

# **Verbundvorhaben: INSIDE – Induzierte Seismizität & Bodendeformation als Interferenzaspekte beim Betrieb von Geothermieranlagen in der Süddeutschen Molasse**

## **Teilvorhaben: Referenzstandort SWM, Datenintegration, Kommunikation**

### **Schlussbericht – ohne Erfolgskontrollbericht**

vom 30.11.2024



# **INSIDE**

Stadtwerke München GmbH  
Innovative Energie Pullach  
Karlsruher Institut für Technologie

Zuwendungsempfänger: SWM Services GmbH (SWM)  
Förderkennzeichen: 03EE4008B  
Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2019 - 31.08.2022;  
1. Verlängerung bis 31.08.2023;  
2. Verlängerung bis 31.05.2024

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

Ansprechpartner: Katja Thiemann, Michael Meinecke

Autoren: Georg Aures, Kilian Beichel, Dr. Daniel Bendias,  
Dr. Franz Böhm, Thorsten Hörbrand, Martin Klaus,  
Dr. Martin Potten, Dr. Kai Stricker, Katja Thiemann

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



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

## Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis.....	4
Abbildungsverzeichnis.....	5
Tabellenverzeichnis.....	7
I. Ausgangssituation .....	9
I.1. Aufgabenstellung.....	9
I.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	10
I.3. Planung und Ablauf des Vorhabens .....	11
I.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand an den angeknüpft wurde .....	13
I.4.1. Verwendete Fachliteratur .....	20
I.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen .....	23
II. Ergebnisse.....	26
II.1. Verwendung der Zuwendung mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele.....	26
II.1.1. Basisdatenerhebung und Datenaufnahme - Arbeitspaket 1 (Leitung: KIT) .....	26
Regionale Geologie und geophysikalische Daten für die Reservoircharakterisierung (AP1.1).....	26
Seismisches Monitoring (AP1.2) .....	26
Bohrlochmessungen (AP1.3).....	28
Deformationsmessungen an der Oberfläche (AP1.4) .....	28
Tracerversuche (AP1.5) .....	29
Kernuntersuchungen (AP1.6) .....	42
II.1.2. Datenmanagement - Arbeitspaket 2 (Leitung: SWM) .....	46
Anforderungsanalyse an Hardware und Software, Konzept & Design des Datenmanagements (AP2.1).....	46
Aufbau eines Datenmanagement-Systems (AP2.2) .....	48
Konzeptentwicklung Datenmanagement (AP2.3).....	49
II.1.3. Monitoring und Datenbearbeitung - Arbeitspaket 3 (Leitung: KIT).....	50
Post-Prozessieren der aufgezeichneten mikroseismischen Daten (AP3.1).....	50
Prozessieren der Bohrloch-Logging Daten und Ermittlung von Geschwindigkeitsmodellen (AP3.2).....	51
Prozessieren von Subsidenz-/ Hebungsmessungen an der Oberfläche (AP3.3) .....	53
Datenauswertung der Kernuntersuchungen (AP3.4) .....	54
II.1.4. Reservoirmodellierungen - Arbeitspaket 4 (Leitung: KIT) .....	57
Aktualisierung des Strukturgeologischen Modells (AP4.1), geomechanische Simulationen (AP4.2), thermisch-hydraulische (TH)-Modellierungen (AP4.3), thermisch-hydraulisch-mechanische (THM)-Modellierungen (AP4.4) nach Abteufen der Bohrungen GTH SLS ...	57
THM-S Modellierungen (AP4.5) .....	59
II.1.5. Datenintegration - Arbeitspaket 5 (Leitung: SWM).....	61
Kosten-/Nutzenanalysen der seismischen Aufzeichnungen (AP5.1) .....	61
Integration Deformationsdaten und Kosten/Nutzenanalyse (AP5.2).....	61
Interpretation der Seismizität und der In-situ Daten hinsichtlich betrieblicher Abläufe und geologisch/tektonischer Gegebenheiten (AP5.3) .....	61
Vergleich der numerischen Modellierungsergebnisse und der beobachteten Daten (AP5.4) .....	61
Verfahrensentwicklung zur Integration der Ergebnisse in ein dynamisches Reservoirmanagementsystem und zum Aufbau der technischen Umsetzungen in die Leitzentralen (AP5.5).....	61
Mögliche operative Empfehlungen (AP5.6) .....	66
II.1.6. Kommunikation - Arbeitspaket 6 (Leitung: IEP) .....	69
Entwicklung von Kommunikationskonzepten und einer Kommunikationsstrategie zur Erhöhung der Akzeptanz der Geothermie (AP6.1), Umsetzung der Kommunikationsstrategie (AP6.2) .....	69
Bewertung der Kommunikationsstrategie (AP6.3) .....	69

Wissenstransfer, u. a. peer-reviewed Publikationen, wissenschaftliche Konferenzen, Workshops (AP6.4) .....	69
II.1.7. Projektmanagement - Arbeitspaket 7 .....	70
II.2. Die wichtigsten Punkte des Zahlenmäßigen Nachweises.....	71
II.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten.....	71
II.4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplanes.....	71
II.5. Bekanntgewordene Fortschritte während des Projektes auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen .....	72
II.6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses .....	73
III. Erfolgskontrollbericht .....	77
IV. Berichtsblatt.....	79

## Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket
BDD	Bodenbewegungsdienst Deutschland
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMWK/BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
BSM	Bürgerinfo Seismisches Messsystem
BVEG	Bundesverbands Erdgas, Erdöl und Geoenergie e.V.
DAS	Distributed Acoustic Sensing
DIN	Deutsche Industrie-Norm
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DTS	Distributed Temperature Sensing
DTSS	Distributed Temperature and Strain Sensing
FAU	Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg
FKPE	Forschungskollegiums Physik des Erdkörpers e.V.
FKZ	Förderkennzeichen
GAB	Geothermie-Allianz Bayern
GEOMaRE	Optimierte Regel- und Anlagentechnik mit nachhaltiger Reservoirbewirtschaftung für die tiefengeothermischen Wärmeprojekte im Münchener Raum
GFK	Glasfaserkabel
GFZ	GeoForschungsZentrum Potsdam
GNSS	Global Navigation Satellite Systems
GOF	Geophysikalisches Observatorium Fürstfeldbruck
GTH SLS/GTH SSU	Geothermieanlage Schäftlarnstraße/Sending
GRAMÉ	Akronym für das Verbundvorhaben „Ganzheitlich optimierte und nachhaltige Reservoirerschließung für tiefengeothermische Anlagen im bayerischen Molassebecken“
GZN	GeoZentrum Nordbayern
IEP	Innovativen Energie für Pullach GmbH
InSAR	Interferometric Synthetic Aperture Radar
KIT	Karlsruher Institut für Technologie
KIT-AGW	Institut für Angewandte Geowissenschaften des KIT
KIT-GIK	Geodätisches Institut Karlsruhe des KIT
LIAG	Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik
LMU	Ludwig-Maximilians-Universität München
LZPIV	Langzeit-Produktions- und Injektionsversuche
NMR	Nuclear Magnetic Resonance
PSI	Persistent-Scatterer-SAR-Interferometrie
PtJ	Projekträger Jülich
RMS	Reservoirmanagementsystem
RUB	Ruhr-Universität Bochum
StMWi	Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie
SWM	Stadtwerke München GmbH bzw. SWM Services GmbH
TH	Thermo-hydraulische (Modellierung)
THM	Thermo-hydraulisch-mechanische (Modellierung)
THM-S	THM-Seismologisches Modell
TUM	Technische Universität München
VSP	Vertical Seismic Profiling

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht der INSIDE Aufgabenpakete und Darstellung der leitenden Bearbeiter.....	9
Abbildung 2: Übersicht über das installierte INSIDE Monitoringnetzwerk im Süden von München. Die schwarzen Linien zeigen die Verläufe der Bohrungen in der Schäftlarnstraße und Pullach. Rote Punkte: Positionen der INSIDE-Stationen. Grüne Punkte: Positionen der MAGS-Stationen. Rote Dreiecke: Positionen der GNSS- und Transponder-Stationen.....	27
Abbildung 3: Tracerkonzentration bei unterschiedlichen Parametrisierungen der 1D Tracergleichung. Schwarz: PD=0.7, t0 = 1600d; rot: PD = 0.7, t0 = 3200d; grün: PD = 0.1, t0 = 1600d; blau: PD = 0.1, t0 = 3200d).....	31
Abbildung 4: Injektionsleitung zum Flansch am Seiteneinlass des Wellheads. ....	32
Abbildung 5: Tracerkonzentration an den Förderbohrungen über die Projektlaufzeit. Die Tracerzugabe fand Ende November 2022 statt. ....	34
Abbildung 6: Rückgewinnungskurven der durchgebrochenen Tracer .....	35
Abbildung 7: Tracer und Recovery fit von NTSA an der Bohrung Th1. Die blaue Kurve zeigt das Signal mit Rezirkulation, die orange Kurve das dekonvolutierte Signal. ....	36
Abbildung 8: Tracer und Recovery fit von NTSA an der Bohrung Th4. Die blaue Kurve zeigt das Signal mit Rezirkulation, die orange Kurve das dekonvolutierte Signal. ....	36
Abbildung 9: Tracer und Recovery fit von PTSA an der Bohrung Th1. Die blaue Kurve zeigt das Signal mit Rezirkulation, die orange Kurve das dekonvolutierte Signal. ....	37
Abbildung 10: Tracer und Recovery fit von PTSA an der Bohrung Th4. Die blaue Kurve zeigt das Signal mit Rezirkulation, die orange Kurve das dekonvolutierte Signal. ....	37
Abbildung 11: Verlauf der Konzentrationsverhältnisse der Tracer an den Förderbohrungen der Mittelscholle (Th4 und Th1).....	39
Abbildung 12: Grobskizze der geometrischen Ausbreitung eines möglichen Karstnetzwerks (orange), welches die Hochscholle mit der Mittelscholle verbindet. ....	40
Abbildung 13: Vergleich der im Versuch ermittelten Dispersivitäten (blaue Punkte: NTSA, orange Punkte: PTSA); Diagramm modifiziert nach Gelhar et al. (1992). ....	41
Abbildung 14: Lageplan der in INSIDE entnommenen Dünnschliffe zur Planung der Entnahmestellen aus Analogaufschlüssen (Grafik aus dem Bericht von Prof. Koch vom 29.06.2020; Koch, R. (2020)). ....	43
Abbildung 15: Ungefähre stratigraphische Position der Aufschlüsse zur Auswahl der INSIDE Beprobungslokalitäten (Grafik aus Koch, R. (2020)). ....	44
Abbildung 16: Lageplan 1 der beprobten Analogaufschlüsse des Malm Alpha bis Zeta (Grafik aus Koch, R. (2020)). Nicht dargestellt sind die Beprobungen aus den Steinbrüchen Sengenthal und Saal. ....	45
Abbildung 17: Lageplan 2 der beprobten Analogaufschlüsse des Malm Alpha bis Zeta (Grafik aus Koch, R. (2020)). Nicht dargestellt sind die Beprobungen aus den Steinbrüchen Sengenthal und Saal. ....	45
Abbildung 18: Architektur und Workflows zum INSIDE Datenmanagement. ....	46
Abbildung 19: Übergeordnetes INSIDE Datenmanagement Konzept und das eingerichtete Netzwerk für das DAS-Monitoring.....	48
Abbildung 20: INSIDE DAS-Datenmanagement Konzept in Microsoft Azure Cloud. ....	49
Abbildung 21: Aufzeichnung lokaler mikroseismischer Ereignisse mit dem DAS der Schäftlarnstraßenbohrung Th3. Die obere Abbildung zeigt die lokale Datenerfassung in der SLS mit $M_w = -0,1$ vom 22.04.2022. In der unteren Abbildung ist das vom 2022-02-09T05:51:28.3 mit $M_w = 1,5$ erfasste regionale Ereignis (nicht Schäftlarnstraße) erfasst. Abbildung aus Azzola (2024a). ....	51

Abbildung 22: Basisdaten des in INSIDE verbesserten Geschwindigkeitsmodell für die Schäftlarnstraße und Pullach aus VSP- und Sonic Log-Messungen (GEOmaRE, INSIDE) und des 3D Geschwindigkeitsfeld von ERDWERK GmbH. Abbildung aus INSIDE-Schlussbericht des KIT und Azzola (2024c).....	52
Abbildung 23: INSIDE-Geschwindigkeitsmodell, das für die Ereignisortung verwendet wurde. Der Umfang des Modells ist auf der Karte in der linken Abbildung dargestellt. Die vertikalen Schnitte in der Karte zeigen die zugehörigen P-Wellengeschwindigkeiten ( $v_p$ ) und Scherwellengeschwindigkeiten ( $v_s$ ), die in der rechten Abbildung dargestellt sind (Abbildung aus dem INSIDE-Schlussbericht des KIT und Azzola (2024c)).....	53
Abbildung 24: Karte der Vertikalverschiebungen, abgeleitet aus einer Persistent-Scatterer-Analyse von 291 Szenen der Satelliten Sentinel-1a und -1b für auf- und absteigende Orbits für den Zeitraum März 2021 bis März 2023. Erkennbar sind alternierende Hebungs- und Senkungsgebiete im Stadtgebiet München mit Amplituden von ca. +3 mm bis – 6 mm. Aus Westerhaus et. al (2024c).....	54
Abbildung 25: Einordnung der gesteinsphysikalischen Kenndaten der untersuchten Proben in die hydrogeologische Klassifikation nach Prof. Roman Koch aus dem Ergebnisbericht von Prof. Koch vom 23.05.2021 zu den Dünnschliffanalysen von Bohrkernen aus Tagesaufschlüssen des Oberjura (Malm). Die petrophysikalischen Parameter, totale Porosität und Permeabilität wurden durch die nach Ruhr-Universität Bochum, Arbeitsgruppe Ingenieurgeologie und Felsmechanik ermittelt.....	56
Abbildung 26: INSIDE Reservoirmanagementsystem (RMS) Konzept mit eingebundenen Modulen.....	63
Abbildung 27: INSIDE Vision zur Systemlandschaft innerhalb und außerhalb der SWM IoT Azure Plattform (Stand: Mai 2024).....	63
Abbildung 28: Schematische Darstellung des INSIDE Dashboards und des RMS-Entscheidungsfindungszentrum (Decision center) (umgezeichnet nach Gaucher et al. 2022).....	64
Abbildung 29: INSIDE Prototyp Dashboard für den Use Case „Seismologisches Monitoring“. Das Dashboard wurde in Jupyter Notebook mit synthetischen (nicht real erfassten) Daten erarbeitet und ist ein Vorschlag für das mittel- bis langfristig zu erarbeitende RMS-Dashboard. In der linken Abbildung ist die Verteilung synthetischer Ereignisorte hinsichtlich des zeitlichen Auftretens und ermittelter Magnitude sowie in der rechten Abbildung hinsichtlich des Abstandes zwischen synthetischen Ereignisorten und Bohrungsverläufen dargestellt.....	64
Abbildung 30: Nicht-konsolidierte Entwürfe der INSIDE-User-Stories und Benutzergruppen im Rahmen eines Brainstormings mit den Verbundpartnern (Stand: Oktober 2021).....	65

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Liste der INSIDE-Arbeitspakete und Angabe des Partners, in dem in den jeweiligen Schlussberichten detaillierte Informationen zu finden sind.....	12
Tabelle 2: Nachweis- und Bestimmungsgrenzen für die geplanten Tracerchemikalien sowie in ebenfalls getestete, aber aufgrund ihrer hohen Nachweisgrenzen ausgeschlossener Chemikalien (1,6 Naphtalindisulfonsäure (NDS) und weitere Naphtalindisulfonsäure-Isomere mit Sulfonsäuregruppen an den Stellen 2,6; 2,7; und 1,5). .....	29
Tabelle 3: Berechnung der erforderlichen Tracermasse in kg aus den Reservoirparametern .....	30
Tabelle 4: Veranschlagte Massen für den Tracerversuch.....	31
Tabelle 5: Auswerteparameter der Tracersignale. Insbesondere die Parameter der Auswertung von PTSA, aber auch die Parameter von NTSA sind unsicher, da bis zum Projektende nur ein Teil der Tracerkurven aufgezeichnet werden konnte.....	38
Tabelle 6: Übersicht der in der INSIDE Aufschlussanalogstudie durchgeführten Arbeiten zur Datenerhebung. ....	42
Tabelle 7: Übersicht zu den INSIDE Veröffentlichungen im Rahmen der Kommunikationsstrategie (Stand: 01.10.2024). ....	69

## **Kapitel I**

# **Ausgangssituation: Aufgabenstellung und Planung des Vorhabens**



## I. Ausgangssituation

### I.1. Aufgabenstellung

Das Forschungs- und Entwicklungsprojekt INSIDE (Induzierte Seismizität & Bodendeformation als Interferenzaspekt beim Betrieb von Geothermieranlagen in der süddeutschen Molasse) zielte ab, das Prozessverständnis von Vorgängen im tiefen Untergrund im Zusammenhang mit der geothermischen Nutzung zu verbessern. Wichtige Aufgabenstellungen waren die Untersuchung induzierter Seismizität und Bodenbewegungen in Verbindung mit der Gewinnung geothermischer Energie über innovative Beobachtungstechniken und Reservoirmodellierungen sowie die Erarbeitung eines Prototyps für ein Reservoir-Management-System.

Im Rahmen des Gemeinschaftsprojekts INSIDE wurden zusammen mit den Verbundpartnern Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Angewandte Geowissenschaften (KIT-AGW) und Geodätisches Institut Karlsruhe (KIT-GIK) sowie der Innovativen Energie für Pullach GmbH (IEP) die in Abbildung 1 dargestellten Arbeitspakete (APs) bearbeitet.

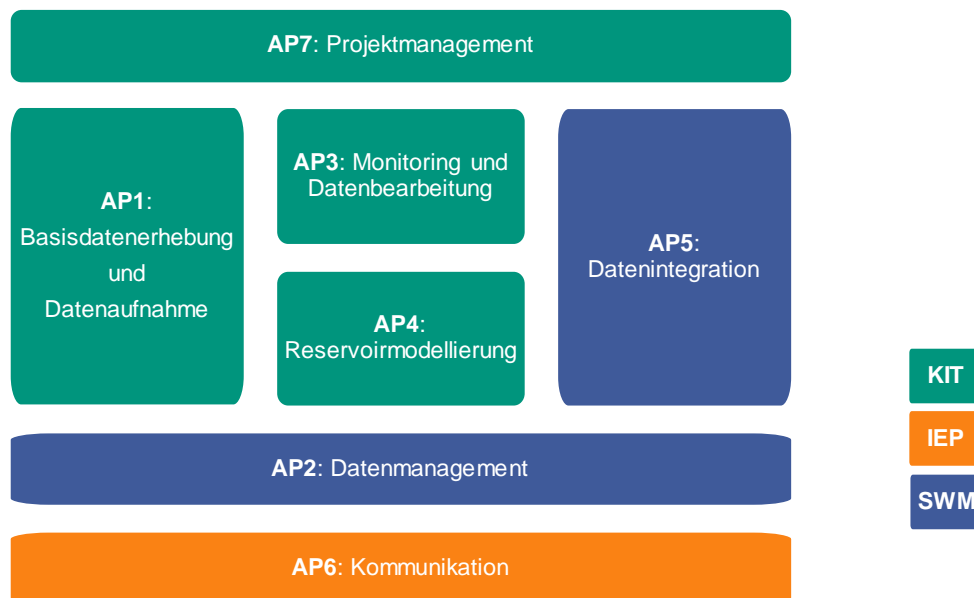


Abbildung 1: Übersicht der INSIDE Aufgabenpakete und Darstellung der leitenden Bearbeiter.

Die Aufgabe von Arbeitspaket 1 (AP1) war die Erhebung neuer Basisdaten zur Erfassung akustischer, mechanisch-hydraulischer und thermischer Parameter, welche in Arbeitspaket 2 (AP2) innerhalb eines geeigneten Datenmanagements gesammelt, sortiert und den Verbundpartnern im Projektumfeld für die Bearbeitung der weiteren Arbeitspakete zur Verfügung gestellt werden sollten. Hierbei spielte für das Datenmanagement auch die Verfügbarkeit bereits vorliegender Daten sowie die Verteilung verschiedener Zugriffsrechte eine Rolle.

Die in AP1 zu erfassenden Daten sollten in Arbeitspaket 3 (AP3) durch ein umfassendes Monitoring analysiert werden. Das Monitoring sah die Datenauswertung und -interpretation von Seismizität und Bodendeformation im Umfeld geothermischer Anlagen vor, z. B. mittels Bohrloch- und Oberflächenseismometer, Glasfaserkabel (GFK), Mini-Arrays und Fernerkundung durch InSAR/GNSS/Nivellement. Des Weiteren sollten die neu erhobenen geologisch-geomechanischen Daten aus Bohrlochmessungen, Tracerversuchen und Kernuntersuchungen ausgewertet werden.

Insgesamt dienten die in AP1 bis AP3 gewonnenen Arbeitsergebnisse der Erstellung kalibrierter Reservoirmodelle und der Simulation induzierter Seismizität über Vorhersagemodelle (Arbeitspaket 4 (AP4)). Ziel von Arbeitspaket 5 (AP5) war die Entwicklung eines Prototyps eines Reservoir-Management-Systems zur Risikominimierung induzierter Ereignisse durch die Steuerung betrieblicher Abläufe. Zur Information der Öffentlichkeit über die Themenfelder induzierte Seismizität und Bodenhebungen/-senkungen war in Arbeitspaket 6 (AP6) die Erarbeitung einer Kommunikationsstrategie geplant. Mit den Verbundpartnern wurde regelmäßig der Leistungsstand sowie der Termin- und Kostenstatus in Projekt- und Arbeitsterminen abgestimmt (Arbeitspaket 7 (AP7)).

## **I.2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde**

Das Geothermieprojekt Schäftlarnstraße/Sendling mit sechs jeweils ca. vier Kilometer tiefen Bohrungen zur Versorgung von rund 80.000 Haushalten im Münchener Innenstadtgebiet ging im Jahr 2021 in den Erprobungsbetrieb. Bereits mit Beginn des INSIDE-Projekts im Jahr 2019 haben die SWM als Anbieter regenerativer Energien fünf Geothermieranlagen (Riem, Sauerlach, Freiham, Dürrnhaar und Kirchstockach) im Münchener Raum in Betrieb genommen, um die 100 % CO<sub>2</sub>-neutrale Versorgung der Münchner Bevölkerung mit aus Erdwärme gewonnener Fernwärme bis 2040 zu erreichen.

Für die Absicherung der Wärmeversorgungsicherheit bei gleichzeitigem Zugang zu bezahlbarer, verlässlicher, nachhaltiger, moderner Energie plant die SWM, bis zu 10 weitere Geothermieranlagen zu errichten. Dies erfolgt in Synergie mit den im Eckpunktepapier vom 11. November 2022 des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) festgelegten Zielen, mindestens 100 neue Tiefengeothermieprojekte bis zum Jahr 2030 zu initiieren.

Da es in der Vergangenheit im Raum München zu einigen wenigen mikroseismischen Ereignissen ohne Schadenswirkung im Zusammenhang mit der Geothermie kam, wurde das F&E-Projekt INSIDE gemeinsam mit den Verbundpartnern initiiert, um einen langfristig sicheren und nachhaltigen Betrieb zu gewährleisten. Ein Fokus des Projekts war und bleibt, sich entwickelnde induzierte Seismizität und Bodendeformation frühzeitig zu erkennen und somit seismische Risiken kontrollierbarer zu machen. Dieses Anliegen wurde bereits vor INSIDE während der Planungsphase von Geothermieranlagen durch hydraulische und geomechanische Prognoseberechnungen sowie seismisches Monitoring während des Bohrens angegangen und ist aufgrund behördlicher Auflagen auch gängige Praxis. Insbesondere aufgrund der zunehmenden Nutzungsdichte in Ballungsräumen wie München kann der intensive Ausbau der Tiefengeothermie das Risiko für induzierte Seismizität erhöhen.

Da die im Rahmen von INSIDE durchgeführten Monitoringmaßnahmen weit über die bergrechtlich geforderten Vorgaben hinausgingen und eine Zusammenarbeit mit wissenschaftlichen Institutionen und anderen Geothermiebetreibern sowie der Wissenstransfer an die Öffentlichkeit zur transparenten Informationslegung über die Themen induzierte Seismizität und Bodenhebungen/-senkungen intensiviert werden sollte, wurde das INSIDE-Projekt durch das BMWK mit einer Fördersumme von insgesamt 4,7 Millionen Euro im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramms unterstützt.

### I.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Im ersten Projektjahr (2019) fanden hauptsächlich die Planungen und die Beschaffung der neu zu akquirierenden Basisdaten im Arbeitspaket AP1 statt, Dies umfasste den Aufbau der seismischen und geodätischen Messstationen (AP1.2 und AP1.4) sowie die Planung und Genehmigungseinholung für die Durchführung der Bohrlochlogging-Kampagne (Sparkermessung, AP1.3), der Tracerversuche (AP1.5) sowie der Kernuntersuchungen (AP1.6 und AP3.4). Parallel dazu wurden in AP1.1 bereits vorhandene Basisdaten über die vom Partner KIT bereitgestellte Datenaustauschplattform (bwSync&Share) mit den Partnern geteilt. Zudem begann AP2 mit den Planungen zum Datenmanagement. In AP6.1, der Entwicklung von Kommunikationskonzepten und einer Kommunikationsstrategie zur Erhöhung der Akzeptanz der Geothermie, wurden Recherchen zu bereits bestehenden Unterlagen durchgeführt. Aufgrund der Corona-Einschränkungen und internen Betriebsplanungen kam es im ersten Projektjahr zu einer Verzögerung der Projektlaufzeit. Dies betraf unter anderem die Standortsuche und den Aufbau des seismologischen Monitoringnetzes, das Niederbringen der Monitoringbohrung, den Aufbau der geodätischen Stationen, die Genehmigung der Tracerversuche, die Entnahme und Untersuchungen von Kernen, die Planung des Datenmanagements sowie die Entwicklung des Kommunikationskonzept. Dies führte im zweiten Quartal 2021 zu einer kostenneutralen Verlängerung der INSIDE-Projektlaufzeit im Gesamtvorhaben um ein Jahr bis zum 31.08.2023.

Mit dem Aufbau der GNSS- und Transponderstationen (AP1.4) an den Standorten im Münchner Maria-Einsiedel-Bad und in Pullach im zweiten Projektjahr (2020) wurden erste geodätische Messdaten zeitgleich mit der Basismessung mittels Präzisionsnivellement im Bereich der Geothermieanlage Schäftlarnstraße erfasst. Parallel dazu erfolgten planmäßig ab dem zweiten Projektjahr die Datenverarbeitung (AP3) sowie die Erarbeitung der INSIDE-Kommunikationsstrategie (AP6.1).

