



INSIDE

Stadtwerke München GmbH
Innovative Energie Pullach
Karlsruher Institut für Technologie

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

SCHLUSSBERICHT

IEP-Teilvorhaben

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klima unter dem Förderkennzeichen 03EE4008C gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Förderkennzeichen

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

Titel:	Schlussbericht
Arbeitspaket:	IEP-Teilvorhaben
Meilenstein:	Schlussbericht
Fälligkeitsdatum:	13.01.2025
Tatsächliches Datum:	10.01.2025
Partner:	SWM, KIT
Ansprechpartner:	Helmut Mangold, Peter Goblirsch IEP
Autoren:	Johanna Zollner
Version:	Version 1

Version	Datum	Beschreibung der Ergänzungen, Änderungen, Überprüfungen
1	30.12.2024	

INHALTSVERZEICHNIS

ZUSAMMENFASSUNG	5
1 EINLEITUNG	5
1.1 Hintergrund und Aufgabenstellung	5
1.2 Voraussetzungen des Vorhabens	7
1.3 Planung und Ablauf	7
1.4 Wissenschaftlich-technischer Stand	8
1.4.1 Seismizität, mikroseismische Ereignisse, Überwachung und Messverfahren (AP1.2)	8
1.4.2 Geschwindigkeitsmodell zur Lokalisierung der seismischen Ereignisse (AP1.2)	9
1.4.3 Bodenbewegung und Überwachung der Messverfahren	10
1.4.4 Thermisch-hydraulische-mechanische Modellierung	10
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	11
2 EINGEHENDE DARSTELLUNG	12
2.1 AP1: Basisdatenerhebung und Datenaufnahme	12
2.1.1 AP1.1: Regionale Geologie und geophysikalische Daten für die Reservoircharakterisierung	12
2.1.2 AP1.2: Seismisches Monitoring	12
2.1.3 AP1.3: Bohrlochmessungen	14
2.1.4 AP1.4: Deformationsmessungen an der Oberfläche	15
2.2 AP2: Datenmanagement	15
2.3 AP3: Monitoring und Datenbearbeitung	15
2.3.1 AP3.1 Post-prozessieren der aufgezeichneten mikroseismischen Daten	15
2.3.2 AP3.2 Prozessieren der Bohrlochlogging Daten	15
2.3.3 AP3.3 Prozessieren von Deformationsmessungen an der Oberfläche	16
2.3.4 AP3.4 Datenauswertung der Kernuntersuchungen	16
2.4 AP4: Reservoirmodellierung	16
2.4.1 AP4.1: Geologische und Strukturgeologische Modellierung	16
2.4.2 AP4.2: Geomechanische Modellierungen	17
2.4.3 AP4.3: Thermo-hydraulische (TH) Modellierungen	17
2.4.4 AP4.4: Thermo-hydraulisch-mechanische (THM) Modellierungen	17
2.4.5 AP4.5: Thermo-hydraulisch-mechanisch-seismische (THM-S) Modellierung	17
2.5 AP5: Datenintegration	18
2.5.1 AP5.1: Kosten-/Nutzenanalysen der seismischen Aufzeichnungen	18
2.5.2 AP5.2: Integration Deformationsdaten und Kosten/Nutzenanalyse	18
2.5.3 AP5.3: Interpretation der Seismizität und der In-situ Daten hinsichtlich betrieblicher Abläufe	18
2.5.4 AP5.4: Vergleich der numerischen Modellierungsergebnisse und der beobachteten Daten	18
2.5.5 AP5.5: Verfahrensentwicklung zur Integration der Ergebnisse	18
2.5.6 AP5.6: Mögliche operative Empfehlungen Anpassung und Optimierung	19
2.6 AP6: Kommunikation und Ergebnisverwertung	20
2.6.1 AP6.1: Entwicklung von Kommunikationskonzepten und einer Kommunikationsstrategie	20
2.6.2 AP6.2: Umsetzung der Kommunikationsstrategie	20
2.6.3 AP6.3: Bewertung der Kommunikationsstrategie	22
2.6.4 AP6.4: Wissenstransfer, u.a. peer-reviewed Publikationen, Konferenzen und Workshops	23
2.7 AP7: Projektmanagement	24
3 WICHTIGE POSITIONEN DER ZAHLENMÄßIGEN NACHWEISE	25
4 NOTWENDIGKEIT UND ANGEMESSENHEIT DER GELEISTETEN ARBEITEN	25
5 VORAUSSICHTLICHER NUTZEN UND VERWERTBARKEIT DER ERGEBNISSE	25
6 FORTSCHRITTE AUF DEM VORHABENGEBIET BEI ANDEREN STELLEN	26
7 ERFOLGLTE UND GEPLANTE VERÖFFENTLICHUNGEN	26
LITERATURVERZEICHNIS	29

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Übersicht über das installierte INSIDE Monitoringnetzwerk im Süden von München. Die schwarzen Linien zeigen die Verläufe der Bohrungen in Pullach und der Schäftlarnstraße. Die roten Rauten kennzeichnen die Bohrlochköpfe. Rote Punkte: Positionen der INSIDE-Stationen. Grüne Punkte: Positionen der MAGS-Stationen. Rote Dreiecke: Positionen der GNSS- und Transponder-Stationen.....	13
Abbildung 2: Aufbau der Monitoringbohrung mit Bohrlochseismometer und Glasfaserkabel.....	14
Abbildung 3: Aufzeichnungsbeispiel der Glasfaserkabeldaten	14
Abbildung 4: Reflektorzuordnung aus VSP und 3D Seismik Daten.....	16

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Auflistung aller Arbeitspakete und Angabe des Abschlussbericht des Partners, in dem die detailliertesten Informationen zu finden sind.....	6
Tabelle 2: Übersicht der Kommunikationswege im INSIDE Projekt	21
Tabelle 3: Übersicht der unterschiedlichen Kommunikationswege mit Bewertung.....	22
Tabelle 4: Übersicht an Veröffentlichungen und Teilnahme an Konferenzen der INSIDE Projektbeteiligten	23

ZUSAMMENFASSUNG

Das INSIDE Forschungsprojekt (Induzierte Seismizität und Bodendeformation) ist ein interdisziplinäres Projekt, das sich mit der Erforschung und Entwicklung von innovativen geothermischen Energiesystemen beschäftigt. Ziel des Projekts ist es, die Nutzung und den Betrieb der Geothermie zu optimieren.

Ein zentraler Aspekt des INSIDE Projekts ist die Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen geothermischen Anlagen und der geologischen Umgebung, insbesondere im Hinblick auf mikroseismische Ereignisse und Bodenhebungen und Senkungen. Durch umfassende Datenanalysen und Modellierungen sollen potenzielle Risiken minimiert und die Effizienz der geothermischen Energiegewinnung maximiert werden.

Das Projekt bringt Wissenschaftler, Ingenieure und Entscheidungsträger zusammen, um nachhaltige Lösungen zu entwickeln, die sowohl ökonomische als auch ökologische Vorteile bieten. INSIDE trägt somit zur Förderung der erneuerbaren Energien und zur Reduzierung der CO₂-Emissionen bei, während gleichzeitig die Zustimmung in der Bevölkerung gefördert werden soll durch die Entwicklung einer Kommunikationsstrategie.

1 EINLEITUNG

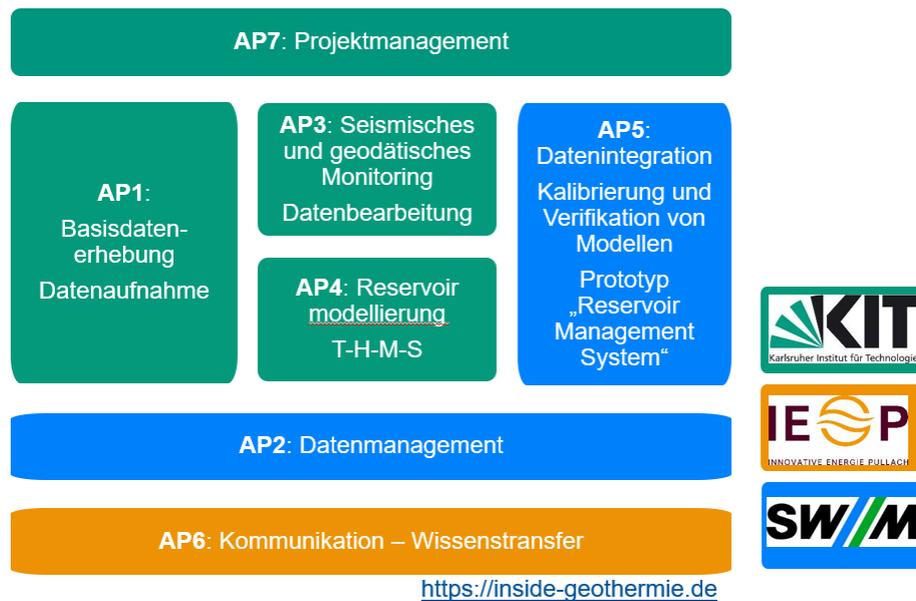
Die Nutzung der tiefen Geothermie hat in Bayern in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen, da sie eine nachhaltige und umweltfreundliche Energiequelle darstellt. Durch die Erschließung von geothermischen Ressourcen in größeren Tiefen können nicht nur Heiz- und Strombedarfe gedeckt werden, sondern auch die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen verringert werden. Allerdings bringt die Förderung von geothermischer Energie auch Herausforderungen mit sich, insbesondere in Bezug auf die mikroseismischen Ereignisse, die während des Bohr- und Förderprozesses auftreten können. Diese kleinen Erdbeben, die oft nicht spürbar sind, können jedoch Auswirkungen auf die Umwelt und die Anwohner haben. Daher ist es von großer Bedeutung, die Ursachen und das Risiko solcher Ereignisse zu verstehen und geeignete Maßnahmen zu ergreifen, um die Sicherheit und Zustimmung der Geothermie Nutzung in Bayern zu gewährleisten.

1.1 HINTERGRUND UND AUFGABENSTELLUNG

Das Hauptziel des Gesamtvorhabens ist, die Lücke über das bisher fehlende Prozessverständnis zu Seismizität und Bodendeformation im Untergrund zu schließen und risikominimierende Maßnahmen daraus abzuleiten. INSIDE verfolgt dabei für die Forschung und den Anlagenbetrieb einen kombinierten Ansatz aus Wissenschaft und Technik, welcher zum Thema Seismizität und Bodendeformation folgende Hauptaufgaben vorsieht:

- Bewertung des Umfangs und der Qualität des Seismizität-Monitorings
- Bewertung des Ausmaßes von obertägigen Senkungen/Hebungen
- Erarbeitung eines Prozessverständnisses zur Seismizität und Bodendeformation
- Modellierung induzierter Deformationsprozesse im Untergrund der Molasse
- Gestaltung eines umfassenden Daten- und eines risikominimierten Betriebsmanagements

- Erarbeitung von angepassten Strategien zur Öffentlichkeitsarbeit im Großraum München



Jedes der sieben Arbeitspakete des INSIDE-Projekts wurde von einem der Partner federführend betreut, wobei alle Partner an jedem Arbeitspaket mitgewirkt haben. Dadurch hat jeder Partner unterschiedliche, aber sich ergänzende Beiträge zum Gesamtziel des Projekts geleistet. Die Vielfalt dieser Beiträge spiegelt sich in den individuellen Abschlussberichten wider, die von jedem Partner vorgelegt wurden. Der vorliegende Bericht konzentriert sich auf den Beitrag der IEP und kann daher nicht die gesamte Arbeit im Rahmen des gemeinsamen Projekts abbilden. Eine Übersicht aller definierten Aufgaben sowie der verantwortlichen Partner und Hauptakteure, deren Berichte die jeweiligen Themen behandeln, ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Auflistung aller 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 DES VORHABENS

Mit Beginn des Forschungsprojektes hatte die IEP GmbH bereits eine Geothermie Anlage in Pullach in Betrieb mit zwei Förderbohrungen und einer Injektionsbohrung. Zu diesem Zeitpunkt waren auch zwei weitere Projekte der IEP GmbH zur Förderung von Erdwärme in Planung.

