucks um maximal 2 MPa. Diese Magnitude verändert sich mit zunehmener Produktionszeit nur geringfügig, allerdings vergrößert sich das beeinflusste Reservoirvolumen. Auf Grund der in diesem Bereich schlechten Durchlässigkeit des Malm Zeta propagiert die Abnahme vornehmlich im Malm Delta-Epsilon und wirkt sich erst nach einigen Betriebsjahren auf den darüberliegenden Malm Zeta aus. Nach 50 Jahren erreicht die +0,5 MPa Porendruckfront eine Ausdehnung von ca. 1,6 km um TH3 und die -0,5 MPa Porendruckfront eine Ausdehnung von ca. 1,5 km um TH1a und 400 m um TH2. Außerdem zeigten die Ergebnisse einen geringen Anstieg der Porosität (+2,9%) und der Permeabilität (+10,3%) im Bereich der Injektionsbohrung TH3 (Abbildung 36).

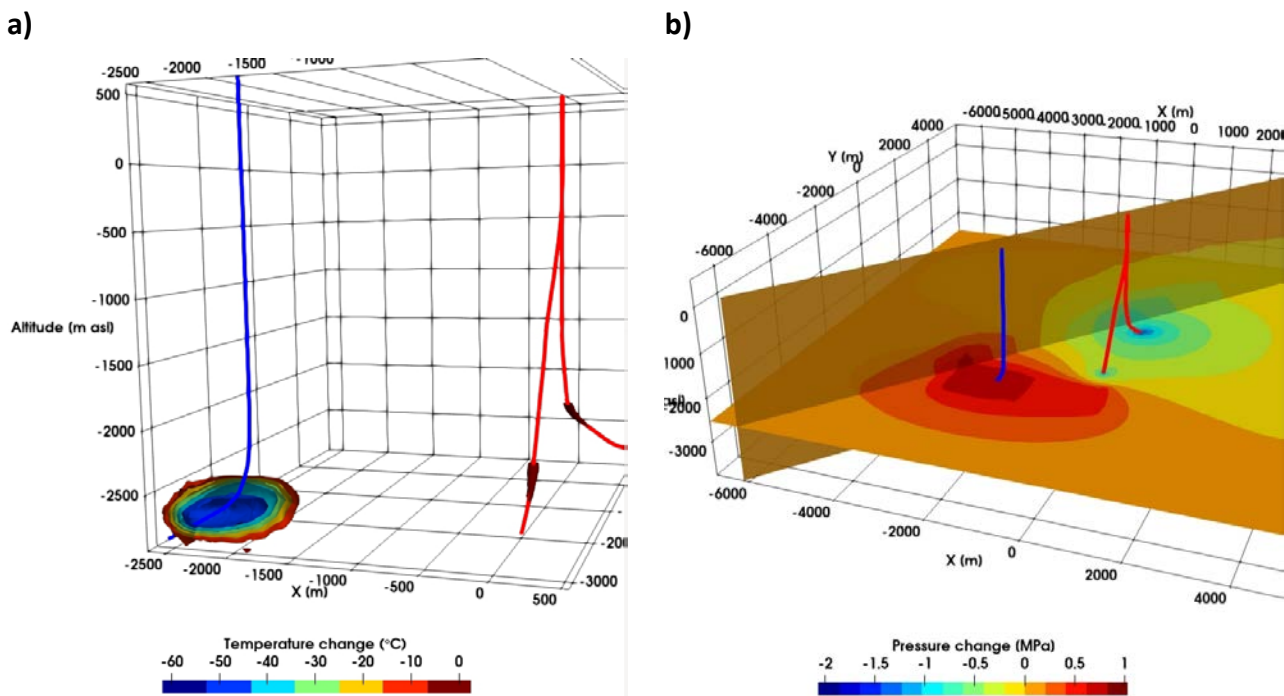


Abbildung 35: Temperaturänderungen (a) und Porendruckänderung (b) nach 50 Betriebsjahren.

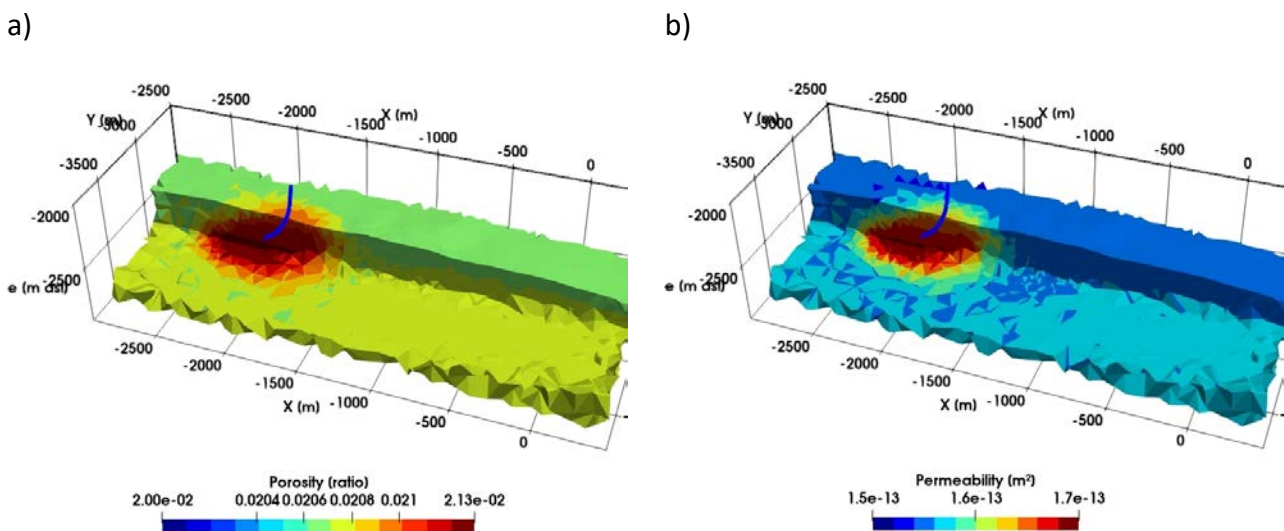


Abbildung 36: Porosität (a) und Permeabilität (b) im Malm Zeta Reservoir im Bereich der Bohrung Pullach TH3 nach 50 Betriebsjahren.

Neben Alterationen der Reservoirparameter und -eigenschaften, führen diese thermoelastischen Prozesse auch zu einer Deformation bis an die Erdoberfläche. Abbildung 37 zeigt die simulierte Oberflächendeformation nach 50 Betriebsjahren. Die größte vertikale Bodenbewegung wird um die Produktionsbohrung TH1a mit einer Subsidenz von 3,2 mm beobachtet. Eine Abweichung von -2 mm würde eine Entfernung von 2,5 km erreichen. Im Gegensatz dazu wird in der Nähe der Injektionsbohrung TH3 eine Hebung von etwa 1,5 mm berechnet. Der initiale Anstieg um TH3 korreliert mit dem Anstieg des Porendrucks innerhalb der ersten Betriebsjahre. Mit der Zeit nimmt jedoch der Einfluss der sich ausbreitenden Abkühlungfront, also der Kontraktion des Reservoirs zu, so dass sich der Anstieg verlangsamt und sogar abnehmen kann.

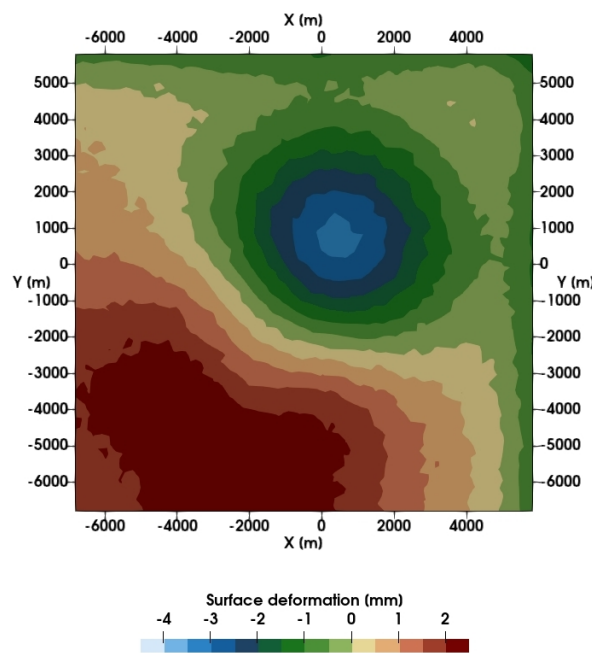


Abbildung 37: Bodenbewegung nach 50 Betriebsjahren.

Während diese Ergebnisse stark von den Unsicherheiten der lithofaziellen Einheiten beeinflusst werden, könnte eine Verifikation kontinuierlich mittels InSAR-Messungen erfolgen.

Aufbauend auf der bisherigen Erfahrung, wurde daher das numerische Modell um die Bohrpfade bzw. offenen Bohrsektionen für zwei weitere Bohrungen erweitert.

Egert (2023) gibt weitere Details. Darüber hinaus wurde diese Arbeit in einem Konferenzbeitrag (Egert et al., 2022) und einem Konferenzposter (Gaucher and Egert, 2023) vorgestellt.

2.1.4.3 AP4.5: Thermo-hydraulisch-mechanische-seismische (THM-S) Modellierung

Einführung

Geothermische Reservoirs sind eine wichtige Komponente nachhaltiger Energie, doch Operationen wie Fluidinjektion und -zirkulation führen häufig zu induzierter Seismizität und stellen somit ein betriebliches und gesellschaftliches Risiko dar. In dieser Studie wird ein neuartiger Ansatz entwickelt, um die thermo-hydro-mechanische (THM) Reservoirmodellierung mit dynamischen Erdbebensimulationen zu verbinden. Derzeitige Modellierungsansätze konzentrieren sich entweder auf quasi-statische Reservoirprozesse oder auf dynamische seismische Ereignisse, integrieren aber

selten beides. Durch die Kopplung zweier spezialisierter open-access numerischer Simulatoren, [TIGER](#) für quasi-statische THM-Prozesse und [SeisSol](#) für die dynamische Bruchmodellierung, schafft die Studie einen Arbeitsablauf, der sowohl die langfristige Spannungsentwicklung als auch schnelle seismische Ereignisse erfassen kann. Im Rahmen des INSIDE-Projekts wurde diese Lücke geschlossen, indem ein gekoppelter Rahmen vorgeschlagen wurde, um die Auswirkungen des Betriebs eines geothermischen Reservoirs zu simulieren, von der allmählichen Spannungsentwicklung bis zum seismischen Bruch und der Wellenausbreitung. Bei der Kopplung werden Spannungstensoren als Schnittstellenvariable verwendet, die anhand eines synthetischen 3D-Verwerfungsmodells für geothermische Lagerstätten validiert wurden. Die Ergebnisse zeigen die Fähigkeit, induzierte seismische Ereignisse zu simulieren, und bieten Einblicke in die Spannungsumverteilung, die Reaktivierung von Verwerfungen und die Ausbreitung seismischer Wellen.

Dieses Konzept wurde in Zusammenarbeit mit der LMU entwickelt, insbesondere mit Alice-Agnes Gabriel, Joachim Wassermann, Thomas Ulrich und Tobias Megies. Thomas Ulrich unterstützte diese Arbeit von Seiten der SeisSol software.

Methodik

Der Ansatz kombiniert zwei Simulatoren:

- [TIGER](#) (Thermo-hydraulisch-mechanischer Simulator): Ein MOOSE-basierter Simulator für die Modellierung der Interaktionen zwischen Fluidströmung, Wärmeübertragung und Spannung/Dehnung in Reservoirsystemen.
- [SeisSol](#) (Seismischer Wellen-Simulator): Ein dynamischer Bruchsimulator auf der Grundlage von Finite-Elemente-Methoden hoher Ordnung, der in der Lage ist, Verwerfungsgleiten und seismische Wellenausbreitung aufzulösen.

Beide Simulatoren verwenden das gleiche, von Gmsh software erstellte Finite-Elemente-Netz, und die Variablen werden an den gleichen Punkten berechnet. Durch die Verknüpfung dieser Modelle bietet die Studie ein umfassendes Instrument zum Verständnis und zur Minderung der induzierten Seismizität.

Thermo-Hydro-Mechanische Modellierung

- Fluidströmung: Modellierung nach dem Darcy'schen Gesetz unter Berücksichtigung von Durchlässigkeitsänderungen und Druckentwicklung.
- Thermische Vorgänge: Wärmeübertragungsgleichungen erfassen Konduktions- und Advektionseffekte im Reservoir.
- Mechanisches Verhalten: Spannungs- und Dehnungsbeziehungen werden gelöst, um die Deformation zu bewerten, wobei das elastische und plastische Verhalten in der Störungszone berücksichtigt wird.

Modellierung des dynamischen Bruchmechanik-Prozesses

- SeisSol löst das Bruchmechanik-Prozess und die Ausbreitung resultierender seismischer Wellen mit Hilfe eines spannungsbasierten Versagenskriteriums. Das Bruchmodell berücksichtigt die gleitschwächende Reibung, um die Energiefreisetzung während der Bruchreaktivierung zu simulieren.

Kopplungsrahmen

Die Kopplung erfolgt über einen sequentiellen Arbeitsablauf, bei dem das Spannungsfeld zwischen TIGER und SeisSol ausgetauscht wird (Abbildung 38). Um die induzierte Seismizität zu simulieren, muss die Spannung auf der Verwerfung berechnet werden, daher verfügt TIGER über Normal-

/Scherspannung und Versagenskriterien. Das Versagenskriterium, das bisher dem Mohr-Coulomb-Konzept folgt, wird nicht nur zur Berechnung des kritischen Zustands verwendet, bei dem die Störung kurz vor der Reaktivierung steht, sondern es wird auch der genaue Zeitpunkt numerisch ermittelt, zu dem die Versagenskriterien erfüllt sind. Bei unserem Ansatz wird, nachdem TIGER den Ort und den Zeitpunkt der Reaktivierung übermittelt hat, SeisSol aufgerufen, das den ursprünglichen Bruch propagiert und die freigesetzte Energie des Ereignisses bestimmt.