Im dritten Projektjahr (2021) wurde die Dateninfrastruktur für DAS-Daten in der Geothermieanlage Schäftlarnstraße im Rahmen des Datenmanagements (AP2) umgesetzt. Außerdem wurde der Wasserrechtsantrag für die Tracerversuche (AP1.5) genehmigt. Mit der Einstellung von Rahim Habibi am KIT-AGW ab Mitte des dritten Projektjahres begannen die Arbeiten zur Erarbeitung des THM-S-Modells (AP4.5, Teilvorhaben INSIDE-KIT).

Der Fokus des vierten Projektjahres (2022) lag auf den Reservoirmodellierungen (AP4). Durch den INSIDE-Partner KIT-AGW wurde im Rahmen von AP4.2 das Benchmarking der statischen geomechanischen Modelle (Slip- und Dilation-Tendency-Analysen) durchgeführt. Aufgrund betrieblicher Verzögerungen bei der Durchführung der Langzeit-Produktions- und Injektionsversuche (LZPIV) in der Geothermieanlage Schäftlarnstraße konnten die Betriebsszenarien den Partnern erst Ende des vierten Projektjahres benannt werden. Dies hatte zeitliche Auswirkungen auf die ursprünglich mit Beginn des dritten Projektjahres geplanten Kalibrierungen des Reservoirmodells (AP4). Weiterhin führte ein Hackerangriff auf den KIT-GIK-Server Mitte des vierten Projektjahres zu einem Verlust der prozessierten Deformationsdaten (AP3.3). Zudem verzögerte sich die Erfassungen der Tracerstoffe, was zu einer weiteren kostenneutralen Verlängerung der Projektlaufzeit bis zum 31.05.2024 führte.

Eine Übersicht der Teilaufgaben in den Arbeitspaketen sowie Verweise auf die INSIDE-Schlussberichte der Partner für detailliertere Informationen sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Liste der INSIDE-Arbeitspakete und Angabe des Partners, in dem in den jeweiligen Schlussberichten detaillierte Informationen zu finden sind.

<b>Arbeitspakete/Teilaufgaben</b>	<b>Bericht</b>
<b>AP1 Basisdatenerhebung und Datenaufnahme (Leitung: KIT)</b>	
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
<b>AP2 Datenmanagement (Leitung: SWM)</b>	
AP2.1 Anforderungsanalyse an Hardware und Software, Konzepte & Design des Datenmanagements	SWM
AP2.2 Aufbau eines Datenmanagement-Systems	SWM
AP2.3 Konzeptentwicklung Datenmanagement	SWM
<b>AP3 Monitoring und Datenbearbeitung (Leitung: KIT)</b>	
AP3.1 Post-Prozessieren der aufgezeichneten mikroseismischen Daten	KIT
AP3.2 Prozessieren der Bohrloch-Logging Daten und Ermittlung von Geschwindigkeitsmodellen	Alle
AP3.3 Prozessieren von Deformationsmessungen an der Oberfläche	KIT
AP3.4 Datenauswertung der Kernuntersuchungen	SWM
<b>AP4 Modellierung (Leitung: KIT)</b>	
Schäftlarnstraße	
AP4.1 Geologische und Strukturgeologische Modellierung	SWM
AP4.2 Geomechanische Modellierung nach Abteufen der Bohrungen	SWM/KIT
AP4.3 TH-Modellierung nach Abteufen der Bohrungen	SWM
AP4.4 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
Synthetisch	
AP4.5 THM-S Modellierung	KIT
<b>AP5 Datenintegration (Leitung: SWM)</b>	
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
<b>AP6 Kommunikationsstrategie (Leitung: IEP)</b>	
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
<b>AP7 Projektmanagement (Leitung: KIT)</b>	

## **I.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand an den angeknüpft wurde**

### **Basisdatenerhebung und Datenaufnahme (AP1)**

#### *Zu AP1.1: Regionale Geologie und geophysikalische Daten für die Reservoircharakterisierung*

Mit der verstärkten Bohraktivität in der bayerischen Molasse seit 2008 wurden verschiedenen Forschungsinitiativen zur Reservoircharakterisierung gestartet. Folgende Schlussberichte sind hervorzuheben:

- Wissenschaftliche und technische Grundlagen zur strukturellen und hydrogeologischen Charakterisierung tiefer geothermisch genutzter Grundwasserleiter am Beispiel des süddeutschen Molassebeckens (BMU - FKZ: 0327671AB)
- PUMA: Quantifizierung der lokalen und Prognose der regionalen hydraulischen und hydrochemischen Reservoireigenschaften des Malmaquifers auf Basis eines Push Pull Tests am Standort Pullach (BMU - FKZ: 0325469)
- MAFA: Parametrisierung von Fazies, Diagenese, Struktur- und Spannungsfeld sowie Optimierung der Testabläufe im Malm zur Verringerung des Erfolgsrisikos (BMW - FKZ: 0325673A)
- Geothermische Charakterisierung von karstig-klüftigen Aquiferen im Großraum München (BMU - FKZ: 0325013A)
- Minimierung von Risiken bei Planung und langfristigem Betrieb tiefegeothermischer Anlagen im bayerischen Molassebecken (BMW - FKZ: 0325280A)
- GRAME: Ganzheitlich optimierte und nachhaltige Reservoirerschließung für tiefegeothermische Anlagen im bayerischen Molassebecken. Entwicklung eines 50 MWel Kraftwerks und Erschließung von 400 MWth für die Fernwärme in München (BMW - FKZ: 0325787A)
- GeoParaMol: Geophysikalische Parameter zur faziellen Interpretation des Malms und Modellierung des thermisch-hydraulischen Langzeitverhaltens (BMW - FKZ: 0325787B)
- GEOMaRE Verbundvorhaben „Ganzheitlich optimierte und nachhaltige Reservoirerschließung für tiefegeothermische Anlagen im bayerischen Molassebecken; Teilvorhaben: ReGEO – Reservoirengineering und GEOMATIC (BMW - FKZ: 0324332A)
- Verbundprojekt MAGS: Konzepte zur Begrenzung der mikroseismischen Aktivität bei der energetischen Nutzung geothermischer Systeme im tiefen Untergrund, Einzelprojekt 2: Untersuchung von Mikro-Beben in der bayerischen Molasse im Umfeld von geothermischen Reservoiren (BMW - FKZ: 0325191C)

#### *Zu AP1.2: Seismisches Monitoring*

Seit der Erfassung der ersten seismischen Ereignisse im Umfeld von Geothermiebohrungen in den Jahren 2008/2009, die mit dem überregionalen seismischen Messnetz detektiert wurden, welches im Auftrag des Erdbebendienstes durch die Ludwig-Maximilians-Universität München (LMU) im Geophysikalischen Observatorium Fürstenfeldbruck (GOF) betrieben wird, werden die Messdaten auch in Kooperation mit weiteren Instituten wie der Technischen Universität München (TUM) und dem Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG) unter wissenschaftlichen Gesichtspunkten untersucht. Seithel et al. 2019a und Seithel 2019b fassten den aktuellen Stand des Wissens über Seismizität und die Ergebnisse aus dem Monitoring in der Molasse zusammen. Die zeitliche und räumliche Streuung der beobachteten Ereignisse lässt jedoch noch keinen einheitlichen, erkennbaren Mechanismus hinsichtlich des Prozessverständnisses induzierter Seismizität im Untergrund erkennen. Unter technischen Gesichtspunkten regelt in Deutschland die DIN 4150-3 die Messung und Überwachung von Erschütterungen (DIN 4150, Deutsches Institut für Normung e.V., 2016). Diese Norm zielt jedoch nicht auf die Lokalisierung der Emissionsquelle und das Prozessverständnis ab, sondern regelt, wie Erschütterungseinwirkungen auf Bauwerke zu messen und zu beurteilen sind.

Bei Geothermiebohrungen, an denen noch keine Seismizität im Zusammenhang mit der Nutzung der Tiefengeothermie nachgewiesen wurde, fordert die bayerische Bergrechtsbehörde derzeit mindestens eine Messstation pro Re-Injektion. Diese Anforderung basiert auf dem Positionspapier zur Überwachung induzierter Seismizität des Forschungskollegiums Physik des Erdkörpers e.V. (FKPE) aus dem Jahr 2012. Ein Anliegen des INSIDE-Projekts war es, das Messnetz im Bereich der Geothermieanlage Pullach, der im Erprobungsbetrieb befindenden Geothermieanlage Schäftlarnstraße/Sendling sowie der geplanten Geothermieanlage in Baierbrunn zu verdichten, um das Prozessverständnis induzierter Seismizität und Bodendeformation zu verbessern. Zeitgleich planten die Betreiber der Geothermieanlagen im Raum München im Jahr 2019 die Verdichtung des Messnetzes zur Nahbeobachtung seismischer Aktivitäten. Diese Maßnahmen wurden in den Jahren 2020–2022 zur Erfüllung der gesetzlichen Auflagen sowie aus Transparenzgründen gegenüber der Öffentlichkeit umgesetzt. Das Betreiber-Messnetz im Überwachungsgebiet des Raums München stellt eine vollständige Dokumentation aller seismischen Ereignisse ab einer Magnitude  $M_L = 1,0$  sicher, was weit unterhalb der Schwelle von 2,0–2,5 liegt, ab der Erschütterungen durch den Menschen spürbar sind. Das Messnetz wurde gemäß den Empfehlungen des FKPE-Positionspapiers erstellt, um den Anforderungen an das Design des Messnetzes, die Monitoringverfahren zur Erfassung von Ereignissen sowie die Hintergrundbodenunruhe zur Lokalisierung von Ereignissen gerecht zu werden. Ein weiterer bedeutender Schritt zu verbessertem mikroseismischen Monitoring wurde während der Antragsstellung von INSIDE über das Projekt „Reservoircharakterisierung“ der TUM im Rahmen der ersten Phase der Geothermie-Allianz Bayern (GAB) geplant. Das Messkonzept sah vor, unter anderem Distributed Acoustic Sensing (DAS)-Glasfaserkabel für die Aufnahme akustischer Signale an bis zu drei ausgewählten Bohrungen in der Schäftlarnstraße zu installieren.

### *Zu AP1.3: Bohrlochmessungen*

Geophysikalische Bohrlochmessungen sind ein fester Bestandteil bei der Niederbringung von Tiefbohrungen. In der Geothermie sind vor allem Gamma-Ray (GR)-, Widerstands- und Caliper-Logs sowie vereinzelt Borehole-Imaging- und Sonic-Log-Messungen Standard. Diese Messungen liefern zusammen mit den Auswertungen von Cuttinganalysen, Bohrparametern und Pumpversuchen petrophysikalische, hydraulische und thermische Daten, die zur Charakterisierung von Bohrungen und dem umgebenden Gestein bzw. des Reservoirs beitragen, um standortabhängige Untergrundmodelle zu erstellen. Im Hinblick auf die Ableitung von lokalen Spannungsparametern für die geomechanische Modellierung sind orientierte Caliper-Messungen und Imagelog-Messungen in der Reservoirsektion wichtig. Darüber hinaus liefern Dichte- und Nuclear Magnetic Resonance (NMR)-Logs in Kombination mit den genannten Bohrlochmessungen genauere Angaben über Porosität und gebirgsmechanische Eigenschaften (z. B. Seithel et al., 2015).

Für die Tiefenzuordnung von seismischen Ereignissen ist die Genauigkeit des Scherwellengeschwindigkeitsmodelles entscheidend. Die erste Tiefenzuordnung der Ereignisse in Unterhaching im Jahr 2009, die im Rahmen des Forschungsprojektes „Geothermische Charakterisierung von karstig-klüftigen Aquiferen im Großraum München“ (BMU - FKZ: 0325013A) und folgenden Projekten stattfanden, sprach von einer Tiefe deutlich unterhalb des Malms, also unterhalb des bewirtschafteten Reservoirs. Im Laufe der weiteren Untersuchungen im Rahmen der Forschungsprojekte MAGS1 und MAGS2 nahm die Lokalisierungstiefe aufgrund eines verbesserten Geschwindigkeitsmodells ab. Dennoch bleibt aufgrund der Unschärfe in den ermittelten Geschwindigkeitsmodellen bis heute eine Unsicherheit bestehen, und es werden Hypozentren im Basement vermutet.

Für die Erarbeitung des Geschwindigkeitsmodells im Bereich der Geothermieanlage Schäftlarnstraße lieferten neben der 3D-Seismik GRAME unter anderem die Untersuchungen zu den Scherwellengeschwindigkeiten sowie die in den Bohrungen Riem und Freiham durchgeführten VSP-Messungen im F&E-Projekt GRAME und GeoParaMol eine Grundlage (Wawerzinek, 2017). In beiden Vorhaben wurden jedoch keine reinen Scherwellengeschwindigkeiten, sondern  $v_p/v_s$ -Verhältnisse ermittelt.



Mit Antragsstellung von INSIDE war bekannt, dass 4D-Time-Lapse-Images mit Distributed Acoustic Sensing (DAS)-Glasfaserkabel in der Erdöl- und Gasindustrie zur Bestimmung des Geschwindigkeitsfeldes genutzt werden können. Insbesondere zur Validierung des bestehenden Geschwindigkeits- und Schichtmodells wurde in zerstörungsfreien Kalibrierungsmessungen ein Mehrwert gesehen. Hierbei sind Sparkermessungen eine zerstörungsfreie Methode, um eine reproduzierbare seismische Quelle im Bohrloch zu simulieren und gleichzeitig tomografische Crosswell-Untersuchungen zu ermöglichen (Goertz und Wuestefeld, 2018). Weitere wissenschaftliche Untersuchungen zur Ermittlung des Geschwindigkeitsfeldes über DAS-GFK erfolgten im CO<sub>2</sub>-Speicherungsprojekt Ketzin mittels aktiver VSP-Messungen (Götz et al., 2018).

Das geplante Bohrlochmessprogramm der Schäftlarnstraße im Rahmen des GEOmaRE-Projekts umfasste Sonic Log- und VSP-Messungen in allen Sektionen, NMR-Messungen zur Bestimmung der effektiven Porosität sowie den Einbau von DAS-/DTS-GFK in der Ankerrohrtour einer Geothermiebohrung und bis zur Endteufe des Reservoirs in der Produktionsbohrung Th4 über ein externes Teilprojekt der GAB.

#### *Zu AP1.4: Deformationsmessungen an der Oberfläche*

Erst seit der Novellierung der EinwirkungsBergV im Oktober 2017 ist seitens der Bergbehörde ein Monitoring zur Erfassung von Hebungen und Senkungen während Bergbautätigkeiten (u. a. Tiefbohrungen) vorgeschrieben. Zu Beginn des INSIDE-Projekts bestanden noch keine Erfahrungen für ein geeignetes Messkonzept zur Erfassung von Hebungen und Senkungen im Umfeld der Geothermiebohrungen in Bayern. Solche Messungen werden in den Geothermieprojekten der bayerischen Molasse mit markscheiderisch begleiteten Präzisionsnivellement-Messungen in halbjährlichen bis mehrjährigen Abständen durchgeführt. Ein Nachteil der Nivellementmessungen ist jedoch, dass keine Angaben zu den horizontalen Verschiebungs- und Deformationskomponenten bestimmt werden. Weiterführende Deformationsmessungen, die über eine kombinierte Datenauswertung von 80 permanenten GNSS-Stationen, Nivellementmessungen und C-Band SAR-Szenen durchgeführt wurden, konnten im Oberrheingraben Oberflächenbewegungen mit einer maximalen Genauigkeit von 0,2 mm/Jahr monitoren.

#### *Zu AP1.5: Tracerversuche*

Tracerversuche sind eine Standardmethode, um die Konnektivität zwischen Injektions- und Förderbohrungen zu testen. Darüber hinaus liefern sie Erkenntnisse über das Volumen und die hydraulischen Transporteigenschaften des Reservoirs und stellen somit einen integralen Bestandteil der hydraulischen Reservoircharakterisierung dar. In der Geothermie finden überwiegend thermostabile Tracer Einsatz, die auch bei Temperaturen jenseits von 100 °C ein konservatives Verhalten zeigen. Beispiele dafür sind Naphthalin-Sulfonate (Rose et al., 2000) oder, mit gewissen Einschränkungen auch Uranin (Adams & Davis, 1991). Für spezielle Fragestellungen können auch thermosensitive Tracer genutzt werden, die speziell auf die im Reservoir vorliegenden Temperaturbereiche abgestimmt sind (Nottebohm et al., 2012). Mit solchen Tracern lässt sich die thermische Abkühlung in einem Reservoir abbilden, da mit zunehmender Ausbreitung der Abkühlungsfront der thermisch induzierte Tracerzerfall reduziert wird. Es sind jedoch mehrere Tracerzugaben mit einem zeitlichen Abstand von mehreren Jahren notwendig, um eine Abkühlungsfront über thermosensitive Tracer charakterisieren zu können. Eine Neuentwicklung, die auch für die Nutzung unter geothermischen Bedingungen interessant ist, sind DNA-Nanotracer, die eine Hülle aus Siliziumdioxid besitzen. Die Nachweisgrenze dieser Tracer ist um Größenordnungen niedriger als die für konventionelle gelöste Tracer (Sharma et al., 2012). Zudem wurde im Feldversuch ein sehr gutes Retentionsverhalten nachgewiesen (Kong et al., 2018).

Im INSIDE-Projekt war geplant, die aus den Tracerversuchen gewonnenen Erkenntnisse in Simulationsmodellen zu nutzen, um ein verbessertes hydraulisches Reservoirverständnis zu erreichen. Dies sollte erfolgen, um (1) die Prognosefähigkeit des geomechanischen Stabilitätszustandes zu verbessern und (2) die langfristige Wirtschaftlichkeit eines Projektes in Bezug auf einen thermischen Durchbruch zu evaluieren und gegebenenfalls zu optimieren.

#### *Zu AP1.6: Aufschlussanalogie Studie an Kernproben*

Die Untersuchung von Probenmaterial aus Kernen ist in der E&P-Industrie seit langem ein integraler Bestandteil zur Charakterisierung von Reservoiren.

In der Geothermie erfolgt die Bewertung des Reservoirs über Bohrkernuntersuchungen bisher nur in geringem Umfang. Dabei werden an den Kernmaterialien thermo- und petrophysikalische Kennwerte im Labor ermittelt (Bohnsack et al. 2020), und das Reservoir wird über Modellrechnungen klassifiziert. Eine weitere Methode zur Prognose der Reservoirereigenschaften besteht in der Untersuchung von Oberflächenproben, die aus Aufschlüssen an Gesteinsformationen gewonnen werden. Aus den ermittelten Gesteinskennwerten können Simulationen zur Druck-, Temperatur- und Tiefenabhängigkeit von Reservoiren erstellt werden (Homuth, 2014; Potten 2020; Bohnsack et al. 2021; Bohnsack 2023).

### **Datenmanagement (AP2)**

Beim Management umfangreicher kontinuierlicher Datenströme, die über mehrere Terabytes pro Tag umfassen, konnte auf bestehende Lösungen von industriellen Soft- und Hardware-Anbietern zurückgegriffen werden.

Die benötigte Datenarchitektur und -verwaltung sollte im Rahmen des Vorhabens an die Anforderungen der Betreiber und das Messkonzept angepasst werden. Hierbei spielten vor allem Zugriffs- und Datennutzungsrechte eine wichtige Rolle. Es war geplant, unter anderem dem Erdbebendienst Bayern bzw. dem Geophysikalischen Observatorium Fürstenfeldbruck (GOF) sowie weiteren Partnern Zugriffsrechte zur weiteren Verwertung zu gewähren.

### **Monitoring und Datenverarbeitung (AP3)**

#### *Zu AP3.1: Seismisches Monitoring*

Das Monitoring der einzelnen Bohrungen erfolgte zu Beginn von INSIDE im Jahr 2019 über betriebseigene Oberflächenstationen, wobei die Datenauswertung an externe Dienstleister der Geothermiebetreiber im Raum München vergeben war.

Seit 2022 wird durch die Geothermiebetreiber im Raum München ein gemeinsames seismologisches Monitoringnetz betrieben. Die Datenauswertung erfolgt zum Zeitpunkt der Berichtslegung durch das Geophysikalische Observatorium Fürstenfeldbruck (GOF) und den externen Dienstleister K-UTEC AG (siehe hierzu auch weiter oben im Abschnitt AP1.2).

#### *Zu AP3.2: Prozessieren der Bohrloch-Logging Daten*

Bohrloch-Logging-Daten werden üblicherweise innerhalb des sogenannten „seismic to production workflows“ in Reservoirmodelle eingepflegt, um Reservoir-Parameter abzuleiten bzw. zu prognostizieren. Es war geplant, die neu erhobenen sowie bereits vorliegenden Bohrlochmessdaten aus Parallel-Vorhaben als Eingangsdaten für die Modellierungen in AP4 zu verwenden.

#### *Zu AP3.3: Prozessieren von Subsidenz-/Hebungsmessungen an der Oberfläche*

Erste Modellrechnungen zur Abschätzung von Subsidenzen haben ohne Berücksichtigung thermischer Einflüsse gezeigt, dass die durch die Reservoirbewirtschaftung verursachte Druckänderung weit unter der Detektionsgrenze an der Oberfläche zu erwarten ist (ERDWERK, 2018). Monitoringkonzepte zum kontinuierlichen Nachweis von Bodenbewegungen über satellitengestützte Vermessungsmethoden, wie Globale Satellitennavigation (GNSS) und Persistent-Scatterer-SAR-Interferometrie (PSI), werden in der E&P-Industrie, im Bergbau und zum Monitoring natürlicher Deformationsereignisse (unter anderem Erdbeben, Vulkanismus und Hangrutschungen) angewandt. Im Großraum München wird bereits seit mehreren Jahren die Aufzeichnung von X-Band-Daten am Earth Observation Center des DLR beauftragt. Die Daten wurden bisher nach der PSI-Methode prozessiert und in ein Geoinformationssystem implementiert.



#### *Zu AP3.4: Bohrkerndatenverarbeitung*

Für die Modellierung von Reservoirprozessen und deren Charakterisierung werden statische Eingangsparameter, wie Elastizitätsmodul und Poissonzahl, benötigt. Die Bestimmung dieser geomechanischen Kennwerte und weiterer Parameter, wie Reibungsparameter, erfolgt üblicherweise anhand von Kernen im Labor über Ein- und Triaxial-Druckfestigkeitsversuche (Bohnsack et al., 2020; Bohnsack et al., 2021; Bohnsack 2023). In Kombination mit Ultraschallmessungen zur Bestimmung der P- und S-Wellengeschwindigkeit können daraus empirische Beziehungen zwischen statisch und dynamisch ermittelten Gesteinsparametern verifiziert werden (Modellkalibrierungen) (Potten, 2020). Entsprechende Kernuntersuchungen aus oberflächennahen Aufschlussproben wurden innerhalb des Projektes INSIDE geplant.

### **Reservoirmodellierung (AP4)**

#### *Zu AP4.1: Geologische und Strukturgeologische Modellierung*

Über die Projekte GRAME und GEOmaRE lagen dem INSIDE-Vorhaben bereits geologische Modelle im Umfeld der Schäftlarnstraße vor. Diese Modelle sollten im Falle neuer Erkenntnisse angepasst werden.

#### *Zu AP4.2: Geomechanische Modellierungen*

Für die Bohrungen an der Schäftlarnstraße wurden vor Bohrbeginn statische geomechanische Simulationen zur Berechnung des rezenten Spannungsfeldes entlang der bekannten Störungsflächen mittels Slip- und Dilation-Tendency-Analysen durchgeführt (Savvatis, 2018). Bereiche, in denen eine plastische Scherverformung und folglich ein möglicher Herd eines seismischen Ereignisses zu erwarten ist, wurden dabei quantifiziert.

Die verwendeten Eingangsdaten basierten hierbei auf der World Stress Map (Standard-Datenbank), Borehole Breakouts umliegender Geothermiebohrungen sowie Literaturwerten.

#### *Zu AP4.3: Thermohydraulische Modellierung*

Die im Reservoir zu erwartenden Druck- und Temperaturverteilungen werden üblicherweise vor dem Abteufen der Bohrungen im Rahmen eines Wärmebergbaumodells über thermisch-hydraulische Simulationen für verschiedene Langzeit-Förderszenarien und über mehrere Dekaden prognostiziert. Diese Modelle werden durch Eingangsdaten aus Bohrlochmessungen, Bohrkernuntersuchungen und Pumpversuchen parametrisiert bzw. kalibriert. Eine weitere Möglichkeit der Modellkalibrierung durch in-situ-Daten liegt in der Durchführung von Tracerversuchen. Auf diese Weise kann der Wärmetransport im Reservoir zeitlich abgebildet werden und die Ausbreitung der Abkühlungsfront modelliert werden. Ein Wärmebergbaumodell für die Bohrungen der Schäftlarnstraße existierte bei der Antragsstellung von INSIDE noch nicht.

#### *Zu AP4.4: Gekoppelte thermohydraulisch-mechanische Simulation*

Für die Prognose der zeitabhängigen Druck- und Temperaturentbreitung im Geothermieprojekt Schäftlarnstraße hat die SWM Services GmbH bereits erste thermisch-hydraulisch-(4D)-geomechanische Modellierungen vor dem Abteufen der Bohrungen durchgeführt. Grundlage dieser Simulationen war ein One-Way-Coupling-THM-Modell, in das die Druck- und Temperaturverteilungen im Reservoir (simuliert über das TH-Modell) importiert wurden. Die Ergebnisse der 4D-geomechanischen Einweg-gekoppelten-Simulationen in der Schäftlarnstraße zeigten, dass die Abkühlung (verglichen mit der Druckerhöhung) um eine Injektionsbohrung im Reservoir einen großen Einfluss auf den Stabilitätszustand des Störungssystems hat (aus Savvatis, 2018).

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 unter anderem die Prognose induzierter THM-Prozesse im Reservoir, basierend auf der Art

und dem Ausmaß der gekoppelten Prozesse (Gaucher et al., 2015; Kohl und Mégel, 2007; Schoenball et al., 2010; Ucar et al., 2017). Innerhalb von INSIDE wurde ein erweitertes und standortunabhängiges „THM-Tool“ angestrebt, das auf probabilistischen Ansätzen, zum Beispiel Wellmann und Regenauer-Lieb (2012), basiert. Dieses Tool soll Entwicklern, Investoren, Errichtern und Betreibern von Geothermieprojekten eine optimierte Charakterisierung und Entwicklung der geothermalen Reservoirs ermöglichen.