Da es in der Vergangenheit zu wenigen mikroseismischen Ereignissen im Zusammenhang mit der Tiefengeothermie im bayerischen Molassebecken gekommen ist, wurde das F&E Projekt INSIDE ins Leben gerufen. Der Hauptfokus war induzierte Seismizität und Bodendeformationen frühzeitig zu erkennen und somit die Risiken zu minimieren beziehungsweise sie kontrollierbarer zu machen. Die seismische Überwachung der Bohrungen und auch seismische Überwachung des späteren Betriebes ist durch die Behörden vorgegeben und somit für alle Betreiber verpflichtend.

Das Projekt INSIDE wurde vom BMWK mit einer Summe von 4,7 Mio. Euro gefördert, da es weit über die bergrechtlich geforderten Vorgaben im Hinblick auf das Monitoring hinausgeht und des Weiteren auch eine Zusammenarbeit mit verschiedenen wissenschaftlichen Institutionen und anderen Geothermie Betreibern notwendig war. Ebenfalls wurde die Öffentlichkeit über alle Schritte des Vorhabens über verschiedene Kommunikationswege informiert.

1.3 PLANUNG UND ABLAUF

Im ersten Projektjahr fand hauptsächlich die Planung für die Erhebung der Basisdaten statt, die für das AP1 für den Aufbau des seismischen und geodätischen Messnetzes sowie die Planung und Genehmigungseinholung zur Durchführung der Bohrlochmessungen statt. Parallel dazu wurden in AP1.1 bereits vorhandene Basisdaten über die durch den Partner KIT bereitgestellte Datenaustauschplattform (bwSync&Share) mit den Partnern geteilt, sowie in AP2 mit den Planungen zum Datenmanagement begonnen. Zu AP6.1, Entwicklung von

Kommunikationskonzepten und einer Kommunikationsstrategie zur Erhöhung der Akzeptanz der Geothermie, erfolgten Recherchen zu bereits bestehenden Unterlagen. Aufgrund der Corona-Einschränkungen und internen Betriebsplanungen kam es im ersten Projektjahr zu einer Verzögerung der Projektlaufzeit, u.a. in der Standortsuche und dem Aufbau des seismologischen Monitoringnetz (Meilensteine M 1.2.1, M 1.2.3), der Niederbringung der Monitoringbohrung (M 1.2.2), dem Aufbau der geodätischen Stationen und Entwicklung des Kommunikationskonzept (M 6.1.1). Dies führte im zweiten Quartal 2021 zu einer kostenneutralen Verlängerung der INSIDE-Projektlaufzeit im Gesamtvorhaben um ein Jahr (bis 31.08.2023).

Im zweiten Projektjahr konnten die ersten geodätischen Messungen mit Hilfe der GNSS-Stationen (Pullach und Maria-Einsiedel-Bad) erfolgen, zeitgleich mit den Feinnivellement Messungen an beiden Standorten. Es wurde ebenfalls intensiver an der INSIDE – Kommunikationsstrategie (AP6.1.) gearbeitet und mit der Datenverarbeitung (AP3) begonnen.

Im dritten Projektjahr erfolgte die Umsetzung der Monitoringbohrung sowie die Bohrlochmessungen (VSP-Messung) an der Injektionsbohrung Th3.

Der Fokus des vierten Projektjahres lag auf den Reservoirmodellierungen (AP4). Durch den INSIDE-Partner KIT-AGW erfolgte in AP4.2 das Benchmarking der statischen geomechanischen Modelle (Slip- und Dilation-Tendency-Analysen). Aufgrund betrieblicher Verzögerungen bei der Durchführung der Langzeit-Produktions- und Injektionsversuche (LZPIV) in der GTH SSU konnten die Betriebsszenarien für die Geothermieanlage GTH SSU erst Ende des vierten Projektjahres den Partnern benannt werden. Ebenso führten der Hackerangriff auf den KIT-GIK-Server Mitte des vierten Projektjahres zu einem Verlust der prozessierten Deformationsdaten (AP3.3) zu einer weiteren kostenneutralen Projektlaufzeitverlängerung bis 31.05.2024.

Generell kann man sagen, dass das Projekt sehr strukturiert ablief und es regelmäßige interne Management Meetings sowie große Halbjahres Treffen gab, bei denen die bis dahin erlangten Meilensteine und Ergebnisse präsentiert und diskutiert wurden. Die Hauptziele konnten während der verlängerten Projektlaufzeit erreicht werden.

1.4 WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHER STAND

1.4.1 SEISMIZITÄT, MIKROSEISMISCHE EREIGNISSE, ÜBERWACHUNG UND MESSVERFAHREN (AP1.2)

Seit 2008 wurden im Geothermiestandort Unterhaching seismische Aktivitäten bis zu einer Magnitude von 2,4 beobachtet, wodurch die Region zu einem bedeutenden Standort für die Erforschung induzierter Seismizität wurde. Neben Unterhaching traten auch in anderen Gebieten wie Poing (2016 und 2017) kleinere seismische Ereignisse auf. Diese seismischen Ereignisse treten nicht nur bei aktiv gesteuerten Systemen (z. B. Enhanced Geothermal Systems, EGS), sondern auch bei hydrothermalen Systemen auf. Die genauen Ursachen, geochemischen Auswirkungen und Risikofaktoren sind noch Gegenstand internationaler Forschung.

Monitoring durch INSIDE und MAGS

Das **INSIDE-Projekt** ergänzt bestehende Forschungsprojekte wie MAGS, um die Überwachung seismischer Ereignisse zu verbessern. Während MAGS fünf seismische Stationen installiert hat, plant INSIDE die Einrichtung weiterer Stationen in der Umgebung von Schäftlarnstraße, Pullach und Baierbrunn. Ziel ist es, auch kleine mikroseismische Ereignisse (Magnitude <1) zu registrieren, die oft durch Störsignale („anthropogener Noise“) verdeckt werden. Dies erfordert eine kontinuierliche, ungefilterte Datenerfassung, da die existierenden, meist schwellenwertbasierten Systeme für detaillierte Analysen nicht ausreichen.

Herausforderungen und Standards

Die derzeit geltende Norm DIN 4150 reguliert zwar die Überwachung geothermischer Erschütterungen, liefert jedoch nicht genügend Daten für die wissenschaftliche Analyse und Risikobewertung. Daher haben Organisationen wie FKPE und GtV Richtlinien entwickelt, die präziser sind. Sie empfehlen, mindestens fünf Stationen zu betreiben, um Erdbeben ab einer Magnitude von $ML \geq 1$ in 2–5 km Tiefe aufzuzeichnen. INSIDE orientiert sich an diesen Vorgaben und konzentriert sich auf die Weiterentwicklung von Monitoringstrategien.

Innovative Technologien

INSIDE testet verschiedene Technologien und Konfigurationen, um effiziente und kostengünstige Überwachungsmethoden zu entwickeln. Neben traditionellen Oberflächen- und Bohrlochgeophonen sowie Mini-Arrays kommt **Distributed Acoustic Sensing (DAS)** über Glasfaserkabel zum Einsatz. Die Glasfasern wurden von der Geothermie-Allianz-Bayern (GAB) und der TU München in Geothermiebohrungen an der Schäftlarnstraße verlegt. Diese Technologie ermöglicht eine innovative seismische Überwachung und wird hinsichtlich ihrer technischen und betrieblichen Eignung evaluiert.

Ziel und Mehrwert

Das INSIDE-Projekt bietet durch die Kombination klassischer und innovativer Messmethoden eine einzigartige Gelegenheit, den Nutzen verschiedener Systeme für die Geothermiebranche zu testen. Neben der wissenschaftlichen Bedeutung liegt der Fokus auch auf der Kosten-Nutzen-Analyse, um Monitoringstrategien für den Geothermie-Einsatz in der Region München und darüber hinaus zu optimieren.

1.4.2 GESCHWINDIGKEITSMODELL ZUR LOKALISIERUNG DER SEISMISCHEN EREIGNISSE (AP1.2)

Die präzise vertikale Lokalisierung von Erdbeben ist essenziell, um geomechanische Prozesse zu analysieren und geologische Aussagen über die Charakteristika dieser Ereignisse zu treffen. An den Münchener Untersuchungsstandorten der IEP und SWM ist dank umfangreicher Daten, einschließlich 3D-Seismik, eine optimale Grundlage für diese Analysen vorhanden. Bisherige Untersuchungen, wie die Projekte GRAME und GEOmaRe, lieferten Geschwindigkeitsmessungen im Untergrund durch VSP (Vertical Seismic Profiling) in Bohrungen in Freiham und Riem. Akustische Logs, die P- und S-Wellengeschwindigkeiten über die gesamte Bohrlänge messen, wurden jedoch in der Molasse bislang nicht vollständig durchgeführt.

VSP-Messungen mit DAS an der Schäftlarnstraße

An der Geothermiebohrung Schäftlarnstraße plante das Projekt GEOmaRe, unterstützt durch SWM, eine VSP-Messkampagne mithilfe von DAS (Distributed Acoustic Sensing) entlang der dort verlegten Glasfaserkabel. Ziel ist es, die seismischen Geschwindigkeiten, insbesondere die bislang kaum erfassten S-Wellengeschwindigkeiten, detaillierter zu bestimmen. Dies wird eine präzisere Charakterisierung des Untergrunds ermöglichen.

Ergänzende Sparker-Schüsse

Zusätzlich sind aktive **Sparker-Schüsse** in der Schäftlarnstraße geplant. Ein Sparker ist eine Sonde, die Hochspannungsimpulse in bestimmten Tiefen erzeugt, was zu einer kontrollierten Druckwelle führt. Die erzeugten Frequenzen (50–4000 Hz) sind reproduzierbar und dienen als zuverlässige, seismische Quellen, ohne die Integrität der Bohrung zu gefährden. Diese Schüsse haben mehrere Vorteile:

1. **Messung von P- und S-Wellengeschwindigkeiten:** Ermöglicht eine detaillierte Bestimmung der seismischen Eigenschaften.
2. **Kalibrierung seismischer Geräte:** Signale dienen als Referenz für Geophone, DAS-Kabel und andere Systeme.
3. **Anpassung von Geschwindigkeitsmodellen:** Unterstützt die Qualitätssicherung der VSP-Messungen und die Modellierung des Untergrunds.

Ziel und Nutzen

Die geplanten Maßnahmen verbessern die Genauigkeit und Effizienz aller seismischen Monitoringgeräte und -konfigurationen im Untersuchungsgebiet. Dies trägt dazu bei, die geophysikalischen und geomechanischen Eigenschaften des Untergrunds im Raum München besser zu verstehen und die Datengrundlage für weitere Forschungsvorhaben zu erweitern.

1.4.3 BODENBEWEGUNG UND ÜBERWACHUNG DER MESSVERFAHREN

Das geodätische Monitoring von Bodenbewegungen im Rahmen des INSIDE-Projekts basiert auf einer Kombination aus klassischen und modernen Messverfahren. Ziel ist es, ein kostengünstiges und umfassendes Verfahren zur Überwachung des Einwirkungsbereichs von Geothermieanlagen zu entwickeln und zu evaluieren. Folgende Methoden kommen dabei zum Einsatz:

Nivellement

Das Nivellement bietet die höchste Genauigkeit (< 1 mm) bei der Bestimmung von Höhen und Höhenunterschieden. Es basiert auf festen Vermarkungspunkten, die präzise im geodätischen Referenzsystem eingemessen werden. Dieses Verfahren wird traditionell von Landesvermessungsämtern zur Dokumentation von Deformationen eingesetzt.

GNSS (Global Navigation Satellite Systems)

GNSS misst dreidimensionale Bodenverschiebungen (Nord-Süd, Ost-West, Vertikal) mit einer Genauigkeit von mm bis cm. Es benötigt keine lokalen Referenzpunkte, sondern greift auf globale Referenzrahmen zurück. GNSS ermöglicht die kontinuierliche Erfassung von Bodenbewegungen und wird sowohl in wissenschaftlichen Anwendungen (Erdbeben, Vulkanismus) als auch in der präzisen Positionierung für technische Geräte genutzt.