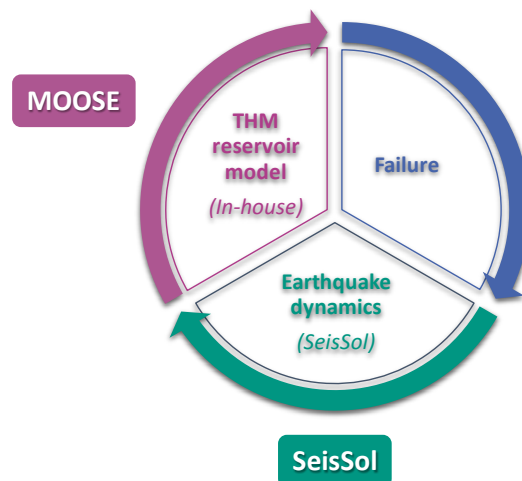


Abbildung 38: Konzept für die Modellierung der THM-Seismizität. Das durch die THM-Reservoirmodellierung (TIGER) vorgegebene Versagenskriterium an einer Störung löst die erdbebendynamische Modellierung (SeisSol) aus.

Die Zeitskalen für TIGER und SeisSol sind unterschiedlich. Ersteres umfasst in der Regel stündliche, tägliche oder sogar monatliche Zeitschritte, wenn die Lösung gut voranschreitet, während letzteres auf Zeitskalen im Sekundenbereich arbeitet. Aufgrund der Injektion ist z.B. nach 5 Jahren das Versagenskriterium in TIGER erfüllt, so dass die THM-Simulation gestoppt wird und die Simulation der induzierten Seismizität von SeisSol z.B. für 5 Sekunden durchgeführt wird.

Die Simulation beginnt also mit TIGER, und SeisSol muss auf der Grundlage des letzten Spannungszustands (Reaktivierungszustand) von TIGER initialisiert werden (Abbildung 5). Dann wird der Reaktivierungszustand auch in SeisSol als kritischer Zustand betrachtet, so dass die Auslösung des Seismizitätsereignisses simuliert und die Spannungsänderungen berechnet werden. Es wird angenommen, dass der Reaktivierungszustand der auslösenden Bedingung in SeisSol entspricht. Zu diesem Zeitpunkt (wenn TIGER und SeisSol mindestens einmal in Folge laufen) ist eine Schleife in unserer Workflow-Terminologie abgeschlossen. Um die zweite Schleife zu initialisieren, muss die durch die Seismizität verursachte Spannungsänderung in TIGER hinzugefügt werden, um mit der THM-Simulation auf der Grundlage eines aktualisierten Spannungsfeldes fortzufahren, das aus der Seismizität resultiert. Der Wechsel zwischen den Simulatoren wird bis zum Ende der Simulationsperiode fortgesetzt. Um den Arbeitsablauf zu automatisieren, d. h. die Initialisierung der einzelnen Simulatoren, die Konvertierung der Dateiformate zwischen TIGER und SeisSol und die Verwaltung der Ausgaben, wird ein Shell-Skript geschrieben (Abbildung 5). In der aktuellen Version des Arbeitsablaufs wird nur der Spannungstensor als Kopplungsparameter zwischen den beiden Codes betrachtet, so dass, sobald das Versagenskriterium von TIGER erfüllt ist, das entsprechende Spannungsfeld an SeisSol übertragen wird und SeisSol nach dem Versagen die Spannungsfeldänderungen an TIGER weitergibt.

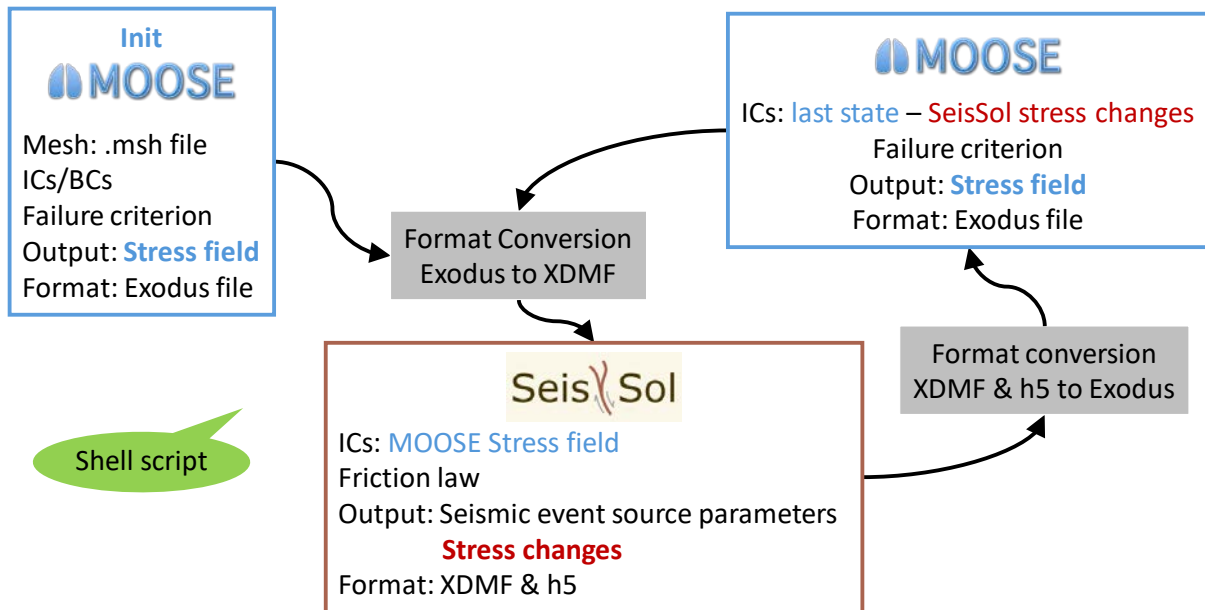


Abbildung 39: Illustration der Kopplung zwischen TIGER und SeisSol.

Synthetische Fallstudie

Modellgeometrie und Eigenschaften

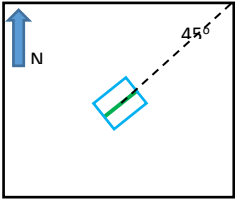
Ein synthetisches Modell, das ein homogenes Reservoir in einem weniger durchlässigen Volumen und eine Störung enthält, wurde erstellt, um die Leistungsfähigkeit des Arbeitsablaufs für einen einfachen Fall zu überprüfen (Abbildung 40).

Das Modell erstreckt sich über $8 \times 8 \times 6$ km in x-, y- und z-Richtung. Die Störungzone ist vertikal und 45° NE ausgerichtet. Ihre Dicke beträgt 1 cm, ihre Länge 2000 m und sie erstreckt sich von der Oberfläche bis in eine Tiefe von 1800 m. Ein Reservoir umgibt die Störungzone 1000 m auf beiden Seiten. Die Hauptspannungen sind S_z gleich der lithostatischen Spannung, $S_x = 1,2 \times S_z$ und $S_y = 0,7 \times S_z$, also $S_x > S_z > S_y$. Unter diesen Bedingungen befindet sich der Verwerfung relativ nahe an einem kritischen Zustand, d. h. relativ nahe an einem möglichen Versagen. Der initialer Porendruck ist hydrostatisch und die Temperatur folgt einem Gradienten von $3^\circ\text{C}/100$ m. Die Materialeigenschaften der Störung, des Reservoirs und der Umgebung, einschließlich der thermischen, hydraulischen und mechanischen Eigenschaften, sind angegeben in Tabelle 5.

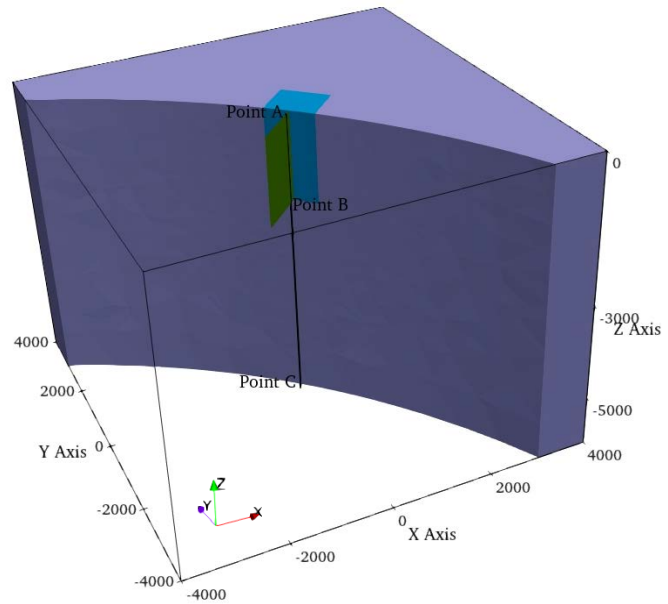
Initialisierung

Ausgehend vom vorgeschriebenen Spannungsregime wird das Modell zunächst ohne jegliche Injektion ausgeführt, damit das System ein mechanisches Gleichgewicht erreicht.

a)



b)



c)

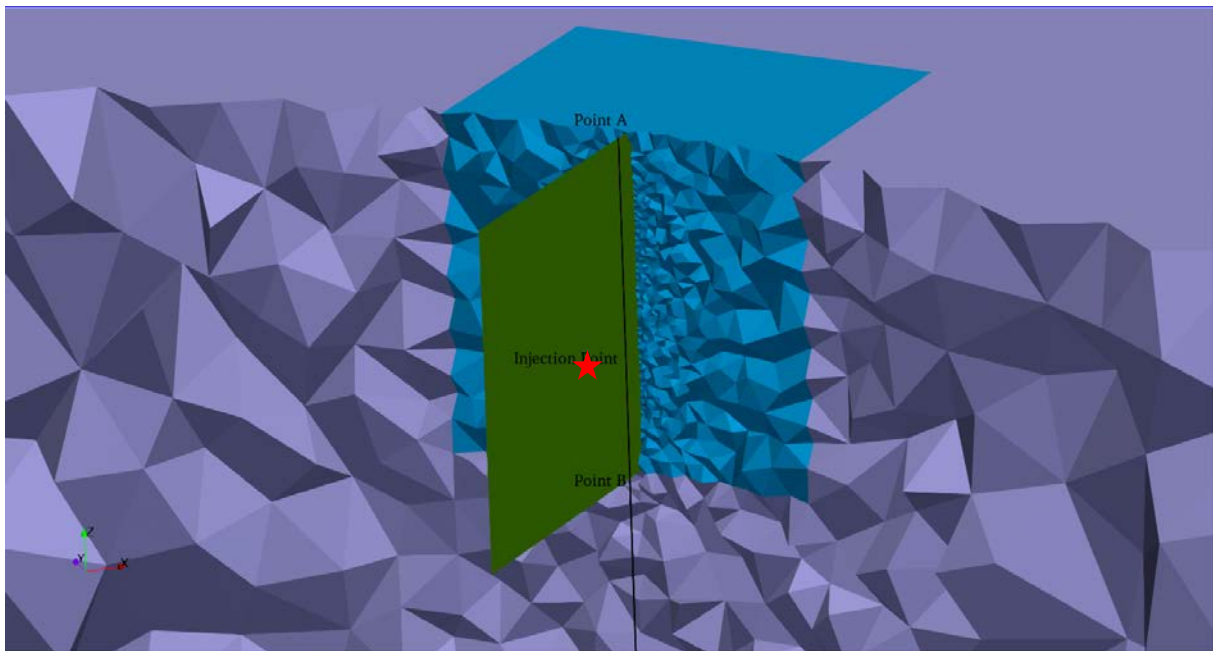


Abbildung 40: Geometrie des synthetischen Modells mit der Störung (grüne Ebene), dem Reservoir (blaues Volumen) und dem restlichen Medium (violettes Volumen): a) Draufsicht, b) 3D-Gesamtansicht und c) Zoom in der Nähe der Störung mit Anzeige des Injektionspunkts (rotes Kreuz). Die vertikale schwarze Linie, die durch die Punkte A an der Oberfläche, B am Fuß der Störung und C am Modellboden definiert ist, gehört zur Störungsebene und kreuzt den Injektionspunkt.

Tabelle 5: Eigenschaften des synthetischen Fallmodells.

Parameter	Beschreibung	Werte und Einheit
Porosität	Reservoir und Umgebung	0.15 (-)
	Störung	0.50 (-)
Permeabilität	Umgebung	3e-18 m ²
	Reservoir	3e-17 m ²
	Störung	20e-11 m ²
Kompressibilität	Fluid	2.16356e+09 m ² /N
Viskosität	Fluid	0.85 mm ² /s
Wärmekapazität	Fluid	3800 J/(kg·K)
	Reservoir und Umgebung	1400 J/(kg·K)
	Störung	1000 J/(kg·K)
	Fluid	0.6 W/(m·K)
Wärmeleitfähigkeit	Reservoir und Umgebung	2.0 W/(m·K)
	Störung	3.0 W/(m·K)
	Fluid	1000 kg/m ³
Dichte	Reservoir und Umgebung	2500 kg/m ³
	Reservoir und Umgebung	10 ⁻⁶ K ⁻¹
Thermische Expansion	Reservoir und Umgebung	15 GPa
Youngscher Modul	Störung, Reservoir und Umgebung	0.2 (-)
Poissonzahl	Störung, Reservoir und Umgebung	1 (-)
Biot-Willis Koeffizient	Reservoir und Umgebung	20 l/s
Injektionsrate	Injektionspunkte	30°C
Injektionstemperatur	Injektionspunkte	1.5 m
Kritische Gleitlänge	Störung	0.6
Statischer Reibungskoeffizient	Störung	0.2
Dynamischer Reibungskoeffizient	Störung	

Injektion, Störungaktivierung und Seismisches Ereignis

Dann wird eine konstante Injektionsrate von 20 l/s am Injektionspunkt auf der Störung angewendet. Nach ~1222 Tagen findet eine Reaktivierung statt, die ein Ereignis der Momenten-Magnitude -1,0 erzeugt. Das Gleiten der Verwerfung wurde um die Injektionszone herum lokalisiert, und die Spannungsumverteilung zeigt Kompressions- und Dilatationszonen, die mit einer Blattverschiebung übereinstimmen (Abbildung 41, Oben). Die beobachtete Verschiebung stimmt auch mit dem Modell überein (Abbildung 41, Unten), außerdem ist das Verschiebungsfeld in x-Richtung in y-Richtung entgegengesetzt, wie bei einer 45°NE-orientierten Störungzone zu erwarten.

Nachdem dieses erste Ereignis eingetreten und die Spannungsänderung in TIGER berücksichtigt worden war, wurde die Injektion fortgesetzt und führte zu einem zweiten Ereignis mit einer Momenten-Magnitude von -0,67. Aufgrund der Anpassung an die akkumulierte Spannung aus dem ersten Ereignis kam es zu größeren Verschiebungen auf der Störung.