## Datenintegration (AP5)

### *Zu AP5: Seismische Frühwarn- und Reservoirmanagementsysteme*

Klassische Ampelsysteme zur Überwachung von Seismizität über statistische Gefährdungsanalysen wurden unter anderem durch Bommer et al. (2006) eingeführt. Diese Systeme modellieren die Auftrittswahrscheinlichkeit eines Ereignisses mit einer bestimmten Magnitude und Bodenschwinggeschwindigkeit. Die Schwellenwerte dieser Systeme (in der Regel auf Basis festgelegter Bodenschwinggeschwindigkeiten und/oder Lokalmagnituden) werden ad hoc auf Basis von Expertenurteilen festgelegt und führen bei Überschreitung zum Abbruch bzw. zur Anpassung operativer Maßnahmen. Die Implementierung der klassischen Ampelsysteme als Reservoirmanagementsystem berücksichtigt hierbei jedoch nicht die gesamte Bandbreite möglicher Szenarien betrieblicher Abläufe (siehe z. B. Tiefe Geothermieprojekte Basel, St. Gallen).

Aufgrund der Unzulänglichkeit der klassischen Ampelsysteme wurden unter anderem von der ETH Zürich adaptive Ampelsysteme entwickelt und getestet (Wiemer et al., 2017). Diese erweiterten Reservoirmanagementsysteme (RMS) basieren auf Ansätzen, welche die Auftrittswahrscheinlichkeit seismischer Prozesse sowie geohydraulische und geomechanische Schlüsselparameter wie Porenfluiddruck, Permeabilität und Spannungsänderung implementieren. Die Grundlage für diese zum Teil noch nicht in den Betrieb integrierten Überwachungssysteme bilden THM-Modelle. Im Gegensatz zu rein reaktiven klassischen Ampelsystemen wird in dynamisch adaptiven RMS das Reservoirverhalten nicht nur beobachtet, sondern auch prognostiziert (Gaucher et al., 2015; Wiemer et al., 2017).

Zur Umsetzung von aktiven Entscheidungsprotokollen und betrieblichen Handlungsanleitungen sollten im Rahmen eines modernen Reservoirmanagements projektangepasste adaptive Systeme erarbeitet und eingeführt werden. Diese Systeme sollten sowohl Standortcharakterisierungen zur Überwachung natürlicher und induzierter Seismizität (klassische Gefährdungsanalysen) als auch eine Steuerung operativer Prozesse auf Basis prognostizierter geohydraulischer Parameter ermöglichen (Grigoli et al., 2017).

Entwicklungen von modifizierten Reaktionsschemata, beispielsweise aus statischen Skalierungsparametern ( $b$ -Wert der Gutenberg-Richter-Relation,  $p$ -Wert des angepassten Omori-Gesetzes) und reservoirkontrollierenden Parametern wie dem injiziertes Fluidvolumen und seismogenen Index, können zudem in Kombination mit Modellierungsansätzen in RMS verwendet werden (Shapiro et al., 2013). Die Anwendung dieser RMS in operativen Betrieben ist Gegenstand wissenschaftlich-technischer Diskussionen (Trutnevyte et al., 2017).

Insbesondere die Untersuchungen während der MAGS1- und MAGS2-Projekte (2010–2018), unter anderem südlich von München, konzentrierten sich neben dem Design von seismischen Monitoringkonzepten auf seismische Gefährdungsanalysen und konnten Prognosen zur Seismizität, während der Planungs-, Bohr- und Betriebsphase liefern (vgl. Megies et al., 2017).

Ein erster Leitfaden („Good Practice“) zum Monitoring, Bewerten sowie zum Umgang mit induzierter Seismizität in Tiefengeothermieprojekten wurde über das Screening-Tool „Geothermisches Risiko der induzierten Seismizitätsdiagnose“ (GRID) von Wiemer (2017) für Projekte in der Schweiz erarbeitet. Über das GRID kann für einen Geothermiestandort das induzierte seismische Risiko abgeschätzt und ein Arbeitsprogramm (u. a. Gefährdungs- und Risikobewertungen, Empfehlungen zum Design des Messnetzes, Einführung von Ampelsystemen etc.) entwickelt werden.

Hinsichtlich des Aufbaus eines RMS wurde im Bereich der Erdgasfelder in Norddeutschland eine Strategie zur Verringerung von induzierter Seismizität entwickelt und Empfehlungen zu räumlichen und zeitlichen Druckhaltungsmaßnahmen abgeleitet (Müller et al., 2018; Schöner et al., 2015). Mit den Untersuchungen, basierend unter anderem auf felsmechanischen Triaxial-Druckversuchen im Labor, hochauflösenden Subsidenzanalysen mit Persistent Scatter InSAR und numerischen Modellrechnungen, konnte für die Betreiber der Erdgasfelder ein RMS entwickelt werden.

### **Kommunikation (AP6)**

Induzierte Seismizität ist ein aktuelles Thema auf wissenschaftlicher, politischer und sozialer Ebene und wird an verschiedenen Geothermiestandorten diskutiert. Als regionaler Energieversorger ist sich die SWM der Bedeutung der öffentlichen Akzeptanz gegenüber Geothermieprojekten bewusst und möchte proaktiv das Thema induzierter Seismizität kommunizieren. Dies verlangt eine projektbezogene Kommunikationsstrategie, die Vertrauen zwischen öffentlichen Interessengruppen und Geothermiebetreibern schafft und die Öffentlichkeit in die betrieblichen Abläufe eines Geothermieprojektes einbezieht (Wiemer et al., 2017).

Neben der Erarbeitung einer proaktiven und transparenten Kommunikationsstrategie ist die Verbreitung von Fehlinformationen, zum Beispiel zur induzierten Seismizität, ein Problem für die Akzeptanz der Tiefengeothermie. Ein Beispiel für ein öffentlich transparentes Webportal ist das Bürgerinformationsportal des Bundesverbands Erdgas, Erdöl und Geoenergie e.V. (BVEG). Seit 2007 wird die Region östlich von Bremen durch die deutschen Erdgasproduzenten seismisch überwacht. Seit 2013 betreibt der BVEG das sogenannte Bürgerinfo Seismisches Messsystem (BSM) im Internet, in dem die erhobenen seismischen Daten veröffentlicht und in einer interaktiven Karte dargestellt werden.

Erste Konzepte für den Aufbau einer Web-GIS-Plattform im süddeutschen Raum wurden innerhalb des Seedfunding-Projektes „Seismic Monitoring in the Urban to Sub-Urban Environment of the Greater Munich Area“ der GAB im Jahr 2017 entwickelt. Ziel dieser Plattform ist es, den Informationsfluss von Daten zu seismischen Ereignissen und Standorten seismischer Messstationen zwischen Betreibern, Behörden und Erdbebendienst zu verbessern. Zurzeit ist die Plattform nicht öffentlich zugänglich. Über die Internetseite des Bayerischen Erdbebendienstes werden alle in Bayern erfassten seismischen Messdaten in Echtzeit und ungefiltert der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt.

#### I.4.1. Verwendete Fachliteratur

- Adams, C. M., & Davis, J., 1991. Kinetics of fluorescein decay and its application as a geothermal tracer. *Geothermics* (Vol. 20). [https://doi.org/10.1016/0375-6505\(91\)90005-G](https://doi.org/10.1016/0375-6505(91)90005-G).
- Arbeitsgruppe „Induzierte Seismizität“ FKPE e.V., 2012. Empfehlungen zur Überwachung induzierter Seismizität: Positionspapier des FKPE. DGG - Mitteilung 17–31.
- Bohnsack, D., Potten, M., Pfrang, D., Wolpert, P., Zosseder, K., 2020. Porosity–permeability relationship derived from Upper Jurassic carbonate rock cores to assess the regional hydraulic matrix properties of the Malm reservoir in the South German Molasse Basin. *Geotherm Energy* 8, 12 (2020). <https://doi.org/10.1186/s40517-020-00166-9>
- Bohnsack, D., Potten, M., Freitag, S., Einsiedel, F., Zosseder, K., 2021. Stress sensitivity of porosity and permeability under varying hydrostatic stress conditions for different carbonate rock types of the geothermal Malm reservoir in Southern Germany. *Geotherm Energy* 9, 15 (2021). <https://doi.org/10.1186/s40517-021-00197-w>
- Bohnsack, D., 2023. Hydraulic properties of carbonate rocks from the Upper Jurassic “Malm” aquifer of the South German Molasse Basin and their dependencies on variable effective stress conditions within the reservoir. TUM.
- Bommer, J., Oates, S., Cepeda, J., Lindholm, C., Bird, J., Torres, R., Marroquin, G., Rivas, J., 2006. Control of hazard due to seismicity induced by a hot fractured rock geothermal project. *Engineering Geology* 83, 287-306, doi: 10.1016/j.enggeo.2005.11.002.
- ERDWERK, 2018. Deformation an der Oberfläche durch den Betrieb der Doppeldublette Unterföhring Th1-Th4. Unveröffentlichter Ergebnisbericht. Auftraggeber GEOVOL GmbH, München 2018.
- ERDWERK GmbH, 2021. Geothermie Schäftlarnstraße Schlussbericht IPS-Arbeiten Schäftlarnstraße Th5 (interner Bericht). München. Unveröffentlicht.
- ERDWERK GmbH, 2024. Geothermie Schäftlarnstraße – Wärmebergbaugutachten Geothermieanlage Schäftlarnstraße (S. 220). ERDWERK GmbH. München. Unveröffentlicht.
- Gaucher, E., Schoenball, M., Heidbach, O., Zang, A., Fokker, P., Wees, J. - D., Kohl, T., 2015. Induced seismicity in geothermal reservoirs: a review of forecasting approaches. *Renew Sustain Energy Rev* 52. doi:10.1016/j.rser.2015.08.026.
- Gelhar, Lynn W.; Welty, Claire; Rehfeldt, Kenneth R., 1992. A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers. In: *Water Resour. Res.* 28 (7), S. 1955–1974.
- Goertz, A., Wuestefeld, A., 2018. Real-time passive monitoring with a fibre-optic ocean bottom array. *First Break*, Vol. 36, p. 55 – 61.
- Götz, J. Lüth, S., Henniges, J., Reinsch, T., 2018. Vertical seismic profiling using a daisy-chained deployment of fibre-optic cables in four wells simultaneously-Case study at the Ketzin carbon dioxide storage site. *Geophysical Prospecting*, 2018, 66, 1201-1214. doi:10.1111/1365-478.12638.
- Grigoli, F., Cesca, S. et al., 2017. Current challenges in monitoring, discrimination and management of induced seismicity related to underground industrial activities: a European perspective. *Reviews of Geophysics*, doi:10.1002/2016RG000542.

- Homuth, S., 2014. Dissertation. Aufschlussanalogiestudie zur Charakterisierung oberjurassischer geothermischer Karbonatreservoirs im Molassebecken. Technische Universität Darmstadt. 17.10.2014.
- Leibundgut, C.; Maloszewski, P.; Kulls, C., 2009. Tracers in Hydrology. Chichester: Wiley-Blackwell.
- Kong, X.-Z., Deuber, C. A., Kittilä, A., Somogyvári, M., Mikutis, G., Bayer, P., et al., 2018. Tomographic Reservoir Imaging with DNA-Labeled Silica Nanotracers: The First Field Validation. *Environmental Science & Technology*, 52(23), 13681–13689. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b04367>.
- Kohl, T., Mégel, T., 2007. Predictive modeling of reservoir response to hydraulic stimulations at the European EGS site Soultz-sous-Forêts. *Int J Rock Mech Min* 44 (8), 1118–1131. doi:10.1016/j.ijrmms.2007.07.022.
- Megies, T., Wassermann, J., 2017. Mikroseismische Aktivität geothermischer Systeme 2 – Vom Einzelsystem zur großräumigen Nutzung. Einzelpaket 2 – Untersuchungen zur optimierten seismischen Überwachung hydrogeothermaler Systeme bei dichter räumlicher Lage der Bohrerlaubnisfelder am Beispiel der Situation im Süden Münchens. Unveröffentlichter Bericht.
- Müller, B., Röckel, T., Schöner, A., Wampach, M., Westerhaus, M., Lempp, C., Scheezük, C., Schilling, F., 2018. How Earthquake Magnitudes of Induced Events at Reservoir Level Can Be Limited – A Stress and Deformation Approach. DGMK/ÖGEW-Frühjahrstagung 2018, Fachbereich Aufsuchung und Gewinnung Celle, 18./19. April 2018.
- Nottebohm, M., Licha, T., & Sauter, M., 2012. Tracer design for tracking thermal fronts in geothermal reservoirs. *Geothermics*, 43, 37–44.
- Potten, M., 2020. Geomechanical characterization of sedimentary and crystalline geothermal reservoirs. TUM.
- Rose, P. E., Benoit, W. R., Lee, S. G., Tandia, B. K., & Kilbourn, P. M., 2000. Testing the naphthalene sulfonates as geothermal tracers at Dixie Valley, Ohaaki, and Awibengkok. Proceedings of the Twenty-Fifth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford University, Stanford, California. January 24-26, 2000 (p. 7).
- Savvatis, 2018. Geothermie Schäftlarnstrasse Geomechanische Simulation vor Bohrbeginn - Unveröffentlichter Bericht. Auftraggeber SWM, München 2018.
- Schoenball, M., Müller, T.M., Müller, B.I.R., Heidbach, O., 2010. Fluid-induced microseismicity in prestressed rock masses. *Geophys J Int* 180 (2), 813–819. doi:10.1111/j.1365-246X.2009.04443.x.
- Schöner, A., Müller, B., Schilling, F., Westerhaus, M., Zippelt, K., Lempp, C., Röckel, T., Scheezük, C., 2015, RMS – Reservoir Management and Seismicity: Entwicklung von Strategien zur Verringerung von induzierter Seismizität in Gasfeldern, DGMK/ÖGEW-Frühjahrstagung 2015, Fachbereich Aufsuchung und Gewinnung, Celle, 22./23. April 2015. Ap04443. x.
- Seithel, R., Gaucher, E., Mueller, B., Steiner, U., & Kohl, T., 2019a. 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. J., 2019b. Geomechanical characterization of geothermal reservoirs in the Bavarian Molasse Basin. Karlsruher Instituts für Technologie.

- Seithel, R., Steiner, U., Müller, B., Hecht, C., & Kohl, T., 2015. Local stress anomaly in the Bavarian Molasse Basin. *Geothermal Energy*, 3(1). <https://doi.org/10.1186/s40517-014-0023-z>
- Shapiro et al., 2013. Abschlussbericht für das Verbundprojekt MAGS: Konzepte zur Begrenzung der mikroseismischen Aktivität bei der energetischen Nutzung geothermischer Systeme im tiefen Untergrund. Einzelprojekt EP5: Modellierung der Auftretswahrscheinlichkeiten fluidinduzierter Erdbeben mit einer gegebenen Magnitude bei der Stimulation geothermischer Systeme. [https://www.bgr.bund.de/MAGS/DE/Downloads/MAGS\\_Abschlussbericht\\_EP5.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.bgr.bund.de/MAGS/DE/Downloads/MAGS_Abschlussbericht_EP5.pdf?__blob=publicationFile&v=1).
- Sharma, A. N., Luo, D., & Walter, M. T., 2012. Hydrological Tracers Using Nanobiotechnology: Proof of Concept. *Environmental Science & Technology*, 46(16), 8928–8936. <https://doi.org/10.1021/es301561q>.
- Trutnevyte, E., Wiemer, S., 2017. Tailor-made risk governance for induced seismicity of geothermal energy projects\_: An application to Switzerland. *Geothermics*, 65, 295-312.
- Ucar, E., Berre, I., Keilegavlen, E., 2017. Postinjection Normal Closure of Fractures as a Mechanism for Induced Seismicity. *Geophysical Research Letters* 44 (19), 9598–9606. doi:10.1002/2017GL074282.
- Wawerzinek, B., 2017. Datenbearbeitung zur Ableitung der vp-vs-Verhältnisse aus der VSP Daten der Bohrung Freiham TH-1. – 10 S. Hannover. Unveröffentlicht.
- Wellmann, J.F., Regenauer-Lieb, K., 2012. Uncertainties have a meaning: Information entropy as a quality measure for 3-D geological models, *Tectonophysics* 526-529, 207–216, doi:10.1016/j.tecto,2011,05,001.
- Wiemer, Kraft, Trutnevyte, Roth, 2017. Good Practice Guide for Managing Induced Seismicity in Deep Geothermal Energy Projects in Switzerland. Swiss Seismological Service (SED). <https://doi.org/10.12686/a5>



## 1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des INSIDE-Verbundprojekts bestand in mehreren Arbeitspaketen eine enge Zusammenarbeit mit verschiedenen Projekten, Institutionen und Firmen. Dazu gehörten Projekte wie GEOmaRE und GFK-Monitor sowie folgende Institutionen wie die Geothermie-Allianz Bayern (GAB), das GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ), das Geophysikalische Observatorium Fürstenfeldbruck (GOF), das GeoZentrum Nordbayern (GZN) die Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), die Ludwig-Maximilians-Universität München (LMU), die Ruhr-Universität Bochum (RUB), Arbeitsgruppe Ingenieurgeologie und Felsmechanik, die Technischen Universität München (TUM) und Firmen wie die ERDWERK GmbH, Febus-Optics sowie Avalon Sciences.

In der Zusammenarbeit mit dem GOF sind besonders die Austauschgespräche zur Planung des seismischen Messnetzes und der Datenauswertung (AP1.2, AP3.1), zur Aktualisierung des Geschwindigkeitsfeldes (AP3.2) und zum THM-Seismologischen Modell (AP4.5) hervorzuheben.

Bei den seismologischen Datenauswertungen und dem verbesserten Geschwindigkeitsfeld im INSIDE-Untersuchungsgebiet ist insbesondere Dr. Jérôme Azzola vom KIT-AGW hervorzuheben, der maßgeblich zum Pioniercharakter der DAS-Datenauswertung im INSIDE-Projekt beitrug.

Darüber hinaus waren Rahim Habibi (KIT-AGW) und Thomas Ulrich (LMU) die maßgeblichen Treiber bei der Erarbeitung des gekoppelten THM-S-Modells in AP4.5. Dieses Modell entstand nach einem Wissenstransfer-Workshop Anfang 2022, der vom GOF und der LMU (Arbeitsgruppen von Prof. Alice-Agnes Gabriel und Dr. Joachim Wassermann) organisiert wurde, als Gemeinschaftsarbeit. Bei diesem Treffen trug insbesondere Dr. Robert Egert mit seinen Erfahrungen über die Reservoirmodellierungen am Geothermiestandort Pullach und Baierbrunn zum Austausch der ersten Ansätze und zum Aufbau des THM-S-Modells bei.

Mit der GAB und der TUM, Lehrstuhl für Hydrogeologie, die die GFK in den Schäftlarnstraßenbohrungen Th3 und Th4 innerhalb eines vom Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie (StMWi) geförderten Projektes eingebaut haben, sowie dem GFZ Potsdam, NORSAR und den Firmen ERDWERK GmbH, Avalon Sciences und Febus Optics fanden wissenschaftlich-technische Austauschgespräche statt. Diese Gespräche betrafen die Planung der in AP3.2 durchgeführten Sparkermessungen sowie zur Abschätzung der zu erwartenden DAS-Datenmenge innerhalb des kontinuierlichen Monitorings in der Schäftlarnstraße über sechs Monate. Insbesondere die IT-spezifischen Planungen von Febus Optics, KIT und SWM führten zum Erfolg des DAS-Monitorings durch die automatischen DAS-Datentransfers in die Microsoft Azure Cloud, wo sie innerhalb der Cloud durch das KIT prozessiert wurden.

An der INSIDE-Vorstudie des KIT-GIK zum Deformationsmonitoring in AP3.3 und AP5.2, die durch den Forschergeist von Dr. Malte Westerhaus und Bence Ambrus vom KIT-GIK ermöglicht wurde, beteiligten sich die Geothermiebetreiber des Großraums München über mehrere Austauschgespräche sowie durch die Bereitstellung von Daten aus herkömmlichen Messverfahren (u. a. Wärmeversorgung Ismaning GmbH & Co. KG und Energie-Wende-Garching GmbH & Co. KG).

Ein weiterer wichtiger Beitrag wurde durch die INSIDE-Aufschlussanalogstudie (AP1.6, AP3.4) zur Ermittlung thermo- und petrophysikalischer Gesteinskennwerte aus Oberflächenproben in der Nördlichen und Südlichen Frankenalb geliefert. Diese Studie wurde von Prof. Roman Koch vom GZN durchgeführt, ergänzt durch eine Literaturstudie zu bereits vorliegenden Daten. Dr. Mandy Duda, Katharina Neumann und Prof. Tobias Backer von der RUB führten Untersuchungen der von Prof. Koch gewonnenen Gesteinsmaterialien im Felslabor durch. Darüber hinaus war Alexandros Savvatis von der ERDWERK GmbH beteiligt an der Auswahl der zu beprobenden Gesteinsproben aus unterschiedlichen Faziesbereichen.

Das Referat für Bildung und Sport sowie das Gartenbauamt (KVR) der Landeshauptstadt München unterstützten das INSIDE-Projekt bei der Standortnutzung des Siemensparks für das Mini-Array. Behördliche Vertreter vom StMWi und dem Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU) wurden



Stadtwerke München

regelmäßig in Konferenzen, wie dem Format GAB-Wissenstransfer, über die INSIDE-Arbeiten und Ergebnisse informiert.

Schlussendlich wäre der Erfolg des INSIDE-Projekts ohne den Innovationsgeist von Dr. Emmanuel Gaucher (KIT-GIK) und seine Vordenkerrolle, insbesondere für das RMS, sowie die intensive und erfolgreiche Zusammenarbeit aller beteiligten Kolleginnen und Kollegen von IEP, KIT und SWM, und der involvierten Partner nicht möglich gewesen.



## **Kapitel II**

# **Ergebnisse**

## **II. Ergebnisse**

### **II.1. Verwendung der Zuwendung mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele**

Die folgenden Abschnitte geben eine Übersicht über die durchgeführten Arbeiten und erzielten Ergebnissen. Die Leitung der Arbeitspakete durch die Verbundpartner ist in den Überschriften aufgeführt. Verlinkungen zu detaillierteren Ergebnisdarstellungen durch die Partner sind in den folgenden Abschnitten gesondert ausgewiesen.

#### **II.1.1. Basisdatenerhebung und Datenaufnahme - Arbeitspaket 1 (Leitung: KIT)**

##### **Regionale Geologie und geophysikalische Daten für die Reservoircharakterisierung (AP1.1)**

Die bei den SWM bereits vorhandenen Basisdaten, einschließlich geologischer, petro- und geophysikalischer Daten, wurden den INSIDE-Partnern KIT und IEP unter anderem für die Entwicklung der Reservoirmodelle (AP4) durch die Firma ERDWEK GmbH zur Verfügung gestellt. Während der Projektlaufzeit wurden neu erhobene Daten wie die Log-Messdaten aus GEOmaRE, Produktionsdaten und Ergebnisse aus den Kernuntersuchungen (AP3.4) weitergeleitet.

##### **Seismisches Monitoring (AP1.2)**

Ziel des AP1.2 war es, im INSIDE-Untersuchungsgebiet der Geothermieanlagen Schäftlarnstraße, Pullach und des in der Planung befindlichen Standorts Baierbrunn ein seismisches Messnetz zur Erfassung mikroseismischer Ereignisse und schwacher Seismizität als Ergänzung zu den bereits installierten Stationen zu planen und zu errichten. Dies sollte ein verbessertes Reservoirverständnis für induzierte Seismizität ermöglichen. Für das Ziel von AP5.1, Kosten-/Nutzenanalysen der seismischen Aufzeichnungen, war eine weitere Anforderung an das INSIDE-Messnetz, Standardüberwachungstechniken wie Oberflächen- und Bohrloch-Seismometer und innovative Messtechniken wie Mini-Array und Distributed Acoustic Sensing (DAS) zu integrieren.

In der Planungsphase des Messnetzes wurden die INSIDE-Standorte, sowie die bereits durch das GOF und Betreiber im Raum München installierten Stationen im näheren Umgriff des Untersuchungsgebiets durch den Verbundpartner KIT-AGW nach den Vorgaben des FKPE-Positionspapiers evaluiert. Dies erfolgte über die Auswertung der im Mai 2020 durchgeführten seismischen Hintergrundrauschenmessungen zur Berücksichtigung der Erfassungs-, Lokalisierungs- und Magnitudensensitivität. Die Planungen führten dazu, dass die im Forstenrieder Park geplante Messstation nach der Bewertung der natürlichen Bodenunruhe um ca. 900 m nach Nordwesten verlegt wurde. Die minimal zu erfassende Magnitude innerhalb des INSIDE-Messnetzes, welches bis zu fünf Stationen umfasst, abgesehen vom Mini-Array und den DAS-Installationen in der Monitoringbohrung in Buchenhain (BUCH) sowie den Geothermiebohrungen in der Schäftlarnstraße, wurde auf  $M_w = -0,7$  geschätzt. Außerhalb des INSIDE-Messnetzes steigt die Detektionsschwelle unter Berücksichtigung der Betreiberstation in Unterhaching auf  $M_w = -0,5$ .

In die Standortsuche für den Aufbau der INSIDE-Messsensorik waren alle drei Verbundpartner eingebunden. Das KIT hat die aufgebaute seismische Messtechnik über das INSIDE-Projekt beschafft. Abbildung 2 zeigt das INSIDE-Messnetz mit vier seismischen Oberflächenstationen (Seismometertyp: Trillium Compact surface, 120 s, Abtastfrequenz: 250 Hz, Inbetriebnahme: 1. Halbjahr 2021) sowie einem im November 2020 in die Grundwassermessstelle in der Siemensallee eingebauten Bohrlochseismometer in einer Teufe von 170 m (Typ Trillium Compact Posthole, 20 s). Des Weiteren umfasste

das seismologische Monitoring DAS-Datenerfassungen. Diese wurden mit dem im Juli 2021 in die neu bis 250 m niedergebrachte INSIDE-Monitoringbohrung BUCH zementierten GFK für DAS- und Distributed Temperature and Strain Sensing (DTSS)- Messungen durchgeführt. Die Niederbringung der Monitoringbohrung BUCH erfolgte durch den INSIDE-Verbundpartner IEP. Der Partner KIT hat die Messtechnik beschafft und aufgebaut, während die SWM die Infrastrukturanbindung (z. B. Stromversorgung) hergestellt hat. Die Standorte des im Mai 2022 im Siemenspark installierten Mini-Arrays, bestehend aus acht obertägigen Stationen (Typ DATA-Cube, Firma DiGOS Potsdam GmbH), sind im Schlussbericht des Verbundpartners KIT dokumentiert.