Radarinterferometrie

Dieses Verfahren bietet eine hohe räumliche Dichte von Messpunkten (10.000 bis über 1.000.000 in urbanen Gebieten wie München) bei einer Genauigkeit, die mit GNSS vergleichbar ist. Die Persistent-Scatterer-Interferometrie (PSI) ermöglicht die Erstellung von Zeitreihen zur Analyse von Bodenbewegungen, wobei auch nicht-lineare Deformationen erfasst werden. Radarinterferometrie zeigt großes Innovationspotenzial, insbesondere durch neue Satellitenmissionen und die Weiterentwicklung von Algorithmen. Trotz des hohen Prozessierungsaufwands hat sich die Methode bewährt, etwa bei der Überwachung von Erdbeben, Vulkanismus und anthropogenen Prozessen (z. B. Geothermie).

Einsatz im INSIDE-Projekt

Das INSIDE-Projekt nutzt diese Methoden für eine Fallstudie zur Geothermie-Überwachung. Folgende Maßnahmen wurden ergriffen:

- **C-Band Radaraufnahmen:** Über den Bodenbewegungsdienst Deutschland (BBD) werden Sentinel-1-Daten genutzt, ergänzt durch TerraSAR-X-Aufnahmen des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR).
- **PSI-Potenzialanalyse:** Ergebnisse wurden präsentiert und deren Integration in das INSIDE-Projekt vereinbart, einschließlich der Erweiterung bestehender Datensätze bis 2021.
- **Fusion von Messverfahren:** Das Geodätische Institut Karlsruhe (GIK) entwickelt mathematische Ansätze zur Kombination verschiedener Verfahren. Künstliche Rückstreuer wie Corner-Reflektoren verbessern die Integration der PSI-Daten in globale geodätische Referenzrahmen.

Das INSIDE-Projekt strebt an, präzise und wirtschaftliche Methoden zur Überwachung von Bodenbewegungen zu etablieren. Fortschritte bei Radarinterferometrie und die Integration mit anderen geodätischen Verfahren könnten neue Standards für die Überwachung von Deformationsprozessen setzen, insbesondere im Bereich Geothermie.

1.4.4 THERMISCH-HYDRAULISCHE-MECHANISCHE MODELLIERUNG

Die Planung und Analyse geothermischer Anlagen stützen sich auf statische geomechanische, thermisch-hydraulische und gekoppelte THM-Modelle. Diese liefern wichtige Erkenntnisse zu Bruchrisiken, Wärmefluss und langfristiger Reservoirbewirtschaftung. Mit dem Open-Source-Tool TIGER hat das KIT ein modernes Modell entwickelt, das physikalische und mechanische Prozesse in komplexen Reservoirstrukturen präzise simuliert.

Solche Ansätze helfen, geothermische Projekte effizient und sicher zu gestalten und mögliche Auswirkungen wie induzierte Erdbeben besser zu verstehen.

Statische geomechanische Modelle

Statische geomechanische Modelle dienen zur Analyse des Spannungszustands in geothermischen Reservoiren, der wesentliche Informationen über potenzielle Bruchprozesse liefert. Diese Modelle basieren auf tektonischen und geologischen Daten, um mögliche Störungen oder Klüfte zu identifizieren. Prognosen über Bruchprozesse werden häufig durch sogenannte Slip Tendency- und Dilation Tendency-Analysen unterstützt. Diese Verfahren wurden in verschiedenen geothermischen Projekten wie Bruchsal, Sauerlach und Riehen erfolgreich angewendet. Im Münchner Raum wurden diese Ansätze durch probabilistische Methoden ergänzt, um seismische Risiken genauer zu bewerten.

Thermisch-hydraulische Modelle

Thermisch-hydraulische Modelle (TH) sind essenziell für die Planung, Genehmigung und langfristige Bewirtschaftung geothermischer Anlagen. Sie simulieren den Wärme- und Flüssigkeitsfluss im Reservoir und unterstützen Entscheidungen über Bohrpfade sowie die Analyse von Nachbarprojekten. Daten aus zahlreichen Geothermiebohrungen im Großraum München fließen in diese Modelle ein, wobei die Verfügbarkeit der Daten durch Eigentumsrechte eingeschränkt ist. Das „Großraum-München-Modell“ dient seit 2008 als wichtiges Instrument zur Bewertung von Projektinteraktionen und möglichen gegenseitigen Beeinflussungen.

Gekoppelte THM- und THMS-Modelle

Kombinierte thermisch-hydraulisch-mechanische (THM) und thermisch-hydraulisch-mechanisch-seismische (THMS) Modelle erweitern die Analyse, indem sie physikalische Prozesse wie Druck- und Temperaturänderungen mit mechanischen Spannungen und potenziellen seismischen Aktivitäten verknüpfen. Diese Modelle werden speziell auf die örtlichen Gegebenheiten und technischen Anforderungen abgestimmt.

Das KIT hat mit TIGER (THMS Simulator for GEoscientific Research) ein leistungsstarkes Simulationswerkzeug entwickelt, das gekoppelte Prozesse in geothermischen Reservoiren realitätsnah modellieren kann. TIGER basiert auf einer objektorientierten Plattform (MOOSE) und erlaubt eine effiziente Simulation komplexer geophysikalischer Phänomene. Es wurde validiert und unterstützt sowohl analytische als auch numerische Lösungen. Zukünftig könnte TIGER erweitert werden, um die Mechanismen der Erdbebenauslösung durch ein Bruchkriterium (z. B. Mohr-Coulomb) zu simulieren.

1.5 ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN STELLEN

Dieses Projekt wäre ohne die enge und konstruktive Zusammenarbeit mit unseren Partnern SWM und KIT nicht umsetzbar gewesen. Die jeweiligen Projektteams waren stets erreichbar und engagiert, der Austausch von Daten und Wissen verlief reibungslos. Viele Aufgaben wurden in enger Teamarbeit durchgeführt, was wir sehr zu schätzen wussten. Dies zeigte sich besonders bei den zahlreichen Datenerhebungskampagnen (AP1, AP2) und Kommunikationsveranstaltungen (AP6). Unser besonderer Dank gilt den folgenden Personen: von SWM: Katja Thiemann, Michael Meinecke, Bernhard Betzl, Doris Betzl und Maximilian Hansinger und von KIT: Emmanuel Gaucher, Jerome Azzola, Malte Westerhaus, Bence Ambrus und Prof. Dr. Thomas Kohl.

Die Erdwerk GmbH war als Drittpartei ebenfalls ein bedeutender Partner im Projekt. Sie lieferte wertvolle Hinweise und Daten, die für die Initialisierung des Projekts erforderlich waren (AP1.1, AP3.2, AP4.1). Die zahlreichen und intensiven Diskussionen zu den Themen Reservoirmodellierung (AP4) sowie Geschwindigkeitsmodellierung erwiesen sich als äußerst produktiv. Ein besonderer Dank gilt Alexandros Savvatis.

Ein weiterer wichtiger Bestandteil der Zusammenarbeit war die Kooperation mit der Fakultät für Erd- und Umweltwissenschaften der Ludwig-Maximilians-Universität München. In mehreren Gesprächen wurden die Planung des seismischen Überwachungsnetzes INSIDE (AP1.2) sowie der Austausch von seismischen Daten (AP3.1) diskutiert. Besonders hervorzuheben sind die Diskussionen zur Integration des bestehenden lokalen

seismologischen Netzes (z.B. Betreiber- oder Geophysikalisches Observatorium in Fürstfeldbruck). Wir möchten uns herzlich bei Joachim Wassermann und Tobias Megies und bedanken. Das Konzept zur Kopplung der thermohydraulisch-mechanischen Modellierung eines geothermischen Reservoirs mit der erdbebendynamischen Bruchsimulation (AP4.5) entstand ebenfalls durch den intensiven Austausch mit der LMU und führte zu einer engen Zusammenarbeit mit Thomas Ulrich. Ihm sowie Alice Gabriel und Joachim Wassermann gebührt unser besonderer Dank.

2 EINGEHENDE DARSTELLUNG

2.1 AP1: BASISDATENERHEBUNG UND DATENAUFNAHME

2.1.1 AP1.1: REGIONALE GEOLOGIE UND GEOPHYSIKALISCHE DATEN FÜR DIE RESERVOIRCHARAKTERISIERUNG

Alle bereits bei der IEP GmbH vorhandenen Basisdaten wie geologische, stratigraphische, tektonische Daten und auch Bohrlochlogs, Seismik Interpretationen usw. wurden gesammelt und als Grundlage für die THM-Modellierungen (AP4) den INSIDE Partnern KIT und SWM zur Verfügung gestellt. Die Datenbasis wurde während der Projektlaufzeit mit relevanten Ergebnissen aus Bohrlochlogs und Vermessungsarbeiten ergänzt.

2.1.2 AP1.2: SEISMISCHES MONITORING

Ziel des AP1.2 war es, für die in Betrieb befindliche Triplette in Pullach sowie für die neu geplanten Geothermiebohrungen in Baierbrunn und dem benachbarten Geothermie Projekt in der Schäftlarnstraße ein einheitliches seismisches Messnetz inkl. einer seismischen real-time Überwachung aufzubauen. Zusätzlich zur Installation von seismischen Messtationen im Feld wurde ein Bohrloch Geophon und ein Glasfaserkabel in einer 200-300 m tiefen Bohrung installiert. Fokus war dabei die Erfassung mikroseismischer Ereignisse.

Die Konzeptionierung, das Design und die Auslegung des Seismischen Monitorings erfolgte unter der Berücksichtigung der lokalen Anforderungen und Regularien (GtV-Richtlinien, FKPE-Positionspapier) und den bekannten Reservoirdaten aus AP1.1.

Um die bestmöglichen Standorte zu identifizieren, wurden mithilfe der im Mai 2020 durchgeführten Messungen zum Seismischen Hintergrundrauschen (seismic noise) einige gut geeignete Standorte gefunden. Dabei wurde auch die Detektions- und Lokalisierungsempfindlichkeit berücksichtigt. In die Standortsuche für den Aufbau der INSIDE-Messensorik waren alle drei Verbundpartner eingebunden, wobei das KIT die aufgebaute seismische Messtechnik über das INSIDE-Projekt beschafft hat. Die Hauptaufgabe der IEP lag darin, sich um die notwendige Infrastruktur an den Pullacher bzw. Baierbrunner Standorten zu kümmern, wie beispielsweise eine Stromanbindung.

Die Abbildung 1 zeigt das im Jahr 2021 in Betrieb genommene INSIDE-Messnetz mit vier seismischen Oberflächenstationen (Seismometertyp: Trillium Compact surface, 120 s, Abtastfrequenz: 250 Hz), einem in die Grundwassermessstelle in der Siemensallee eingebauten Bohrlochseismometer in einer Teufe von 170 m (Typ Trillium Compact Posthole, 20 s) sowie in die neu bis 250 m niedergebrachte INSIDE-Monitoringbohrung BUCH mit zwei zementierten Glasfaserkabel (GFK) für Distributed Acoustic Sensing (DAS) und Distributed Temperature and Strain Sensing (DTSS) Messungen, siehe dazu Abbildung 2. Die Niederbringung der Monitoringbohrung BUCH ist durch die IEP selbst erfolgt. Der Partner KIT hat die Messtechnik beschafft und aufgebaut, während die SWM die Infrastrukturanbindung (u. a. Stromversorgung) hergestellt hat. Die Datenerfassung der Glasfaserkabeltechnologie konnte im Juli im Nachgang der Einrichtungen des Schaltschranks (u.a. Herstellung einer Klimatisierung) durch die Fa. Febus Optics und das KIT installiert werden. Eine beispielhafte Datenaufzeichnung der Glasfaserkabel ist in Abbildung 3 zu sehen. Die Seismometerdaten werden derzeit autark an das KIT gesendet. Eine Umstellung auf Echtzeitdatenübertragung war später im Projekt vorgesehen, konnte aber nicht mehr umgesetzt werden.

Neben dem vertikal zementierten Glasfaserkabel in der Monitoringbohrung wurde eine 100m GFK-Schleife in 80cm Tiefe um die Bohrung verlegt, welches somit ein weiteres seismisches Mess-Array bildet. Das ursprünglich geplante zweite Bohrlochseismometer nahe der Monitoring Bohrung konnte nicht umgesetzt werden, da kein geeigneter Standort gefunden werden konnte. Außerdem musste nach aufgrund von unwirtschaftlichen Ergebnissen nach der ersten Ausschreibung das Konzept der Bohrung geändert werden. Die Bohrung wurde vereinfacht, indem man eine Art Erdsondenbohrung durchführte. Für den Einbau der gewünschten Messgeräte brachte dies keinen Nachteil.