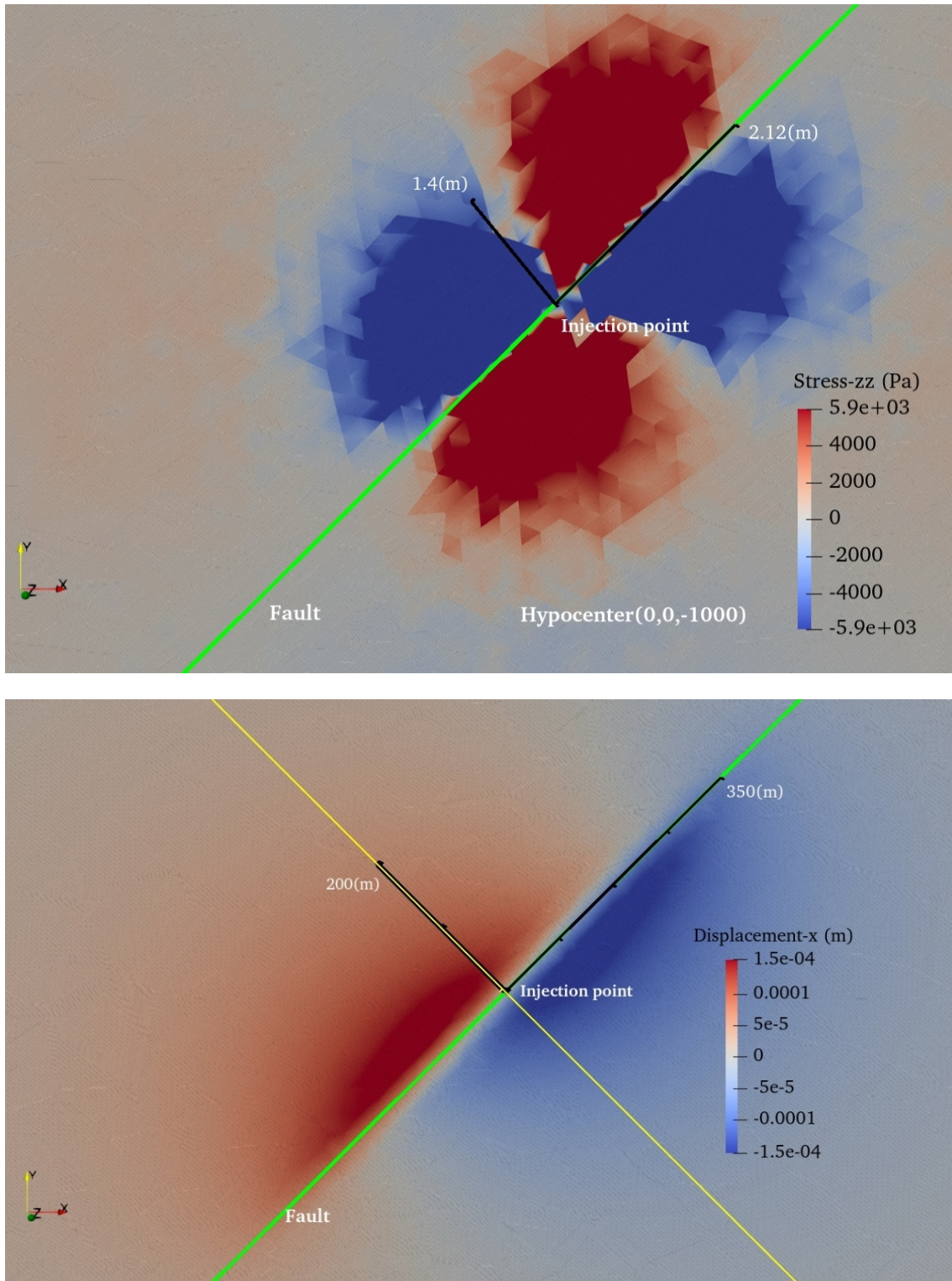


Abbildung 41: Horizontaler Abschnitt zentriert auf den Injektionspunkt. Oben: Veränderung der Spannung-zz nach dem ersten seismischen Ereignis, berechnet mit SeisSol. Negative Spannungswerte entsprechen einer Kompression. Unten: Verschiebung entlang der Störung in x-Richtung nach dem ersten seismischen Ereignis. (Beachten Sie die Änderung des Maßstabs zwischen den beiden Diagrammen.)

Zusammenfassung

Die synthetische Fallstudie hat gezeigt, dass der vorgeschlagene gekoppelte Modellierungsrahmen TIGER-SeisSol das thermohydromechanische und seismische Verhalten geothermischer Systeme effektiv simulieren kann, indem er die langfristige Spannungsentwicklung mit dynamischen seismischen Reaktionen integriert.

Anhand des Testfalls konnten wir überprüfen, dass die Coulomb-Spannungsänderungen und Verschiebungsfelder in den Simulatoren konsistent sind, was einen effektiven Datenaustausch und Modelltreue belegt. Die Möglichkeit, mehr als einen Simulationszyklus durchzuführen, wurde auch durch die Erzeugung von zwei seismischen Ereignissen zu unterschiedlichen Zeiten demonstriert.

Ein wissenschaftlicher Artikel, der die hier vorgestellten Ergebnisse im Detail beschreibt, ist in Vorbereitung.

Zukünftige Arbeiten werden sich auf die Anwendung des Rahmens auf einen realen Datensatz und die Erweiterung des Modells konzentrieren, um zusätzliche Komplexitäten wie nichtlineares Verwerfungsverhalten und Fluid-Gestein-Wechselwirkungen einzubeziehen.

2.1.5 AP5: DATENINTEGRATION (LEITUNG: SWM)

2.1.5.1 AP5.1: Kosten-/Nutzenanalysen der seismischen Aufzeichnungen

Im Rahmen von INSIDE wurde ein Überwachungsnetz installiert, das über die Standards für seismisches Monitoring hinausgeht, wie in AP1.2 – Kapitel 2.1.1.1 berichtet. Diese Vielfalt an Instrumenten und Konfigurationen mit Messstandorten, die mehrere Instrumente kumulieren, ermöglicht einen Vergleich der Fähigkeiten im Hinblick auf seismisches Monitoring. Dieses AP vergleicht die Fähigkeiten, Vorteile und Nachteile der getesteten Überwachungsansätze. Dies umfasst die Installation von Oberflächen- und Bohrlochseismometern, das Mini-Array Siemens-Park, die DAS-Station Buchenhain und das DAS-Überwachungssystem Schäftlarnstraße. Der Vergleich wird aus technischer, praktischer und wirtschaftlicher Sicht durchgeführt.

Fähigkeiten zur seismischen Überwachung

Die technischen Fähigkeiten der verschiedenen Monitoring-Methoden und -Ansätze werden hinsichtlich ihrer Fähigkeit, seismische Signale zu detektieren und die seismische Quelle zuverlässig zu charakterisieren, bewertet. Dies umfasst insbesondere die Bestimmung der Magnitude des Ereignis und sein Hypozentrum, oder die Direktionalität des Wellenfeldes.

Theoretische Vorteile/Einschränkungen

Theoretisch ermöglicht die Erhöhung der Anzahl der Sensorpunkte am gleichen Messort (wie beim Mini-Array oder den DAS-Stationen) die Anwendung erweiterter Array-Verarbeitungstechniken, insbesondere Frequenz-Wellenzahl (f - k) Methoden und „Beamforming“. Bei diesem Ansatz wird ein Array von Sensoren verwendet, die gleichzeitig Signale von einer bestimmten Quelle empfangen, um die Signalstärke zu erhöhen und die Richtcharakteristik des Wellenfelds zu bewerten. Die Auflösung und Empfindlichkeit des Arrays im Hinblick auf die Rauschunterdrückung hängt insbesondere von der Positionierung der einzelnen Sensoren ab und wird durch die theoretische Transferfunktion bestimmt, die in AP1.2 – Kapitel 2.1.1.1 diskutiert wird.

Daher ist die Geometrie des Arrays ein entscheidender Aspekt für die Empfindlichkeit des Monitorings. Im Idealfall sollte diese Geometrie in Abhängigkeit vom Überwachungsziel sorgfältig geplant werden. In der Regel gibt es jedoch starke externe Einschränkungen für die Platzierung der Sensoren (Mini-

Array im Siemens-Park) oder für mögliche Grabungsarbeiten (Station Buchenhain). Manchmal ist die Geometrie vorgegeben (vertikales Kabel in SLS TH3). Unterschiede in den Überwachungsergebnissen bei der Charakterisierung von Ereignissen (z.B. zwischen DAS Buchenhain und Mini-Array) müssen daher auch im Lichte dieser geometrischen Einschränkungen gesehen werden.

Weitere theoretische Aspekte, die beim Vergleich eine Rolle spielen, werden im Folgenden aufgeführt:

- Unterschiede in der Sensitivität einzelner Messpunkte: Einzelne DAS-Punkte haben ein höheres Rauschen und ein geringeres Signal-Rausch-Verhältnis als Inertial-Seismometer aufgrund von unterschiedlichem instrumentellem und optischem Rauschen oder variablen Boden-Faser-Kopplungsbedingungen (z.B. (Lindsey et al., 2020)). Dies kann in geringerem Maße auch für die einzelnen Geophone des Mini-Arrays gelten.
- Unterschiede in den Sensorkomponenten: Die Empfindlichkeit des DAS Messpunkts ist auf die Richtung des GFKs beschränkt, während Geophone und Seismometer normalerweise 3 normalisierte Aufnahmerichtungen bieten.
- Unterschiede in den Datentypen: Ein Aspekt des Vergleichs besteht darin, dass die in der Analyse berücksichtigten Messinstrumente unterschiedliche physikalische Größen erfassen (Bodenbewegungsgeschwindigkeit für Seismometer/Geophone, Dehnungsrate für DAS).

Der Vergleich der Messmethoden basiert auf dem in AP3.1 beschriebenen Katalog seismischer Ereignisse. Um die Unterschiede in den Datentypen zu berücksichtigen, konzentriert sich die Analyse der Signalstärke auf das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR), das für alle Ereignisse im Katalog beobachtet wurde.

Oberfläche- und Bohrloch-Seismometer

Die Analyse konzentriert sich zunächst auf das Seismometer-Netz, um einen Einblick in den Beitrag des Bohrlochseismometers SIEM zu erhalten. Die meisten der beobachteten seismischen Aktivitäten traten in der Nähe der Stationen Oberhaching und Unterhaching auf, und die Station WBRU (und in geringerem Maße BUCH) erwies sich aufgrund der geringen Entfernung zwischen Quelle und Sensor als am besten geeignet für die Detektion von Ereignissen. Um die absolute Empfindlichkeit der Stationen unabhängig von der Geometrie des Netzes zu analysieren, zeigt Abbildung 42 die statistische Verteilung der SNR-Werte nach Normierung auf die Entfernung zwischen Station und Quelle. Sie zeigt, dass FORS von niedrigen Rauschpegeln profitiert. Die Ergebnisse stimmen mit den Rauschmessungen überein, die bei der Inbetriebnahme des Netzes durchgeführt wurden. Es zeigt sich auch, dass die Positionierung der SIEM-Station in einem Bohrloch nur von begrenztem Nutzen ist, wahrscheinlich wegen der schlechten Verbindung des Sensors mit dem Boden, was zu einer geringeren Empfindlichkeit gegenüber seismischen Signalen führt.

DAS- und Geophonen- Arrays – Stärke des Signals

Das Mini-Array und die DAS-Station sind am selben Standort wie ein Seismometer installiert, was einen Vergleich der Signalstärke zwischen etablierten (Seismometer) und weniger etablierten Messmethoden ermöglicht. Weitere Details der Analyse sind in Azzola & Gaucher (2024b) beschrieben. Zwischen 5 und 40 Hz, dem Zielband für die Detektion von seismischen Ereignissen, zeigt sich, dass die Anwendung von Beamforming auf die Mini-Array-Aufzeichnungen das seismische Signal so verstärkt, dass es im Allgemeinen zu höheren SNRs führt als die Anwendung eines Bandpassfilters auf den nahegelegenen SIEM-Bohrlochsensor. Von den 35 Ereignissen, deren Entstehungszeit mit dem Zeitraum der Datenaufzeichnung übereinstimmt, wurden 18 Ereignisse mit einem ausreichenden SNR für die Verarbeitung der Mini-Array-Daten mittels Beamforming identifiziert.

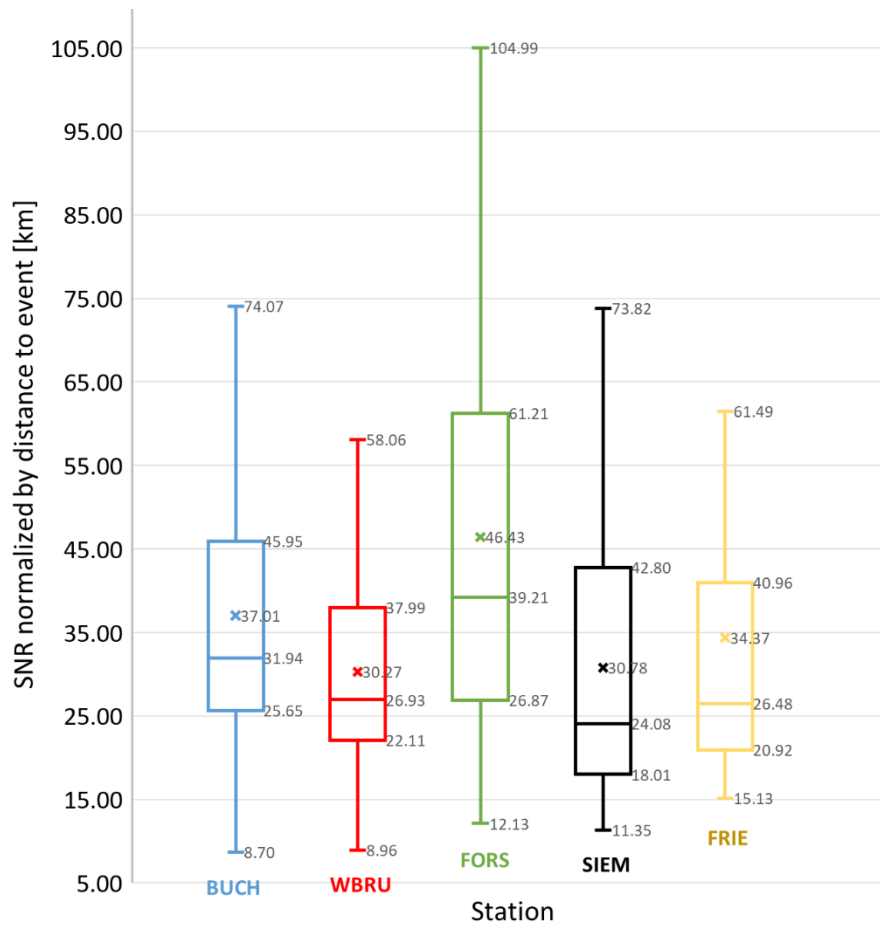


Abbildung 42: Statistische Darstellung (mittels Boxplot) der für jedes detektierte Ereignis berechneten Scores, basierend auf SNR-Werten und Entfernungen zwischen Quelle und Sensor. Die mittlere horizontale Linie zeigt den Median und das Kreuz den Mittelwert. Die Whiskers zeigen das obere und untere Quartil.