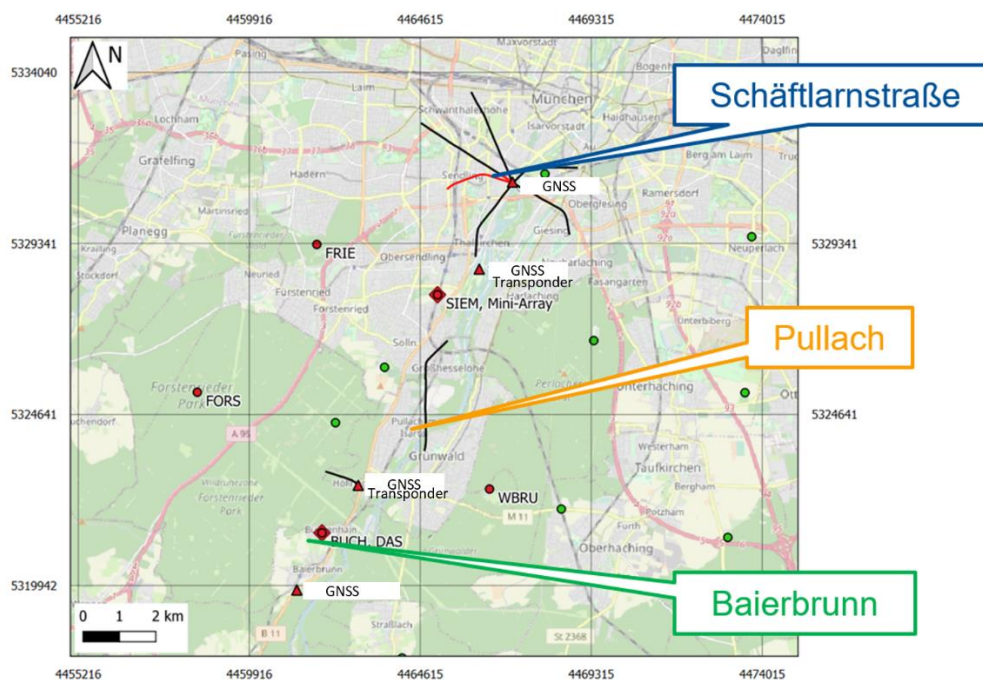


Abbildung 2: Übersicht über das installierte INSIDE Monitoringnetzwerk im Süden von München. Die schwarzen Linien zeigen die Verläufe der Bohrungen in der Schäftlarnstraße und Pullach. Rote Punkte: Positionen der INSIDE-Stationen. Grüne Punkte: Positionen der MAGS-Stationen. Rote Dreiecke: Positionen der GNSS- und Transponder-Stationen.

Zusätzlich zu dem vertikal in der Monitoringbohrung BUCH zementierten GFK wurden GFK in einer 100 m Schleife in 80 cm Tiefe um die Bohrung vergraben und bilden somit ein weiteres seismisches Mess-Array. Die Standortsuche für ein ursprünglich nahe der Monitoringbohrung BUCH geplantes zweites Bohrlochseismometer führte zu keinem Ergebnis. Da die erste Ausschreibung des Partners IEP zur Niederbringung der Bohrung kein wirtschaftlich zufriedenstellendes Ergebnis hervorbrachte, musste das Ausbaukonzept angepasst werden. In Abstimmung mit der GAB/TUM konnte das in die Schäftlarnstraßenbohrungen Th3 und Th4 installierte DAS für das seismologische Monitoring in INSIDE genutzt werden (siehe AP3.1 und AP3.2).

Mit Ausnahme des Mini-Arrays im Siemenspark sowie der GFK der Monitoringbohrung BUCH und GTH SLS erfolgte die Datenübertragung an das KIT über SeedLink („Echtzeit-Datenerfassungsprotokoll“). Es ist geplant, die seismologischen INSIDE-Stationen weiterhin innerhalb des seismologischen Betreiber-netzes zu betreiben, um dadurch einen Beitrag zu einem verbesserten Verständnis des Reservoirs in Bezug auf induzierte Seismizität durch wissenschaftliche Datenverarbeitung durch das KIT sowie das GOF zu ermöglichen.

Eine detailliertere Darstellung der Ergebnisse zu AP1.2, einschließlich der Standortsuche zum Aufbau des seismologischen INSIDE-Messnetzes, der Inbetriebnahme, Wartung und Datenverfügbarkeit, ist im INSIDE-Schlussbericht des KIT sowie in Azzola (2020, 2021a und 2023e) beschrieben.

### **Bohrlochmessungen (AP1.3)**

Die Tiefenlokalisierung seismischer Ereignisse stellte im INSIDE-Projekt eine zentrale Rolle für das Prozessverständnis induzierter Seismizität dar. Dazu wurden am Standort der Geothermieanlage Schäftlarnstraße (GTH SLS) im November 2020 zur Verbesserung des Geschwindigkeitsmodells tomographische Crosswell-Messungen über Sparker-Schüsse in Tiefenniveaus zwischen 334 m MD und 1.200 m MD durchgeführt. Die bergrechtliche Zulassung für die Crosswell-Messungen erfolgte durch das Bergamt Südbayern im Februar 2020.

Die in den Crosswell-Messungen eingesetzte Impulsquelle der Firma Avalon wurde aufgrund technischer und wirtschaftlicher Kriterien (siehe Vergabeempfehlungen in ERDWERK, 2020a) sowie aufgrund wissenschaftlicher Beratungen und der im Vorfeld der Messkampagne durch den INSIDE-Partner KIT und im Unterauftrag beauftragten GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ) durchgeführten Machbarkeitsstudien (Schwarz, 2020) ausgewählt. Aus den wissenschaftlich-technischen Beratungen ging hervor, dass mit einer Impulsquelle stärkere Signale mit einer größeren Reichweite im Vergleich zu einer Vibrationsquelle erzeugt werden können.

Insgesamt wurden in der Durchführung der Sparkermessung vier Runs gefahren: drei Runs für den Wechsel des Sondenkopfes der Sparkerquelle nach 1.000 Schüssen und ein Testlauf. Als Empfänger dienten die in den Bohrungen Th3 und Th4 installierten DAS-Glasfaserkabel sowie drei obertägig aufgestellte 3C-Geophone. Vor jedem Run wurden Kalibrierungsmessungen (Klopftests am Wellhead per Hammerschlag) zur Funktionskontrolle der Messsysteme durchgeführt. Die Messdurchführung und detailliertere Informationen zu den Ergebnissen der Crosswell-Messungen sind in Azzola (2021b) und Thiemann (2024b) dokumentiert.

Des Weiteren waren begleitend zum Projekt GEOmaRE im INSIDE-Projekt passive DAS-VSP-Messungen vorgesehen. Da die VSP-DAS-Messungen an der Schäftlarnstraßenbohrung Th4 teilweise im Rahmen der im GEOmaRE-Projekt durchgeführten aktiven VSP-Messung, einschließlich der Erfassung über eine in der Bohrung Th1 installierten Hydrophonkette im Jahr 2020, erfolgten, wurde dieses Forschungsziel in INSIDE nicht weiterverfolgt.

Als Alternativprogramm zu den passiven VSP-DAS-Messungen wurden im INSIDE-Projekt zur Verbesserung des Geschwindigkeitsfeldes, vor allem im Hinblick auf eine mögliche Ermittlung von Scherwellen, die DAS-Datenerfassungen und -auswertungen während der Langzeit-Pump- und Injektionsversuche (LZPIV) in der Schäftlarnstraße über einen Zeitraum von sechs Monaten geplant.

### **Deformationsmessungen an der Oberfläche (AP1.4)**

Für die kombinierte Datenerfassung und -auswertung von Bodenhebungen und -senkungen über ein innovatives Monitoringsystem, unter anderem zur Bestimmung und Überwachung des Einwirkungsbereiches geothermischer Aktivitäten im Untergrund, wurden im Rahmen des INSIDE-Projekts im August 2022 vier GNSS-Stationen sowie im September 2021 zwei Transponderstationen errichtet. Zudem wurden im Umgriff der Geothermieanlage Schäftlarnstraße temporär Feinnivellement- sowie Radarinterferometrie (InSAR)-Messungen durchgeführt.

Hierbei haben die SWM die Verbundpartner in der Planung, dem Aufbau und der Wartung des obertägigen Deformationsmessnetzes, einschließlich der Standortsuche, unterstützt. Des Weiteren wurde für die Durchführung von Beweissicherungs-nivellement-Messungen nach Abschluss der Bohrarbeiten ein marktscheiderisch bestelltes Dienstleistungsunternehmen beauftragt. Die Erstmessung erfolgte im Frühjahr 2021, die Wiederholungsmessung im darauffolgenden Jahr. Detailliertere Informationen zur Einrichtung und Durchführung des geodätischen Beobachtungsnetzes zur Erfassung von Deformationen an der Erdoberfläche sind im INSIDE-Schlussbericht des KIT sowie in Westerhaus et al. (2024a) aufgeführt.

## Tracerversuche (AP1.5)

### 1. Tracerdesign

Zur Minimierung der notwendigen Tracermasse wird das derzeit empfindlichste Verfahren zur Detektion der Tracer verwendet (High-Pressure-Liquid-Chromatography, Kurzform HPLC). Mittels dieses Verfahrens wurden Wasserproben der Produktionsbohrungen auf ihre Nachweisempfindlichkeit bezüglich der Tracerchemikalien von der Firma Hydroisotop untersucht. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 dargestellt. Aufgrund von Hintergrundfluoreszenz sind die Nachweis- und Bestimmungsgrenzen im Thermalwasser am Projektstandort Schäftlarnstrasse deutlich schlechter als bei den meisten anderen bekannten Projekten im Molassebecken. Dies stellt eine erhöhte Anforderung an die Dimensionierung des Tracers. Für die Zugabe ausgewählt wurden die drei Tracer NTSA (1,3,6-Naphthalintrisulfonsäure), PTSA (1,3,6,8-Pyrentetrasulfonsäure) und Uranin.

Tabelle 2: Nachweis- und Bestimmungsgrenzen für die geplanten Tracerchemikalien sowie in ebenfalls getestete, aber aufgrund ihrer hohen Nachweisgrenzen ausgeschlossener Chemikalien (1,6 Naphthalindisulfonsäure (NDS) und weitere Napthalindisulfonsäure-Isomere mit Sulfonsäuregruppen an den Stellen 2,6; 2,7; und 1,5).

Tracer	Nachweisgrenze [ $\mu\text{g/L}$ ]	Bestimmungsgrenze [ $\mu\text{g/L}$ ]
NTSA	0,0050	0,0150
PTSA	0,0040	0,0100
Uranin	0,0003	0,0010
16NDSA	0,7000	2,3000
26NDSA	0,0150	0,0500
27NDSA	0,0200	0,0600
15NDSA	>0,1000	-

Als empirisches Dimensionierungsverfahren wird die Zugabemassenabschätzung nach Leibundgut et al. (2009) angewendet. Hierfür wird die Masse  $M$  über das Detektionslimit  $C_B$  und das markierte Dublettensvolumen  $V_W$  berechnet:

$$M = 10 \cdot C_B \cdot V_W$$

Das Detektionslimit  $C_B$  kann über folgende Formel unter Berücksichtigung des stoffspezifischen Fluoreszenzintensitätskoeffizienten  $a$  ermittelt werden:

$$C_B = 0,01 \cdot a \left[ \frac{\mu\text{g}}{\text{L}} \right]$$

Der  $a$ -Koeffizient nimmt für Uranin den Wert 1 an. Für 1368-PTSA und 136-NTSA sind in Leibundgut et al. (2009), Tabelle 4.4 keine  $a$ -Koeffizienten aufgelistet. Daher wurden diese analog zu anderen Tracern in besagter Tabelle gemäß folgender Formel berechnet.

$$a = \text{Nachweisgrenze}/0.001$$

Die Berechnung orientiert sich an den Nachweisgrenzen für Tracer mit schlechterer Nachweisbarkeit (z. B. beträgt für Eosin mit einer Nachweisgrenze von 0,01 der  $a$ -Koeffizient 10). Der  $a$ -Koeffizient beträgt für PTS 4 und für NTS 5. Das markierte Dublettensvolumen  $V_W$  kann aus dem Abstand der Produktions- und Injektionsbohrung  $L$ , der Aquifermächtigkeit  $m$  und der durchschnittlichen Porosität  $n$ , sowie dem versuchsspezifischen  $p$ -Wert berechnet werden. Dieser Wert beträgt für ein Monopol-

System (Einfachdoublette) 1, und für einen Dipol 3. Werte für mehrere Dipolssysteme existieren nicht. In der vorliegenden Rechnung wurde der Wert von 3 verwendet. Die Aquifermächtigkeit  $m$  wurde als  $\frac{3}{4}$  der Mächtigkeit von Top bis Basis Malm angesetzt.

$$V_w = p \cdot \pi \cdot L \cdot m \cdot n$$

Die Ergebnisse der Berechnung sind in Tabelle 3 dargestellt. Es wurden nur jene Konfigurationen betrachtet, bei denen ein Tracerdurchbruch realistisch erscheint. Aufgrund zu großer Distanzen und der hiermit verbundenen Erfordernis von extremen Tracermassen wird auf eine direkte Untersuchung der Interaktion zwischen Th5 und Th2a, Th3 und Th2a und Th6 und Th1 verzichtet. Die Information über die Interaktion dieser Systeme kann im Nachhinein mithilfe einer Simulation aus den gemessenen Interaktionen der in Tabelle 3 aufgelisteten Doublettenpaare generiert werden.

Tabelle 3: Berechnung der erforderlichen Tracermasse in kg aus den Reservoirparametern

Bohrungspaar	Abstand „L“ [m]	„M“ NTS [kg]	„M“ PTS [kg]	„M“ Uranin [kg]
Th5-Th1	2014	210	168	42
Th5-Th4	1745	158	126	32
Th3-Th1	2639	393	314	79
Th3-Th4	1326	99	79	20
Th6-Th2a	2160	354	283	71
Th6-Th4	1265	121	97	24

Aufgrund der Tatsache, dass die Massen für NTSA und PTSA zu hoch für eine praktikable Versuchsdurchführung sind, wurde eine analytische Modellierung durchgeführt, um die empirische Abschätzung der Tracermasse zu ergänzen. Dies ist insofern sinnvoll, als dass das empirische Verfahren nicht für die Interaktion von Mehrdoublettensystemen entwickelt wurde. Für die analytische Modellierung wurde ein Parametersatz in Anlehnung an die Ergebnisse der Auswertung des Tracerdurchbruchs der Geothermieranlage Kirchstockach verwendet. Die mittlere Durchbruchzeit ( $t_0$ ) wurde jedoch deutlich erhöht, um dem größeren Anteil von Matrixpermeabilität am Standort Schäftlarnstrasse Rechnung zu tragen.

Die Tracerkonzentrationen wurden mit dem Modell nach Lenda & Zuber (Leibundgut et al. 2009) Gleichung 5.24 berechnet.

Folgende Annahmen wurden getroffen:

- 100 kg Tracer
- Förderrate 100 l/s
- Rückgewinnung = 10 %
- $0,1 \leq PD \leq 0,7$
- $1.600 \text{ Tage} \leq t_0 \leq 3.200 \text{ Tage}$

Alle Modelle in Abbildung 3 zeigen eine Tracerkonzentration, die größer ist als die Bestimmungsgrenze (schlechteste Bestimmungsgrenze:  $0,015 \mu\text{g/L}$ ).

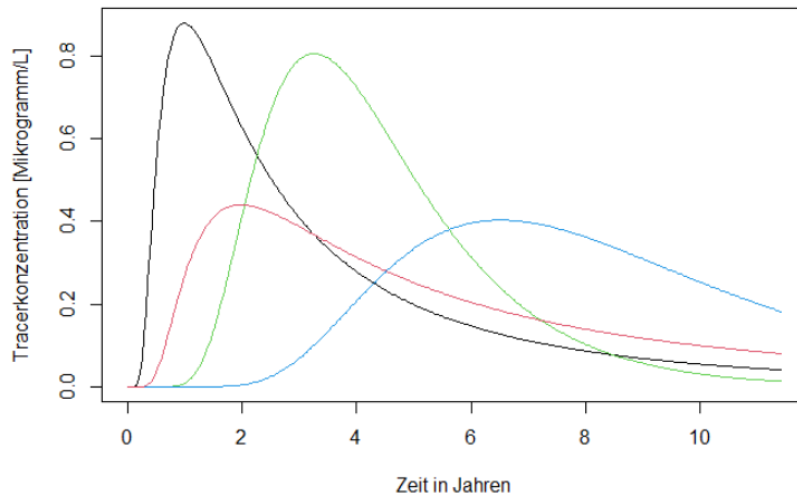


Abbildung 3: Tracerkonzentration bei unterschiedlichen Parametrisierungen der 1D Tracergleichung. Schwarz: PD=0.7, t0 = 1600d; rot: PD = 0.7, t0 = 3200d; grün: PD = 0.1, to = 1600d; blau: PD = 0.1, t0 = 3200d).

Aufgrund der Ergebnisse der analytischen Dimensionierung wird für die Tracer PTS und NTS eine Masse von 100 kg als ausreichend erachtet. Aufgrund der besseren Nachweisgrenze von Uranin werden hierfür 80 kg als ausreichend erachtet.

Die veranschlagten Massen für die jeweiligen Injektionsbohrungen sind in Tabelle 4 aufgeführt.

Tabelle 4: Veranschlagte Massen für den Tracerversuch

Tracer	kg	Injektionsbohrung
NTSA	100	Th5
PTSA	100	Th3
Uranin	80	Th6



## 2. Tracerzugabe

Die Injektion der Tracer fand am 24.11. und 25.11 2022 am Standort Schäftlarnstraße statt. Die Tracer wurden bereits angemischt in jeweils einem IBC-Container angeliefert und über die Wellheads in die Bohrungen injiziert (vgl. Abbildung 4). Die Probenahmestelle ist ca. 50 m von den Wellheads der Bohrung entfernt und wurde vom Personal, welches bei der Zugabe anwesend war, nicht betreten. Im Folgenden ist die Zugabe an den jeweiligen Bohrungen beschrieben.

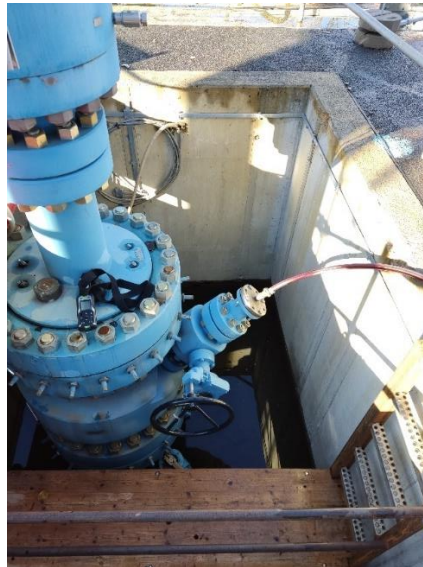


Abbildung 4: Injektionsleitung zum Flansch am Seiteneinlass des Wellheads.

Die Zugabe an der Doublette 1 (Th2a injiziert in Th6) fand am 24.11. im laufenden Betrieb statt. Da die Bohrung einen Gegendruck von 14,5 barü zum Zeitpunkt der Zugabe hatte, wurde mittels einer Hochdruckpumpe injiziert. Durch einen Pumpenschaden an der Injektionspumpe konnten jedoch nur 330 l der angemischten 550 l Uranin-Lösung injiziert werden. Die Zugabe erfolgte innerhalb von 32 Minuten. Anschließend wurde mit 1 m<sup>3</sup> Frischwasser nachgespült.

Die Zugabe an der Doublette 2 (Th1 injiziert in Th3) fand ebenfalls am 24.11. statt. Die Bohrung wurde zum Zeitpunkt der Injektion nicht betrieben, sodass eine drucklose Injektion mittels einer Fassungspumpe erfolgte. Die 1.000 l PTSA-Lösung konnten ohne Probleme innerhalb von 23 Minuten zugegeben werden. Anschließend wurde mit 1 m<sup>3</sup> Frischwasser nachgespült.

Die Zugabe an der Doublette 3 (Th4 injiziert in Th5) fand am 25.11. im laufenden Betrieb statt. Da die Bohrung einen Gegendruck von ca. 3 barü hatte, wurde mittels einer Kreiselpumpe injiziert. Am Boden des angemischten IBC-Containers (1 m<sup>3</sup> NTSA-Lösung) befand sich ein gewisser Anteil an ausgeflockten Feststoffen, da bei der Anmischung durch eine Fremdfirma versehentlich in 1 m<sup>3</sup> statt in 4 m<sup>3</sup> Frischwasser aufgelöst wurde. Daher wurde operativ entschieden, den Behälter zunächst zu etwa 95 % zu injizieren und anschließend den Bodensatz mit 500 l Frischwasser zu verdünnen, von denen 450 l injiziert wurden. Insgesamt wurde somit 1.400 l NTSA-Lösung zugegeben. Der Bodensatz mit Feststoffen wurde aus Gründen der Verstopfungsgefahr der Kreiselpumpe nicht injiziert. Die Zugabe dauerte 35 Minuten. Anschließend wurde mit 1 m<sup>3</sup> Frischwasser nachgespült. Um die injizierte Masse an NTSA zu ermitteln, wurden von der Firma Hydroisotop Löslichkeitsversuche mit NTSA durchgeführt. Diese Versuche ergaben eine Löslichkeit von 35 g/l in Frischwasser, wodurch die injizierte Menge berechnet werden konnte.

Insgesamt wurden somit folgende Mengen injiziert:

- Uranin: ca. 48 kg
- PTSA: 100 kg
- NTSA: ca. 35 kg



### 3. Tracerauswertung

#### 3.1. Methodik

Die Auswertung des Markierungsversuches erfolgt mittels der der normalisierten 1D-Transportgleichung nach Lenda & Zuber (Leibundgut et al. 2009):

$$C(t) = \frac{M * mrf}{Q t_0} \frac{1}{\sqrt{4\pi P_D \left(\frac{t}{t_0}\right)^3}} \exp \left[ -\frac{\left(1 - \frac{t}{t_0}\right)^2}{4P_D \left(\frac{t}{t_0}\right)} \right] \quad \text{Formel 1}$$

wobei  $C(t)$  für die berechnete Konzentration in Abhängigkeit zum Zeitpunkt der Tracerzugabe ( $t = 0$ ) steht,  $M$  für die eingegebene Masse,  $Q$  für die Durchflussmenge,  $t_0$  für die mittlere Fluidverweilzeit, und  $P_D$  für den Dispersionsparameter. Eine Modifikation dieses etablierten Auswerteverfahrens ist jedoch erforderlich, da ab dem Tracerdurchbruch der bereits angekommene Tracer reinjiziert wird und sich ab diesem Zeitpunkt in Rezirkulation befindet (Axelsson et al. 2001). Die Gleichung wurde daher um den Parameter  $mrf$  erweitert, welche den Massenrückgewinnungsfaktor beschreibt. Dieser Parameter ist für das Dekonvolutionsverfahren erforderlich, und definiert die Massenverluste, die bei jeder Injektion (und Rezirkulation auftreten). Nach dem Peakdurchgang ermöglicht er eine Auswertung des Tracers, bevor die vollständige Kurve vorliegt. Zudem ist der Massenrückgewinnungsfaktor erforderlich, da die Tracer an mehreren Bohrungen durchbrechen und somit eine vollständige Rückgewinnung an einer Bohrung unmöglich ist.

Zur Ableitung der Reservoirparameter wurde daher das Signal dekonvolviert sodass die Rezirkulation aus den Anpassungsparametern in Formel 1 herausgerechnet wird. Für die Förderraten wurde die durchschnittliche Förderrate seit Tracerzugabe verwendet, da die Funktion bei Änderungen von  $Q$  sprunghafte die Konzentration ändert. Im Gegensatz zu Einzeldoubletten wird bei dem Mehrdoublettensystem der Schäftlarnstraße der Tracer in unterschiedlichen Bohrungen rezirkuliert, sodass sich mehrere Rezirkulationssignale überlagern. Dies erfordert eine globale Optimierung aller Tracersignale im Gegensatz zur Einzeldoublettenoptimierung, welche für die Dekonvolution im vorliegenden Projekt angewandt wurde. Hierfür besteht weiterer Entwicklungsbedarf.

#### 3.2. Überblick über die Daten

Die rückgewonnenen Tracerkonzentrationen sind in Abbildung 5 dargestellt. An den Bohrungen Th1 (Dublette 2) und Th4 (Dublette 3) sind jeweils alle Tracer durchgebrochen. An der Bohrung Th2a hat bis zum Ende des Projekts kein Tracerdurchbruch stattgefunden. Am deutlichsten ist der Durchbruch von NTSA, welches insgesamt zu ca. 48 % rückgewonnen wurde und eine Erstankunftszeit von 3, bzw. 6 Monaten hat. Die Rückgewinnung ist zum jetzigen Zeitpunkt nur unwesentlich von der Rezirkulation beeinflusst (siehe Abbildung 7 und Abbildung 8). Ebenfalls gut interpretierbar ist der Durchbruch von PTSA, auch wenn die Rückgewinnung eine Größenordnung kleiner ausfällt. Die Erstankunft von PTSA beträgt etwa 6 bzw. 9 Monate. Die Erstankunft von Uranin ist an beiden Bohrungen nach ca. 7,5 Monaten. Jedoch ist der Konzentrationsverlauf erratisch und lässt sich nicht interpretieren. Ungewöhnlich ist, dass sich der Peak nicht über die Zeit aufbaut, wie bei den anderen Tracern, sondern innerhalb kurzer Zeit auf ein vorheriges Nullsignal folgt. Das Signal lässt sich nicht auf eine Kontamination rückführen, da dafür die Rückgewinnung deutlich zu hoch ist.