Es ist geplant, die seismologischen INSIDE-Stationen innerhalb des seismologischen Betreiber-netzes weiterzubetreiben und so eine Reservoircharakterisierung durch wissenschaftliche Datenprozessierung durch das KIT sowie das GOF zu ermöglichen.

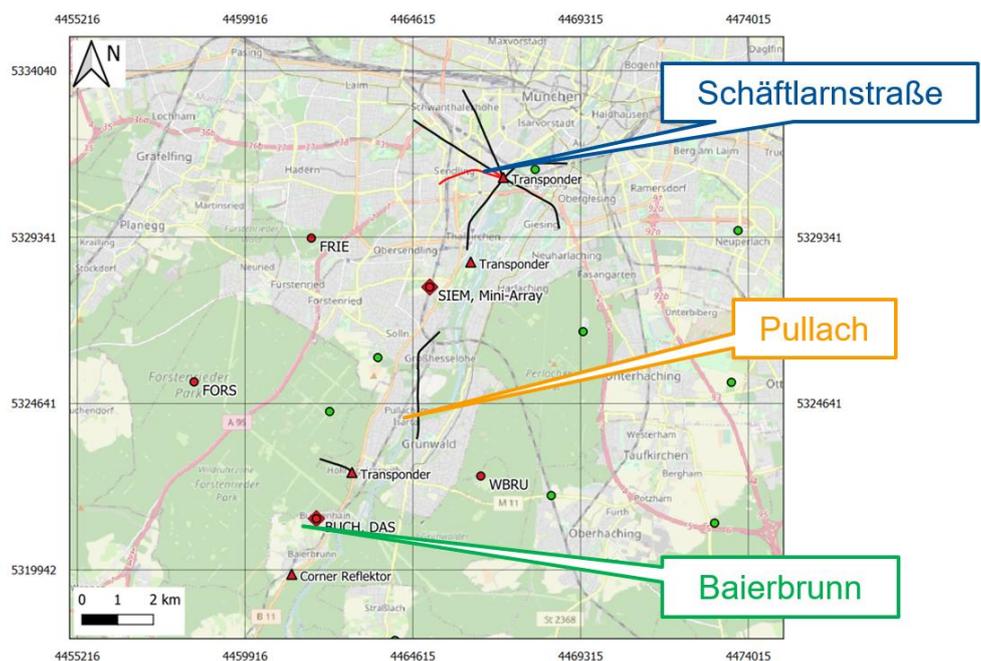
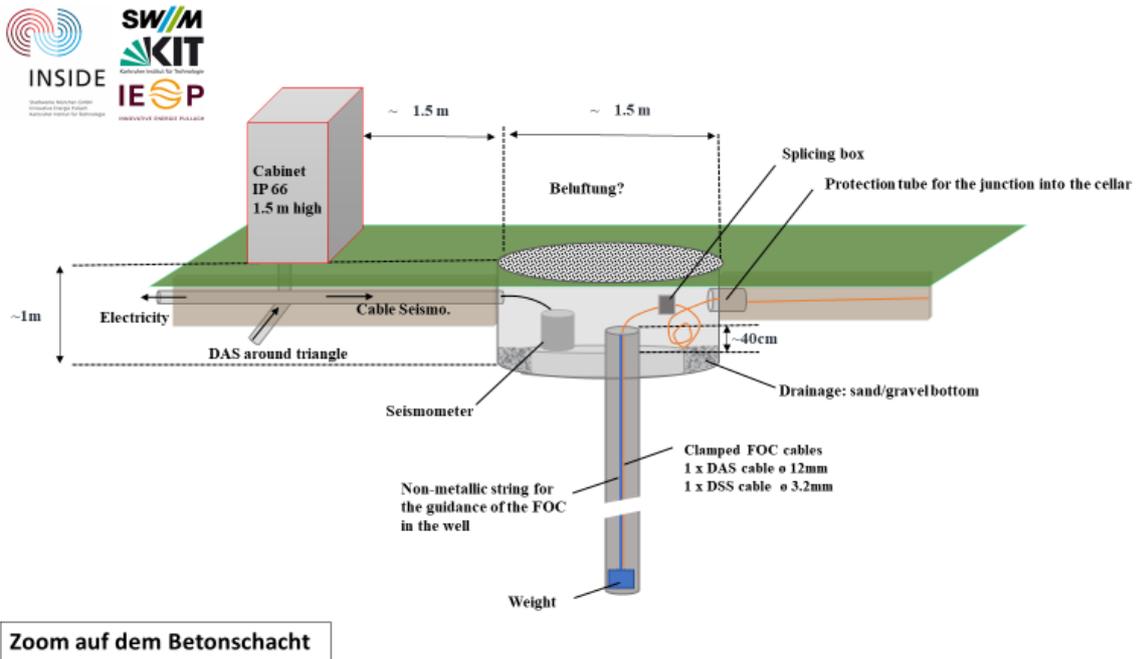


Abbildung 1: Übersicht über das installierte INSIDE Monitoringnetzwerk im Süden von München. Die schwarzen Linien zeigen die Verläufe der Bohrungen in Pullach und der Schäftlarnstraße. Die roten Rauten kennzeichnen die Bohrlochköpfe. Rote Punkte: Positionen der INSIDE-Stationen. Grüne Punkte: Positionen der MAGS-Stationen. Rote Dreiecke: Positionen der GNSS- und Transponder-Stationen.



Zoom auf dem Betonschicht

Abbildung 2: Aufbau der Monitoringbohrung mit Bohrlochseismometer und Glasfaserkabel

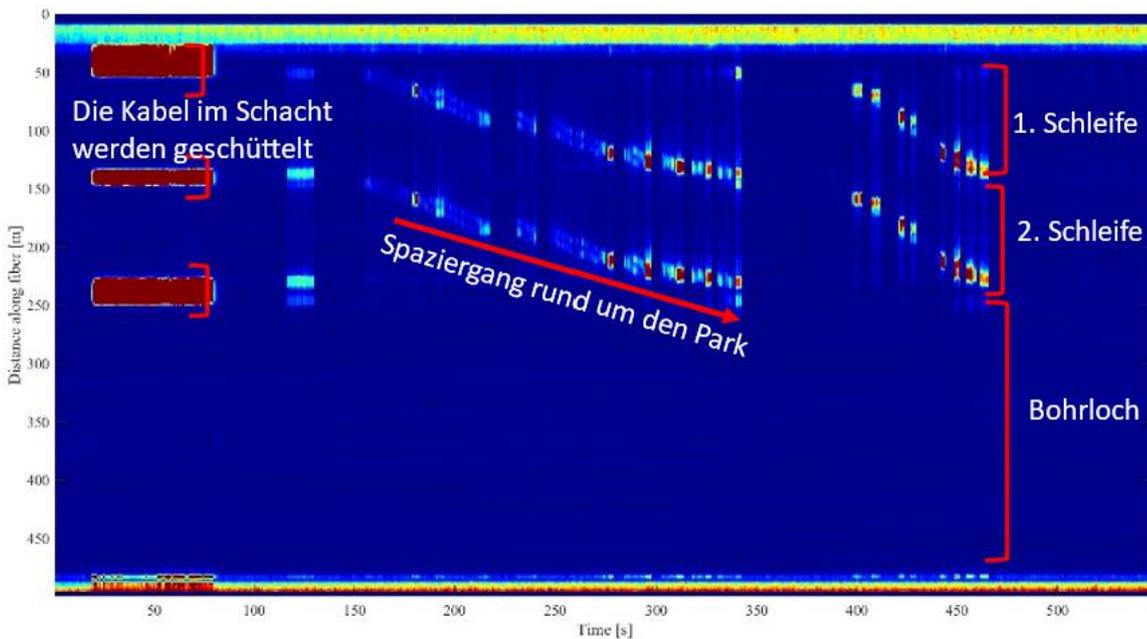


Abbildung 3: Aufzeichnungsbeispiel der Glasfaserkabeldaten

2.1.3 AP1.3: BOHRLOCHMESSUNGEN

VSP-Messung Pullach

Die ursprüngliche Erweiterung der Triplette Pullach um eine vierte Bohrung und das neu geplante Geothermie Projekt Baierbrunn wurden während der Projektlaufzeit nicht umgesetzt. Aus diesem Grund wurden nicht alle für INSIDE IEP geplanten Bohrlochmessungen durchgeführt. Vor allem die Open-hole Messungen konnten nicht an den Bestandsbohrungen durchgeführt werden. Stattdessen fand die VSP-Messung an der Injektionsbohrung Pullach Th3 statt um Daten über das Geschwindigkeitsmodell zu erlangen.

Vom 10. bis 12. August 2021 wurden die VSP-Messungen in der Geothermiebohrung Pullach Th3 durchgeführt. Um diese zu ermöglichen und die Befahrbarkeit des Bohrlochs sicherzustellen, wurden zunächst

Bohrlochmessungen durchgeführt. Nachdem die Befahrbarkeit erfolgreich nachgewiesen wurde, wurde die Geophonkette mit insgesamt acht Geophonen bis 3.010 m MD (ca. 10 m unter Top Malm) in das Bohrloch eingebracht. Es wurde eine Walk Away/ Multi-Offset Messung mit drei Vibrationsfahrzeugen an drei Anregungspunkten entlang des Bohrpfad durchgeföhrt, in Abständen von 275 m, 1.115 m und 1.774 m vom Wellhead entfernt. Die Messung dauerte insgesamt ca. 15 Stunden. Die Datenauswertung fand im Laufe des zweiten Halbjahres 2021 statt. Die Ergebnisse aus dem Processing sind sehr zufriedenstellend und wurden 2022 in das geologisch-geomechanische Modell, aus einer Seismikkampagne aus dem Jahr 2018, durch Erdwerk eingepflegt. Im Großen und Ganzen konnten die bisherigen Erkenntnisse, die man über das Malmkarstreservoir hatte, wie beispielsweise das Geschwindigkeitsmodell bestätigt werden.

Ausführliche Informationen über alle weiteren Bohrlochmessungen, die vor allem vom Projektpartner SWM in der Schäftlarnstraße durchgeföhrt wurden, sind im Abschlussbericht INSIDE-SWM unter AP 1.3. zu finden.

2.1.4 AP1.4: DEFORMATIONSMESSUNGEN AN DER OBERFLÄCHE

Das Arbeitspaket AP 1.4. wurde vorrangig vom KIT bearbeitet. Ausführliche Informationen sind im Abschlussbericht INSIDE-KIT unter AP 1.4. zu finden.

2.2 AP2: DATENMANAGEMENT

Das Arbeitspaket AP 2 wurde vorrangig vom Projektpartner SWM bearbeitet. Ausführliche Informationen sind im Abschlussbericht INSIDE-SWM unter AP 2 zu finden.

2.3 AP3: MONITORING UND DATENBEARBEITUNG

2.3.1 AP3.1 POST-PROZESSIEREN DER AUFGEZEICHNETEN MIKROSEISMISCHEN DATEN

Das Arbeitspaket AP 3.1. wurde vorrangig vom Projektpartner KIT bearbeitet. Ausführliche Informationen sind im Abschlussbericht INSIDE-KIT unter AP 3.1. zu finden.

2.3.2 AP3.2 PROZESSIEREN DER BOHRLOCHLOGGING DATEN

Ziel des AP3.2. war die Ermittlung des Geschwindigkeitsmodells im Untergrund der Geothermieranlage in Pullach, um unter anderem seismische Ereignisse in der Tiefe besser lokalisieren zu können. Dazu wurden die Ergebnisse der VSP-Messung an der Pullach Th3 herangezogen. Da es im Vorfeld keine Messungen zum Geschwindigkeitsfeld in Pullach und direkter Umgebung gab, sind die Ergebnisse der VSP-Messung sehr wichtig und aufschlussreich. Die VSP-Daten der Pullach Th3 wurden erfolgreich verarbeitet und führten zu hochwertigen Ergebnissen, darunter hochauflösende VSP-Bilder und eine gute Übereinstimmung mit der Oberflächen-Seismik, trotz fehlender Sonic-Log-Daten. Die erhaltenen Daten, einschließlich Zeit-Tiefen-Tabellen, Geschwindigkeitswerte und V_p/V_s -Verhältnisse, bieten eine zuverlässige Grundlage für zukünftige seismische Interpretationen und Monitoring-Studien. Um das Geschwindigkeitsfeld um die Bohrung Pullach Th3 noch zu verbessern, wurden anschließend die Ergebnisse der VSP-Messung mit den Ergebnissen der 3D Seismik aus dem Jahr 2018 verknüpft. Vorher wurde für die Reflektor Zuordnung in der 3D-Seismik Pullach-Grünwald ursprünglich eine synthetische seismische Linie von ebendieser 3D-Seismik über eine 2D-Seismik aus den 1970ern bis in die GRAME 3D-Seismik gelegt. Durch die VSP-Messung in der Pullach Th3 kann die Reflektorzusordnung direkt innerhalb der 3D-Seismik Pullach-Grünwald durchgeföhrt werden. Es konnte dadurch bestätigt werden, dass die Reflektoren von Top Tonmergel, Top Lithothamienkalk, Top Purbeck und Top Malm übereinstimmen, siehe dazu Abbildung 3.