Der Einsatz der DAS-Technologie in einem vertikalen Bohrloch wie in Buchenhain und Schäftlarnstraße liefert Datensätze mit dichter räumlicher Abtastung, die den Einsatz von Frequenz- Wellenzahl (f-k) Filter- und Analysetechniken ermöglichen. Dies kann zu einer Erhöhung der Stärke der aufgezeichneten Signale im Vergleich zu einzelnen bandpassgefilterten Spuren führen. Dieser Ansatz, der in Abbildung 44 anhand von zwei im Experiment Schäftlarnstraße beobachteten Ereignissen dargestellt ist, ermöglicht auch eine enge Geschwindigkeitsfilterung, um P- und S-Wellenfronten zu isolieren. Das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR), das selbst mit enger f-k-Filterung erreicht wird, bleibt jedoch unter dem Wert, der bei nahegelegenen Seismometer-Aufzeichnungen beobachtet wird. Andererseits kann der entwickelte schmale f-k-Filter verwendet werden, um die Ankunftszeiten der beiden Wellenfronten über dem GFK konsistent zu messen. Details zur angewandten Methodik sind in Azzola & Gaucher (2024a) zu finden.

Die Aufzeichnungen des Oberflächenteils der DAS-Station Buchenhain wurden nur bandpassgefiltert und weisen aufgrund der umgebenden Aktivitäten relativ hohe Rauschpegel auf (Azzola and Gaucher, 2024b). Daher wurden 30 der 41 Ereignisse, die während der Betriebszeit der DAS-Station Buchenhain detektiert wurden, weiter analysiert. In Bezug auf die Signalstärke ist die DAS-Station in Buchenhain nicht so effizient wie das Seismometer-Netzwerk, aber sie ist als Ergänzung zu betrachten, insbesondere im Hinblick auf die zusätzliche Verarbeitungskapazität, die sich aus der Anzahl der Sensoren in der Faser ergibt.

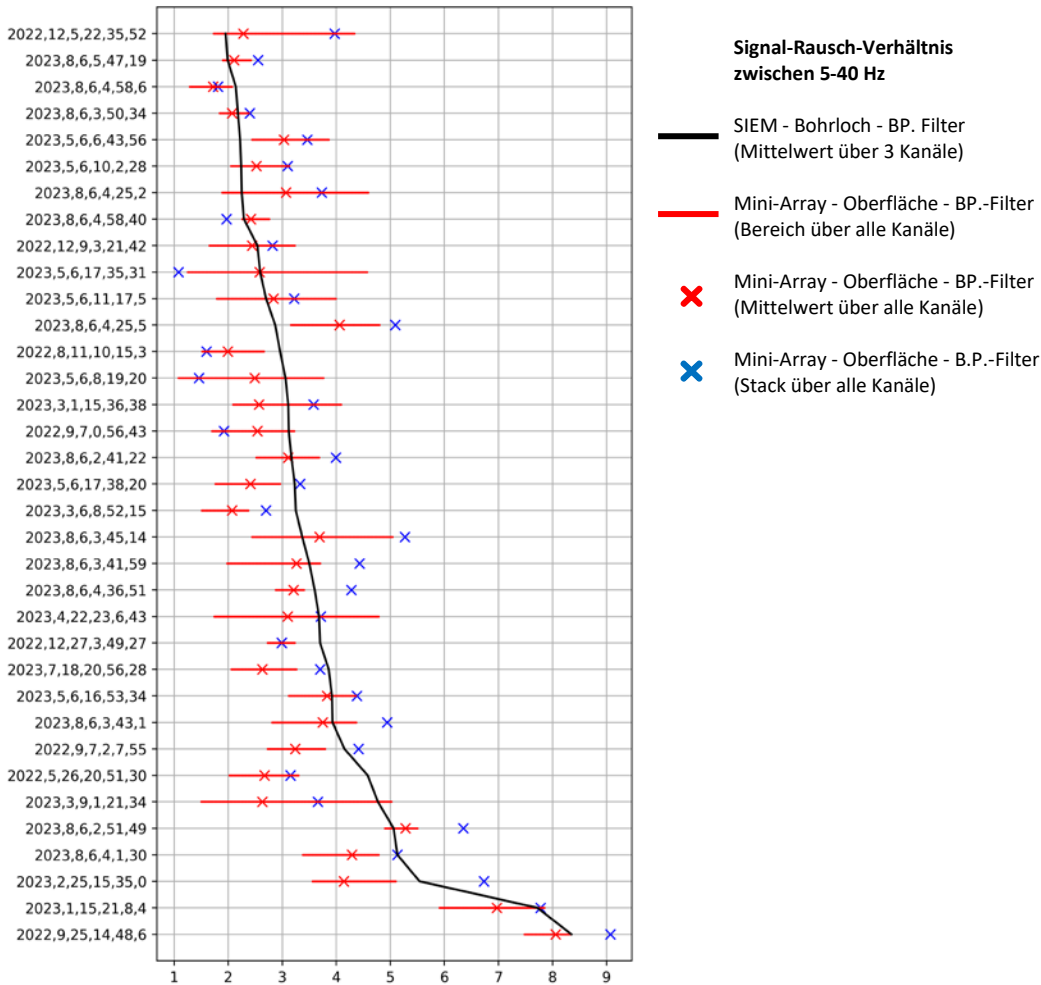


Abbildung 43: SNR-Werte im Frequenzbereich von 5-40 Hz am SIEM-Sensor (schwarze Linie) und am Mini-Array (rote Linie). Die Y-Achse zeigt alle Ereignisse, die während des Betriebs des Mini-Arrays im Siemens-Park detektiert wurden. Die Ereignisse sind nach dem am SIEM-Seismometer beobachteten SNR sortiert.

DAS- Arrays – Detektion seismischer Ereignisse

Neben der Bewertung der Stärke der beobachteten seismischen Signale bewertete das Schäftlarnstraße-Experiment auch den Beitrag von DAS zur Verbesserung der Empfindlichkeit des Netzwerks zur Erkennung seismischer Ereignisse. Azzola et al. (2023) zeigen, dass das Array von Bohrloch-DAS Messpunkte insbesondere in städtischen und betrieblichen Umgebungen von Vorteil ist. Die DAS-Überwachung, die auf das hinter dem Injektionsbrunnen TH3 einbetonierte, vertikale Kabel angewendet wurde, zeigte eine erhöhte Empfindlichkeit bei der Erkennung seismischer Ereignisse im Vergleich zum Oberflächennetzwerk und ermöglichte die Erkennung und Verarbeitung des lokalen Ereignisses 22. April 2023 MW -0,1, das andernfalls möglicherweise unbemerkt geblieben wäre.

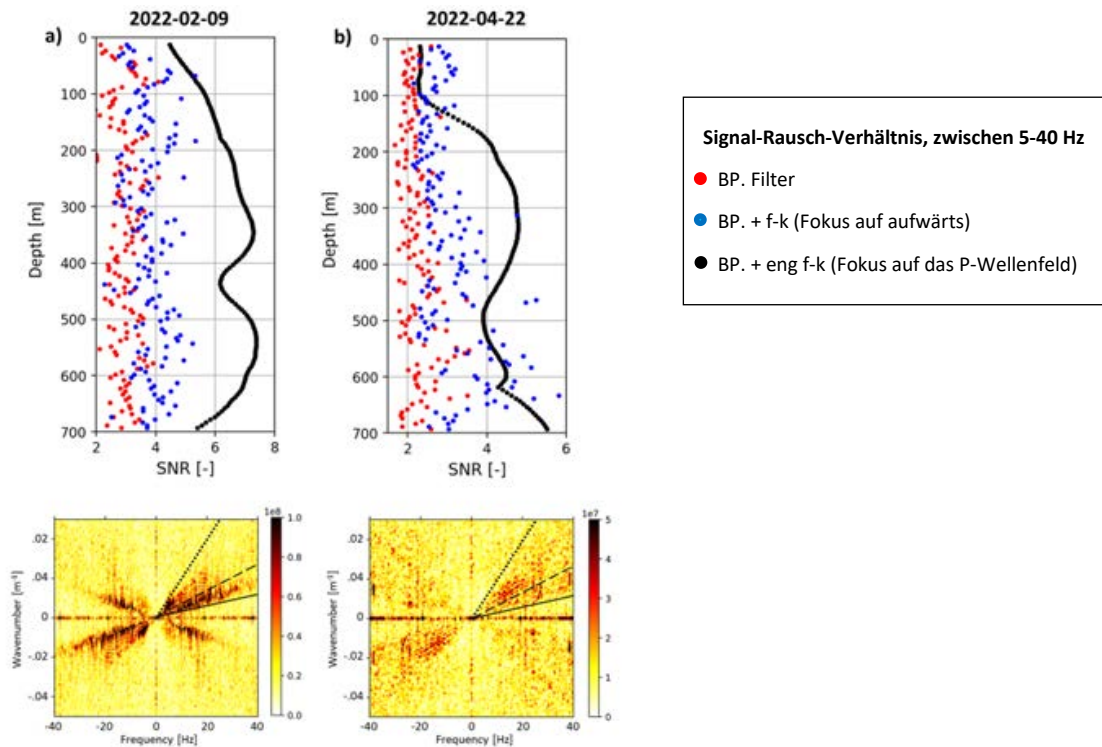


Abbildung 44: Entwicklung mit Tiefe des SNR [-] der ersten Ankünfte, die für die Ereignisse vom 9. Februar und 22. April aufgezeichnet wurden. Es werden unterschiedliche Filterstrategien angewendet. Die Datensätze sind nur BP-gesfiltert zwischen 5 und 40 Hz (rote Punkte) oder BP- und f-k-gesfiltert durch Auswahl des f-k-Bereichs, der mit aufwärts gerichteten Wellenfeldern verbunden ist (blaue Punkte) oder BP- und f-k-gesfiltert durch Auswahl des f-k-Bereichs, der mit den sich entlang des Kabels ausbreitenden P-Wellen verbunden ist (schwarze Punkte). Die ungefilterten Datensätze werden unten im f-k-Bereich angezeigt. Die durchgezogenen, gestrichelten und gepunkteten Linien entsprechen jeweils scheinbaren Geschwindigkeiten von 3500, 1600 und 500 m/s.

DAS- und Geophonen- Arrays – Analyse seismischer Ereignisse

Im Vergleich zu einem einzelnen Seismometer bieten die DAS-Station und das Mini-Array weitere Optionen für die Analyse seismischer Ereignisse. Die Messungen der Direktivität des Wellenfelds sind im Kapitel 2.1.3.1 und Azzola & Gaucher (2024b) zusammengefasst. Sie zeigen, dass die Abschätzungen des Rückazimuts aus dem Mini-Array für 12 der 18 analysierten Ereignisse mit den Epizentren aus dem Seismometer Netz übereinstimmen. Die Einschränkung ist weniger technologisch/technisch als vielmehr betrieblich bedingt und hängt mit der Verschmutzung der Datensätze durch die nahegelegene Bahnlinie und die Wartung des Bahnhofs zusammen (erhebliche Anzahl von Ausfallzeiten), wie im folgenden Kapitel beschrieben.

Die seismische Überwachung mit DAS wurde in zwei verschiedenen Experimenten (Buchenhain und Schäftlarnstraße) durchgeführt, was eine Bewertung der Vorteile und Grenzen der Technologie - insbesondere hinsichtlich der Empfindlichkeit und der Art der Daten - für die Analyse seismischer Ereignisse in unterschiedlichen Umgebungen ermöglichte.

Die Beamforming-Ergebnisse der Station Buchenhain stimmen weniger gut mit den Ortungsergebnissen des Seismometer-Netzes überein als die des Mini-Arrays. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass die seismischen Ereignisse relativ weit von der DAS-Station entfernt sind und dass die Öffnung („Aperture“) des Arrays von Messpunkten auf der Oberfläche die Empfindlichkeit des Arrays einschränkt. Abgesehen von den Einschränkungen, die mit der Geometrie der Station und ihrer Umgebung zusammenhängen, verfügt die DAS-Station über ein innovatives Design, das dreidimensionale Erfassungsmöglichkeiten bietet. Sie ermöglichen, die Direktionalität des

einfallenden Wellenfeldes, einschließlich seines Einfalls, von einer einzigen Station aus zu schätzen. Die Station eignet sich zum Beispiel für die Analyse des seismischen Ereignisses vom 15. Januar 2023, das in der Nähe von Pullach TH3 stattfand. Diese Fallstudie zeigt, dass die Kombination der DAS-Aufzeichnungen aus dem oberflächennahen Bereich und aus dem Überwachungsbohrloch eine Schätzung von Rückazimut und Einfall in Übereinstimmung mit dem Hypozentrum des Seismometer Netzes ermöglicht (s. Abbildung 22). In diesem Sinne überwindet das für die DAS-Stationen in Buchenhain vorgeschlagene Design die der Technologie innewohnende begrenzte Richtungsempfindlichkeit. Diese Richtungsempfindlichkeit wirkt sich insbesondere auf die Lokalisierung von seismischen Ereignissen aus, die durch DAS an einem einzigen vertikalen Kabel erzeugt werden, wie z. B. beim Experiment in der Schäftlarnstraße. Dieser Aspekt wird in Azzola & Gaucher (2024a) ausführlich diskutiert.