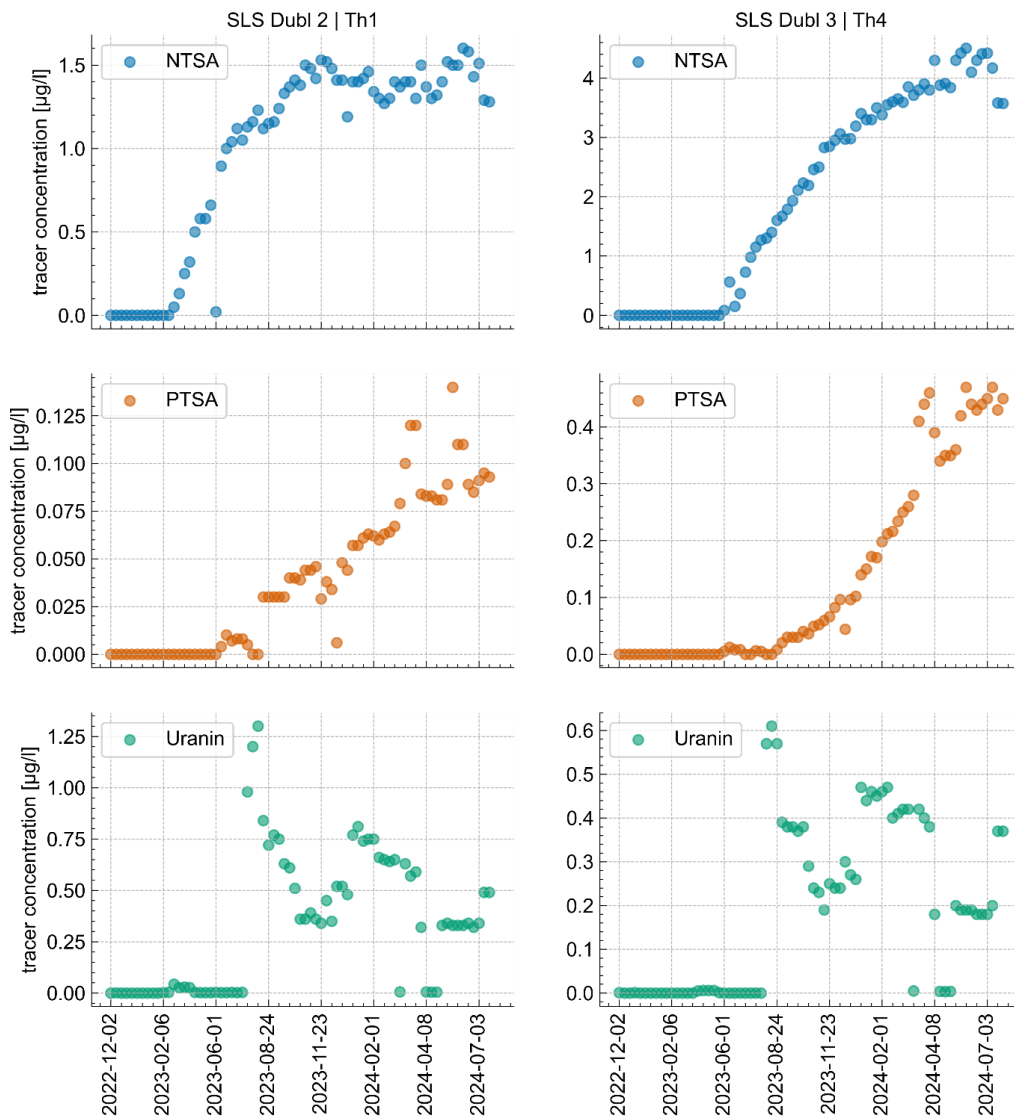


Abbildung 5: Tracerkonzentration an den Förderbohrungen über die Projektlaufzeit. Die Tracerzugabe fand Ende November 2022 statt.

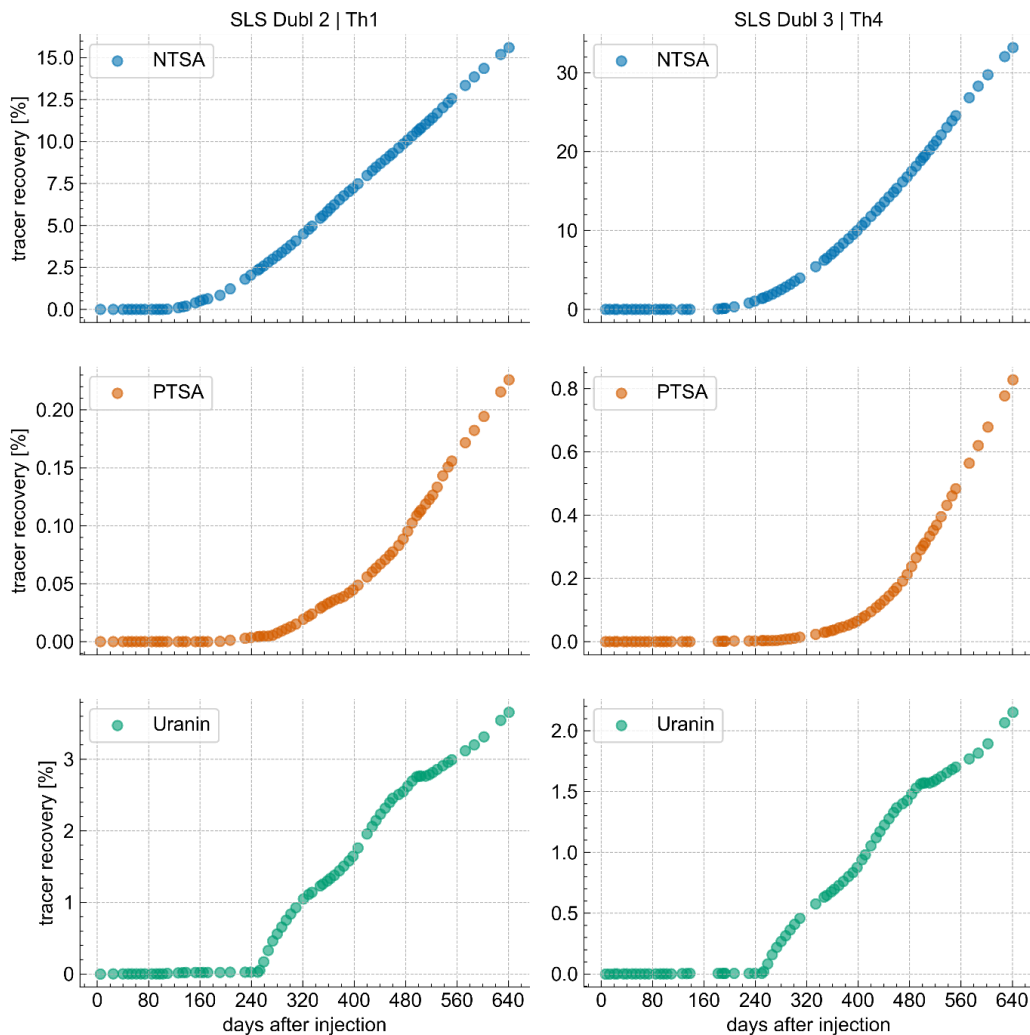


Abbildung 6: Rückgewinnungskurven der durchgebrochenen Tracer

### 3.3. Auswertung NTSA an der Th1

An der Th1 fand der Durchbruch von NTSA (Th5) nach 109 Tagen statt. Aktuell befindet sich die Kurve im Bereich ihres Peaks (vgl. Abbildung 7). Die Modellierung zeigt eine geringe mittlere Verweilzeit ( $t_0$ ) und eine hohe Rückgewinnung von ca. 16 %. Durch die kurze Durchbruchzeit und die hohe Rückgewinnung kommt es zu Rezirkulation in relevantem Ausmaß. Jedoch ist vor allem das im weiteren Verlauf des Versuchs zu messende Signal betroffen, die aktuellen Messwerte sind von der Rezirkulation kaum beeinflusst. Da der Tracerdurchgang bis zum Projektende nicht vollständig aufgezeichnet werden konnte, besteht noch eine gewisse Unsicherheit in den Auswerteparametern.

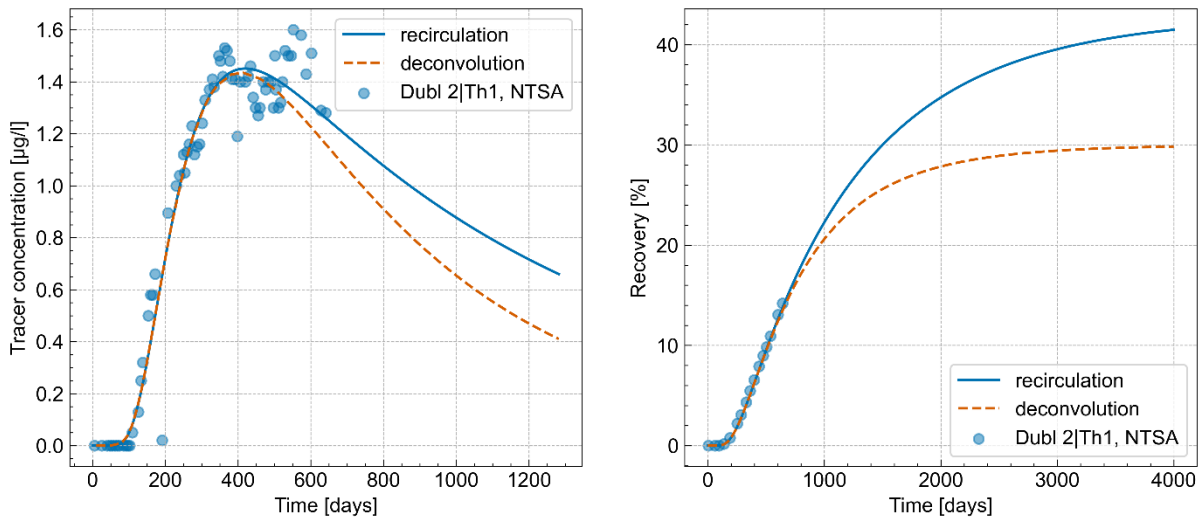


Abbildung 7: Tracer und Recovery fit von NTSA an der Bohrung Th1. Die blaue Kurve zeigt das Signal mit Rezirkulation, die orange Kurve das dekonvolutierte Signal.

### 3.4. Auswertung NTSA an der Th4

An der Th1 fand der Durchbruch von NTSA (Th5) nach 189 Tagen statt (vgl. Abbildung 8). Aktuell befindet sich die Kurve im Bereich ihres Peaks. Die Modellierung zeigt eine geringe mittlere Verweilzeit ( $t_0$ ) und eine sehr hohe Rückgewinnung von ca. 34 %. Durch die kurze Durchbruchzeit und die hohe Rückgewinnung kommt es zu Rezirkulation in relevantem Ausmaß. Jedoch ist vor allem das im weiteren Verlauf des Versuchs zu messende Signal betroffen, die aktuellen Messwerte sind von der Rezirkulation kaum beeinflusst. Da der Tracerdurchgang bis zum Projektende nicht vollständig aufgezeichnet werden konnte, besteht noch eine gewisse Unsicherheit in den Auswerteparametern.

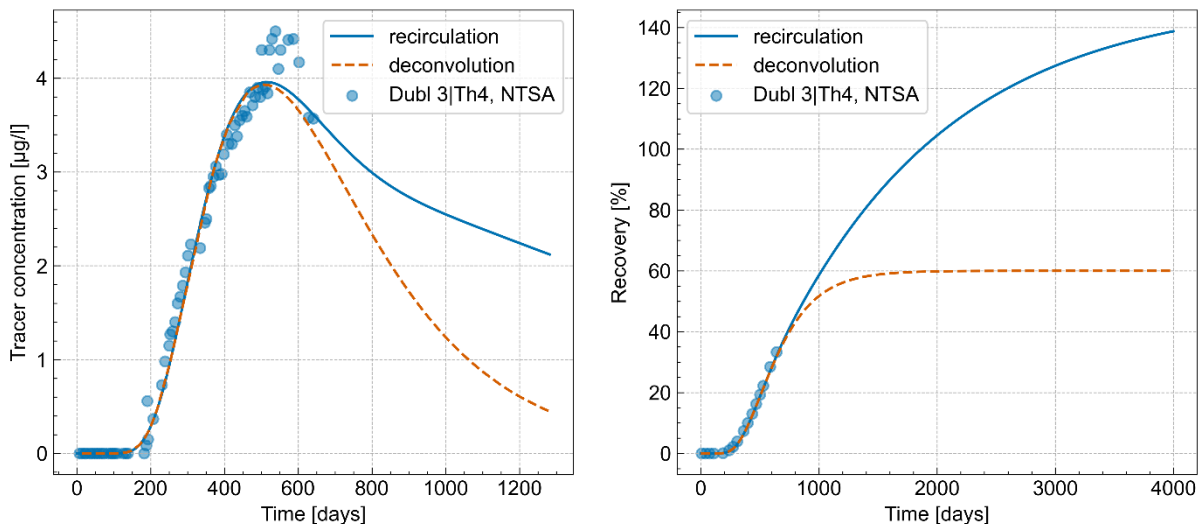


Abbildung 8: Tracer und Recovery fit von NTSA an der Bohrung Th4. Die blaue Kurve zeigt das Signal mit Rezirkulation, die orange Kurve das dekonvolutierte Signal.

### 3.5. Auswertung PTSA an der Th1

An der Th1 fand der Durchbruch von NTSA (Th5) nach 280 Tagen statt (vgl. Abbildung 9). Aktuell befindet sich die Kurve noch im Anstieg zum Peak. Die Modellierung zeigt eine hohe mittlere Verweilzeit ( $t_0$ ) und eine sehr geringe Rückgewinnung von ca. 0,23 %. Durch die hohe Verweilzeit und die geringe Rückgewinnung spielt das Phänomen der Rezirkulation kaum eine Rolle. Da der Peak noch nicht erfasst ist, besteht noch eine sehr große Unsicherheit in den Auswerteparametern.

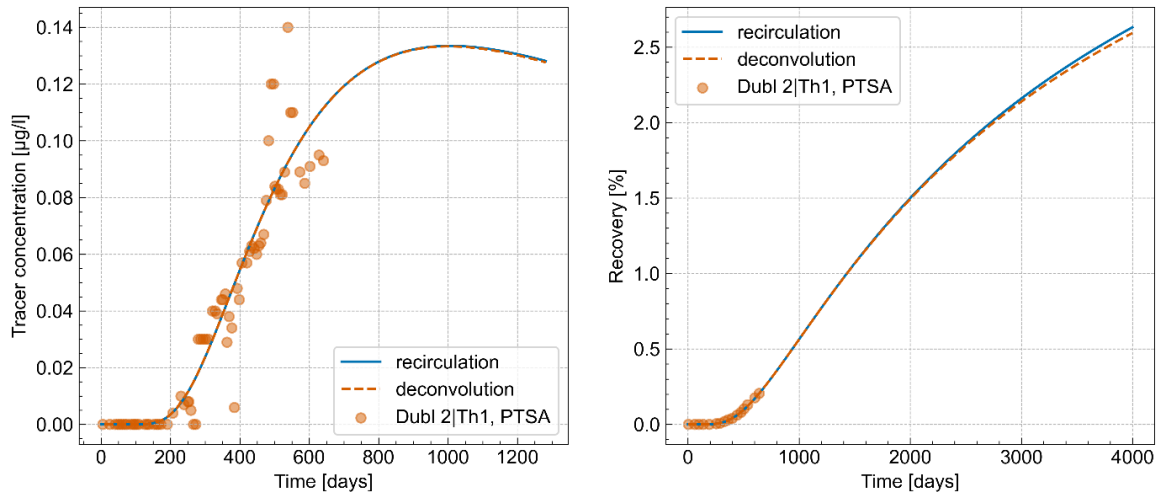


Abbildung 9: Tracer und Recovery fit von PTSA an der Bohrung Th1. Die blaue Kurve zeigt das Signal mit Rezirkulation, die orange Kurve das dekonvolutierte Signal.

### 3.6. Auswertung PTSA an der Th4

An der Th4 fand der Durchbruch von NTSA (Th5) nach 272 Tagen statt (vgl. Abbildung 10). Aktuell befindet sich die Kurve noch im Anstieg zum Peak. Die Modellierung zeigt eine hohe mäßige Verweilzeit ( $t_0$ ) und eine sehr geringe Rückgewinnung von ca. 0,23 %. Durch die mäßige Verweilzeit und die geringe Rückgewinnung spielt das Phänomen der Rezirkulation kaum eine Rolle. Da der Peak noch nicht erfasst ist, besteht noch eine sehr große Unsicherheit in den Auswerteparametern.

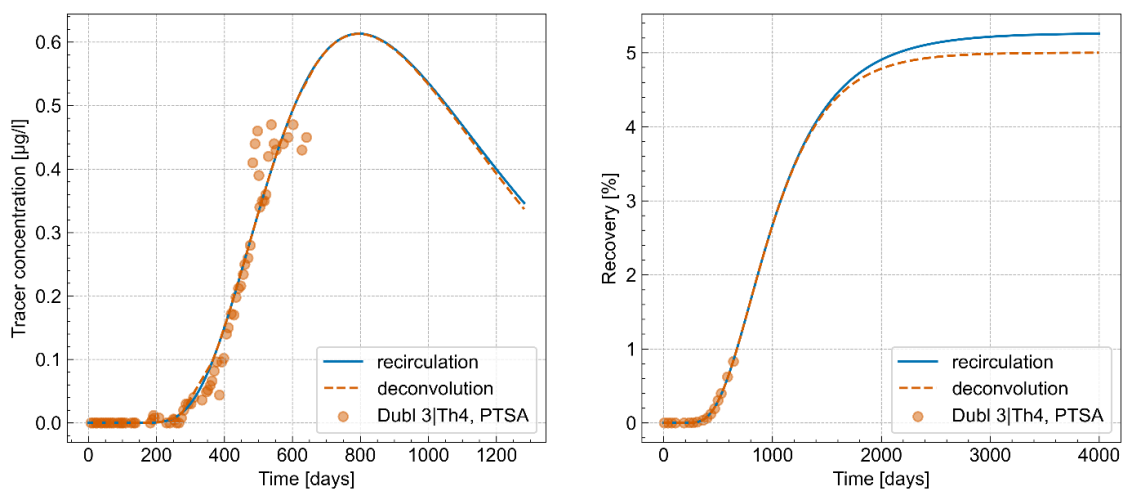


Abbildung 10: Tracer und Recovery fit von PTSA an der Bohrung Th4. Die blaue Kurve zeigt das Signal mit Rezirkulation, die orange Kurve das dekonvolutierte Signal.

Tabelle 5: Auswerteparameter der Tracersignale. Insbesondere die Parameter der Auswertung von PTSA, aber auch die Parameter von NTSA sind unsicher, da bis zum Projektende nur ein Teil der Tracerkurven aufgezeichnet werden konnte.

	Th1 - NTSA	Th4 - NTSA	Th1 - PTSA	Th4 - PTSA
Parameter				
Zeit bis Erst-ankunft [Tage]	109	189	280	273
L [m]	2014	1745	2639	1326
Rückgewinnung zum 15.08.2024 [%]	16,00	34,00	0,23	0,85
Auswertung				
$v_{max}$ [m/Tag]	18,48	9,23	9,43	4,86
$t_0$	907	685	8964	1058
$P_D$	0,30	0,10	1,47	0,10
MRF [-]	0,30	0,60	0,05	0,05
$v$ [m/Tag]	2,22	2,55	0,29	1,25
$\alpha_L$ [m]	596,14	174,50	3879,33	127,30
Simulierte Rückgewinnung nach 4000 Tagen [%]	30,00	60,00	2,60	5,00

## 4. Bewertung

### 4.1. Bewertung der Tracermodellierung

In Zuge des Tracerdesigns und auf Basis der zum Zeitpunkt des Designs vorliegenden geologischen und hydraulischen Informationen (Flowmeter, Interferenztests, Modellierung) wurden Tracerdurchbruchzeiten im Rahmen von mehreren Monaten bis hin zu mehreren Jahren erwartet. Die Tatsache, dass 6 der 9 möglichen Doublettenkonfigurationen einen Durchbruch in weniger als einem Jahr zeigen (Tabelle 5) ist insofern in gewisser Weise eine Überraschung, insbesondere in Anbetracht der großen Abstände auf Top Reservoir (1326–2639 m). Auffällig sind die Unterschiede in der Rückgewinnung zwischen PTSA und NTSA, die sich um zwei Größenordnungen unterscheiden. Da es sich bei beiden Tracern um thermostabile Chemikalien handelt, ist nicht davon auszugehen, dass ein thermisch induzierter Abbau stattgefunden hat. Es wird angenommen, dass sich die Rückgewinnung gegenüber der aktuellen Modellierung nicht mehr entscheidend verändert, obwohl bisher nur ein Teil der Tracerdurchgangskurve erfasst wurde. Dies legt die Hypothese nahe, dass bei Th3 (PTSA) ein großer Anteil des injizierten Volumens von der Mittelscholle wegströmt, wobei nur ca. 10 % zur Mittelscholle fließen. Im Gegensatz dazu strömt bei der Th5 (NTSA) der größte Teil des injizierten Volumens (ca. 90 %) zur Mittelscholle (vgl. Abbildung 12).

Unter Berücksichtigung der Annahme, dass Karstnetzwerke das Stofftransportproblem dominieren (Hörbrand et al. 2024) wurde das in Abbildung 12 skizzierte geometrische Konzept der Verkarstungszonen entwickelt. Die stellt eine erste Hypothese dar, muss jedoch noch insbesondere bezüglich der vertikalen Auflösung der Karstnetzwerke und deren Verbindungen, insbesondere über die Schollengrenzen verfeinert werden. Die reduzierte Transmissibilität in einigem Abstand zur Th5, welche mit dem Auslaufen des Karstnetzwerks einhergeht, zeigt sich auch im Bourdet-Derivat der instationären Pumpversuche, welche im intermediären Abschnitt eine Reduktion der Permeabilität um ca. den Faktor 2 im radial composite model erforderte (ERDWERK, 2021). Bei der Th3 zeigt sich eine solche Permeabilitätsverringering im intermediären Bereich nicht, das Bourdet-Derivat konnte mit einem homogenen Modell angepasst werden. Die Karstnetzwerkausdehnung an den Injektionsbohrungen der Hochscholle sind somit grundsätzlich hydraulisch plausibel. Die Konzentrationsverhältnisse der Tracer verlaufen parallel (vgl. Abbildung 11). Beide Tracer (NTSA und PTSA) kommen früher an der Th1 an, jedoch in größerer Menge an der Th4. Dieses Verhalten deutet darauf hin, dass die Fließwege der Injektionsbohrungen zusammenlaufen und dann auf der Mittelscholle diskrete Fließpfade zu den jeweiligen Förderbohrungen existieren. Da die Tracerankunft sehr sensitiv auf Volumen (Gesteinsvolumen \* Porosität) reagieren, welches zu Verdünnung der Tracer führt, lässt sich der verzögerte Tracerdurchbruch an der Th4 damit erklären, dass der Fließpfad zwar einen größeren Massenstromanteil am Schollenübergang aufnimmt (ca. 66 %), es jedoch durch ein größeres Fließpfadvolumen zu einer verzögerten Tracerankunft kommt. Im Gegensatz dazu nimmt der Fließpfad zur Th1 zwar ein geringeres Massenstrom (33 %) auf, führt jedoch durch ein geringeres Volumen des Fließpfades zu einem schnelleren Durchbruch.

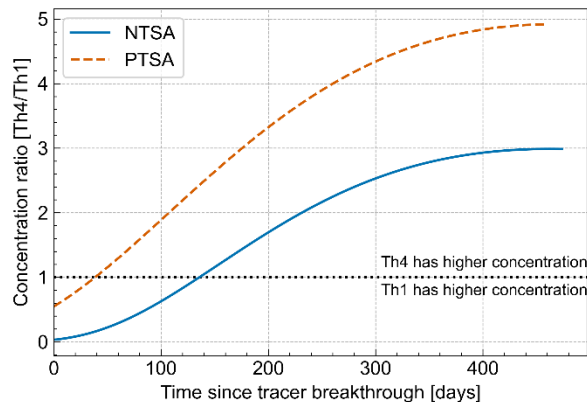


Abbildung 11: Verlauf der Konzentrationsverhältnisse der Tracer an den Förderbohrungen der Mittelscholle (Th4 und Th1).

Die geometrische Konstellation und die hohe Rückgewinnung von NTSA stellen grundsätzlich das Potential eines thermischen Durchbruchs von der Th5 zu den Förderbohrungen der Mittelscholle in den Raum, was eine weitere Untersuchung mittels numerischer Simulationen erfordert. Aufgrund der sehr geringen Rückgewinnung wird das Risiko eines thermischen Durchbruchs von der Th3 als sehr gering bewertet. Die Uranin-Signale, welche von der Th6 zu den Bohrungen der Mittelscholle durchbrechen, sind nicht interpretierbar, sodass hier keine geometrische Aussage erzeugt werden kann. Die erratischen Uranin-Signale stellen die grundsätzliche Eignung von Uranin für das bayerische Molassebecken infrage, obwohl Uranin in anderen geothermischen Systemen mit ähnlichen Temperaturen hervorragende Ergebnisse liefern kann (Axelsson et al. 2001). Die longitudinale Dispersivität der Tracerversuche ist sehr hoch, verglichen mit vorhandenen Literaturwerten (vgl. Abbildung 13). Die Werte sind alle in der Kohorte der größten im Feld gemessenen Dispersivitäten für ihre jeweilige Fließstrecke. Dies weist auf ein stark anisotropes und heterogenes Porensystem hin.



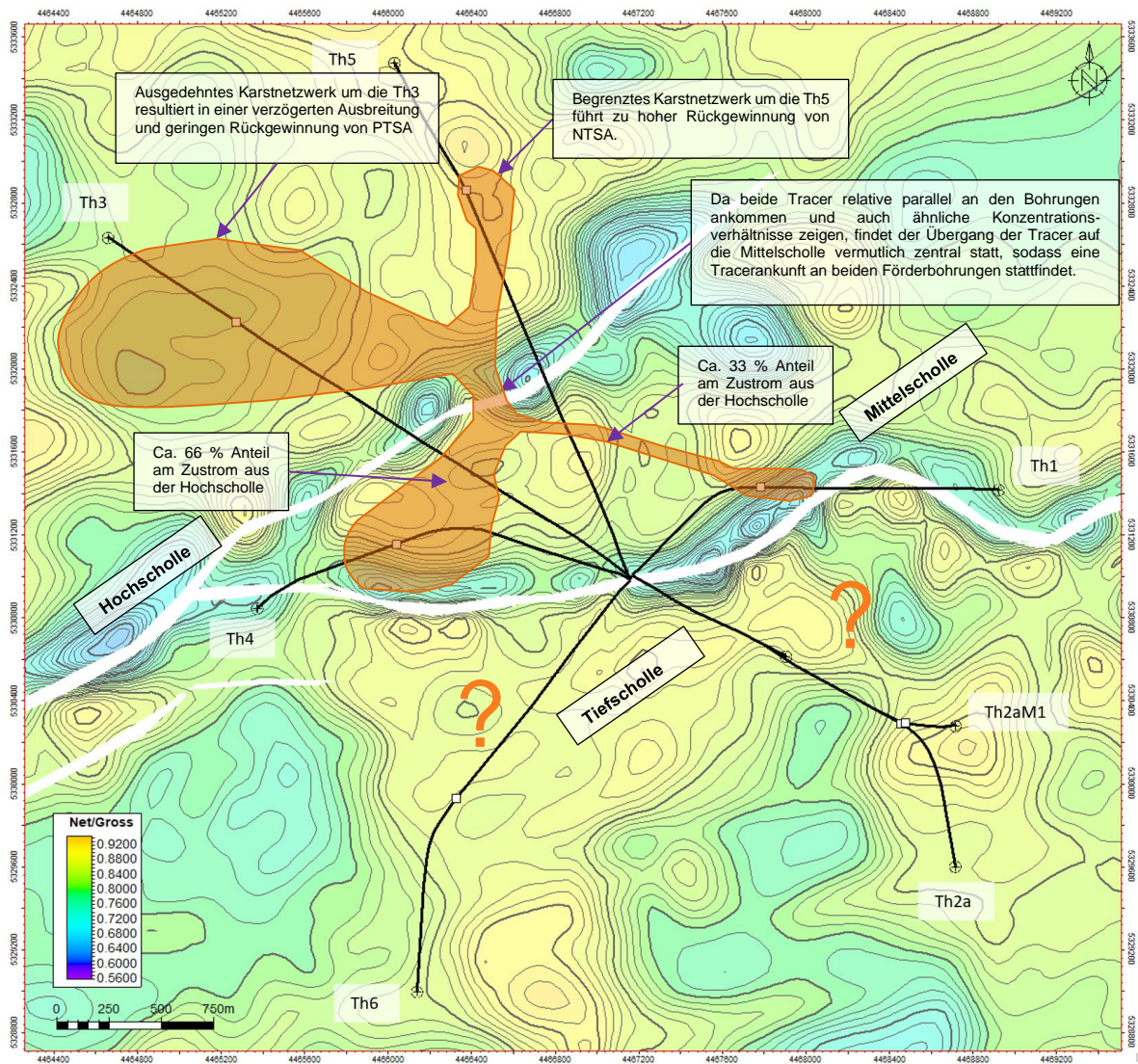


Abbildung 12: Grobskizze der geometrischen Ausbreitung eines möglichen Karstnetzwerks (orange), welches die Hochscholle mit der Mittelscholle verbindet.