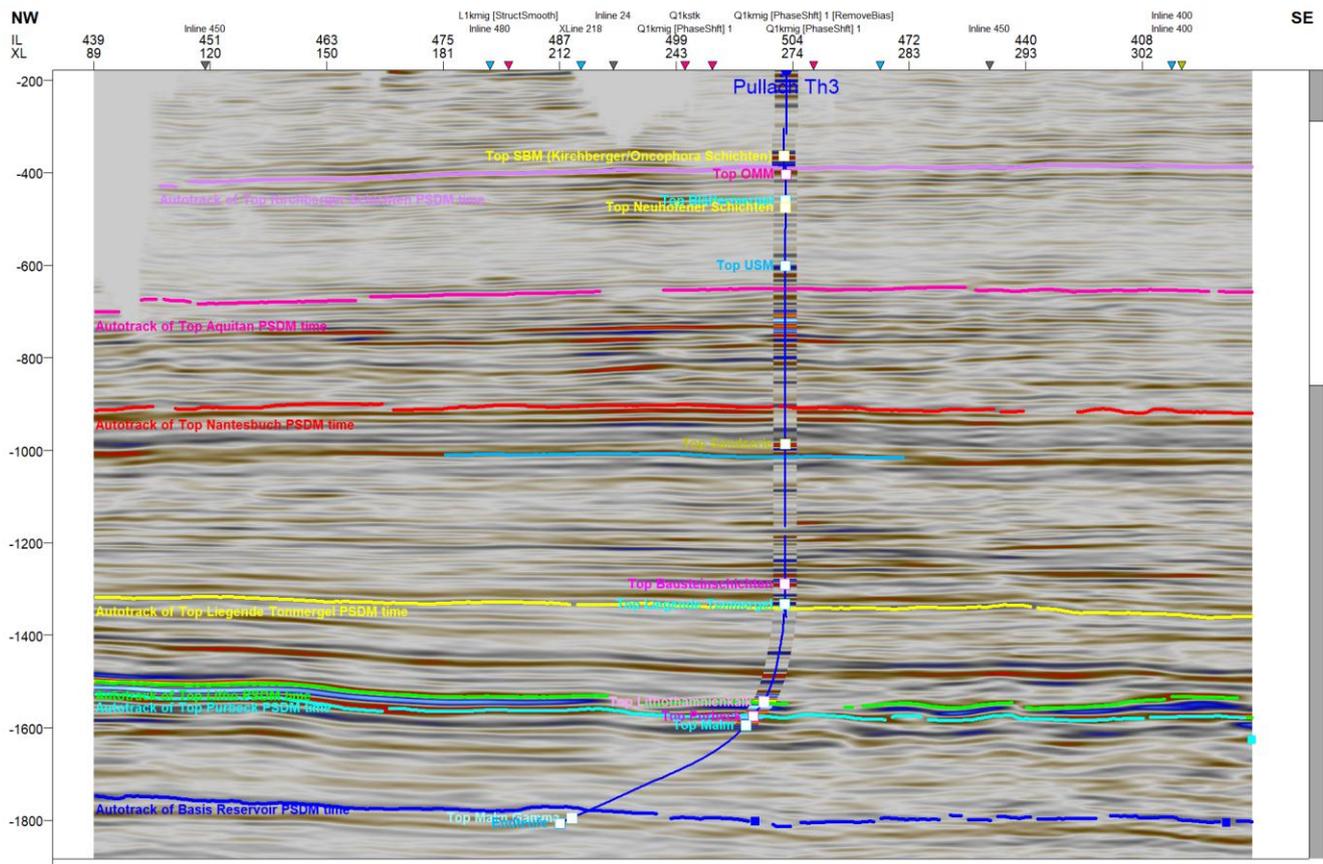


Abbildung 4: Reflektorzuordnung aus VSP und 3D Seismik Daten

2.3.3 AP3.3 PROZESSIEREN VON DEFORMATIONSMESSUNGEN AN DER OBERFLÄCHE

Das Arbeitspaket AP 3.3. wurde vorrangig vom Projektpartner KIT bearbeitet. Ausführliche Informationen sind im Abschlussbericht INSIDE-KIT unter AP 3.3. zu finden.

2.3.4 AP3.4 DATENAUSWERTUNG DER KERNUNTERSUCHUNGEN

Das Arbeitspaket AP 3.4. wurde vorrangig vom Projektpartner SWM bearbeitet. Ausführliche Informationen sind im Abschlussbericht INSIDE-SWM unter AP 1.4. zu finden.

2.4 AP4: RESERVOIRMODELLIERUNG

2.4.1 AP4.1: GEOLOGISCHE UND STRUKTURGEOLOGISCHE MODELLIERUNG

Die Modellierungen wurden zu Beginn des Forschungsvorhaben zügig durchgeführt und sind aus diesem Grund noch für die damals geplanten Standorte Baierbrunn und Pullach TH4 (Erweiterung Pullach um vierte Bohrung) erstellt worden. Wie weiter oben schon beschrieben wurde, kam es zu keiner Umsetzung der beiden Projekte während der Laufzeit des Forschungsprojektes.

Die ERDWERK GmbH wurde von der Innovativen Energie für Pullach GmbH beauftragt, die im Jahr 2018 gemessenen 3D-seismischen Daten Pullach-Grünwald geologisch zu interpretieren, ein fazies- und strukturdifferenziertes Reservoirmodell zu erstellen und für die damals sechs geplanten geothermischen Bohrungen in Baierbrunn, sowie die optionale Bohrung Pullach Th4 konzeptionelle Bohrpfade zu erarbeiten.

Dazu wurden unter Einbindung umgebender 2D- und 3D-seismischer Daten, Bohrungsinformationen und VSP-Messungen umliegender Bohrungen sieben stratigraphische Horizonte kartiert.

Auf Grundlage der Interpretation der 3D-Seismik wird das geplante Projekt Baierbrunn geothermisch als sehr erfolgsversprechend bewertet. Zum einen zeigt die fazielle Auswertung, dass in weiten Teilen des Untersuchungsgebietes der Malm in relativ mächtiger, hydraulisch günstiger Massenfazies vorliegt. Größere Bereiche mit reduzierter Massenfazies konnten lediglich im Nordwesten bis zentralen Norden der 3D-Seismik ausgemacht werden, wobei auch hier keine tiefgreifenden Beckenstrukturen auftreten. Darüber hinaus weist das seismische Bild auf eine Vielzahl von Verkarstungsbereichen an Top Reservoir hin und es wurden sog. Built-up-Strukturen im Reservoir identifiziert, die ebenfalls als hydraulisch positiv bewertet werden. Auf Basis der vom Auftraggeber festgelegten Standorte wurden sechs reservoiroptimierte Bohrfadkonzepte für das Geothermievorhaben Baierbrunn sowie zwei konzeptionelle Bohrfadvarianten für eine potenzielle Erweiterungsbohrung Pullach Th4 erarbeitet, dargestellt und bewertet. Dabei wurden fazielle Aspekte inkl. Hinweise auf Verkarstungen sowie hydraulische (Mindestabstände wg. thermisch-hydraulischer Beeinflussung) und strukturgeologische Gesichtspunkte beim Targeting integriert. Auch die bergrechtliche Situation und bohrtechnische Anforderungen sowie risikominimierende Maßnahmen hinsichtlich induzierter Seismizität fanden Berücksichtigung. Die Temperaturprognose lässt am Standort Baierbrunn Temperaturen zwischen 119°C und 125°C erwarten. Eine statistische Auswertung der zu erwartenden Fördertemperaturen für Baierbrunn erfolgt im Rahmen der thermisch-hydraulischen Vorab-Simulation. Dabei wird auf Basis eines numerischen Reservoirmodells zudem auch eine Prognose der Förderraten, zur wechselseitigen hydraulischen oder thermischen Beeinflussung der Bohrungen untereinander und zu potenziellen hydraulischen Berandungen erarbeitet. Für die TH-Modellierung wäre die Integration der Pumpversuchsdaten aus den Oberhachinger Bohrungen ebenfalls sinnvoll. Aktuelle Erkenntnisse aus dem Großraum München zum Thema fluidinduzierter Seismizität durch Geothermiebohrungen sollten in Form einer geomechanischen Modellierung mit aufgenommen werden.

2.4.2 AP4.2: GEOMECHANISCHE MODELLIERUNGEN

Das Arbeitspaket AP 4.2. wurde vorrangig von den Projektpartnern SWM und KIT bearbeitet. Ausführliche Informationen sind im Abschlussbericht INSIDE-SWM und INSIDE-KIT unter AP 4.2. zu finden.

2.4.3 AP4.3: THERMO-HYDRAULISCHE (TH) MODELLIERUNGEN

Das Arbeitspaket AP 4.3. wurde vorrangig von dem Projektpartner KIT bearbeitet. Ausführliche Informationen sind im Abschlussbericht und INSIDE-KIT unter AP 4.3. zu finden.

2.4.4 AP4.4: THERMO-HYDRAULISCH-MECHANISCHE (THM) MODELLIERUNGEN

Das Arbeitspaket AP 4.4. wurde vorrangig von dem Projektpartner KIT bearbeitet. Ausführliche Informationen sind im Abschlussbericht INSIDE-KIT unter AP 4.4. zu finden.

2.4.5 AP4.5: THERMO-HYDRAULISCH-MECHANISCHE-SEISMISCHE (THM-S) MODELLIERUNG

Das Arbeitspaket AP 4.5. wurde vorrangig von dem Projektpartner KIT bearbeitet. Ausführliche Informationen sind im Abschlussbericht INSIDE-KIT unter AP 4.5. zu finden.

2.5 AP5: DATENINTEGRATION

2.5.1 AP5.1: KOSTEN-/NUTZENANALYSEN DER SEISMISCHEN AUFZEICHNUNGEN

Das Arbeitspaket AP 5.1. wurde vorrangig von dem Projektpartner KIT bearbeitet. Ausführliche Informationen sind im Abschlussbericht INSIDE-KIT unter AP 5.1. zu finden.

2.5.2 AP5.2: INTEGRATION DEFORMATIONSDATEN UND KOSTEN/NUTZENANALYSE

Das Arbeitspaket AP 5.2. wurde vorrangig von dem Projektpartner KIT bearbeitet. Ausführliche Informationen sind im Abschlussbericht INSIDE-KIT unter AP 5.2. zu finden.

2.5.3 AP5.3: INTERPRETATION DER SEISMIZITÄT UND DER IN-SITU DATEN HINSICHTLICH BETRIEBLICHER ABLÄUFE

An allen untersuchten Standorten kam es nur zu einer sehr geringen Anzahl seismischer Ereignisse, die aufgezeichnet wurden (siehe dazu auch Abschnitt 2.1.3.1 des KIT – Abschlussberichtes). Aus diesen Gründen ist es nicht möglich diese Aufgabe zuverlässig zu erfüllen. Die fehlende Störungszone im Untersuchungsgebiet Pullach könnte dazu beitragen, dass dort fast keine Seismizität aufgezeichnet wird. Die wenigen sehr schwachen Ereignisse in der Nähe der Injektionsbohrung Th3 sind möglicherweise durch Abkühlungseffekte der Gesteinsmatrix zurückzuführen.