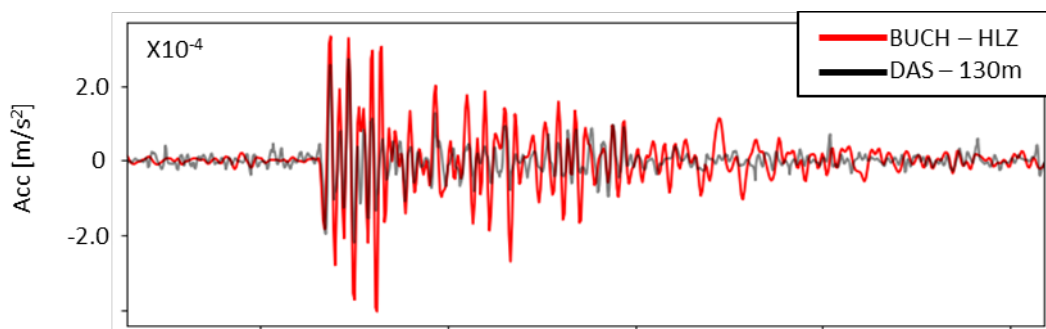


Abbildung 45: Vergleich der seismischen Signale, die von der DAS-Station in Buchenhain in der Überwachungsbohrung und auf der vertikalen Komponente des BUCH-Seismometers erfasst wurden, für das Ereignis am 15. Januar 2023 (nach der Datentyp-Konvertierung).

Die für die Verarbeitung der DAS-Daten von Buchenhain und Schäftlarnstraße entwickelte Methodik beinhaltet die Umrechnung der Dehnungsratendaten in Bodenbewegungen. In beiden Experimenten bestätigt ein genauer Vergleich mit Seismometerdaten (z.B. Abbildung 45), dass DAS-Phase und -Amplitude für die seismische Verarbeitung zuverlässig sind (z. B. Azzola & Gaucher (2024a)). Dies zeigt das Potenzial für hybride Netzwerke, die Oberflächen- und Bohrlochseismometer mit DAS kombinieren. Es deutet auch darauf hin, dass das Netz schrittweise erweitert werden kann, wenn neue Bohrungen mit GFK ausgestattet werden, die möglicherweise von der Oberfläche aus miteinander verbunden werden, indem z. B. Telekommunikationsinfrastrukturen genutzt werden. Eine solche Vervielfachung und Kombination von Messpunkten ist besonders empfehlenswert, um die Beschränkungen der Messung einer einzelnen Komponente zu überwinden und die Dichte des Messnetzes erheblich zu erhöhen. Ein gut eingeschränktes Geschwindigkeitsmodell ist jedoch weiterhin von entscheidender Bedeutung, um Ungenauigkeiten bei der Lokalisierung von Ereignissen zu vermeiden, die sich aus den zahlreichen Messpunkten ergeben, die durch die DAS-Sensortechnologie eingeführt werden (z.B. Azzola and Gaucher, 2024a).

Betriebliche Aspekte

Betriebliche Aspekte sind wichtig für den effizienten Betrieb von Messstationen. Sie werden anhand des Wartungsaufwandes der verschiedenen Messmethoden und deren Auswirkungen auf die Datenverfügbarkeit bewertet. Erfassungszeiträume und Unterbrechungen sind in Azzola & Gaucher (2025) detailliert dargestellt.

Einschränkungen in Bezug auf die Positionierung der Sensoren und die Genehmigung zur Installation gelten für alle Messstellen, wobei die Auswirkungen mehr oder weniger stark von der gewählten Messmethode / dem Stationsdesign abhängen (abgedeckte Fläche, Anzahl der Sensoren, Flexibilität der Sensoranordnung). Für die Anordnung von Geophonen oder DAS-Messpunkten ist es von

Interesse, sich an eine vordefinierte Anordnung zu halten, die vom Ziel der Überwachung abhängt und die Auflösung und Empfindlichkeit der Messstation einschränkt. Die Messbohrung Buchenhain erfordert zudem eine umfangreiche Planung, Ausschreibung und Genehmigung, einschließlich der Entscheidung über die wasserrechtliche Genehmigung. In INSIDE wurde das Mini-Array nur über einen komparativen kurzen Zeitraum betrieben. In diesem speziellen Fall verzögerte sich die Inbetriebnahme, weil die Einholung der Installationsgenehmigungen für alle neun Stationen sehr zeitaufwändig war.

Für den Mini-Array führten die in AP1.2 beschriebenen technischen Einschränkungen zu erheblichen Datenlücken, die durch die mit dem Mini-Array-Design verbundenen Wartungsanforderungen (Batteriebetrieb, lokale Datenspeicherung usw.) verbunden waren. Das für das Mini-Array gewählte Design erforderte einen Besuch der Stationen alle drei bis vier Monate, was durch das KIT aufgrund der Entfernungen nicht gewährleistet werden konnte

Im Gegensatz dazu sind die betrieblichen Einschränkungen bei seismischen Standard-Stationen, die über das Stromnetz versorgt werden, wie WBRU, FRIE, BUCH oder SIEM, minimal und erfordern in der Regel nur einen Standortbesuch pro Jahr. Dies gilt auch für die DAS-Station, die jedoch gelegentlich Hardware-Wartung und kurze Unterbrechungen der Erfassung erfordert.

Höhere Anforderungen gelten auch für autonome Stationen wie FORS, die zweimal von Vandalismus heimgesucht wurden und wetterbedingt Probleme mit der Stromversorgung hatten. Diese Erfahrungen machen deutlich, wie wichtig eine sorgfältige Planung der Stationsanforderungen unter Berücksichtigung von Umgebungsfaktoren wie Sicherheit und Stromversorgung ist, um einen zuverlässigen und kontinuierlichen Betrieb zu gewährleisten.

Eine wesentliche betriebliche Einschränkung im Zusammenhang mit der DAS-Technologie ist die Behandlung der Daten. Die hohe räumliche und zeitliche Abtastung der Datensätze erfordert die Übertragung, Verarbeitung und mögliche Speicherung von Datenströmen, die mit der Länge der abgefragten Glasfaser skalieren. Für das Experiment in der Schäftlarnstraße sind dies 825 kB/s/km. Die von Azzola et al. (2023) und Azzola & Gaucher (2024a) veröffentlichten Ergebnisse eines sechsmonatigen Überwachungszeitraums zeigen, dass die Anbindung des DAS-Systems an eine Cloud-Lösung für die Datenspeicherung und -verarbeitung - wie das vorgeschlagene Microsoft Azure-basierte Überwachungssystem - es ermöglicht, die großen Datenmengen zu behandeln und einen seismischen Katalog auf automatisierte Weise zu erstellen.

Wirtschaftliche Aspekte

Aus betrieblicher Sicht müssen die Vorteile der verschiedenen Messstationen für die seismische Überwachung gegen die Installations- und Wartungskosten abgewogen werden. Die im vorigen Kapitel aufgeführten Aspekte beeinflussen auch die Wartungs- und Installationskosten der verschiedenen Stationen. Weitere Einzelheiten zu diesen Kosten sind in Azzola & Gaucher (2024b) enthalten. Obwohl es sich bei diesen Preisen um Richtwerte handelt, geben sie eine ungefähre Größenordnung an und dienen als Grundlage für künftige Initiativen.

Die Studie zeigt, dass die mit der DAS-Station Buchenhain verbundenen Kosten ~ 8 -mal höher sind als die für das Mini-Array geschätzten Kosten und ~ 20 -mal höher als die für eine Oberflächen-Seismometer Station. Diese Kosten werden größtenteils ($\sim 40\%$) vom Kaufpreis einer DAS-System und in geringerem Maße von den Kosten für Bohr- und Grabungsarbeiten ($\sim 20\%$) dominiert. Der Kauf des Kabels macht nur 5 % des Gesamtpreises aus. Die Interoperabilität des Systems zwischen verschiedenen Messstandorten ist jedoch ein wichtiger Faktor, der berücksichtigt werden muss: Das fest installierte Sensorelement ist das Kabel, das einen geringen Teil der Kosten ausmacht. Die Anschaffung des DAS-Systems kann als eine langfristige Investition betrachtet werden. Die im

Experiment in der Schäftlarnstraße erwogene Lösung (temporäre Vermietung eines DAS- Systems) ist nur kurzfristig vorteilhaft, da die Kaufkosten nach 13 Monaten Mietdauer ausgeglichen sind. Die Verlegung des Kabels in der Injektionsbohrung TH3 erfolgte im Rahmen der Zusammenarbeit zwischen Geothermie Allianz Bayern und Technische Universität München. Die damit verbundenen Kosten werden in dieser Studie nicht bewertet.

Die DAS-Station hat auch die höchsten Wartungskosten unter den untersuchten Lösungen. Die Wartungskosten sind hauptsächlich auf die jährlichen Kosten für die Wartung und das Update des Systems zurückzuführen. Die Datenarchivierung und -verarbeitung, z. B. über Microsoft Azure im Falle des Experiments in der Schäftlarnstraße, verursacht zusätzliche Kosten, die je nach Datenfluss und aufzubewahrendem Volumen variieren. Gegebenenfalls kann auch Downsampling angewandt werden, um die Menge der übertragenen Daten zu reduzieren. So kann beispielsweise die Speicherung aller DAS-Datensätze, die mit 500 Hz abgetastet wurden, aus betrieblicher Sicht irrelevant sein.

Zusammenfassung

Die in diesem Arbeitspaket beschriebenen Ergebnisse unterstreichen die Bedeutung der Auswahl von Messstandorten in Bezug auf das Überwachungsziel und der sorgfältigen Planung der Station (einschließlich einer angepassten Stromversorgung, Schutz vor der Betriebsumgebung, Ankopplung des Sensors). Dies sind betriebliche Zwänge, die für alle Messstandorte und -methoden gelten, unabhängig von der verwendeten Methode. Der Kontrast zwischen den Überwachungsergebnissen für die verschiedenen Messmethoden sollte bestenfalls unabhängig von diesen praktischen Aspekten analysiert werden.

Die Fähigkeiten zur Aufzeichnung und Detektion der seismischen Signale werden im Hinblick auf die mit den verschiedenen Instrumenten beobachteten Signal-Rausch-Verhältnisse (SNRs) analysiert. Diese Analyse basiert auf dem während des Projekts erstellten Katalog seismischer Ereignisse, wobei die meisten der beobachteten seismischen Aktivitäten in der Nähe der Standorte Oberhaching und Unterhaching auftraten. Die Positionierung der SIEM-Station in einem Bohrloch war nur von begrenztem Nutzen, vermutlich aufgrund der schlechten Ankopplung des Sensors an den Boden, was zu einer geringeren Empfindlichkeit gegenüber seismischen Signalen führte. Für die SIEM-Station wäre mehr Aufwand erforderlich gewesen (z. B. Reinigung des Bohrlochs, Planung einer besseren Ankopplung durch Zugabe von Glasperlen...). Die Anwendung von Beamforming auf die Mini-Array-Aufzeichnung führte im Allgemeinen zu höheren SNRs im Vergleich zur Verwendung eines Bandpassfilters auf dem SIEM-Bohrlochsensor. Die Schätzungen des Rückazimuts (BAZ) aus dem Mini-Array stimmen im Allgemeinen mit den Standorten des Seismometer-Netzes überein. Die Ergebnisse werden durch betriebliche Probleme beeinflusst, und eine geringere Abhängigkeit von der Wartung der Station durch das KIT hätte zu einer besseren Leistung des Mini-Arrays beigetragen.

Die Analyse der DAS-Daten zeigt das Potenzial des Einsatzes der Technologie bei Kabeln, die in Bohrlöchern verlegt werden, entweder von einer Überwachungsbohrung oder hinter der Verrohrung einer Produktionsbohrung aus. Die Fallstudie am Geothermie-Standort Schäftlarnstraße zeigt einen wichtigen Beitrag zur Erkennung seismischer Ereignisse, der im Vergleich zu Oberflächenmessungen eine höhere Empfindlichkeit bei minimalen Betriebseinschränkungen ermöglicht. Darüber hinaus hat sich DAS als nützlich für die Abschätzung der seismischen Quelleigenschaften an den beiden untersuchten Standorten Buchenhain und Schäftlarnstraße erwiesen und zur Ereignislokalisierung beigetragen. Unsere Analysen zeigen, dass es dennoch ratsam ist, für die Kalibrierung von DAS-Messungen zumindest zeitweise ein Seismometer parallel zu einem DAS-Messstandort zu installieren. Für die Ereignislokalisierung unterstreicht das Experiment in der Schäftlarnstraße eine Einschränkung bei der Anwendung der DAS-Technologie auf eine einzelne Vertikalbohrung aufgrund ihrer unidirektionalen Empfindlichkeit. Diese Einschränkung kann durch ein gemischtes Design

(Oberfläche/in Bohrung), wie es in Buchenhain installiert wurde, adressiert werden. Außerdem ermöglicht der reiche Frequenzgehalt und die hohe räumlich-zeitliche Abtastung der DAS-Daten wichtige Perspektiven in Bezug auf die Datenverarbeitung, die derzeit noch Gegenstand der wissenschaftlichen Entwicklung sind und im Rahmen des INSIDE-Projekts nicht alle getestet wurden. Darüber hinaus können GFK die Erfassung verschiedener Datentypen, wie z.B. statische Temperatur- und Dehnungsprofile, erleichtern, was ihre Überwachungsmöglichkeiten über rein seismologische Anwendungen hinaus erweitert.