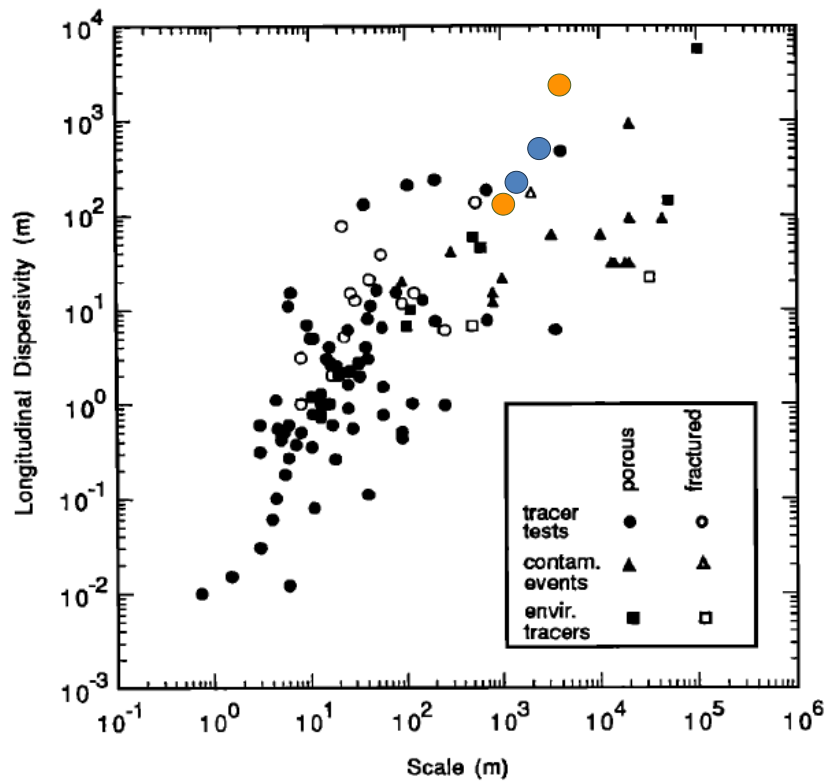


Abbildung 13: Vergleich der im Versuch ermittelten Dispersivitäten (blaue Punkte: NTSA, orange Punkte: PTSA); Diagramm modifiziert nach Gelhar et al. (1992).

#### 4.2. Fazit zum Tracerdesign und Tracerzugabe

Aus der Tracerzugabe an der Schäftlarnstraße lässt sich folgendes Fazit ziehen: Insbesondere die Zugabe der Tracer in ein druckbehaftetes System kann problematisch sein und trotz sorgfältiger Vorplanung und Pumpentests zu unerwarteten Problemen führen. Generell sollten Tracer daher idealerweise in drucklose Systeme zugegeben werden. Weiterhin stellen die verwendeten Mengen in etwa das Maximum dar, was sich technisch noch sinnvoll nutzen lässt. Insbesondere Stoffe mit geringer Löslichkeit (z. B. NTSA) stellen eine Herausforderung dar, da sie in mehreren Behältern angeliefert werden und somit ein Umstecken der Pumpe zwischen den Zugaben erfordert. Die Zugabe erfolgt dann auch wegen der grundsätzlich langen Zugabezeiträume bei großen Massen nicht mehr als Dirac-Impuls. Bezüglich der eingesetzten Mengen hat sich gezeigt, dass 100 kg nicht überdimensioniert waren. PTSA ist ein Tracer mit sehr geringer Bestimmungsgrenze, läge die Bestimmungsgrenze höher wie bei anderen Naphtalin-Sulfonaten (vgl. Tabelle 2), so wären Teile der Durchgangskurve und insbesondere das Tailing nicht erfasst worden.

Zusammenfassung, Ausblick und weiterer Forschungsbedarf:

- Der Tracerversuch an der Schäftlarnstraße weist sehr deutlich auf diskrete Fließpfade hin, welche die Bohrungen miteinander verbinden und liefert somit einen entscheidenden Baustein um die Interaktionen des Projekts zu charakterisieren und die Hypothese der Verkarstungsdominanz (Hörbrand et al. 2024) weiter zu untermauern. Es zeigt sich jedoch in den Versuchen auch, dass erhebliche Unterschiede zwischen unerschiedlichen Bohrungspaaren existieren (schneller Tracerdurchbruch aber auch z. B. kein Tracerdurchbruch zwischen Th6 und Th2a), und somit, dass das Reservoir sehr heterogen ist.
- Der Tracerdurchbruch wird von den SWM weiterhin auf eigene Kosten beprobt, um eine optimale Inwertsetzung der wissenschaftlichen Ergebnisse zu ermöglichen.

- Der Tracerdurchbruch an der Schäftlarnstraße sollte in einem numerischen Modell hinsichtlich der Plausibilisierung der geometrischen Konzepte und der Bewertung der thermischen Entwicklung des Projekts bewertet werden.
- Der Rezirkulationsalgorithmus sollte weiterentwickelt werden, um eine globale/simultane Optimierung aller Rezirkulationsprobleme bei Mehrdoublettensystem zu ermöglichen.

### Kernuntersuchungen (AP1.6)

Ziel der INSIDE-Kernuntersuchungen war die gezielte Datenerhebung aus den für Tiefengeothermieprojekte im südbayerischen Molassebecken relevanten Horizonten im Malm aus Aufschlüssen mit ähnlichem faziell-diagenetischen Setting. Hintergrund dieses Vorgehens ist, dass das Ziehen von Voll-Kernen bzw. „side-wall-cores“ an den Geothermiebohrungen aufwendig und teuer ist, wodurch bisher nur eine geringe Anzahl von Gesteinsproben aus dem GEOmaRE-Projekt zur Verfügung steht. Das im Rahmen von AP1.6 und AP3.4 durchgeführte INSIDE-Arbeitsprogramm zur Erhebung thermophysikalischer und geomechanischer Daten aus analogen Gesteinsproben der Südlichen und Nördlichen Fränkischen Alb sowie zur faziellen Klassifizierung des Untergrundes ist in Tabelle 6 zusammengefasst.

Tabelle 6: Übersicht der in der INSIDE Aufschlussanalogstudie durchgeführten Arbeiten zur Datenerhebung.

Zeitraum	Beschreibung
Januar 2020 – Oktober 2020	Planung der Aufschlussanalogiestudie Messprogramm I (Malm Alpha bis Malm Zeta). Die Probenentnahmestellen wurden durch Dünnschliffanalysen aus 56 Proben der Nördlichen und Südlichen Frankenalb festgelegt. Die Beprobung der Aufschlüsse in der Südlichen Frankenalb und weiterer Aufschlüsse (u. a. Kinding, Wachenzell, Ammerfeld, Hormersdorf) ist in Koch, R. (2020) dokumentiert.
Oktober 2020	Probenentnahme aus den Analogaufschlüssen Essing (Auer Kalk), Marching (Trosselfels) und Laisacker mit Riffbereichen. Der Abschlussbericht über die Dünnschliffanalysen der im Felslabor der Ruhr-Universität Bochum (RUB) untersuchten Kerne ist in Koch, R. (2021a) beigefügt.
August 2020 – Juli 2021	Geomechanische Kennwertermittlungen im Felslabor der RUB für das Untersuchungsprogramm I. Siehe Ergebnisbericht in Backers, T. (2021).
bis Mai 2021	Dünnschliffanalysen der im Felslabor untersuchten Analogproben des Messprogramms I und Bewertung von Korrelationen zwischen Fazies und gesteinsphysikalischen Kenndaten am GeoZentrum Nordbayern. Siehe Ergebnisbericht in Koch, R. (2021c).
Dezember 2021	Dokumentation zum Fazies- und Diagenese-Modell der Geothermieanlage Schäftlarnstraße (GTH SU) unteres und oberes Tithon über ausgewählte Literatur zur Riffentwicklung im Unteren Tithon (Raum Regensburg-Kelheim) sowie Schlussfolgerungen für die GTH SU (Koch, R. (2021b)).
März 2021 – Juni 2022	Planung der Aufschlussanalogiestudie Teil II. Probenentnahmen durch Prof. Koch aus der Schutt- und Schichtfazies der Steinbrüche Sengenthal und Saal. Die Dokumentation der Beprobung, die mineralogischen Ergebnisse sowie die Porositätsabschätzungen sind in Koch, R. (2022) dokumentiert.
Juni 2022 – Dezember 2023	Durchführung des Kernuntersuchungsprogramms II (äquivalent zu Programm I) im Felslabor der RUB. Ergänzend wurden thermophysikalische Gesteinskennwerte durch die RUB untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen im Felslabor sind in Backers, T. (2023) dokumentiert.
Dezember 2020 – Mai 2023	Literaturstudie "Malm-Liegendes und Hangendes" zur Interpretation der mechanischen Kennwerte des Untergrundes im Molasse-Becken; siehe Ergebnisbericht in Koch, R. (2023).

Die innerhalb der INSIDE-Aufschlussanalogiestudie entnommenen Gesteinsproben sollten möglichst aus allen stratigraphischen Einheiten des Malm Alpha bis Malm Zeta mit z. B. Solnhofener Plattenkalk, gebankten und massigen Kalken, Schuttkalken, sowie Dolomiten entnommen werden. Die Untersuchung von Dolomit stand zunächst im Vordergrund. Um sicherzustellen, dass die Analogproben den Gegebenheiten im reinen Dolomit des Tiefenaufschlusses in der südbayerischen Molasse entsprechen, wurden die geplanten Entnahmestellen im Vorfeld durch Dünnschliffanalysen mineralogisch klassifiziert. Eine Übersicht zu den in der Aufschlussstudie beprobten Entnahmestellen im Nördlichen und Südlichen Frankenjura zeigt der Lageplan in Abbildung 14. Abbildung 15 zeigt die stratigraphische Position der beprobten Aufschlüsse. Aus allen bekannten Faziesklassen wurden zwischen Juni und Oktober 2020 Gesteinsproben entnommen und durch Prof. Koch vom GZN anhand von Dünnschliffanalysen erneut faziell klassifiziert. Die Entnahmestellen sowie die hergestellten Dünnschliffe, unter anderem aus den Steinbrüchen Kinding, Wachenzell, Ammerfeld, Hormersdorf, sind in Koch, R. (2020) fotografisch dokumentiert. Ebenso sind die riffogenen Analogproben aus den Steinbrüchen Essing, Marching und Laisacker mit Faziestypen aus dem Massenkalk und Riffschutt (Breistein), wie sie in den Tiefbohrungen der Geothermieanlage Schäftlarnstraße in den oberen porösen Zonen auftreten, in Koch, R. (2021a) dokumentiert. Der Fokus der im Messprogramm II entnommenen Proben lag in der Datenerhebung aus der Breistein-Fazies (Steinbrüche Sengenthal und Saal).



Abbildung 14: Lageplan der in INSIDE entnommenen Dünnschliffe zur Planung der Entnahmestellen aus Analogaufschlüssen (Grafik aus dem Bericht von Prof. Koch vom 29.06.2020; Koch, R. (2020)).

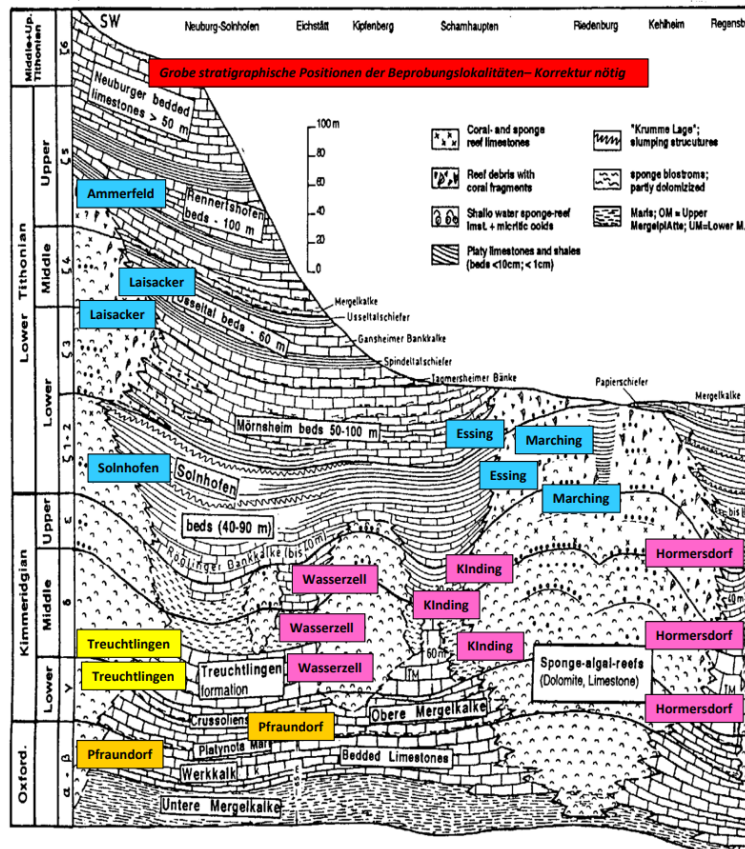


Abbildung 15: Ungefähre stratigraphische Position der Aufschlüsse zur Auswahl der INSIDE Beprobungslokalitäten (Grafik aus Koch, R. (2020)).

Die Probeentnahmenstellen der im Felslabor der RUB geomechanisch und thermophysikalisch untersuchten Proben sind in Abbildung 16 und Abbildung 17 dargestellt. Das an der RUB durchgeführte Untersuchungsprogramm der Analogproben umfasste zerstörungsfreie Laborversuche wie Pyknometer-Versuche und Ultraschallmessungen sowie zerstörende Laborversuche wie einaxiale und triaxiale Druckversuche und Spaltzugversuche. Die triaxialen Untersuchungen erfolgten in dreistufigen Mehrstufenversuchen bei unter anderem 10 MPa–20 MPa–30 MPa und 10 MPa–15 MPa–20 MPa, um die im Reservoir zu erwartenden Spannungsbereiche zu berücksichtigen und das Bruchkriterium ableiten zu können. Die Ultraschallmessungen zur Ermittlung der P- und (soweit möglich) S-Wellengeschwindigkeiten wurden während der Triaxialversuche kontinuierlich an trockenen Probenkörpern in axialer Richtung gemessen. Ergänzend zum aufgeführten Arbeitsprogramm wurden durch die RUB an drei Proben Mineralanalysen mittels Röntgenpulverdiffraktometrie durchgeführt. Im Ergebnisbericht der RUB (Backers, T., 2021) sind die ermittelten geomechanischen Kennwerte wie totale und effektive Porosität, Permeabilität, Ultraschall-Geschwindigkeiten, Festigkeiten, Elastizitätsmoduli, Zugfestigkeiten und weitere Parameter dokumentiert.



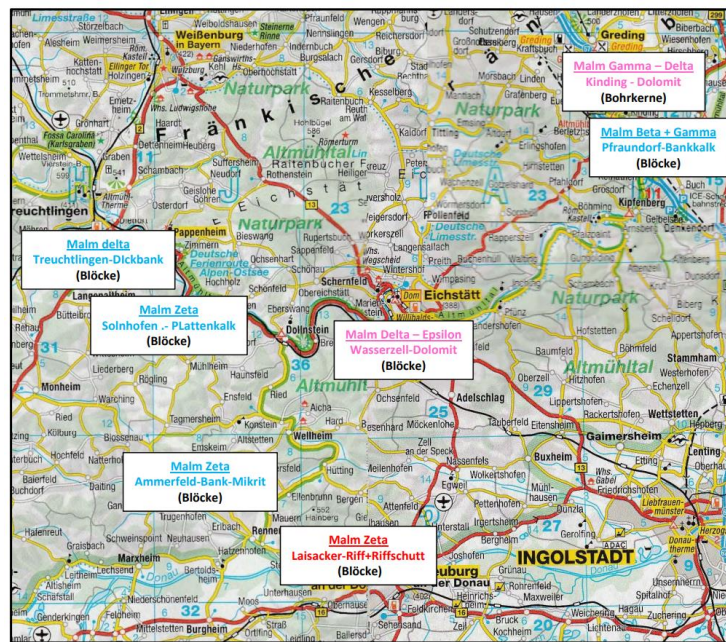


Abbildung 16: Lageplan 1 der beprobten Analogaufschlüsse des Malm Alpha bis Zeta (Grafik aus Koch, R. (2020)). Nicht dargestellt sind die Beprobungen aus den Steinbrüchen Sengenthal und Saal.

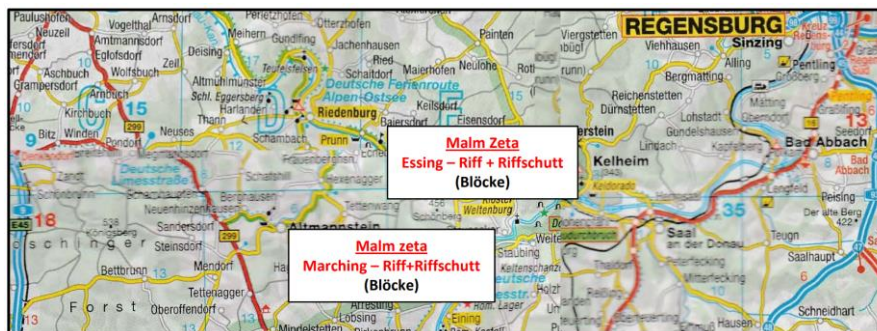


Abbildung 17: Lageplan 2 der beprobten Analogaufschlüsse des Malm Alpha bis Zeta (Grafik aus Koch, R. (2020)). Nicht dargestellt sind die Beprobungen aus den Steinbrüchen Sengenthal und Saal.

## II.1.2. Datenmanagement - Arbeitspaket 2 (Leitung: SWM)

### Anforderungsanalyse an Hardware und Software, Konzept & Design des Datenmanagements (AP2.1)

Der Fokus der INSIDE-Anforderungsanalyse (AP2.1) lag in der Erarbeitung eines geeigneten Konzepts für das Datenhandling (Datentransfer und -speicherung) der für das RMS (AP5.5) zu integrierenden Daten und Auswerteverfahren aus AP1, AP3 und AP4, mit der Möglichkeit eines Ausbaus für weitere Anwender. Dies erforderte eine wissenschaftlich-technische Spezifikation der in INSIDE und in Parallelprojekten erhobenen Daten (AP1) sowie der in AP3 und AP4 ausgewerteten Daten hinsichtlich der Datengröße, -formate, -übertragungsrate und -verfügbarkeit, einschließlich der im Datenmanagement zu integrierenden Bearbeitungs-Workflows zur Integration der Daten innerhalb des RMS (AP5) bzw. zur Planung der Datenmanagement-Architektur.

Abbildung 18 zeigt die innerhalb der INSIDE-Datenbasis ursprünglich geplanten zu integrierenden Daten und abgeleiteten Handlungsempfehlungen zu erforderlichen Workflows außerhalb einer IoT-Datenplattform zur Datenbearbeitung für die Geothermiestandorte Pullach, Sendling/Schäftlarnstraße und Baierbrunn, unter anderem mit statischen und dynamischen Betriebs- und Reservoirdaten wie aktiven und passiven Akustikdaten, Hebungs-/Senkungsdaten (ermittelt aus Nivellementmessungen und Satellitendaten), aus den Tracerversuchen ermittelte thermisch-hydraulische Daten, aus Kernuntersuchungen analysierte Daten sowie Prognosedaten (ermittelt aus TH-Modellierungen, vernetzten THM- und THM-S-Modellierungen).

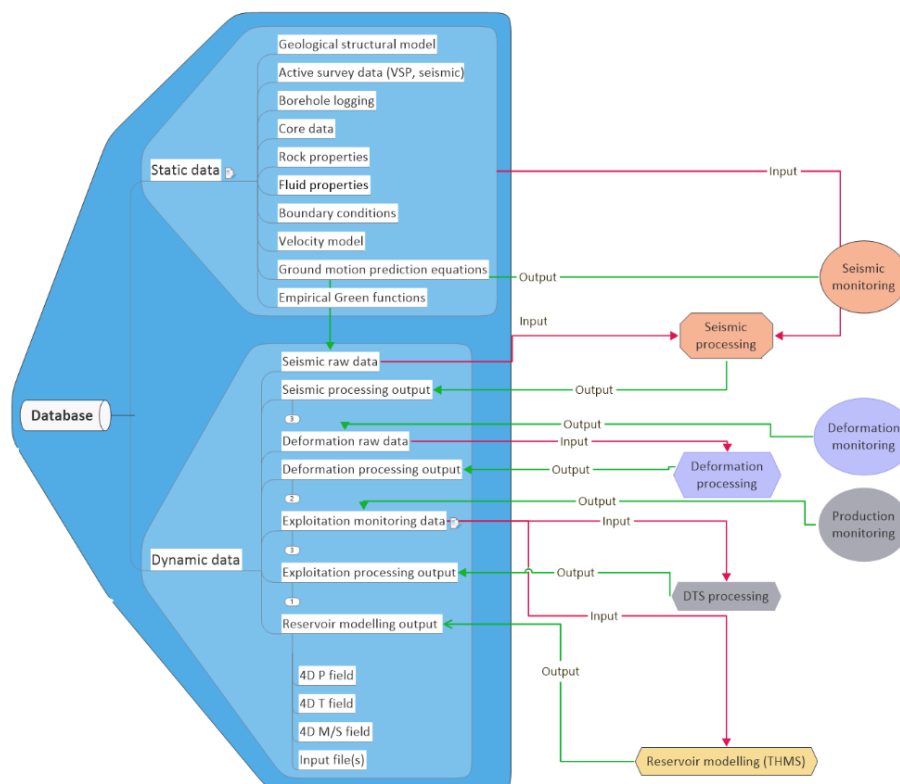


Abbildung 18: Architektur und Workflows zum INSIDE Datenmanagement.

Für die Anforderungen an die Architektur des Datenmanagements wurde in INSIDE der Fokus auf das DAS-Datenmanagement in der Geothermieanlage Schäftlarnstraße gelegt. Das Monitoring umfasste die DAS-Datenaufnahme und -auswertung sowie die Integration der DAS-Daten aus der Bohrung Th3



in der zementierten ersten Sektion bis 696,7 m und in der Bohrung Th4 (bis ~3.700 m lose über einen Pumpensteigstrang eingebaut). Es wurden verschiedene Recherchearbeiten zur Abschätzung der zu erwartenden DAS-Datenmenge mit den Verbundpartnern sowie externen Stakeholdern wie dem GOF (Nahtstelle zum Seismologischen BetreiberNetz, als Ansprechpartner der seismischen Stationen des BetreiberNetzes) und weiteren, wie der Geothermie-Allianz Bayern/TUM, für die Planung der Dateninfrastrukturanbindung durchgeführt.

Wertvolle Einblicke und ergänzende Informationen lieferten die Austauschgespräche unter anderem mit Febus-Optics, Dr. Thomas Reinsch (ehemals GFZ Potsdam), Dr. Andreas Wüstefeld (NORSAR) und weiteren. Im Ergebnis der Gespräche wurden die DAS-Daten (Stand 2021) wie folgt geschätzt: Th3: 5 TB/Monat, 1,8 Mbit/s; Th4: 10 TB/Monat, 26 Mbit/s (Strainrate) sowie Th3: 215 TB/Monat, 640 Mbit/s; Th4: 430 TB/Monat, 1,3 Gbit/s (Rohdatenerfassungsmodus). Aufgrund der großen Datenmengen im Vergleich zu passiven seismischen Daten, die über herkömmliche Sensorik erfasst werden, sah das ursprüngliche Konzept zum DAS-Massendatenmanagement die Verwendung eines lokalen Zwischenspeichers (NAS-System) vor dem DAS-Datentransfer nach Azure vor. Hierbei ist anzuführen, dass sich die INSIDE-Verbundpartner unabhängig von einem möglichen Zwischenspeicher frühzeitig für die Nutzung von Microsoft Azure Cloud-Lösungen entschieden haben.

Ein wesentlicher Vorteil eines Datenspeichers in der Cloud (Data Lake) ist, dass verschiedenen Benutzergruppen sofort Zugriff auf große Datenmengen gewährt werden kann, basierend auf geschäftlichen und sicherheitstechnischen Bewertungen im Vorfeld. Mittels Cloud-Computing (Data Lab), hier mittels Microsoft Azure Machine Learning Services, durch das bei Bedarf große Python-Compute-Cluster gestartet werden können, lassen sich die Daten dann ohne weitere langwierige Datenübertragung direkt in der Cloud analysieren. Auf den Einsatz eines Zwischenspeichers konnte aufgrund der durch Febus-Optics durchgeführten Datentransfertests auf Azure im Vorfeld des in Betrieb genommenen DAS-Monitorings in der GTH SLS verzichtet werden. In den Tests standen drei Optionen zur Verfügung:

- Variante 1: Entwicklung eines direkten Schreibmoduls für den DAS-Datentransfer nach Azure;
- Variante 2: Einbinden von Azure Storage am DAS-Interrogator;
- Variante 3: Entwicklung eines ZeroMQ-Abonnenten.

Über die Integration einer zweiten SSD-Karte in den Febus A1-Interrogator wurde das direkte Einbinden der DAS-Daten (HDF5/HDFS-Protokolle) in den Azure-Speicher (Data Lake), Option 2, ermöglicht. Datenkomprimierungsmethoden unter Einsatz von beispielsweise Machine-Learning-Verfahren der Roh-DAS-Daten wurden in INSIDE nicht verfolgt. Der Fokus lag auf der prinzipiellen Machbarkeit eines kontinuierlichen DAS-Monitorings.