2.5.4 AP5.4: VERGLEICH DER NUMERISCHEN MODELLIERUNGSERGEBNISSE UND DER BEOBACHTETEN DATEN

Das Arbeitspaket AP 5.4. wurde vorrangig von dem Projektpartner KIT bearbeitet. Ausführliche Informationen sind im Abschlussbericht INSIDE-KIT unter AP 5.4. beziehungsweise in den Abschnitten 2.1.3.3 und 2.1.4.2 des Abschlussberichts des KIT zu finden.

2.5.5 AP5.5: VERFAHRENTWICKLUNG ZUR INTEGRATION DER ERGEBNISSE

Das Arbeitspaket AP5.5 des INSIDE-Projekts hatte das Ziel, ein dynamisches Reservoirmanagementsystem (RMS) zu entwickeln, das den Aufbau, die Integration und die softwaretechnische Umsetzung innerhalb der Leitzentrale umfasst. Dafür wurde eine Architektur mit den Modulen „Database“, „Processing Center“ und „Dashboard“ entworfen. Die „Database“ dient als zentrale Plattform zum Austausch und zur Verarbeitung von Daten aus verschiedenen Quellen, während das „Processing Center“ Überwachungsdaten und numerische Modelle verarbeitet. Das „Dashboard“ visualisiert die Ergebnisse und benachrichtigt bei Schwellenwertüberschreitungen.

Das Konzept wurde anhand eines Prototyps für seismologisches Monitoring in der Geothermieanlage Schäftlarnstraße getestet, die die grundsätzliche Eignung des Datenmanagements und der Big-Data-Integration nachwies. Langfristig soll das RMS externe Partner wie GAB, TUM und LMU einbinden, um eine umfassende Betrachtung der Reservoirdynamik sicherzustellen. Ein visionärer Entwurf sieht zudem die Verknüpfung mit der SWM-IoT-Plattform und externen RMS-Komponenten vor.

Die geplante Open-Source-Software für das RMS konnte im Projektzeitraum nicht fertiggestellt werden. Erste Ansätze wurden jedoch in Python, ObsPy und Matlab entwickelt. Ein Prototyp für ein Dashboard wurde in Jupyter Notebook erstellt und bietet eine Visualisierung seismischer Ereignisse. Allerdings fehlt derzeit eine Integration in Live-Daten und den laufenden Betrieb.

Für die Weiterentwicklung sind die erstellten User Stories für Produktionsmonitoring und Reservoircharakterisierung zu konkretisieren. Das Dashboard soll zukünftig Stakeholder bei kritischen Ereignissen informieren und alternative Produktionsszenarien vorschlagen, die nach Prüfung durch einen Lenkungsausschuss umgesetzt werden können.

2.5.6 AP5.6: MÖGLICHE OPERATIVE EMPFEHLUNGEN ANPASSUNG UND OPTIMIERUNG

Im INSIDE-Projekt wurde die Teilaufgabe AP5.6 mit dem Ziel bearbeitet, betriebliche Aktivitäten an den geothermischen Untersuchungsstandorten zu bewerten und Maßnahmen zur Minimierung induzierter Seismizität und Bodendeformation zu entwickeln. Dies soll ein nachhaltiges und risikominimiertes Reservoirmanagement zur geothermischen Energiegewinnung unterstützen.

Während des Projekts konnten am Standort Schäftlarnstraße (GTH SLS) keine Zusammenhänge zwischen den Betriebsabläufen und den aufgezeichneten seismischen oder geodätischen Daten festgestellt werden. Im Monitoringzeitraum von März 2021 bis Januar 2024 wurde lediglich ein mikroseismisches Ereignis ($M_w = -0,1$) erfasst. An anderen Standorten, wie Pullach und Unterhaching, konnten ebenfalls keine betrieblichen Änderungen festgestellt werden, die mit den beobachteten seismischen Ereignissen in Verbindung standen. Jedoch zeigte das DAS-Monitoring am Standort Schäftlarnstraße, dass faseroptische Messtechnologien prinzipiell geeignet sind, frühzeitig Spannungsänderungen im Untergrund zu erkennen.

Die geodätische Analyse mittels InSAR-Daten ergab keine signifikanten Bodendeformationen, die mit dem Geothermiebetrieb in Zusammenhang stehen. Eine minimale Hebung von etwa 3 mm, die in früheren Daten zwischen 2018 und 2021 identifiziert wurde, konnte im weiteren Verlauf bis Ende 2023 nicht bestätigt werden. Dies deutet auf ein stabiles Bodenniveau hin.

Für ein sicheres und wirtschaftliches geothermisches Management wurden erste Maßnahmen zur Risikominimierung induzierter Seismizität und Bodendeformation erarbeitet. Dazu gehören Anpassungen der Injektionsrate, Temperaturregelungen oder Änderungen des Druckmanagements. Solche Maßnahmen müssen jedoch mit Vorsicht angewandt werden, da schnelle Anpassungen unerwünschte Spannungsänderungen im Untergrund auslösen könnten. Zudem wurde die Möglichkeit untersucht, wie geomechanische Modelle genutzt werden könnten, um seismische Risiken vorherzusagen und Kontrollmaßnahmen abzuleiten. Die vollständige Integration dieser Modelle in ein Reservoirmanagementsystem (RMS) konnte jedoch aufgrund verzögerter Ergebnisse nicht abgeschlossen werden.

Innerhalb des INSIDE-Projekts wurde ein Prototyp für ein RMS entwickelt, das auf seismologischen, geodätischen und betrieblichen Daten basiert. Dieses RMS soll langfristig Empfehlungen zur Vermeidung spürbarer Seismizität und Bodendeformation bereitstellen. Erste Use Cases und Ablaufschemata wurden erstellt, um zukünftige Maßnahmen zu unterstützen. Die Weiterentwicklung des RMS, insbesondere mit kalibrierten thermisch-hydraulisch-mechanisch-geologischen Modellen (THM-S), erfordert jedoch eine enge Zusammenarbeit zwischen Betreibern, Wissenschaft und Behörden. Erste Schritte in diese Richtung wurden im Rahmen des Projekts initiiert.

Zusammenfassend bietet INSIDE wertvolle Grundlagen für ein nachhaltiges Reservoirmanagement. Für eine umfassende Risikoabschätzung und die Ableitung wirksamer Maßnahmen sind jedoch weitere Modellierungs- und Kooperationsansätze erforderlich.

2.6 AP6: KOMMUNIKATION UND ERGEBNISVERWERTUNG

2.6.1 AP6.1: ENTWICKLUNG VON KOMMUNIKATIONSKONZEPTEN UND EINER KOMMUNIKATIONSSTRATEGIE

Im Rahmen des AP6.1 wurde gemeinsam mit den Verbundpartnern eine Kommunikationsstrategie entwickelt, die in AP6.2 praktisch umgesetzt wurde. Ziel dieser Strategie war es nicht, die Akzeptanz der Geothermie allgemein zu steigern, sondern die Forschungsergebnisse des INSIDE-Projekts zu vermitteln und die Zustimmung der Bevölkerung zu fördern. Besonderer Schwerpunkt lag dabei auf der transparenten Kommunikation von Erkenntnissen zu Seismizität und Bodendeformationen gegenüber der Öffentlichkeit und weiteren Stakeholdern.

Die Kommunikationsstrategie wurde im Juli 2023 in Zusammenarbeit mit der Publishing Group erstellt und im Ergebnisbericht M6.1.1 dokumentiert. In AP6.2 erfolgte die Umsetzung dieser Strategie unter anderem durch Filmbeiträge, Aktivitäten auf Social Media und die Gestaltung der INSIDE-Homepage (siehe inside-geothermie.de).

2.6.2 AP6.2: UMSETZUNG DER KOMMUNIKATIONSSTRATEGIE

Die Kommunikationsstrategie des INSIDE-Projekts basiert auf klaren Grundsätzen, die die gemeinsame Verantwortung der Beteiligten – SWM, IEP und KIT – betonen. Alle drei Partner stehen geschlossen hinter INSIDE, und ihre jeweiligen Kommunikationskanäle werden für die Verbreitung der Projektergebnisse genutzt. Ziel ist es, präzise und ehrlich zu informieren. So wird dargelegt, warum INSIDE existiert, wer beteiligt ist, welche Forschungsziele verfolgt werden und welche Maßnahmen zur Zielerreichung vorgesehen sind. Dabei werden keine Versprechungen gemacht, die nicht eingehalten werden können, weder inhaltlich noch zeitlich.

Das Projekt wirbt nicht für die Geothermie, hebt jedoch deren Bedeutung im bayerischen Molassebecken und ihr Potenzial für die Wärmewende in Deutschland hervor. Bei öffentlich wahrnehmbaren INSIDE-Aktivitäten wird die Öffentlichkeit, insbesondere das unmittelbare räumliche Umfeld, proaktiv und im Vorfeld informiert. Für vertiefte Fragen, deren Antworten erst nach Abschluss des Projekts vorliegen werden, wird auf das endgültige Ergebnis verwiesen. Allgemeine Fragen zu Seismizität oder geologischen Aspekten in Bayern werden an das Geologische Landesamt oder das Bayerische Landesamt für Umwelt weitergeleitet.

Während der Projektlaufzeit liegt der Schwerpunkt auf lokaler und regionaler Kommunikation. Mit dem Vorliegen der Forschungsergebnisse wird die überregionale, nationale und internationale Kommunikation stärker in den Fokus rücken. Grundsätzlich versteht sich INSIDE als „Übersetzer“ komplexer geologischer Fachzusammenhänge in eine alltagstaugliche und für Laien verständliche Sprache, die auf einem soliden wissenschaftlichen Fundament basiert. Ziel ist es, sowohl FachwissenschaftlerInnen als auch die allgemeine Öffentlichkeit gleichermaßen anzusprechen.

Die Kommunikationsarbeit zielt darauf ab, Interesse bei den relevanten Zielgruppen zu wecken, die Notwendigkeit von INSIDE zu verdeutlichen sowie Vorurteile und Sorgen abzubauen.

Umgesetzt wurde das mit Hilfe unterschiedlicher Medien und Ereignisse, die in Tabelle 2 dargestellt sind.

Tabelle 2: Übersicht der Kommunikationswege im INSIDE Projekt

Datum	Bemerkung
Oktober 2020	INSIDE Website wurde im Team profiliert
23.04.2021	Dreharbeiten für einen Teaser an der Lokation GTH SLS erfolgt. Im Oktober 2021 wurde der Film auf der Homepage veröffentlicht.
Ende April 2021	INSIDE Homepage ist online gegangen.
August 2021	INSIDE Website durch das KIT in der Community zirkuliert
September 2021	Beschluss zur Nutzung der INSIDE Website als Newsletter. Hintergrund: Wegen DSGVO kann ein Newsletter nicht einfach so verteilt werden. Der Empfänger muss einen etwaigen Empfang bestätigen. Einrichtung Newsticker-Zeile auf der Website.
24.03.2022	Filmdreh mit KIT und SWW zum DAS-Monitoring GTH SLS und satellitengestützten Messtechnologie zum Deformationsmonitoring. Veröffentlichung Video MünchenTV: 30.03.2022, SWM Youtube: 31.03.2022, Filmbeitrag München liegt im BwSync&share
1.4.2022	Pressemitteilung zu INSIDE Projekt auf SWM-Presseseite und SWM-Medienverteiler https://www.swm.de/presse : 01.04.2022, Verteiler der Pressemeldung auch über dpa bundesweit (~980 Abrufe), Veröffentlichung im Magazin-Bereich auf SWM-Homepage: www.swm.de/magazin/energie/geothermie-forschung
April 2022	Socialmedia: Tweet zu INSIDE mit Link zum Video auf SWM Twitterkanal 1.4. (15.000 Follower), Post mit Video auf SWM Facebookkanal 3.4.2022, Thema im SWM Kundennewsletter April 2022 (26 T Empfänger).
April/ Mai 2022	Erklärfilm zu INSIDE und zur Fernwärmewende am Bsp. Geothermie. Filmbeitrag wurde auf der INSIDE Homepage und dem SWM Youtube Kanal veröffentlicht.
27.09.2022	Drehtermin zur ZDF-Reihe „Leschs Kosmos“, Thema „Energie nach 2022“ mit Schwerpunkt Geothermie mit Dreh Experten-Meeting INSIDE-Beteiligte SWM und KIT. Ausstrahlung von „Leschs Kosmos“: 08.11.2022
23.12.2022	BR „Radio Wissen“ Beitrag zur Tiefengeothermie und INSIDE mit Experteninterviews. INSIDE-Beteiligte SWM und IEP
7.05.2024	Abschlussbericht auf der Website INSIDE-Geothermie.de https://inside-geothermie.de/publikationen/
7.5.2024	https://www.linkedin.com/feed/update/urn:li:activity:7193605477614661632 Post bei LinkedIn zum Abschluss des Forschungsprojekts INSIDE

2.6.3 AP6.3: BEWERTUNG DER KOMMUNIKATIONSSTRATEGIE

Die Kommunikationsstrategie des INSIDE-Projekts ist durchdacht, vielseitig und transparent. Sie hat maßgeblich dazu beigetragen, die Ziele des Projekts zu vermitteln und Vertrauen in der Öffentlichkeit zu schaffen. Einige Bereiche, wie die frühzeitige Optimierung der Website und eine klarere Messbarkeit des Erfolgs, könnten in zukünftigen Projekten verbessert werden. Insgesamt ist die Strategie jedoch erfolgreich, insbesondere durch die kreative und ehrliche Ansprache verschiedener Zielgruppen.