2.1.5.2 AP5.2: Integration Deformationsdaten und Kosten/Nutzenanalyse

In Erweiterung der ursprünglich für AP5.2 vorgesehenen Kosten-Nutzen-Analyse wurde eine umfassende Konzeptstudie ausgearbeitet. Sie diskutiert die aus den auf dem Abschlusstreffen zum INSIDE-Projekt am 07. Mai 2024 in Pullach präsentierten Ergebnissen folgenden Konsequenzen für die Bestimmung des Einwirkungsbereichs und seiner zeitlich veränderlichen Grenzen. Es wird aufgezeigt, dass die derzeitige Vorgehensweise nicht geeignet ist, die Vorgaben der Einwirkungsbereichs-Bergverordnung zu erfüllen und dass das für diese Aufgabe notwendige Messkonzept grundsätzlich neu gedacht werden muss. Basierend auf numerischen Modellierungen für die Standorte Pullach und Baierbrunn sowie qualitativer Überlegungen zur Oberflächenwirkung tiefliegender Deformationsquellen wurden Szenarien zur Überlagerung der Einwirkungen aller aktiven Geothermieanlagen in München bei einer Betriebszeit von 50 Jahren entwickelt. Die wesentlichen Erkenntnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die derzeitigen Wiederholungsnivellements in unmittelbarem Umkreis der Bohrungen einer Geothermieanlage sind zu kurz, um die räumlich über mehrere Kilometer ausgedehnten Hebungs-/Senkungsgebiete zu erfassen, da die verwendeten Höhenanschlusspunkte innerhalb des Deformationsgebietes liegen.
- Der als stabil angenommene Höhenanschlusspunkte des Nivellemente sollte außerhalb der 1 mm-Linie der Deformation liegen. Für den Anschluss des Nivellementnetzes Schäftlarnstraße würde somit eine zusätzliche Linie von ca. 22 km Länge benötigt, was abgesehen von hohen Kosten – einen negativen Einfluss auf die Messgenauigkeit im Bereich des Standortes hätte. Unter diesem Aspekt ist die Beauftragung individueller Messungen durch jeden einzelnen Betreiber wirtschaftlich nicht sinnvoll.
- Aufgrund des Zusammenhanges zwischen Tiefe der Deformationsquellen und der räumlichen Ausdehnung der Oberflächeneffekte kommt es zu einer Überlagerung der prognostizierten Einwirkungsbereiche bestehender Geothermiebohrungen im Großraum München. Dieser Effekt wird sich mit dem geplanten Ausbau der Geothermie weiter verstärken. Die Trennung der Einwirkungsbereiche und deren Zuordnung zu einzelnen Betreibern ist nicht mehr zweifelsfrei gegeben. Der nach den Vorgaben der Markscheider-Bergverordnung messbare Nullrand des gemeinsamen Einwirkungsbereichs der bisherigen Anlagen hat bereits eine Ausdehnung von mehr als 30 Kilometern.

Die Erfassung des großräumigen Einwirkungsbereiches, der durch die operative Wärmegewinnung der Geothermieanlagen im Großraum München hervorgerufen wird, ist eine flächenhafte Aufgabe, die nicht durch lokale Nivellementsnetze erfüllt werden kann. Wir empfehlen, zu diesem Zweck die Produkte des Bodenbewegungsdienstes Deutschland (BBD) und des European Ground Motion Service (EGMS) heranzuziehen. In AP3.3 konnte gezeigt werden, dass die als Karten und Zeitreihen vorliegenden Ergebnisse einer multi-temporalen interferometrischen Auswertung von Radarszenen die Genauigkeitsvorgaben der Markscheider-Bergverordnung weitgehend erfüllen und

Bodenbewegungsereignisse ab einem Schwellwert von 5mm zuverlässig mit überlegener räumlicher und zeitlicher Auflösung erfassen.

Stabile Referenzpunkte für das Nivellement müssen sehr weit außerhalb des Münchner Stadtgebietes angelegt werden und stehen bei der Auffahrung zukünftiger Geothermiebohrungen in der Gefahr, wieder in Einwirkungsbereiche zu geraten. Zur Vermeidung sehr langer Nivellementslinien ist die Anlage von Referenzpunkten innerhalb des Stadtgebietes zu empfehlen, deren Stabilität von einem absoluten Messverfahren kontrolliert wird, d. h. einem Verfahren, das an eine globale Referenz anschließt. Hierzu bieten sich die Globalen Satelliten-Navigations-Verfahren (GNSS) an. Die Erfahrungen mit den in Rahmen von INSIDE angelegten GNSS-Stationen belegen, dass die Messgenauigkeit ausreicht, um als Anschlusspunkte Verwendung zu finden.

Weiterhin wird empfohlen, nach Art der Leitnivellements in den Bergbaugebieten Nordrhein-Westfalens periodisch Wiederholungsnivellements im Stadtgebiet München und definierten Außenbereichen durchzuführen. Neben der Aufdeckung von Trends oder Systematiken in den PSI-Karten der Bodenbewegungsdienste können solche über Dekaden durchgeführten Nivellements auch zur Sicherstellung der Kontinuität bei möglichen zukünftigen Veränderungen des Radarsatellitensystems dienen. Wegen der langsam voranschreitenden thermischen Prozesse im Untergrund und der auf Nachhaltigkeit angelegten europäischen Satellitenmission Sentinel-1 scheint ein Wiederholungsintervall von 10 Jahren angemessen. Wegen der großen räumlichen Ausdehnung der erwarteten Deformationserscheinungen an der Erdoberfläche sollte geprüft werden, ob – außer an neu eingerichteten Bohrplätzen – die Anlage spezieller Neupunkte zwingend erforderlich ist. Stattdessen sollte auf eine repräsentative Auswahl bereits existierender Messpunkte der Stadtvermessung zurückgegriffen werden. Infolgedessen wird empfohlen, bei dieser Aufgabe die Landes- und Stadtvermessung hinzuzuziehen. Es ist zudem zu prüfen, ob die Durchführung der Geothermie-bedingten, stadtweiten Wiederholungsnivellements in den Aufgabenbereich der Vermessungsämter zur Sicherstellung des geodätischen Raumbezugs fällt. Ebenso wäre zu prüfen, ob und in welcher Form sich die Betreiber von Geothermie-Anlagen an solchen Leitnivellements beteiligen. Denkbar wäre ein Modell in Anlehnung an das seismische Betreiber Netzwerk.

Weitere Details finden Sie in Westerhaus et al. (2024b).

2.1.5.3 AP5.3: Interpretation der Seismizität und der In-situ Daten hinsichtlich betrieblicher Abläufe und geologisch / tektonischer Gegebenheiten

Aufgrund der sehr geringen Anzahl seismischer Ereignisse, die an den Standorten Pullach und Schäftlarnstraße aufgezeichnet wurden (s. Kap. 2.1.3.1), ist es nicht möglich, diese Aufgabe zuverlässig zu erfüllen.

Das offensichtliche Fehlen einer abgebildeten Störung am Standort Pullach (s. Kap. 2.1.4.2) könnte die Tatsache erklären, dass dort fast keine Seismizität aufgezeichnet wird. Die wenigen schwachen Ereignisse in der Nähe von TH3 könnten auf Abkühlungseffekte der Matrix in der Nähe des Injektionsintervalls zurückzuführen sein.

2.1.5.4 AP5.4: Vergleich der numerischen Modellierungsergebnisse und der beobachteten Daten

Die Reservoirmodellierung in Pullach (s. Kap. 2.1.4.2) steht im Einklang mit der Tatsache, dass an diesem Standort keine Seismizität beobachtet wird und dass die Bodendeformation an der Oberfläche vernachlässigbar und in den Subsidenz-/Hebungsmessungen nicht sichtbar ist (s. Kap. 2.1.3.3).

2.1.5.5 AP5.5: Verfahrensentwicklung zur Integration der Ergebnisse in ein dynamisches RMS Reservoir-Management-System und zum Aufbau der technischen Umsetzungen in die Leitzentralen

Dieses Thema wurde von der SWM geleitet, aber das KIT beteiligte sich maßgeblich an dem Konzept, das in der folgenden Konferenzbeiträge entwickelt wurde:

- Gaucher, E., Hansinger, M., Goblirsch, P., Azzola, J., & Thiemann, K. (2022). Towards a geothermal reservoir management system. **Presented at the European Geothermal Congress 2022**, Berlin, Germany. <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000152177>.
- Bohnsack, D., Meinecke, M., Thiemann, K., Zosseder, K., & Gaucher, E. (2023). Risk management of induced seismicity in the life cycle of a hydro-geothermal heating plant in an urban area (Vol. 2023, pp. 1–5). **Presented at the 84th EAGE Annual Conference & Exhibition**, European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023101256>.

Eine deutsche Beschreibung findet sich im INSIDE-Abschlussbericht der SWM.

2.1.5.6 AP5.6: Mögliche operative Empfehlungen

Angesichts der geringen beobachteten Seismizität ist es schwierig, aus betrieblicher Sicht etwas für den Standort Schäftlarnstraße vorzuschlagen. Der Betrieb in Pullach scheint unverändert weitergeführt werden zu können. Die Verwendung der Ergebnisse aus allgemeinerer Sicht wird in Kapitel 2.4 beschrieben.

Eine deutsche Beschreibung findet sich im INSIDE-Abschlussbericht der SWM.

2.1.6 AP6: KOMMUNIKATION (LEITUNG IEP)

Das KIT-Team hat sich an der Gestaltung des INSIDE-Flyers, der INSIDE-Website (<https://inside-geothermie.de/>) und deren Inhalt beteiligt. Es hat außerdem an Video-/Film-/Radiobeiträgen mitgewirkt, mit denen das INSIDE-Projekt der breiten Öffentlichkeit (nicht-Wissenschaftler) vorgestellt werden sollte. Das KIT-Team nahm an mehreren wissenschaftlichen Kongressen und Workshops auf nationaler und internationaler Ebene teil und präsentierte das Projekt bei anderen Betreibern im Raum München und anderswo (z. B. ESG, OMV).

Einzelheiten zu den Veröffentlichungen sind in Kapitel 2.6 zu finden.

2.1.7 AP7: PROJEKTMANAGEMENT (LEITUNG KIT)

Das KIT war für die Projektleitung verantwortlich, wurde aber von den Projektleitern des IEP (P. Goblirsch) und der SWM (K. Thiemann) unterstützt.

Die Projektvereinbarung zwischen den Partnern wurde schnell zu Beginn des Projekts unterzeichnet.

Es wurden regelmäßige Projektmanagement-Sitzungen organisiert, um den technischen und finanziellen Stand der Projektaufgaben zu besprechen. Sie dienten auch der Vorbereitung der Projektfortschrittssitzungen, die alle sechs Monate stattfanden und zu denen alle Mitarbeiter der Partner, die in der letzten oder nächsten Projektphase beteiligt waren, eingeladen wurden. Insgesamt fanden neun dieser Treffen statt, darunter ein Kick-off-Meeting (03.12.2019) und das Projektabschlusstreffen (07.05.2024). Mit Ausnahme des Projektabschlusstreffens wurden alle Treffen mit Protokollen dokumentiert.

2.1.8 LITERATURVERZEICHNIS

- Altmann, J.B., Müller, T.M., Müller, B.I.R., Tingay, M.R.P., Heidbach, O., 2010. Poroelastic contribution to the reservoir stress path. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 47, 1104–1113. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2010.08.001>
- Arbeitsgruppe „Induzierte Seismizität“ FKPE e.V., 2012. Empfehlungen zur Überwachung induzierter Seismizität: Positionspapier des FKPE. DGG - Mitteilung 17–31.
- Azzola, J., Gaucher, E., 2025. INSIDE seismic monitoring: Methodology and results. Karlsruhe Institute of Technology. <https://doi.org/10.5445/IR/1000177804>
- Azzola, J., Gaucher, E., 2024a. Seismic Monitoring of a Deep Geothermal Field in Munich (Germany) Using Borehole Distributed Acoustic Sensing. *Sensors* 24, 3061. <https://doi.org/10.3390/s24103061>
- Azzola, J., Gaucher, E., 2024b. INSIDE seismic monitoring approaches: Capabilities versus costs. Karlsruhe Institute of Technology. <https://doi.org/10.5445/IR/1000177812>
- Azzola, J., Gaucher, E., 2024c. P- and S-wave velocity models for the INSIDE study area. Karlsruhe Institute of Technology. <https://doi.org/10.5445/IR/1000177806>
- Azzola, J., Gaucher, E., 2023. Seismisches Netzwerk INSIDE: Aufbau und Inbetriebnahme des Mini-Arrays. Karlsruher Institut für Technologie. <https://doi.org/10.5445/IR/1000177794>
- Azzola, J., Gaucher, E., 2021a. Seismisches Netzwerk INSIDE: Aufbau und Inbetriebnahme, INSIDE Projekt. Karlsruher Institut für Technologie. <https://doi.org/10.5445/IR/1000177799>
- Azzola, J., Gaucher, E., 2021b. Sparker survey at Schäftlarnstraße: Design, Field acquisition and Data processing. Karlsruhe Institute of Technology. <https://doi.org/10.5445/IR/1000177800>
- Azzola, J., Gaucher, E., 2020. Seismisches Netzwerk INSIDE: Planungs- und Designphase. Karlsruher Institut für Technologie. <https://doi.org/10.5445/IR/1000177798>
- Azzola, J., Thiemann, K., Gaucher, E., 2023. Integration of distributed acoustic sensing for real-time seismic monitoring of a geothermal field. *Geothermal Energy* 11, 30. <https://doi.org/10.1186/s40517-023-00272-4>
- Boatwright, J., 1980. A spectral theory for circular seismic sources; simple estimates of source dimension, dynamic stress drop, and radiated seismic energy. *Bulletin of the Seismological Society of America* 70, 1–27. <https://doi.org/10.1785/BSSA0700010001>
- Cacace, M., Blöcher, G., 2015. MeshIt—a software for three dimensional volumetric meshing of complex faulted reservoirs. *Environ Earth Sci* 74, 5191–5209. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4537-x>
- Carman, P.C., 1956. Flow of gases through porous media. Butterworths Scientific Publications, London.
- Chen, Y., Zhou, C., Jing, L., 2009. Modeling coupled THM processes of geological porous media with multiphase flow: Theory and validation against laboratory and field scale experiments. *Computers and Geotechnics* 36, 1308–1329. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2009.06.001>
- 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>