Des Weiteren wurde aus der abgeschätzten DAS-Datenmenge die physische Datenübertragung (Bearbeitungsstrecke) geplant. Die am DAS-Interrogator erfassten Strainrate-DAS-Daten wurden mit ungefähr 12 Mbit/s über ein auf dem Kraftwerksgelände zwischen dem Aufstellungsort des DAS-Interrogators verlegtes 8-adriges Kupferkabel in den Azure-Data Lake (LAN-Ports – Switch) übertragen. Für die Laufzeit des DAS-Monitorings in der Schäftlarnstraße wurden die Firewall und Remotezugänge (per Software-Token, HTML5-Authentifizierungsgeber über VNC) für den Partner KIT und die im Unterauftrag für das DAS-Monitoring beauftragte Firma Febus-Optics auf eine Netzwerkstrecke des SWM-Intranets eingerichtet. Durch den Fernzugriff auf den DAS-Interrogator (Datenrekorder) konnten Parametereinstellungen vorgenommen werden. Weitere technische Komponenten wie die GPS-Antenne zur Kalibrierung der Uhrzeit am Interrogator sowie eine USV zeigt die Abbildung 19.

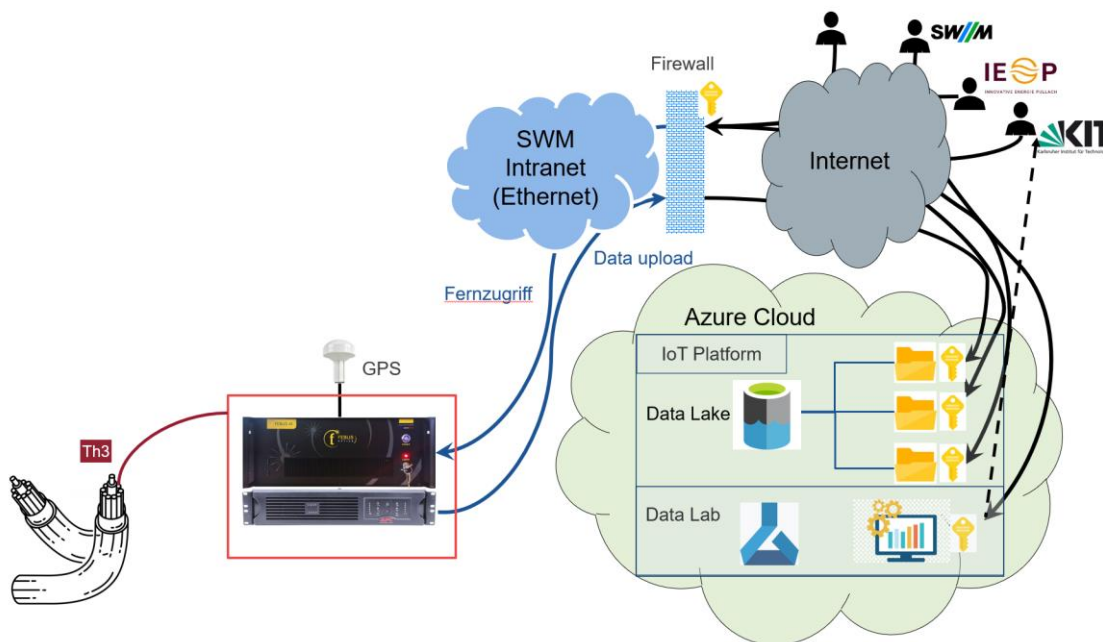


Abbildung 19: Übergeordnetes INSIDE Datenmanagement Konzept und das eingerichtete Netzwerk für das DAS-Monitoring.

### Aufbau eines Datenmanagement-Systems (AP2.2)

Das in Microsoft Azure Cloud eingerichtete Distributed Acoustic Sensing (DAS) Datenerfassungskonzept zum DAS-Monitoring in der Geothermieranlage Schäftlarnstraße ist in Abbildung 20 dargestellt. Die Infrastruktur und Cloud wurden durch die SWM gehostet. Der Verbundpartner KIT hat die DAS-Daten innerhalb der Data-Analytics-Umgebung der Cloud im Rahmen von AP3.2 prozessiert.

Im Data Lake wurden drei separate Bereiche (Container) eingerichtet, in denen stündlich Datenfiles mit 4,7 GB in der „Landing-Zone“ als hot blob storage sowie in der „Speicherzone“ als cold blob storage aufliefen. Die DAS-Datenprozessierung erfolgte durch das KIT im Datalab, wobei die prozessierten DAS-Daten im Container „Ergebnisse“ abgelegt wurden. Die Datenverschiebung zwischen den Containern erfolgte automatisch über ein Azure-Machine-Learning-Copy-Skript (Blob). Dies ermöglichte ein automatisches Abrufen der mit 12 Mbit/s eingegangenen Daten per Push-Verfahren mit „Shared Access Signature-Token“ als Schlüssel zur Authentifizierung. Für die Datenablage von der Speicherzone in die „Ergebniszone“ hat das KIT ein Azure-Verarbeitungsskript erstellt. Das in Azure bereitgestellte Datalab umfasste 8 cores (5 GB RAM). Aufgrund eines Glasfaserkabeldefekts der Th4 konnte das DAS-Monitoring nur mit dem DAS der Th3 erfolgen. Insgesamt wurden zwischen Februar und Juli 2022 mit dem DAS der SLS Th3 19 TB Strainrate-Daten erfasst, und die verarbeitete (prozessierte) Datenmenge lag mit 280 MB bei ungefähr 1/10 der erfassten „Rohdaten“ (Strainrate-DAS-Daten).

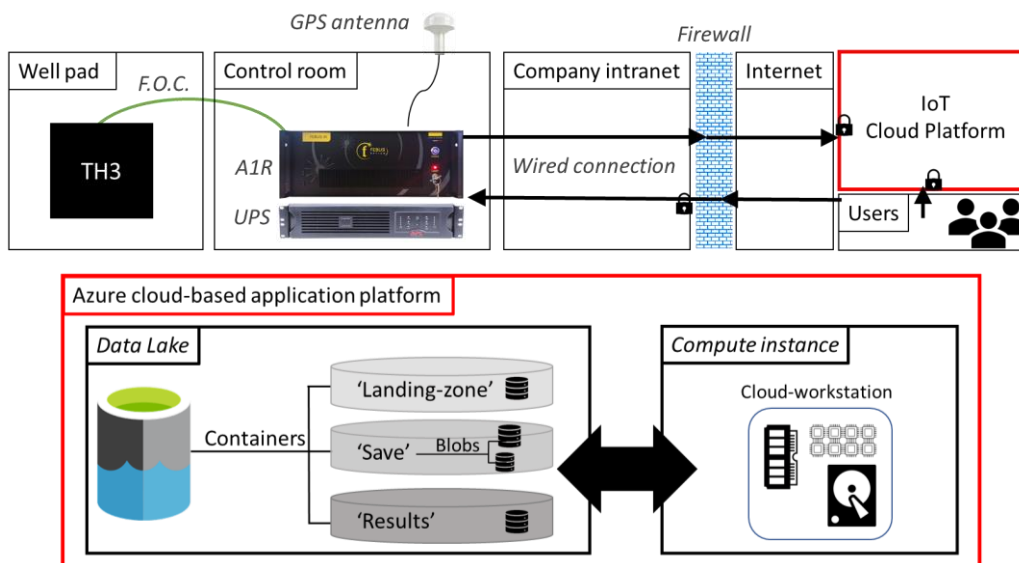


Abbildung 20: INSIDE DAS-Datenmanagement Konzept in Microsoft Azure Cloud.

### Konzeptentwicklung Datenmanagement (AP2.3)

Das Ziel der Teilaufgabe AP2.3 war es, ein Konzept für eine langfristige und regionale Datenaufnahme, -übertragung und -speicherung zu erarbeiten, das im Hinblick auf das Reservoirmanagementsystem (AP5.5) einerseits Datenauswertungen in Echtzeit, unter anderem zur Identifikation kritischer Reservoirparameter, und andererseits Zugriffe von externen Nutzern wie beispielsweise anderen Betreibern ermöglicht. Dies konnte in INSIDE über das automatisch agierende DAS-Massendatenmanagement in der Geothermieanlage Schäftlarnstraße (GTH SLS) für den Anwendungsfall des seismologischen Monitorings getestet werden. Mit Ausblick auf das RMS (AP5.5) wurde konzeptionell (kein Live-Betrieb) ein Dashboard außerhalb der IoT-Datenplattform über ein Jupyter Notebook instanziiert. Die Erarbeitung und Entwicklung des RMS steht jedoch noch aus.

Das innerhalb der SWM Azure Data Lab Umgebung eingerichtete DAS-Datenmanagement zum regelmäßigen Antriggern von DAS-Daten wurde für das INSIDE-Projekt gelöscht. Die technischen Einrichtungen im Data Lake und der Machine-Learning (ML)-Umgebung im Datalab sind dokumentiert. Die KIT-Python-Skripte zum Einlesen und Verarbeiten der DAS-Daten auf der Cloud-Workstation stehen Open Source unter der URL: <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000157458> (DOI: <https://doi.org/10.5445/IR/1000157458>) zur Verfügung. Das DAS-Datenmonitoring wurde in dem Artikel von Azzola et al. (2023d) in der Geothermal Energy veröffentlicht.

## II.1.3. Monitoring und Datenbearbeitung - Arbeitspaket 3 (Leitung: KIT)

### Post-Prozessieren der aufgezeichneten mikroseismischen Daten (AP3.1)

Ziel des AP3.1 war es, die durch den INSIDE Verbundpartner KIT ausgewerteten passiven seismischen Daten hinsichtlich ihrer Ursachen zu bewerten. Diesbezüglich wurden keine betrieblichen Zusammenhänge erkannt. Des Weiteren erfolgte im Rahmen von INSIDE über eine Vereinbarung ein teilweiser Daten- und Erfahrungsaustausch mit dem KIT und dem GOF zu den am KIT gespeicherten passiven seismischen Daten. Der ursprünglich in AP2.2 vorgesehene Datentransfer über das Datenmanagement ist aus projektspezifischen Gründen nicht erfolgt. Über den Verbundpartner KIT wurde ein STA/LTA-Algorithmus mit Einsatz einer Template-Matching-Analyse zur automatischen Triggerung (Erfassung) sowie zur Ereignislokation, Magnitudenabschätzung und Modellierung der Wellenausbreitung von mikroseismischen Ereignissen erarbeitet. Insgesamt wurden mit dem INSIDE-Messnetz zwischen März 2021 und Dezember 2023, 79 mikroseismische Ereignisse mit einer minimalen Magnitude von -0,8 und einer maximalen Magnitude von 1,6 erfasst. Hierbei konnten 75 Ereignisse drei Clustern (Oberhaching, Unterhaching und Pullach) zugeordnet werden, wobei zwei Ereignisse in Pullach erfasst wurden und das stärkste Ereignis Unterhaching zugeordnet wurde. Die absoluten Lokalisierungen des KIT zeigen, dass die Ereignisse im Reservoir oder darunter stattfinden. Einige Ereignisse werden in den oberflächennahen Sedimentschichten lokalisiert, was mit größeren Unsicherheiten in der Bestimmung der Epizentren einhergeht.

Des Weiteren wurde für das zwischen Februar und Juli 2022 durchgeführte DAS-Monitoring in der Geothermieranlage Schäftlarnstraße mit dem in die Bohrung Th3 bis ca. 700 m einzementierten GFK über die kontinuierliche Erfassung und Auswertung von stündlichen Datenströmen ein automatisiertes, Cloud-basiertes Datenprocessing umgesetzt (siehe AP2).

Die Ergebnisse zu den in INSIDE erfassten passiven seismischen Daten sind im Schlussbericht des Teilvorhabens INSIDE-KIT sowie in Azzola (2025) detaillierter dokumentiert. Generell ist anzumerken, dass in INSIDE kein spürbares Ereignis erfasst wurde. Mit dem sechsmonatigen DAS-Monitoring in der GTH SLS konnte ein regionales und ein lokales Ereignis erfasst werden, wobei das lokale Ereignis mit  $M_w = -0,1$  neben dem DAS der SLS Th3 nur mit dem Bohrlochseismometer im Schyrenbad erfasst wurde. Besonders hervorzuheben ist die Sensitivität des DAS in der Bohrung GTH SLS Th3, da für die beiden mikroseismischen Ereignisse sowohl die P- als auch S-Wellenankunftszeiten erfasst wurden (siehe Abbildung 21). Mit dem DAS der Bohrung Th4 (lose bis Endteufe eingebaut) können aufgrund eines GFK-Defekts im Zeitraum der Datenerfassung keine Aussagen getroffen werden. Mit Ausblick auf ein mittel- bis langfristig umzusetzendes 24/7-DAS-Datenmanagement und ggf. Berücksichtigung weiterer DAS-Daten sind Verfahren zur Datenkomprimierung, beispielsweise unter Einsatz von Machine-Learning-Methoden, zu entwickeln.



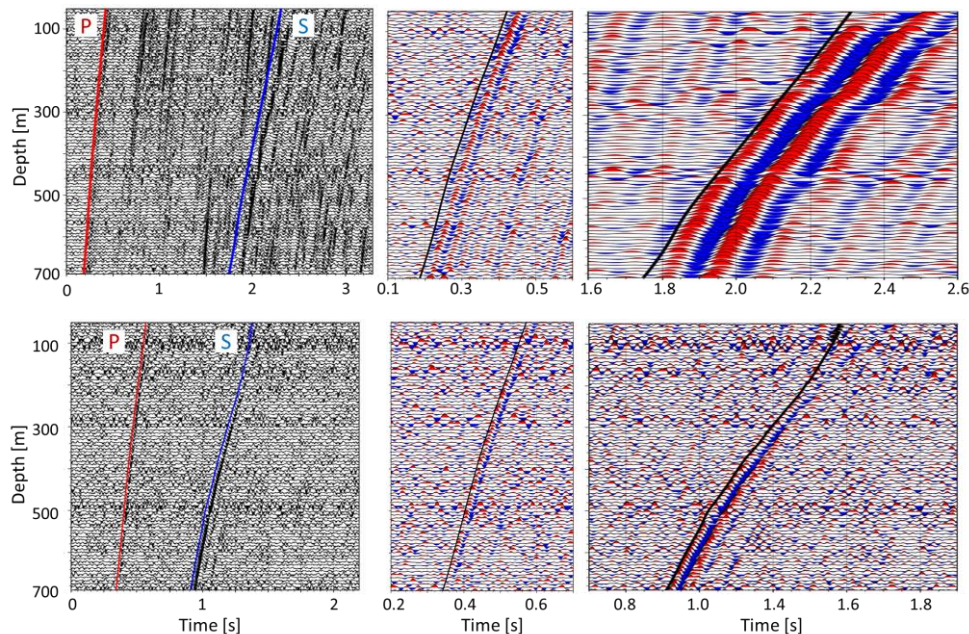


Abbildung 21: Aufzeichnung lokaler mikroseismischer Ereignisse mit dem DAS der Schäftlarnstraßenbohrung Th3. Die obere Abbildung zeigt die lokale Datenerfassung in der SLS mit  $M_W = -0,1$  vom 22.04.2022. In der unteren Abbildung ist das vom 2022-02-09T05:51:28.3 mit  $M_W = 1,5$  erfasste regionale Ereignis (nicht Schäftlarnstraße) erfasst. Abbildung aus Azzola (2024a).

### Prozessieren der Bohrloch-Logging Daten und Ermittlung von Geschwindigkeitsmodellen (AP3.2)

Das Ziel von AP3.2 war die Ermittlung eines verbesserten Geschwindigkeitsmodells im Untergrund der Geothermieanlage Schäftlarnstraße, unter anderem zur verbesserten Tiefenlokalisierung seismischer Ereignisse über die in AP1.3 erhobenen Daten aus den Crosswell-Messungen. Weitere in Parallelprojekten wie GEOmaRE ermittelte Geschwindigkeiten aus VSP- und Full Sonic Log-Messungen sollten hierbei berücksichtigt werden.

Die Kalibrierung des seismischen Geschwindigkeitsmodells über kontrollierte Anregungen einer Sparkerquelle konnte nicht erreicht werden. Unter anderem konnten mit den gestapelten DAS-Daten aus bis zu 1.000 Wiederholungsschüssen (ausgesendet in einer horizontalen Ebene zwischen Sparkererschüsse und Empfängern) keine Signale im angeregten Wellenfeld visualisiert werden. Die weiterführenden Untersuchungen im Post-Processing (sowohl im Zeit- als auch im Frequenzbereich sowie über Kohärenzanalysen im Nachprozessing durch den INSIDE-Verbundpartner KIT) führten zu keinen verwertbaren Ergebnissen der aus den Crosswell-Messungen erhobenen passiven seismischen Datenerhebungen mit dem DAS der GTH SLS Th3 und -Th4. Zusätzlich zum Quellen-Empfänger-Abstand und zur Richtungsempfindlichkeit der Glasfasern, die in den Planungen untersucht wurden, werden weitere Ursachen für die geringere ausgesendete Energie der Sparkersonde im Vergleich zu den von den GFK erfassten Signalen vermutet.

Diese Ursachen liegen wahrscheinlich in der Signaldämpfung der Sonde, bedingt durch das Bohr- und Verrohrungsschema der Th6 und die geologischen Formationen zwischen den Bohrungen Th3, Th4 und Th6 und sind im INSIDE-Schlussbericht des KIT im Kapitel 2.1.1.2 sowie in Azzola (2021b) und Thiemann (2024b) detaillierter aufgeführt. Dennoch konnte, aufbauend auf dem bestehenden 3D-Seismik-Cube GRAME sowie den in GEOmaRE erhobenen Daten aus den VSP- und Sonic-Messungen, Amplitude versus Offset (AVO)-Analysen und den in INSIDE erhobenen Daten über das DAS-Logging in der Bohrung SLS Th3 und der aktiven VSP-Messung über herkömmliche Sensorik in der Pullach-Bohrung Th3, ein verbessertes Geschwindigkeitsmodell durch den Verbundpartner KIT und ERDWERK GmbH erstellt werden (siehe Abbildung 22 und Abbildung 23 sowie ausführlichere Erläuterungen im INSIDE-Schlussbericht des KIT im Kapitel 2.1.3.2 und in Azzola, 2024c). Eine

Kalibrierung des INSIDE-Geschwindigkeitsfelds erfolgte über eine Laufzeitomografie der erfassten mikroseismischen Ereignissen (Relokation der Ereignisse).

Dies zeigt, dass mit dem DAS der SLS Th3, neben einer Anwendung für das seismologische Monitoring (AP3.1), auch ein Monitoring und Imaging des Untergrunds für Reservoircharakterisierungen über beispielsweise 4D-Geschwindigkeitsermittlungen (Time-Lapse-Monitoring) möglich ist. In INSIDE hat der Partner KIT die Geschwindigkeiten im Anschluss in der Nachprozessierung ermittelt. Dieser Bearbeitungsschritt erfolgte teilweise automatisiert und nicht in Azure (AP2.2). Des Weiteren konnten mit dem DAS der GTH SLS Th3, mit einer Einbauteufe bis ungefähr 700 m, weitere seismische Parameter wie beispielsweise seismische Impedanz, Moment-Magnitude und Stress-Drop aus einer Vielzahl von Messpunkten entlang des DAS ermittelt werden. Dies wurde für 55 aus dem DAS verwendete seismische Messpunkte in Azzola (2024a) getestet.

Abbildung 23 zeigt das aktualisierte INSIDE-Geschwindigkeitsfeld, welches unter anderem in den Ereignislokationen verwendet wurde. Das Geschwindigkeitsfeld umfasst sowohl ein P- als auch ein S-Wellenmodell und erstreckt sich über das in Abbildung 23 dargestellte Gebiet bis zu einer Teufe von 5.000 m bei einem Gitterabstand von 25 m. Das Geschwindigkeitsmodell ist mit dem geologischen Strukturmodell konsistent (diesbezügliche Austauschgespräche sind zwischen dem KIT und der ERDWERK GmbH erfolgt). Die Schichtgrenzen wurden aus den 2D- und 3D-Seismikuntersuchungen (u. a. in GRAME erhoben) identifiziert und die Topografie im Geschwindigkeitsmodell berücksichtigt. Die Einhängung der Geschwindigkeiten erfolgte über die VSP- und Sonic-Logs der Schäftlarnstraßen-Bohrungen sowie der INSIDE-VSP-Messung der Pullach Th3 Bohrung. Jeder Schichtgrenze wurde eine feste P-Wellengeschwindigkeit zugewiesen und linear vertikal zwischen den Schichtgrenzen interpoliert. Ebenso ist das S-Wellen-Geschwindigkeitsmodell aufgebaut, wobei die S-Wellengeschwindigkeiten an den Schichtgrenzen aus den  $v_P/v_S$ -Verhältnissen abgeleitet wurden.

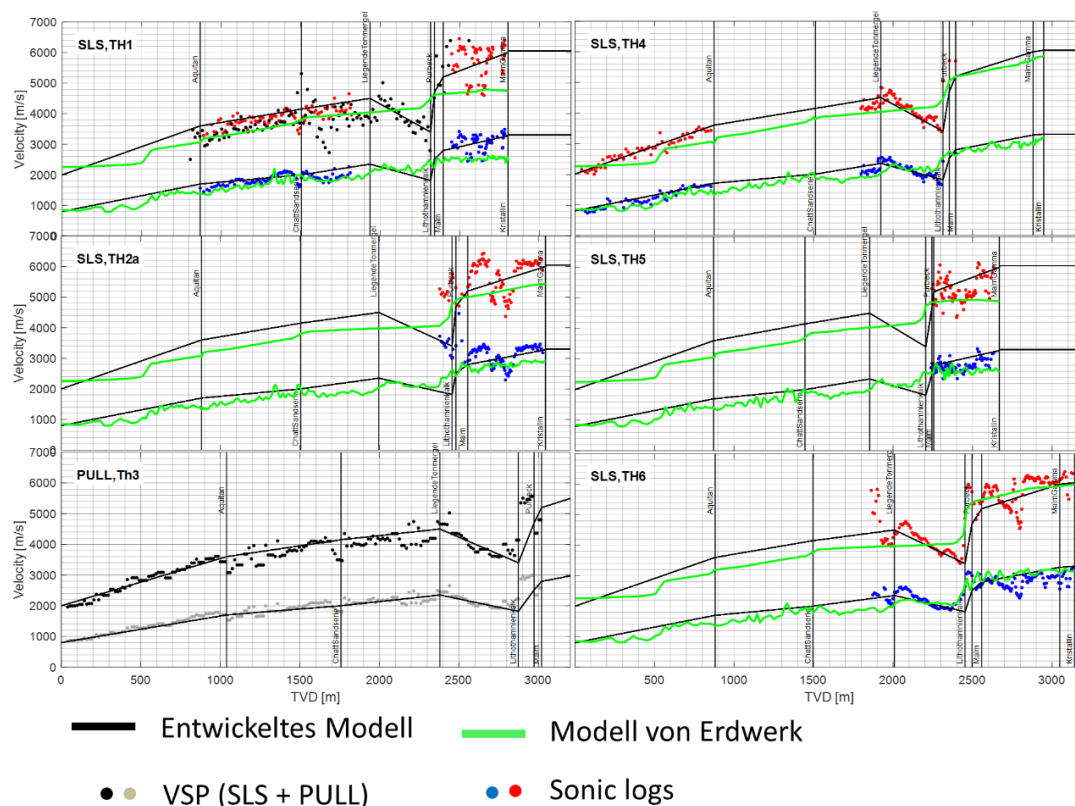


Abbildung 22: Basisdaten des in INSIDE verbesserten Geschwindigkeitsmodell für die Schäftlarnstraße und Pullach aus VSP- und Sonic Log-Messungen (GEOMARE, INSIDE) und des 3D Geschwindigkeitsfelds von ERDWERK GmbH. Abbildung aus INSIDE-Schlussbericht des KIT und Azzola (2024c).



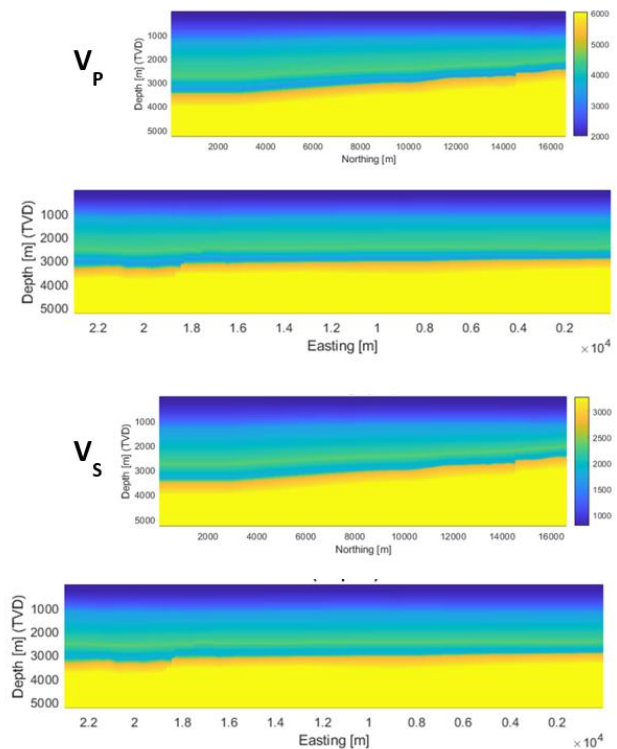
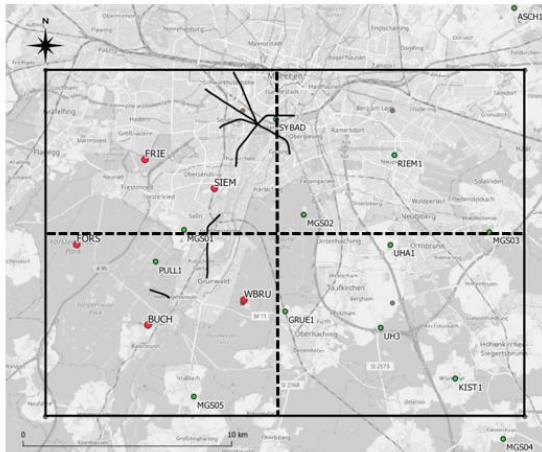


Abbildung 23: IN-SIDE-Geschwindigkeitsmodell, das für die Ereignisortung verwendet wurde. Der Umfang des Modells ist auf der Karte in der linken Abbildung dargestellt. Die vertikalen Schnitte in der Karte zeigen die zugehörigen P-Wellengeschwindigkeiten ( $v_p$ ) und Schwerwellengeschwindigkeiten ( $v_s$ ), die in der rechten Abbildung dargestellt sind (Abbildung aus dem IN-SIDE-Schlussbericht des KIT und Azzola (2024c)).