Die Kommunikationsstrategie des INSIDE-Projekts zeichnet sich durch mehrere Stärken aus. Besonders hervorzuheben ist die klare Zielsetzung, die sich auf die Vermittlung der Forschungsergebnisse, insbesondere zu Seismizität und Bodendeformationen, konzentriert. Dieser präzise Fokus zeigt ein durchdachtes Vorgehen, das sowohl den wissenschaftlichen Anspruch des Projekts als auch die Bedürfnisse der Öffentlichkeit berücksichtigt. Die Betonung von Transparenz und Ehrlichkeit stärkt zusätzlich das Vertrauen der Stakeholder und der Öffentlichkeit. Durch die bewusste Entscheidung, keine unrealistischen Versprechungen zu machen, wird langfristig Glaubwürdigkeit aufgebaut.

Ein weiterer starker Aspekt ist die zielgruppengerechte Ansprache. INSIDE gelingt es, sowohl Fachwissenschaftler als auch die allgemeine Öffentlichkeit in verständlicher, klarer Sprache anzusprechen. Der regionale und lokale Fokus während der Projektlaufzeit verdeutlicht, dass die Bedürfnisse der unmittelbar betroffenen Menschen ernst genommen werden. Gleichzeitig zeigt der Plan, mit Abschluss der Forschungsergebnisse die Kommunikation auf überregionale und internationale Zielgruppen auszudehnen, strategische Weitsicht.

Auch die Vielfalt der genutzten Kommunikationskanäle unterstreicht die Stärke der Strategie. Von der INSIDE-Homepage über Social Media, Filme und Pressemitteilungen bis hin zu Beiträgen in renommierten Medien wie „Leschs Kosmos“ wurde eine breite Palette an Formaten genutzt, um die Botschaft zu verbreiten. Darüber hinaus hebt die enge Zusammenarbeit der beteiligten Partner – SWM, IEP und KIT – hervor, wie gut die Synergien zwischen den Akteuren genutzt wurden.

Trotz dieser Stärken gibt es auch Bereiche mit Verbesserungspotenzial. So wurde die Website zu Beginn des Projekts schlecht in Suchmaschinen gefunden, was die Reichweite eingeschränkt haben könnte. Eine frühzeitigere Fokussierung auf Suchmaschinenoptimierung (SEO) hätte diese Schwäche minimieren können. Auch die Effizienz bestimmter Maßnahmen, wie der Nutzung eines Newsletters, wurde durch hohe DSGVO-Auflagen eingeschränkt. Alternative Ansätze, beispielsweise gezielte Werbekampagnen auf Social Media, könnten hier zukünftig helfen, die Reichweite zu erhöhen.

Ein weiterer Aspekt, der optimiert werden könnte, ist die Messbarkeit des Erfolgs der einzelnen Kommunikationsmaßnahmen. Während die Strategie insgesamt gut dokumentiert ist, könnten klar definierte Kennzahlen (KPIs) wie Website-Besuche, Social-Media-Interaktionen oder Zuschauerzahlen der verschiedenen Filmbeiträge dabei helfen, den Erfolg einzelner Maßnahmen noch detaillierter zu bewerten.

Zusätzlich hätte die überregionale und internationale Kommunikation möglicherweise früher in die Strategie eingebunden werden können, um das Interesse an INSIDE kontinuierlich zu steigern. Dies würde die Bekanntheit des Projekts auch über die regionalen Grenzen hinaus langfristig stärken.

Tabelle 3: Übersicht der unterschiedlichen Kommunikationswege mit Bewertung

Maßnahme	Aufwand	Kosten	Reichweite	Nutzen/ Bewertung
Homepage	Mittel	Mittel	Hoch	Zentrale Plattform; SEO ausbaufähig
Flyer	Gering	Gering	Gering	Ergänzend, aber geringe Reichweite

Erklärfilm	Hoch	Hoch	Mittel-Hoch	Gut für komplexe Themen, langlebig
Reportage Film (Monitoring Bohrung)	Mittel – Hoch	Hoch	Mittel	Spannend, aber auf Fachpublikum beschränkt
Leschs Kosmos Beitrag	Hoch	gering	Sehr hoch	Sehr effektive überregionale Ansprache
Radio Beitrag	Mittel	gering	Hoch	Effektiv für breite Zielgruppen
LinkedIN Posts	Gering	Gering	Mittel	Günstige Ergänzung, mehr Engagement wünschenswert

2.6.4 AP6.4: WISSENSTRANSFER, U.A. PEER-REVIEWED PUBLIKATIONEN, KONFERENZEN UND WORKSHOPS

Die Projektbeteiligten nahmen an unterschiedlichen Konferenzen mit Vorträgen und Postern teil und veröffentlichten die Forschungsergebnisse in Paper. Eine Übersicht ist in Tabelle 3 über die Laufzeit des Projektes dargestellt. Weitere Veröffentlichungen sind im Abschnitt 7 aufgelistet.

Tabelle 4: Übersicht an Veröffentlichungen und Teilnahme an Konferenzen der INSIDE Projektbeteiligten

Datum	Thema	Art der Publikation/Workshop/Kongress
17.10.-21-10.2022	<ul style="list-style-type: none"> E. Gaucher et al.: Towards a geothermal reservoir management system K. Thiemann et al.: GFK - DAS Datenmanagement R. Egert et al.: Numerical determination of long-term alterations of THM characteristics of a Malm geothermal reservoir during continuous exploitation 	EGC-Konferenz, Vorträge
2022	<ul style="list-style-type: none"> J. Azzola et al.: Towards real-time seismic monitoring of a geothermal plant using Distributed Acoustic Sensing 	Paper (Solid Earth)
05.03. März 09.03.2023	<ul style="list-style-type: none"> Azzola & Gaucher: Monitoring local seismicity using a Distributed Fiber Optic Sensing (DFOS) station in the Munich region (Abstract + Poster) 	DGG Bremen, Konferenz
23.-28. April 2023	<ul style="list-style-type: none"> Azzola & Gaucher: Continuous seismic monitoring of a geothermal project using Distributed Acoustic Sensing 	EGU Wien, Konferenz

	<p>(DAS): a case study in the German Molasse Basin. (Abstract + Poster)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Karamzadeh Toularoud, Gao, Azzola, Forbriger, Widmer-Schmidrig, Gaucher & Rietbrock: Local earthquake recordings using Distributed Acoustic Sensing (DAS) at BFO (Abstract + Vortrag) • Gaucher & Egert: Change of the THM properties of a Malm geothermal reservoir under present and future exploitation schemes. (Abstract + Poster) 	
05.-08. Juni 2023	<ul style="list-style-type: none"> • Bohnsack, Thiemann, Meinecke, Zosseder & Gaucher: Risk management of induced seismicity in the life cycle of a hydro-geothermal heating plant in an urban area. (Abstract + Vortrag) • Gaucher: Induced Seismicity and Geothermal Reservoir De-risking: Items on the To-do List (Vortrag) 	EAGE, Wien, Konferenz
Oktober 2023	<ul style="list-style-type: none"> • Azzola et al., Integration of Distributed Acoustic Sensing (DAS) for real-time seismic monitoring of a geothermal field. DOI: https://doi.org/10.1186/s40517-023-00272-4 (Veröffentlichung) 	Paper
08.-10. November	<ul style="list-style-type: none"> • Habibi et al., Coupling of thermo-hydro-mechanical modelling with seismicity modelling in a faulted geothermal reservoir (Vortrag) 	EGW, Utrecht
11–15. Dezember 2023	<ul style="list-style-type: none"> • Azzola & Gaucher, Implementation and Evaluation of Distributed Acoustic Sensing (DAS) for Continuous Seismic Monitoring of Geothermal Fields in the Munich Area (Germany) (Poster) 	AGU, San Francisco, Konferenz
2023	<ul style="list-style-type: none"> • Teilnahme DGK, Außendarstellung des Projektes 	DGK, Essen
Mai 2024	<ul style="list-style-type: none"> • INSIDE Abschlusskonferenz • Alle Projektbeteiligte und Partner 	Pullach

2.7 AP7: PROJEKTMANAGEMENT

Das KIT (E. Gaucher) übernahm die Projektleitung, wurde jedoch von den Projektleitern der IEP (P. Goblirsch) und der SWM (K. Thiemann) tatkräftig unterstützt. Zu Beginn des Projekts wurde eine Projektvereinbarung zwischen den Partnern zügig unterzeichnet.

Regelmäßige Projektmanagement-Sitzungen wurden organisiert, um sowohl den technischen als auch den finanziellen Fortschritt der einzelnen Projektaufgaben zu besprechen. Diese Treffen dienten auch der Vorbereitung der halbjährlich stattfindenden Projektfortschrittssitzungen, zu denen alle Mitarbeiter der

Partner eingeladen wurden, die an der aktuellen oder der kommenden Projektphase beteiligt waren. Insgesamt fanden neun dieser Sitzungen statt, darunter das Kick-off-Meeting am 03.12.2019 und das Abschlussmeeting am 07.05.2024. Mit Ausnahme des Abschlussmeetings wurden alle Treffen protokolliert.

Die Corona-Pandemie und die damit verbundenen Lockdowns führten zu Verzögerungen bei der Umsetzung der ursprünglichen Projektaufgaben, insbesondere bei AP1 sowie in der Folge bei AP3 und AP5. Aufgrund dieser Umstände wurde eine erste kostenneutrale Verlängerung des Projekts um ein Jahr beantragt, die genehmigt wurde. Als Gründe wurden auch die Schwierigkeiten bei der Rekrutierung eines Doktoranden für die Aufgabe AP4.5 angeführt. So wurde das Projekt bis zum 31.08.2023 verlängert. Ein zweiter Antrag auf eine kostenneutrale Verlängerung wurde im Mai 2023 gestellt. Dieser Antrag, der vom KIT initiiert und von den Partnern akzeptiert wurde, begründete sich auf der bisher geringen Seismizität, die mit dem installierten seismischen Netzwerk beobachtet wurde, sowie auf dem Verlust von Ergebnissen aus AP3.3 aufgrund eines Server-Hacks, was eine Neubearbeitung der Rohdaten erforderlich machte. Die Verlängerung wurde genehmigt und der Projektabschluss auf den 31.05.2024 festgelegt.

3 WICHTIGE POSITIONEN DER ZAHLENMÄßIGEN NACHWEISE

Der Verwendungsnachweis ist als Anlage beigelegt und gibt eine Übersicht über alle entstandenen Kosten.

4 NOTWENDIGKEIT UND ANGEMESSENHEIT DER GELEISTETEN ARBEITEN

Das INSIDE-Gemeinschaftsprojekt leistete einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung des mikroseismischen Monitorings sowie zur Überwachung von Hebungen und Senkungen mithilfe satellitengestützter Verfahren. Zudem wurde ein Prototyp für ein Reservoirmanagementsystem entwickelt. Eine entscheidende Rolle spielte dabei das in AP2 entwickelte Datenmanagement, das insbesondere im Bereich Big-Data-Transfer, -Speicherung und -Verarbeitung unter Einbeziehung eines breiten Umfelds von Bedeutung war.

Die im Rahmen von INSIDE erstellte Website diente während des gesamten Projekts und wird voraussichtlich bis 2027 zur Präsentation der Themen induzierte Seismizität und Bodendeformationen genutzt, insbesondere für die Öffentlichkeit und politische Akteure.