- Department of Earth and Environmental Sciences, Geophysical Observatory, University of Munchen, 2001. BayernNetz (BH) seismic network. International Federation of Digital Seismograph Networks. <https://doi.org/10.7914/SN/BW>
- Dussel, M., Lüschen, E., Thomas, R., Agemar, T., Fritzer, T., Sieblitz, S., Huber, B., Birner, J., Schulz, R., 2016. Forecast for thermal water use from Upper Jurassic carbonates in the Munich region (South German Molasse Basin). *Geothermics* 60, 13–30. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.10.010>
- Egert, R., 2023. Numerische Vorhersage betriebsbedingter Reservoir- und Oberflächenveränderungen am Standort Pullach. Karlsruher Institut für Technologie. <https://doi.org/10.5445/IR/1000177809>
- Egert, R., 2022. Vergleich von Moose/TIGER und Comsol Multiphysics anhand eines THM Modells des Standortes Pullach. Karlsruher Institut für Technologie. <https://doi.org/10.5445/IR/1000177808>
- Egert, R., Gaucher, E., Savvatis, A., Goblirsch, P., Kohl, T., 2022. Numerical determination of long-term alterations of THM characteristics of a Malm geothermal reservoir during continuous exploitation. Presented at the European Geothermal Congress 2022, Berlin, Germany.
- Egert, R., Gholami Korzani, M., Held, S., Kohl, T., 2021. Thermo-hydraulic Modeling of an Enhanced Geothermal System in the Upper Rhine Graben using MOOSE/TIGER, in: World Geothermal Congress. Presented at the World Geothermal Congress 2020+1, Reykjavik, Iceland.
- Egert, R., Korzani, M.G., Held, S., Kohl, T., 2020. Implications on large-scale flow of the fractured EGS reservoir Soultz inferred from hydraulic data and tracer experiments. *Geothermics* 84, 101749. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2019.101749>
- Fadel, M., Reinecker, J., Bruss, D., Moeck, I., 2022. Causes of a premature thermal breakthrough of a hydrothermal project in Germany. *Geothermics* 105, 102523. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102523>
- Gaucher, E., Egert, R., 2023. Change of the THM properties of a Malm geothermal reservoir under present and future exploitation schemes. Presented at the EGU General Assembly, Vienna, Austria.
- Gaucher, E., Egert, R., 2022. Statisches Geomechanisches Modell: Schäftlarnstraße, Pullach, Baierbrunn, INSIDE Projekt. Karlsruher Institut für Technologie. <https://doi.org/10.5445/IR/1000177807>
- Gholami Korzani, M., Held, S., Kohl, T., 2020. Numerical based filtering concept for feasibility evaluation and reservoir performance enhancement of hydrothermal doublet systems. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 190, 106803. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106803>
- 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>
- Lindsey, N.J., Rademacher, H., Ajo-Franklin, J.B., 2020. On the Broadband Instrument Response of Fiber-Optic DAS Arrays. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 125. <https://doi.org/10.1029/2019JB018145>
- Rudnicki, J.W., 1986. Fluid mass sources and point forces in linear elastic diffusive solids. *Mechanics of Materials* 5, 383–393. [https://doi.org/10.1016/0167-6636\(86\)90042-6](https://doi.org/10.1016/0167-6636(86)90042-6)

- Seithel, R., Steiner, U., Müller, B., Hecht, C., Kohl, T., 2015. Local stress anomaly in the Bavarian Molasse Basin. *Geothermal Energy* 3, 77. <https://doi.org/10.1186/s40517-014-0023-z>
- Wathelet, M., Chatelain, J.-L., Cornou, C., Giulio, G.D., Guillier, B., Ohrnberger, M., Savvaidis, A., 2020. Geopsy: A User-Friendly Open-Source Tool Set for Ambient Vibration Processing. *Seismological Research Letters* 91, 1878–1889. <https://doi.org/10.1785/0220190360>
- Westerhaus, M., Ambrus, B., 2024. INSIDE: Einrichtung eines geodätischen Beobachtungsnetzes, INSIDE Projekt. Karlsruhe Institut für Technologie. <https://doi.org/10.5445/IR/1000177881>
- Westerhaus, M., Ambrus, B., Tsantopoulos, E., Even, M., Almassian, C., 2024a. INSIDE: Analyse von terrestrischen und satellitengestützten Deformationsmessungen, INSIDE Projekt. Karlsruhe Institut für Technologie. <https://doi.org/10.5445/IR/1000177880>
- Westerhaus, M., Kutterer, H., Ambrus, B., 2024b. Konzept für ein Integriertes Geodätisches Beobachtungssystem zur Überwachung des Erweiterten Einwirkungsbereiches im Raum München, INSIDE Projekt. Karlsruhe Institut für Technologie. <https://doi.org/10.5445/IR/1000177822>
- Ziegler, M.O., Heidbach, O., 2020. The 3D stress state from geomechanical–numerical modelling and its uncertainties: a case study in the Bavarian Molasse Basin. *Geothermal Energy* 8, 65. <https://doi.org/10.1186/s40517-020-00162-z>

2.2 DIE WICHTIGSTEN PUNKTE DES ZAHLENMÄßIGEN NACHWEISES

2.2.1 PERSONAL

Aus dem Kostennachweis ist ersichtlich, dass die Personalkosten einen großen Teil des Budgets einnahm. Dies betraf Mitarbeiter für die Koordination des Gesamtprojekts sowie für die technischen und wissenschaftlichen Tätigkeiten. An diesem Projekt, arbeiteten ein wissenschaftlicher Mitarbeiter (Vollzeit) über die gesamte Dauer des Projekts (4 Jahre und 8 Monaten) sowie zwei weitere wissenschaftliche Mitarbeiter (Vollzeit) über drei Jahre. Außerdem arbeiteten zwei Doktoranden (Teilzeit 75%) jeweils über fast drei Jahre am Projekt, sowie zwei studentische Praktikanten und Hilfwissenschaftler.

2.2.2 GERÄTE UND INVESTITIONEN

Der zweitgrößte Teil des Projektbudgets betrafen Geräte und Investitionen. Fünf seismologische Stationen (darunter eine Bohrlochstation), vier GNSS-Stationen, ein DAS-Interrogator sowie ein DTSS-Interrogator wurden gekauft. Ebenfalls wurden die zugehörigen Ausrüstungsgegenstände für Erfassungs- und Installations angeschafft (z.B. Gehäuse, Sensor- oder Glasfaserkabel, elektrische Komponenten). Nach Abschluss des Projekts werden die Geräte entweder vor Ort im Einsatz bleiben oder an andere Lokationen zur Fortzusetzung der seismische und geodätische Überwachung des INSIDE-Gebiets versetzt.

2.2.3 VERGABE VON AUSTRÄGEN

Der Zugang zu den Daten des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) sowie die Wartung oder das Upgrade der Geräte (z. B. DAS- Interrogator) waren die Hauptkosten dieser Position.

2.2.4 MIETEN UND RECHNER

Die 6-monatige Miete des DAS-Interrogators für die Echtzeit-DAS-Überwachung bei SLS machte den größten Teil dieser Kostenstelle aus.

2.3 NOTWENDIGKEIT UND ANGEMESSENHEIT DER GELEISTETEN ARBEITEN

Das Inside-Projekt verfolgte folgende Zielsetzung: 1) die Entwicklung eines Systems zur Steuerung geothermischer Reservoire auf Grundlage von 2) Echtzeitbeobachtungen und numerischen Modellen an ausgewählten Standorten sowie 3) die Einrichtung innovativer seismischer und geodätischer Überwachungssysteme. Diese Punkte wurde sowohl in der Projektstruktur wie auch in den definierten Aufgaben gespiegelt.

Die Kooperationsarbeit mit den Industriepartnern war nicht nur für den Wissenstransfer von der Universität zu den Geothermie- Betreibern und umgekehrt absolut notwendig, sondern auch, um Lösungen in einem realistischen Szenario umzusetzen und nützliche Ergebnisse zu liefern.

2.4 VORAUSSICHTLICHER NUTZEN UND VERWERTBARKEIT DER ERGEBNISSE IM SINNE DES FORTGESCHRIEBENEN VERWERTUNGSPLANES

2.4.1 PERSPEKTIVEN MIT DEM SEISMISCHEN NETZWERK

Die Ergebnisse des Projektes zeigen, dass ein seismisches Messnetz im Rahmen von INSIDE installiert wurde, welches das bestehende Messnetz ergänzt. Dieses Messnetz wird auch weiterhin betrieben werden. Die INSIDE-Stationen werden wieder im Großraum München in das größere BetreiberNetz und/oder das von der GOF betriebene Seismometer-Netz integriert und genutzt.

Die in Kapitel 2.1.5.1 dargestellten Ergebnisse sowie die in Kapitel 2.6 zitierte Literatur zeigen die Machbarkeit und die Vorteile eines solchen hybriden "DAS / Seismometer" Netzwerks. Damit wird eine standardmäßigere und systematischere Anwendung der DAS-Technologie für die Überwachung tiefer geothermischer Reservoire unterstützen. Unsere Ergebnisse zeigen, dass die gemeinsame Instrumentierung mehrerer Bohrungen, die auch durch oberirdische Telekommunikationsnetze verbunden sein können, ein Netzwerk von Seismometern an der Oberfläche ergänzen und ein hohes Potenzial für die Überwachung geothermischer Reservoire in städtischen Gebieten bieten. Dieses Forschungsthema wird im Rahmen des BMWK-Projekts GFK-Monitor weitergeführt. Darüber hinaus haben die im Rahmen des Projekts veröffentlichten Ergebnisse (s. Kap. 2.6) das starke Interesse von Unternehmen wie OMV oder Vulcan Energy für die Entwicklung ihrer zukünftigen Geothermie-Projekte geweckt. Dasselbe Interesse findet sich auch in dem BMWK-Projekt namens AGENS. Dies zeigt die mögliche Nutzung der Ergebnisse durch die Industrie und unterstützt den Wissenstransfer nach Abschluss des Projektes.

Neben der Verdichtung des Messnetzes zeigen die Ergebnisse auch, dass ein verbessertes Geschwindigkeitsmodell von entscheidender Bedeutung ist, um Ungenauigkeiten bei der Lokalisierung des Ereignisses zu vermeiden. Das Projekt betont auch die Bedeutung der Planung von Messkampagnen in neuen Bohrungen (VSP, sonic logs). In diesem Zusammenhang wird die Verfeinerung des Geschwindigkeitsmodells in zukünftigen Arbeiten fortgesetzt, mit dem Ziel, neue Beobachtungsdaten zu produzieren und zu integrieren.

2.4.2 PERSPEKTIVEN MIT DER RESERVOIRMODELLIERUNG

Zukünftig könnte die Analyse der Slip-Tendency (s Kap. 2.1.4) bereits dann durchgeführt werden, wenn ein Strukturmodell des Untergrunds vorliegt und bevor der Betreiber der geothermischen Anlage eine Bohrung abteuft. Sie könnte helfen, den Bohrfad der geothermischen Bohrungen zu optimieren und/oder die Lage der Injektions- bzw. Produktionsbohrungen auszuwählen mit dem Ziel, Verwerfungszonen mit hohen Slip-Tendency Werten zu vermeiden. Trotz der mit diesem Ansatz behafteten Unsicherheiten – die nur bis zu einem gewissen Grad berücksichtigt werden können – lassen sich damit die a priori günstigsten Bedingungen zur Verminderung einer möglichen induzierten Seismizität ermitteln. In Verbindung mit der thermohydrmechanischen Modellierung des geothermischen Reservoirs während seines Betriebs besitzt eine zusätzliche „Prognose“-Komponente. Dieser Aspekt steht im Mittelpunkt der in diesem Projekt eingeleiteten Entwicklungen zur Kopplung der THM-Modellierung mit der induzierten Seismizität. Diese Analysen haben ein direktes Interesse für zukünftige Feldentwicklungen der Projektpartner, aber auch für die Entwicklung zukünftiger geothermischer Standorte sinnvoll. Die hier begonnene Forschung wird fortgesetzt.

2.4.3 PERSPEKTIVEN MIT DEM RESERVOIR MANAGEMENT SYSTEM

Das sechsmonatige Monitoring-Experiment mit DAS entlang der Injektionsbohrung TH3 in der Geothermieanlage Schäftlarnstraße hat gezeigt, dass es möglich ist, die Daten eines solchen seismischen Monitoring-Tools in Echtzeit zu integrieren und die damit verbundenen Daten auch zu verarbeiten (s. Kap. 2.1.1.1, 2.1.2 und 2.1.5.5). Es wurde gezeigt, dass dies innerhalb der Infrastruktur des Betreibers (hier der SWM) entwickelt und implementiert werden kann, so dass ein direkter Zugriff durch den Betreiber – ohne Zwischenstellen, die die Prozesse verlangsamen würden– auf die Messungen zur Weiterverarbeitung und Integration in ein Reservoir Management System möglich ist.

Das Potential des vorgeschlagenen Datenmanagementsystems (s. Kap. 2.1.2) sowie des konzipierten Schemas für ein neues Reservoir-Managementsystem (s. Kap. 2.1.5.5) werden zukünftig nützlich sein, z.B. für das laufende Projekt „Reservoirmanagementmodell Molassebecken (ReMol)“ unter der Führung des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (Referat 104). Die Partner des ReMol Projekts sind über die Ergebnisse von INSIDE informiert, einige ihrer Vertreter nahmen an der Abschlusskonferenz des INSIDE-Projekts teil.

2.4.4 GEODÄTISCHE UND FERNERKUNDLICHE PERSPEKTIVEN

Auf der Basis der auf dem Abschlusstreffen im Mai 2024 und im Arbeitsbericht vorgestellten Ergebnisse und der daraus folgenden Konsequenzen für die Bestimmung des Einwirkungsbereichs und seiner zeitlich veränderlichen Grenzen wurde eine Konzeptstudie erstellt (s. Kap. 2.1.5.2). Es wird darin aufgezeigt, dass die derzeitige Vorgehensweise nicht geeignet ist, die Vorgaben der Einwirkungsbereichs-Bergverordnung im Hinblick auf die Erfassung von Oberflächendehformationen zu erfüllen und dass das für diese Aufgabe notwendige Messkonzept grundsätzlich neu gedacht werden muss. Die Grundzüge für ein modernes, integriertes geodätisches Messkonzept, das neben dem Nivellement auch permanente GNSS-Stationen einschließt und den Produkten der Bodenbewegungsdienste eine besondere Rolle zuweist, werden formuliert und diskutiert.

Die Studie wurde nach vorausgehender Einsichtnahme durch die Projektbeteiligten Anfang Oktober 2024 fertiggestellt und den Partnern zur Verfügung gestellt. Seitens SWM und IEP ist geplant, diese

auch weiteren Betreibern zur Kenntnis zu bringen und gemeinsam die zuständigen Behörden anzusprechen. Sollte diese Vorgehensweise Erfolg haben, so könnten die Projektergebnisse zu einer Kosteneinsparung und gleichzeitig zu einer erheblichen Verbesserung der Beobachtungslage und einer Steigerung der Verlässlichkeit bei der Bestimmung des Einwirkungsbereiches beitragen. Damit wäre ein unmittelbarer Nutzen für die zukünftige Arbeit der Projektpartner gegeben.

2.5 BEKANTGEWORDENE FORTSCHRITTE WÄHREND DES PROJEKTES AUF DEM GEBIET DES VORHABENS BEI ANDEREN STELLEN

Im Frühjahr 2022, kurz vor Ende der ursprünglich geplanten Projektlaufzeit, traten der Bodenbewegungsdienst Deutschland (BBD) sowie der European Ground Motion Service (EGMS) in die operationelle Phase. Diese Entwicklung war zu Beginn des Projektes INSIDE noch nicht vollständig absehbar. Wegen der großen Bedeutung dieser kostenfreien Dienste für das flächenhafte Monitoring von Bodenbewegungen wurde eine Untersuchung der über die Webportale der Dienste abrufbaren Produkte im Hinblick auf die Bestimmung des Einwirkungsbereiches durch die Geothermie im Großraum München für sehr wichtig erachtet. Diese Untersuchung wurde zusätzlich zu den ursprünglich beantragten Aufgaben des Teilprojektes Geodäsie durchgeführt; durch die zweimalige, Corona-bedingte Verlängerung des Projektes ergab sich der dazu notwendige zeitliche Spielraum.

Bei den beiden Bodenbewegungsdiensten handelt es sich um parallele Entwicklungen zur Implementierung und Nutzung der Geodaten-Infrastruktur des europäischen Erdbeobachtungsprogramm Copernicus. Der nationale Dienst wurde durch die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe implementiert und ist unter <https://bodenbewegungsdienst.bgr.de> erreichbar. Er basiert auf einer *Wide-Area-Analyse* der Sentinel-1 Daten, entwickelt und durchgeführt durch das DLR. Sie beinhaltet unter anderem eine blattschnittfreie und konsistente PSI-Analyse aller Deutschland überdeckenden SAR-Szenen sowie die Kalibrierung der Ergebnisse über eine deutschlandweite einheitliche Prozessierung der Daten von GNSS-Referenzstationen. Der europäische Dienst ist eine Entwicklung im Rahmen des Copernicus Landüberwachungsdienst (Copernicus Land Monitoring Service), an der die führenden Analysezentren in Europa beteiligt sind. Der Dienst verwendet landesweite PSI-Analysen der nationalen Datenzentren, die über publizierte und im Internet abrufbare Konzepte zu einer Gesamtlösung zusammengeführt werden (s. die Internetseite des EGMS <https://land.copernicus.eu/en>).

2.6 ERFOLGTE ODER GEPLANTE VERÖFFENTLICHUNGEN DES ERGEBNISSES

Die zahlreiche Öffentlichkeitsarbeit über das Projekt sowie der erzielten Ergebnisse richtete sich an verschiedene Zielgruppen.

2.6.1 TAGUNGSBEITRÄGE

Azzola, J., & Gaucher, E. (2023a). *Continuous seismic monitoring of a geothermal project using Distributed Acoustic Sensing (DAS): a case study in the German Molasse Basin*. Presented at the **EGU General Assembly**, Vienna, Austria. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-1292>.

Azzola, J., & Gaucher, E. (2023b). *Implementation and evaluation of Distributed Acoustic Sensing (DAS) for continuous seismic monitoring of geothermal fields in the Munich area (Germany)* (pp. S41E-0356). Presented at the **AGU Annual Meeting**, San Francisco, CA, USA. Retrieved from <https://agu.confex.com/agu/fm23/meetingapp.cgi/Paper/1248252>

- Azzola, J., & Gaucher, E. (2023c). *Monitoring local seismicity using a Distributed Fiber Optic Sensing (DFOS) station in the Munich region*. **Presented at the Deutsche Geophysikalische Gesellschaft**, Bremen, Germany.
- Azzola, J. (2022, December). *Distributed Fibre Optic Sensors, a geophysics tool for integrated monitoring of deep geothermal exploitation in the Munich area*. **Presented at the ITI-GeoT seminar**, University of Strasbourg, Strasbourg, France.
- Azzola, J., Gaucher, E., Bögelspacher, F., Baasch, R., Betzl, B., & Schulz, I. (2021). *INSIDE: Investigating the impact of geothermal exploitation in the Munich area - The induced seismicity perspective*. **Presented at the European Geothermal Workshop**, Karlsruhe, Germany.
- Azzola, J., Karamzadeh Toularoud, N., Gaucher, E., Forbriger, T., Widmer-Schmidrig, R., Bögelspacher, F., et al. (2022). *Comparison between Distributed Acoustic Sensing (DAS) and strain meter measurements at the Black Forest Observatory*. **Presented at the EGU General Assembly**, Vienna, Austria. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-6976>.
- Gaucher, E. (2019). *Well monitoring of seismicity and deformation within the INSIDE project (Greater Munich area)*. **Presented at the EAGE/BVG/FKPE Joint Workshop on Borehole Geophysics and Geothermal Energy**, Munich.
- Gaucher, E., & Egert, R. (2023). *Change of the THM properties of a Malm geothermal reservoir under present and future exploitation schemes*. **Presented at the EGU General Assembly**, Vienna, Austria. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-11877>.
- Gaucher, E., Azzola, J., Thiemann, K., Schulz, I., Steiner, U., Meinecke, M., & Dirner, S. (2020, November). *Active cross-well survey at geothermal site Schäftlarnstraße*. **Presented at the Deutscher Geothermie Kongress - Workshop F&E in der Praxis (Geothermieprojekt Schäftlarnstraße)** Stadtwerke München GmbH, Munich, Germany.
- Gaucher, E., Azzola, J., Meinecke, M., Betzl, B., Goblirsch, P., Baasch, R., et al. (2020, November). *The INSIDE research project - Investigating the relationship between seismicity, deformation and deep geothermal exploitation in the Greater Munich*. **Presented at the Deutscher Geothermie Kongress**, Stadtwerke München GmbH, Munich, Germany.
- Gaucher, E., Azzola, J., Meinecke, M., Poegl, T., Aures, G., Janke, U., et al. (2021, December). *Monitoring the long-term pump-tests at the Schäftlarnstraße geothermal field using Distributed Acoustic Sensing (DAS)*. **Presented at the Deutscher Geothermie Kongress**, Online.
- Habibi, R., Ulrich, T., Gabriel, A., Wassermann, J., & Gaucher, E. (2024). *Coupling of thermo-hydro-mechanical modeling with seismicity modeling in a faulted geothermal reservoir*. **Presented at the EGU General Assembly 2024**, Vienna, Austria. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu24-16775>.
- Habibi, R., Ulrich, T., Gabriel, A.-A., Wassermann, J., & Gaucher, E. (2023). *Coupling of thermo-hydro-mechanical modeling with seismicity modeling in a faulted geothermal reservoir*. **Presented at the European Geothermal Workshop**, Utrecht, The Netherlands.
- Karamzadeh Toularoud, N., Azzola, J., Gaucher, E., Forbriger, T., Widmer-Schmidrig, R., Bögelspacher, F., et al. (2022). *PSD analysis and seismic event detectability of Distributed Acoustic Sensing (DAS) measurements from several monitoring sites*. **Presented at the EGU General Assembly**, Vienna, Austria. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-8787>.
- Steiner, U. (2020, May). *Ein Jahr INSIDE - F&E zu Induzierter Seismizität und Bodendeformation bei Geothermie in München*. **Presented at the Wissenstransfer der Geothermie Allianz Bayern - Webinar**, Technical University of Munich, Munich, Germany.
- Thiemann, K. (2022, July). *F&E-Projekt INSIDE: Seismizität und Bodendeformation – Spannungsumlagerungen im Untergrund durch Tiefengeothermie*. **Presented at the Geothermie in der Praxis Workshop**, Technical University of Munich.

Ulrich, T., Habibi, R., Gabriel, A., Wassermann, J., Egert, R., & Gaucher, E. (2023). Combining 3D dynamic rupture modeling and thermo-hydro-geomechanical modeling towards physics-based induced earthquake simulations. **Presented at the SSA Annual Meeting**, San Juan, Puerto Rico.

2.6.2 KONFERENZ-ARTIKEL

Bohnsack, D., Meinecke, M., Thiemann, K., Zosseder, K., & Gaucher, E. (2023). Risk management of induced seismicity in the life cycle of a hydro-geothermal heating plant in an urban area (Vol. 2023, pp. 1–5). **Presented at the 84th EAGE Annual Conference & Exhibition**, European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023101256>

Egert, R., Gaucher, E., Savvatis, A., Goblirsch, P., & Kohl, T. (2022). Numerical determination of long-term alterations of THM characteristics of a Malm geothermal reservoir during continuous exploitation. **Presented at the European Geothermal Congress 2022**, Berlin, Germany. <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000152037>.

Gaucher, E., Hansinger, M., Goblirsch, P., Azzola, J., & Thiemann, K. (2022). Towards a geothermal reservoir management system. **Presented at the European Geothermal Congress 2022**, Berlin, Germany. <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000152177>.

Thiemann, K., Azzola, J., Hansinger, M., Gaucher, E., & Meinecke, M. (2022). *GFK - DAS Datenmanagement*. **Presented at the European Geothermal Congress 2022**, Berlin, Germany. <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000176991>.

2.6.3 PEER-REVIEWED PUBLIKATIONEN

Azzola, J., & Gaucher, E. (2024). Seismic Monitoring of a Deep Geothermal Field in Munich (Germany) Using Borehole Distributed Acoustic Sensing. *Sensors*, **24(10)**, 3061. <https://doi.org/10.3390/s24103061>

Azzola, J., Thiemann, K., & Gaucher, E. (2023). Integration of distributed acoustic sensing for real-time seismic monitoring of a geothermal field. *Geothermal Energy*, **11(1)**, 30. <https://doi.org/10.1186/s40517-023-00272-4>

Forbriger, T., Karamzadeh, N., Azzola, J., Gaucher, E., Widmer-Schmidrig, R., & Rietbrock, A. (2024). Calibration of the strain amplitude recorded with DAS using a strainmeter array. *Seismological Research Letters*, Accepted.

Ebenfalls bereitet R. Habibi derzeit eine wissenschaftliche Publikation über die Kopplung der thermohydromechanischen Modellierung mit der dynamischen Bruchmodellierung (s. Kap. 2.1.4.3) zur Einreichung bei einer wissenschaftlichen Zeitschrift vor.

2.6.4 BERICHTE

Die folgenden Berichte sind frei verfügbar

Azzola, J., & Gaucher, E. (2020). *Seismisches Netzwerk INSIDE: Planungs- und Designphase* (p. 36). Karlsruher Institut für Technologie. <https://doi.org/10.5445/IR/1000177798>

Azzola, J., & Gaucher, E. (2021a). *Seismisches Netzwerk INSIDE: Aufbau und Inbetriebnahme* (INSIDE Projekt) (p. 37). Karlsruher Institut für Technologie. <https://doi.org/10.5445/IR/1000177799>

- Azzola, J., & Gaucher, E. (2021b). *Sparker survey at Schäftlarnstraße: Design, Field acquisition and Data processing* (p. 69). Karlsruhe Institute of Technology. <https://doi.org/10.5445/IR/1000177800>
- Azzola, J., & Gaucher, E. (2023). *Seismisches Netzwerk INSIDE: Aufbau und Inbetriebnahme des Mini-Arrays* (p. 17). Karlsruher Institut für Technologie. <https://doi.org/10.5445/IR/1000177794>
- Azzola, J., & Gaucher, E. (2024a). *INSIDE seismic monitoring approaches: Capabilities versus costs* (p. 64). Karlsruhe Institute of Technology. <https://doi.org/10.5445/IR/1000177812>
- Azzola, J., & Gaucher, E. (2024b). *P- and S-wave velocity models for the INSIDE study area* (p. 22). Karlsruhe Institute of Technology. <https://doi.org/10.5445/IR/1000177806>
- Azzola, J., & Gaucher, E. (2025). *INSIDE seismic monitoring: Methodology and results* (p. 54). Karlsruhe Institute of Technology. <https://doi.org/10.5445/IR/1000177804>
- Egert, R. (2022). *Vergleich von Moose/TIGER und Comsol Multiphysics anhand eines THM Modells des Standortes Pullach* (p. 19). Karlsruher Institut für Technologie. <https://doi.org/10.5445/IR/1000177808>
- Egert, R. (2023). *Numerische Vorhersage betriebsbedingter Reservoir- und Oberflächenveränderungen am Standort Pullach* (p. 21). Karlsruher Institut für Technologie. <https://doi.org/10.5445/IR/1000177809>
- Gaucher, E., & Egert, R. (2022). *Statisches Geomechanisches Modell: Schäftlarnstraße, Pullach, Baierbrunn* (INSIDE Projekt) (p. 39). Karlsruher Institut für Technologie. <https://doi.org/10.5445/IR/1000177807>
- Westerhaus, M., & Ambrus, B. (2024). *INSIDE: Einrichtung eines geodätischen Beobachtungsnetzes* (INSIDE Projekt) (p. 19). Karlsruher Institut für Technologie. <https://doi.org/10.5445/IR/1000177881>
- Westerhaus, M., Ambrus, B., Tsantopoulos, E., Even, M., & Almassian, C. (2024). *INSIDE: Analyse von terrestrischen und satellitengestützten Deformationsmessungen* (INSIDE Projekt) (p. 47). Karlsruher Institut für Technologie. <https://doi.org/10.5445/IR/1000177880>
- Westerhaus, M., Kutterer, H., & Ambrus, B. (2024). *Konzept für ein Integriertes Geodätisches Beobachtungssystem zur Überwachung des Erweiterten Einwirkungsbereiches im Raum München* (INSIDE Projekt) (p. 22). Karlsruher Institut für Technologie. <https://doi.org/10.5445/IR/1000177822>

2.6.5 SONSTIGES

Das KIT-Team hat an den folgenden Videos/Filmen/Programmen mitgearbeitet:

- Die Monitoring Bohrung – Ein Meilenstein im INSIDE Projekt
 - <https://inside-geothermie.de/>
- 08.11.2022: zdf program Leschs Kosmos, Energie in der Krise – der ultimative Stresstest
 - <https://www.zdf.de/wissen/leschs-kosmos/energie-in-der-krise-der-ultimative-stresstest-100.html>
- Pressemitteilung München TV – Forschungsprojekt INSIDE
 - <https://www.swm.de/unternehmen/presse/pressemitteilungen/2022/04-2022/swm-inside-forschungsprojekt>
 - https://www.youtube.com/watch?v=sjgcwAex7_Y

Vortrag auf der Abschlussveranstaltung des INSIDE-Projekts:

Gaucher, E., Baasch, R., Goblirsch, P., Thiemann, K., Azzola, J., Westerhaus, M., et al. (2024, May). *Abschlussstreffen Forschungsprojekt INSIDE – Einblicke und Ergebnisse*. Presented at the Abschlussstreffen Forschungsprojekt INSIDE, Pullach am Isartal. <https://doi.org/10.5445/IR/1000177823>

Ein Artikel zur Vorstellung der Ergebnisse des INSIDE-Projekts in der Zeitschrift „Geothermische Energie“ des Bundesverband Geothermie e.V. ist in Vorbereitung zusammen mit IEP.