5 VORAUSSICHTLICHER NUTZEN UND VERWERTBARKEIT DER ERGEBNISSE

Das in INSIDE angepasste Geschwindigkeitsfeld stellt eine solide Grundlage für die Lokalisierung von Ereignissen dar. Eine stetige Aktualisierung und Präzisierung sind wichtig. Vor allem für die Reservoircharakterisierung durch mikroseismische Ereignisse. Nur durch eine präzise Bestimmung der Ereignisposition und -tiefe können aussagekräftige Analysen bezüglich des Reservoirs sowie anderer Prozesse, wie etwa Spannungsumlagerungen im Bereich von Störungen und Verwerfungen, vorgenommen werden. Genaue Ortungsergebnisse sind zudem von entscheidender Bedeutung für die Kalibrierung zukünftiger Modelle.

Der Einbau von Glasfaserkabeln in Tiefengeothermiebohrungen ist derzeit kostspielig. Um diese Technologie, insbesondere für das seismische Monitoring, zu etablieren, müssen Finanzierungsmodelle entwickelt werden, während gleichzeitig der Markt weiterentwickelt wird. Aus wissenschaftlicher Perspektive ist es wichtig, Verfahren zur Datenkomprimierung zu entwickeln, etwa durch den Einsatz von Machine-Learning-Methoden, um die Technologie mittel- bis langfristig effizient zu nutzen.

Besonders hervorzuheben ist der INSIDE-Prototyp RMS für das seismologische Monitoring, der einen wegweisenden Ansatz darstellt (siehe Abschnitt 5.5). Ursprünglich war vorgesehen, weiteren Anwendern – wie Betreibern, Behörden und der Öffentlichkeit – Zugang zu ermöglichen oder Verlinkungen zu anderen Systemlandschaften außerhalb von Microsoft Azure anzubieten. Die Vision dahinter war die gemeinsame Entwicklung von Modellen und Auswertungsverfahren, um Maßnahmen gegen induzierte Seismizität und Bodendeformation zu erarbeiten.

6 FORTSCHRITTE AUF DEM VORHABENGEBIET BEI ANDEREN STELLEN

Im Jahr 2023 erarbeiteten BRGM und INERIS im Rahmen des INSIDE-Projekts einen Leitfaden für den Umgang mit induzierter Seismizität bei Tiefengeothermieranlagen in Frankreich. Dieser Handlungsleitfaden, der unter anderem in einem Beitrag vom 09.08.2023 vorgestellt wurde (Abruf am 10.10.2024 über „Gute Praktiken induzierte Seismizität – Geothermie“ auf geothermie-schweiz.ch), basiert auf den Auswertungen passiver seismischer Daten. Im Fokus stehen Handlungsempfehlungen zur Anpassung der Anlagenbetriebsweise bei seismischen Risiken. Prognosemodelle, die thermohydromechanische (THM) und seismische Aspekte kombinieren, wurden dabei nicht einbezogen.

Nach Angaben des INSIDE-Projektteams existieren derzeit keine spezifischen Maßnahmen, die für das Molassebecken oder hydrothermale Geothermieprojekte abgeleitet wurden, um Seismizität entgegenzuwirken. Dies wurde unter anderem bei einem Austausch mit dem Geothermie-Operatoren-Forum (GOF) und der LMU im Jahr 2022 sowie in einem Gespräch mit Leo Eisner (Firma Seismik) während der GeoTHERM-Konferenz in Offenburg im Februar 2024 deutlich. Laut Leo Eisner gibt es derzeit keine dynamischen THM-seismischen Prognosemodelle, die zur Risikominimierung von induzierter Seismizität oder Bodenverformungen geeignete Maßnahmen ableiten können.

Im Rahmen des Projekts SEIGER (BMW – FKZ: 03EE4003) wurden unter anderem beim Abschlusstreffen am 20.01.2023 Empfehlungen für seismische Monitoringsysteme in städtischen Gebieten vorgestellt. Dabei wurde eine Präferenz für den Einsatz von Geophonen in Überwachungsbohrungen und/oder Glasfaserkabeln hervorgehoben. Darüber hinaus entwickelte die BGR im Rahmen von SEIGER einen Machine-Learning-Detektor zur Erkennung seismischer Ereignisse, der mit Daten aus Insheim getestet wurde. Ziel dieser Arbeiten war es, mithilfe passiver seismischer Daten betriebliche Veränderungen im Fließregime zu identifizieren.

7 ERFOLGTE UND GEPLANTE VERÖFFENTLICHUNGEN

Tagungsbeiträge

Azzola, J., 2022, December 7. Distributed Fibre Optic Sensors, a geophysics tool for integrated monitoring of deep geothermal exploitation in the Munich area, Presented at the ITI-GeoT seminar.

Azzola, J. & Gaucher, E., 2023. Monitoring local seismicity using a Distributed Fiber Optic Sensing (DFOS) station in the Munich region, Presented at the Deutsche Geophysikalische Gesellschaft.

Azzola, J. & Gaucher, E., 2023. 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. Retrieved from <https://agu.confex.com/agu/fm23/meetingapp.cgi/Paper/1248252>

Azzola, J. & Gaucher, E., 2023. 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.

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.

Azzola, J., Karamzadeh Toularoud, N., Gaucher, E., Forbriger, T., Widmer-Schmidrig, R., Bögelspacher, F., Frietsch, M., *et al.*, 2022. Comparison between Distributed Acoustic Sensing (DAS) and strain meter measurements at the Black Forest Observatory, Presented at the EGU General Assembly.

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. doi:[10.3997/2214-4609.2023101256](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.

Gaucher, E., 2019. Well monitoring of seismicity and deformation within the INSIDE project (Greater Munich area). *EAGE/BVG/FKPE Joint Workshop on Borehole Geophysics and Geothermal Energy*.

Gaucher, E., Azzola, J., Meinecke, M., Betzl, B., Goblirsch, P., Baasch, R., Steiner, U., *et al.*, 2020, November 12. *The INSIDE research project - Investigating the relationship between seismicity, deformation and deep geothermal exploitation in the Greater Munich*, Presented at the Deutscher Geothermie Kongress.

Gaucher, E., Azzola, J., Meinecke, M., Poegl, T., Aures, G., Janke, U., Kising, Y.-P., *et al.*, 2021, December 1. *Monitoring the long-term pump-tests at the Schäftlarnstraße geothermal field using Distributed Acoustic Sensing (DAS)*, Presented at the Deutscher Geothermie Kongress.

Gaucher, E., Azzola, J., Thiemann, K., Schulz, I., Steiner, U., Meinecke, M. & Dirner, S., 2020, November 9. *Active cross-well survey at geothermal site Schäftlarnstraße*, Presented at the Deutscher Geothermie Kongress - Workshop 'F&E in der Praxis (Geothermieprojekt Schäftlarnstraße)'.
doi:<https://doi.org/10.5445/IR/1000152177>

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.

Gaucher, E., Hansinger, M., Goblirsch, P., Azzola, J. & Thiemann, K., 2022. Towards a geothermal reservoir management system, Presented at the European Geothermal Congress 2022. doi:<https://doi.org/10.5445/IR/1000152177>

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, pp. EGU24-16775, Presented at the EGU General Assembly 2024.

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.

Karamzadeh Toularoud, N., Azzola, J., Gaucher, E., Forbriger, T., Widmer-Schmidrig, R., Bögelspacher, F., Frietsch, M., *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.

Steiner, U., 2020, May 20. *Ein Jahr INSIDE - F&E zu Induzierter Seismizität und Bodendeformation bei Geothermie in München*, Presented at the Wissenstransfer der Geothermie Allianz Bayern - Webinar.

Thiemann, K., 2022, July 15. *F&E-Projekt INSIDE: Seismizität und Bodendeformation – Spannungsumlagerungen im Untergrund durch Tiefengeothermie*, Presented at the Geothermie in der Praxis Workshop.

Thiemann, K., Azzola, J., Hansinger, M., Gaucher, E. & Meinecke, M., 2022. GFK - DAS Datenmanagement, Presented at the European Geothermal Congress 2022.

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.

Berichte

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. doi:[10.1186/s40517-023-00272-4](https://doi.org/10.1186/s40517-023-00272-4)

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

Backers, T. et. al, 2021. Ergebnisbericht der Ruhr-Universität Bochum vom 30.07.2021 zur Geomechanischen Kennwertermittlung im Felslabor (Untersuchungsprogramm I). Unveröffentlicht.

Backers, T. et. al, 2023. Ergebnisbericht der Ruhr-Universität Bochum vom 05.12.2023 zur Geomechanischen Kennwertermittlung im Felslabor (Untersuchungsprogramm II). Unveröffentlicht.

Bergdolt, G., Gaucher, E., 2024. Abschluss des Forschungsprojekts INSIDE – Jetzt haben wir Daten und verstehen den Untergrund besser. *Geothermische Energie*, Ausgabe 109.

ERDWERK (2021): Geothermie Schäftlarnstraße Schlussbericht IPS-Arbeiten Schäftlarnstraße Th5 (interner Bericht). München. Unveröffentlicht.

Forbriger, T., Karamzadeh, N., Azzola, J., Gaucher, E., Widmer-Schmidrig, R. & Rietbrock, A., 2024. On DAS recorded strain amplitude. *Submitted*

Hörbrand, T.; Beichel, K.; Bendias, D.; Savvatis, A.; Kohl, T. (2024): Karst control on reservoir performance of a developed carbonate geothermal reservoir in Munich, Germany. In: *The Geological Society of London, Special Publications* (548).

Koch, R., 2020. Ergebnisbericht vom 29.06.2020 zur Interpretation von Image-Log-Interpretationen in der stratigraphischen Folge Malm Alpha bis Malm Zeta. Unveröffentlicht.

Koch, R., 2021a. Abschlussbericht vom 18.02.2021 zur INSIDE Aufschlussanalogstudie mit den Riffbereichen Essing (Auer Kalk), Marching (Trosselfels) und Laisacker. Unveröffentlicht.

Koch, R., 2021b. Dokumentation zum Fazies- und Diagenese-Modell der Geothermieranlage Schäftlarnstraße und ausgewählter Literatur zur Riffentwicklung im Unteren Tithon (Raum Regensburg-Kelheim). Präsentation Prof. Koch zum INSIDE Workshop vom 21.12.2021. Unveröffentlicht.

Koch, R., 2021c. Ergebnisbericht Prof. Koch vom 23.05.2021 zu den Dünnschliffanalysen von Bohrkernen aus Tagesaufschlüssen des Oberjura (Malm) – Zusammenhang zwischen Fazies und gesteinsphysikalischen Kenndaten zum Messprogramm I. Unveröffentlicht.

Koch, R., 2022. Bericht von Prof. Koch vom 27.06.2022 zur Dokumentation und zu den Dünnschliff-Analysen zu den in den Steinbrüchen Sengenthal und Saal entnommenen Proben aus der Schuttfazies. Unveröffentlicht.

Koch, R., 2023. Bericht Prof. Koch vom 17.05.2023 zur Literaturstudie "Malm-Liegendes und Hangendes zur Interpretation der mechanischen Kennwerte des Untergrundes im Molasse-Becken". Unveröffentlicht.

Westerhaus, M., Ambrus, B., Tsantopolous, E., Almassian, C., Seidel, A., Even, M., Baasch, R., Betzl, B., Potten M. et al., Geodetic Monitoring, Forschungsprojekt INSIDE – Einblicke und Ergebnisse, Foliensatz zum Abschlusstreffen, S. 57 – 82, Pullach, 07. Mai 2024, www.inside-geothermie.de/publikationen, abgerufen 17.07.2024. Unveröffentlicht.

LITERATURVERZEICHNIS

Arbeitsgruppe „Induzierte Seismizität“ FKPE e.V., 2012. Empfehlungen zur Überwachung induzierter Seismizität: Positionspapier des FKPE. DGG - Mitteilung 17–31.

Barth, A., Gaucher, E., 2012. Monitoring geothermaler Felder durch seismische Netzwerke: Vorgaben und Chancen. BBR - Leitungsbau Brunnenbau Geothermie 12, 56–61.

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.

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.

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.ijrmmms.2007.07.022>
- 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.
- 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>