### Prozessieren von Subsidenz-/ Hebungsmessungen an der Oberfläche (AP3.3)

Das Ziel des AP3.3 war es, über die kombinierte Datenauswertung verschiedener geodätischer Messverfahren wie Nivellement, GNSS, Transponder und Corner-Reflektoren sowie Satelliten die Leistungsfähigkeit für Deformationsmessungen entsprechend den Anforderungen der Bergverordnung über Einwirkungsbereiche (EinwirkungsBergV) in der Fassung vom 18.10.2017, insbesondere zur Festlegung des Einwirkungsbereichs im Umgriff von Geothermiebohrungen für die Anwendung der Bergschadensvermutung nach § 120 Bundesberggesetz zu ermitteln. Die Datenprozessierung erfolgte durch den IN-SIDE-Partner KIT-GIK und führte zu einer Vorstudie, die zum einen die Notwendigkeit von InSAR-Datenauswertungen zum frühzeitigen Monitoring von Bodenhebungen und Senkungen aufgrund der kurzen zeitlichen Abstände zwischen den Datenerhebungen im Vergleich zu den bisher zulässigen Nivellementmessungen aufzeigt und zum anderen Lücken im derzeitigen Messkonzept aufzeigte.

Ein weiterer Vorteil von InSAR-Datenauswertungen ist die Möglichkeit zur Ermittlung von Trendänderungen in der horizontalen Verschiebung und Deformation in allen drei Raumrichtungen, die aus Nivellementmessungen nicht erfassbar sind. Generell ist anzumerken, dass im Raum München keine signifikanten Bodenhebungen oder -senkungen erfasst wurden (siehe Abbildung 24). Die in Abbildung 24 durch die Auswertung von 291 Szenen der Satelliten Sentinel-1a und -1b für den Zeitraum von März 2021 bis März 2023 erkennbare Senkung von weniger als 1 cm ist auf die Bauwasserhaltungsmaßnahmen der Deutschen Bahn im Bereich des Marienhofs zurückzuführen.

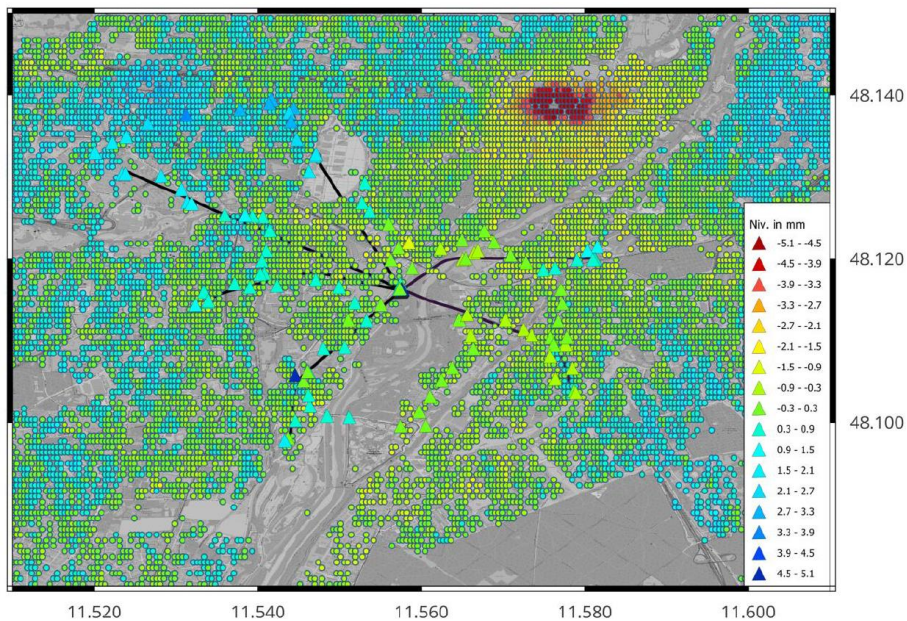


Abbildung 24: Karte der Vertikalverschiebungen, abgeleitet aus einer Persistent-Scatterer-Analyse von 291 Szenen der Satelliten Sentinel-1a und -1b für auf- und absteigende Orbits für den Zeitraum März 2021 bis März 2023. Erkennbar sind alternierende Hebungs- und Senkungsgebiete im Stadtgebiet München mit Amplituden von ca. +3 mm bis – 6 mm. Aus Westerhaus et. al (2024c).

Die weiteren Ergebnisse und detaillierteren Informationen zum Deformationsmonitoring sind im INSIDE-Schlussbericht des Partners KIT sowie in Westerhaus et al. (2024a, 2024b und 2024c) einsehbar und beinhalten zusätzlich Betrachtungen zu Prognoseberechnungen von Bodenhebungen und -senkungen.

Bezugnehmend auf das weitere Vorgehen ist geplant, gemeinsam mit Betreibern und Behörden wie dem Bergamt und dem StMWi im Nachgang der Diskussionen auf dem INSIDE-Abschlusstreffen am 07.05.2024 in den weiteren Austausch zur Neubewertung der Aufgaben des Markscheiders zu gehen. Diesbezüglich ist anzumerken, dass die Ergebnisse der KIT-GIK-Meilensteinberichte Westerhaus et al. (2024b, 2024c) den Teilnehmenden des INSIDE-Abschlusstreffens Anfang Mai 2024 aufgrund der verzögerten Berichtslegung noch nicht vorgestellt wurden.

Erste mögliche Überlegungen im Rahmen einer Neubewertung der Aufgaben im Zuge eines integrierten geodätischen Monitoringsystems könnten darin bestehen, die Koordinierung der verschiedenen Messmethoden im Markscheider-Bereich anzusiedeln (u. a. Austausch mit den Bodenbewegungsdiensten, Betreibern und Behörden, inklusive Aufarbeitung und Interpretation von Monitoringdaten zu Deformationen nach aktuellem Stand der Technik und Wissenschaft).

#### **Datenauswertung der Kernuntersuchungen (AP3.4)**

Das Ziel der in AP1.6 durchgeführten Kernuntersuchungen aus Aufschlussproben in der Nördlichen und Südlichen Frankenalb war die Ermittlung von thermo- und petrophysikalischen Gesteinskennwerten aus Triaxial-Druckversuchen und akustischen Messungen im Gesteinslabor für die Parametrisierung der Reservoirmodelle in AP4.

Des Weiteren wurde in INSIDE eine Literaturstudie zum Liegenden und Hangenden des Malms für ein verbessertes Verständnis geomechanischer Prozesse im Untergrund des bayerisches Molassebeckens einerseits sowie zur Interpretation von unter anderem geomechanischen Kennwerten des Molasse-Beckens andererseits durchgeführt. Die Literaturrecherche wurde unter Leitung von Prof. Koch (GZN) der FAU durchgeführt und beinhaltet Daten aus 275 Literaturquellen, unter anderem aus dem Dogger und dem Kristallin im Liegenden sowie den tertiären Schichten des Lithothamnienkalks und dem

Fischschiefers im Hangenden. Aufgrund der rechtlichen Rahmenbedingungen für die kommerzielle Nutzung von Publikationen wurden hierbei aus 19 Literaturquellen Auszüge mit persönlichen Kommentaren von Prof. Koch erstellt.

Über die im Rahmen von INSIDE erhobenen Daten aus den Untersuchungen von Aufschlussproben der Nördlichen und Südlichen Frankenalb konnte die bestehende Datenbasis ergänzt werden. Dies ermöglicht in weiter fortzusetzenden Betrachtungen großskalierte Anwendungen im Gesamtvolumen (vom Untergrund des Gebirges bis zur Oberfläche), unter anderem für die TH- und THM-Modellierungen im beispielsweise Raum München. In Hinblick auf die Geothermieanlage Schäftlarnstraße wurden aus den Analogproben für alle Tiefenaufschlüsse relevante Faziesklassen geomechanische und thermophysikalische Kennwerte ermittelt. Hinsichtlich der aus den INSIDE-Analogproben ermittelten effektiven Porositäts- und Permeabilitätswerte, im Vergleich zu den im Projekt GEOmaRE (BMW - FKZ: 0324332A) an Analogproben aus der Frankenalb ermittelten Werten, zeigt sich im ersten Vergleich ein ähnlicher Trend.

Basierend auf den vorliegenden Ergebnissen der RUB, Arbeitsgruppe Ingenieurgeologie und Felsmechanik, unter anderem totale Porositäten und Permeabilitäten, und der von Prof. Koch ermittelten mineralogischen Zusammensetzung, werden die aus dem Oberen Jura der Nördlichen Frankenalb gewonnenen Oberflächenproben aus Aufschlüssen, hydrogeologisch in undurchlässige bis schwach durchlässige Aquiferbereiche klassifiziert (siehe Abbildung 25). Diese Klassifizierung ist bei der Übertragung der Messergebnisse auf die Reservoirs in der südbayerischen Molasse zu beachten. Des Weiteren ist bei der Übertragung der Messwerte zu berücksichtigen, dass im Tagesaufschluss nur Riffkalke und Breistein-Fazies des Unteren und möglicherweise des Mittleren Tithon erfasst sind, während im Tiefenaufschluss das vollständige Tithon bis zum hangenden Purbeck ansteht. Diesbezüglich wurden durch Prof. Koch im Rahmen der INSIDE-Kernuntersuchungen (Messprogramm II, Untersuchungen an den Analogproben aus den Steinbrüchen Sengenthal und Saal) erste Korrelationen der porösen Riffschutt-Zonen im Tithon der Schäftlarnstraße-Karbonatplattform erarbeitet.

Alle in INSIDE geplanten Arbeiten in AP1.6 und AP3.4 konnten durchgeführt werden, zielten jedoch nicht, wie ursprünglich geplant, auf kleinskalige Untersuchungen (wie den Nachweis der Bohrlochstabilität) zu chemischen/petrophysikalischen Parameter ab.

Ergänzende Untersuchungen zum Einfluss variierender thermischer Eigenschaften wie Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmespeicherkapazität unter zyklischer Belastung auf die thermo-hydro-mechanischen Eigenschaften wurden an ausgewählten Proben aus den Steinbrüchen Saal & Sengenthal) innerhalb der Masterarbeit von Katharina Neumann (Thema: „Veränderung der Gesteinseigenschaften eines jurassischen Kalksteins nach zyklischer thermischer Behandlung im Hinblick auf die Speicherung und Nutzung thermischer Energie in Gesteinsformationen“, Juni 2023) an der RUB durchgeführt. Diese Ergebnisse ergänzen die Datenbasis im Molassebecken mit einem Nutzen für Geothermieprojekten auch von Wärmespeicherprojekten.

Die Ergebnisse der Aufschlussanalogstudien (erhobene Daten aus den In-situ und Laboruntersuchungen sowie die Literaturstudie) liegen dem PtJ über den Meilensteinbericht M1.6.1 der SWM (Thiemann, 2024a) vor und sind auf Nachfrage einsehbar.

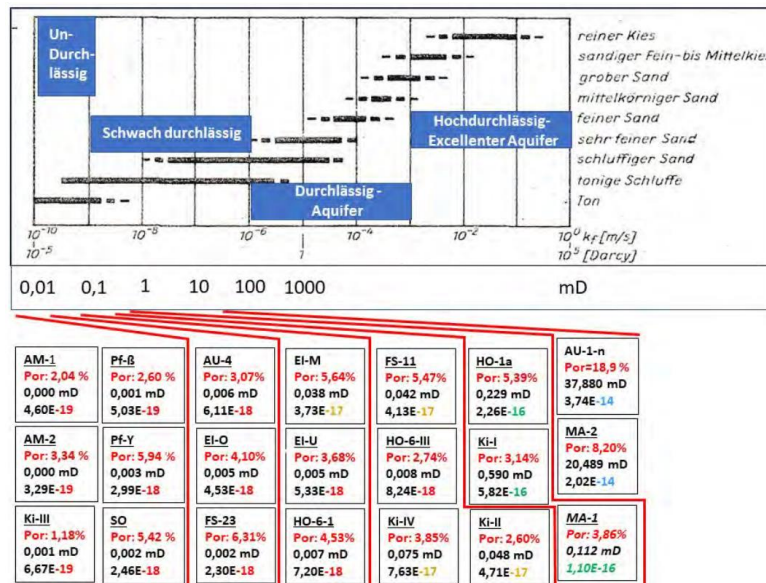


Abbildung 25: Einordnung der gesteinsphysikalischen Kenndaten der untersuchten Proben in die hydrogeologische Klassifikation nach Prof. Roman Koch aus dem Ergebnisbericht von Prof. Koch vom 23.05.2021 zu den Dünnschliffanalysen von Bohrkernen aus Tagesaufschlüssen des Oberjura (Malm). Die petrophysikalischen Parameter, totale Porosität und Permeabilität wurden durch die nach Ruhr-Universität Bochum, Arbeitsgruppe Ingenieurgeologie und Felsmechanik ermittelt.



## II.1.4. Reservoirmodellierungen - Arbeitspaket 4 (Leitung: KIT)

Ziel des AP4, Reservoirmodellierungen innerhalb des Teilvorhabens INSIDE-SWM, war es, für den Energiestandort Süd, München Schäfflarnstraße, nach dem Abteufen der Bohrungen ein kalibriertes geomechanisches Simulationsmodell für das in Teilaufgabe AP4.5 zu erarbeitende THM-S Modell zu erstellen.

Die Erstellung des kalibrierten geomechanischen (THM)-Simulationsmodells für die GTH SLS in Teilaufgabe AP4.2 (geomechanische Modellierung nach Abteufen der Bohrungen GTH SLS) und AP4.4 (thermisch-hydraulisch-mechanische Modellierungen nach Abteufen der Bohrungen GTH SLS), basierte auf den in AP4.3 durchgeführten kalibrierten thermisch-hydraulischen (TH)-Modellierungen nach Abteufen der Bohrungen GTH SLS und wurde durch ERDWERK GmbH durchgeführt. Entgegen der ursprünglich in INSIDE geplanten Durchführung der Langzeit-Produktions- und Injektionsversuche (LZPIV) Mitte Oktober 2021 mit Stufentests zur Festlegung der Betriebsszenarien des Förder- und Injektionsbetriebs der GTH SLS, welche die Grundlage für die TH-Simulationen in AP4.3 bildeten, erfolgten diese betriebsbedingt erst zwischen dem 13.03.2023 und dem 15.08.2023. Ein standortkalibriertes THM-S Modell konnte daher nicht wie ursprünglich in INSIDE anvisiert in AP4.5 für die GTH SLS durch den Partner KIT erarbeitet werden. Dementsprechend erfolgten auch keine kalibrierten TH-Simulationen in AP4.3 sowie THM-Modellierungen in AP4.4 durch das KIT.

Die in Teilaufgabe 4.2 durch das KIT durchgeführten geomechanischen Modellierungen mittels Slip- und Dilation Tendency Analysen (siehe INSIDE-Schlussbericht-KIT in Kapitel 2.1.4.1) stellen somit einen Vergleich zwischen den Modellierungen des KIT über einen probabilistischen Ansatz und den durch die Firma ERDWERK GmbH durchgeführten Modellierungen mittels eines Worst-Case-Ansatzes dar.

In Teilaufgabe AP4.1 wurden sowohl durch das KIT als auch die ERDWERK GmbH die strukturgeologischen Modellierungen auf Basis der 3D-seismischen Daten sowie vorhandener Dichte-, Permeabilitäts-, Porositäts-, Zufluss- und Temperaturmessungen aktualisiert. Die Datengrundlagen wurden dem KIT über AP1.1 übergeben.

In den folgenden Abschnitten zu AP4.1 bis AP4.4 sind die Ergebnisse der Firma ERDWERK GmbH zu den geomechanischen Simulationen nach dem Abteufen der Bohrungen GTH SLS dargelegt. Am Ende des Kapitels II.1.4 werden die Arbeitsergebnisse des INSIDE-Verbundpartners KIT zu den THM-S-Modellierungen (AP4.5) zusammengefasst.

### **Aktualisierung des Strukturgeologischen Modells (AP4.1), geomechanische Simulationen (AP4.2), thermisch-hydraulische (TH)-Modellierungen (AP4.3), thermisch-hydraulisch-mechanische (THM)-Modellierungen (AP4.4) nach Abteufen der Bohrungen GTH SLS**

#### **1. Datengrundlage**

Die Abschätzung und Festlegung der geomechanischen Eigenschaften, wie Poissonzahl, Elastizitätsmodul und einaxialer Druckfestigkeit, sowie der Randbedingungen, wie Spannungsrichtung und Spannungsmagnitude, erfolgte auf Basis der Daten aus den Schäfflarnstraße Bohrungen. Ergänzend wurden bohrtechnische Parameter und relevante geophysikalische Logs aus den umliegenden SWM-Bohrungen in Riem, Freiam, Sauerlach, Dürrnhaar und Kirchstockach sowie aus weiteren relevanten Bohrungen im Großraum München aus der internen Datenbank der ERDWERK GmbH verwendet.

## 2. Geomechanische (THM) Simulation

Die thermisch-hydraulischen (TH) Simulationen erfolgten auf Basis des im Rahmen von ERDWERK (2024) erstellten Wärmebergbaumodells in Petrel™ sowie mittels der Temperaturoption der Simulationssoftware Eclipse™ (E100). Die dort durchgeführten thermisch-hydraulischen (TH) Simulationen basierten auf einem hydraulisch kalibrierten Reservoirmodell und lieferten die Druck- und Temperaturverteilungen der einzelnen Betriebsszenarien als Input für die geomechanischen (THM) Simulationen. Bei den Simulationen wurde von einem konstanten, durchgängigen Betrieb über das gesamte Jahr ausgegangen, sodass Schwankungen in der Förder- und Injektionsrate bzw. in der Injektionstemperatur vernachlässigt wurden. Die Simulation ist daher als ein konservatives Szenario im Hinblick auf die thermische Entwicklung zu betrachten.

Die geomechanischen (THM) Simulationen erfolgten auf Basis des in Petrel™ erstellten Simulationsmodells und der Simulationssoftware Visage™. Für die Erstellung des geomechanischen (THM) Simulationsmodells wurde gemäß des Geomechanics Workflow in Petrel™ das bestehende Grid des thermisch-hydraulischen (TH) Simulationsmodells erweitert und daraus das Finite-Elemente-Netz in Petrel™ generiert. Die Parametrisierung des Modells erfolgte basierend auf dem bestehenden thermisch-hydraulischen (TH) Simulationsmodell sowie der bereits beschriebenen Datengrundlage. Nach dem Setzen von Randbedingungen für die Simulation des rezenten Spannungsfeldes wurde vor der Durchführung der geomechanischen (THM) Simulationen eine Kalibrierung des Spannungsfeldes vorgenommen. Die Modellierung erfolgt für vier verschiedene Betriebsszenarien der Geothermieanlage Schäftlarnstraße unter Variation der Fließraten, der Verteilung auf die drei Dubletten sowie der Injektionstemperatur.

## 3. Bewertung der Modellierungsergebnisse

Die Ergebnisse der geomechanischen (THM) Simulationen zeigen, dass die Abkühlung im Vergleich zur prognostizierten Druckerhöhung um eine Injektionsbohrung im Reservoir einen größeren Einfluss auf den Stabilitätszustand einer Störung während des Betriebs der Geothermieanlage GTH SLS hat. Dennoch zeigen die INSIDE THM-Simulationen, dass das seismische Risiko zur Auslösung spürbarer seismischer Ereignisse, verursacht durch Untergrundprozesse, u. a. durch Spannungsänderungen an den Störungen und im Reservoir, als sehr gering einzustufen ist.

Die Beobachtungen zu bereits aufgetretener induzierter Seismizität im Großraum München unterstützen diese Aussage. Die Ereignisse werden bisher meist einer Injektionsbohrung zugeordnet und treten überwiegend erst nach einigen Jahren Betrieb auf. Entsprechend könnte die sukzessive Ausbreitung der Abkühlungsfront um die Injektionsbohrung eine mögliche Indikation für einen langsamen bzw. zeitversetzten Prozess sein, wie er in den Modellierungsergebnissen zu erkennen ist. Darüber hinaus zeigt das geomechanische Modell, warum, entgegen der Erwartung, bei einer raschen Druckerhöhung im Reservoir keine schnelle Reaktion mit induzierter Seismizität folgt.

Theoretisch ist zwar davon auszugehen, dass der Effekt, den eine thermische Abkühlung und eine hydraulische Druckerhöhung auf das Mohr-Coulombsche Bruchkriterium ausüben, derselbe ist. Beide beeinflussen die effektive Spannung und versetzen den Mohrschen Spannungskreis nach links bzw. in Richtung Bruchlinie. Der Mechanismus, der zur Spannungsumlagerung führt, ist jedoch unterschiedlich zu bewerten: die Druckerhöhung wirkt direkt auf die effektive Spannung, da diese als die Gesamtspannung minus den Porendruck definiert ist. Bei der Abkühlung hingegen kommt es durch das Schrumpfen des Gesteins zu einer Verformung, die die Gesamtspannung beeinflusst und damit die effektive Spannung nur indirekt beeinflusst.

Eine Betrachtung des simulierten Tensors der effektiven Spannung zeigt, dass die Veränderung des Spannungsfeldes durch die Druckerhöhung auch im Malm um die Injektionsbohrungen kaum sichtbar ist, während die Abkühlungsfront um die Injektionsbohrung nach 100 Jahren Betrieb eine signifikante Auswirkung auf das Spannungsfeld hat. Lokal erreicht die minimale Horizontalspannung sogar einen negativen Wert, was einer Zugspannung in dieser Richtung entspricht. Dies bedeutet, dass im



ungestörten Gestein in Bereichen, in denen die Zugfestigkeit des Gesteins überschritten wird, Klüfte entstehen würden. In natürlich geklüftetem Gestein würde es zu einer Erweiterung der bestehenden Klüfte kommen. Die Anordnung des Spannungstensors um die Abkühlungsfront zeigt Ähnlichkeit mit dessen Anordnung um einen Tunnel, da in beiden Fällen die stützende Funktion des Gesteins durch die Abkühlung bzw. durch dessen Abbau stark reduziert wird.

Für die Quantifizierung des Risikos einer möglichen Spannungsumlagerung, die zu einem seismischen Ereignis führen könnte, sind Bereiche zu identifizieren, in denen das definierte Bruchkriterium entlang der Störungsflächen überschritten wird. Grundsätzlich kann anhand der Simulation nicht ausgesagt werden, ob die in diesen Bereichen erwartete plastische Verformung eher ein kontinuierlicher Spannungsabbau, also ein „Knistern“, oder ein eruptives, diskretes seismisches Ereignis ist.

Es ist zwar zunächst davon auszugehen, dass durch die Reduzierung der Unsicherheit der Parameter die Aussagekraft der Simulationsergebnisse zum zeitlichen Verlauf und zur räumlichen Ausbreitung verbessern konnte, jedoch wird die grundsätzliche Risikobewertung einer möglichen Spannungsumlagerung an einer Störung für die verschiedenen Betriebsszenarien weiterhin bestehen bleiben. Vereinfacht dargestellt: Mit den gemessenen Daten aus den abgeteufte Bohrungen Schäftlarnstraße kann das „Wo“ und „Wann“ aber nicht das „Ob“ einer möglichen Überschreitung des Bruchkriteriums entlang der Störungsflächen bewertet werden.

Basierend auf den Ergebnissen der geomechanischen (THM) Simulationen ist nach 50 Jahren Kaltwasserinjektion für keines der modellierten Betriebsszenarien eine Überschreitung des Bruchkriteriums entlang der Störungen zu erwarten. Demnach ist das Risiko für eine plastische Scherverformung entlang der Störung als gering zu bewerten. Nach 100 Jahren Kaltwasserinjektion zeigt sich für zwei der Betriebsszenarien stellenweise (einzelne Zellen) eine Annäherung des Bruchkriteriums entlang der nördlichen Schäftlarnstraße Störung.

### **THM-S Modellierungen (AP4.5)**

Ziel des AP4.5 war die Modellierung induzierter Seismizität in Verbindung mit dem Geothermiebetrieb. Der Verbundpartner KIT hat in Kooperation mit der LMU ein synthetisches THM-Seismizitätsmodell (THM-S) erstellt. Das Modell basiert auf dem geologischen Strukturmodell sowie dem TH- und THM-Modell des Raums München und wurde mit der Open-Source-Software MOOSE (KIT) und SeisSol (LMU) erarbeitet. Die Verlinkung der Software ermöglichte die Untersuchung der geomechanischen Verhältnisse im Untergrund, unter anderem zur Vorhersage von Änderungen im Spannungsfeld über Analysen nach dem „Mohr-Coulomb-Failure-Criterion“ (MOOSE) und zur Vorhersage von Seismizität über Analysen zur Ausbreitung der seismischen Wellenfronten (SeisSol). Durch die Gemeinschaftsarbeit von KIT und LMU ist ein gegenseitiger automatischer Benchmark der erarbeiteten Modelle möglich. Die Arbeitsergebnisse zum THM-S-Modell sind in Kapitel 2.1.4.3 des INSIDE-Schlussberichts des Partners KIT sowie in der von Rahim Habibi (KIT) und Thomas Ulrich (LMU) geplanten Veröffentlichung dargestellt.

Für den operativen Einsatz der Modelle, das heißt zur Abschätzung und Evaluierung von Maßnahmen zur Reduzierung von induzierter Seismizität und Bodendeformation aus THM-S-Simulationen, sind weiterführende Arbeiten erforderlich, unter anderem zur Erarbeitung standortspezifischer (kalibrierter) THM-S-Modelle.

Besonders hervorzuheben ist die erfolgreiche Kopplung zweier unabhängiger komplexer 3D-THM-Reservoirmodelle, die ursprünglich in INSIDE nicht vorgesehen war. Die Kopplung der beiden Open-Source-Codes (MOOSE, SeisSol) wird durch ein Versagenskriterium ausgelöst. Über die in INSIDE erarbeitete Synthese zwischen MOOSE und SeisSol konnten synthetische seismische Ereignisse während der angenommenen Lebensdauer des Reservoirs simuliert werden.

Offene zukünftige Arbeiten sollten die synthetischen Modellierungen zur THM-Reaktion auf das Versagen einer Verwerfung beinhalten, unter anderem über Studien zum Einfluss von Porosität und Permeabilität sowie der Auswirkung von Temperaturunterschieden während des Versagens. Im



Stadtwerke München

nächsten Schritt ist die in INSIDE erarbeitete Kopplung des THM-S-Modells mit realen Daten zu kalibrieren.

### **II.1.5. Datenintegration - Arbeitspaket 5 (Leitung: SWM)**

Das Ziel von AP5, Datenintegration, war es, die Projektergebnisse aus AP1, AP3 und AP4 zu bewerten. Diese Bewertung diente dazu, Empfehlungen für das Monitoring, die Datenverarbeitung und die Modellierung von seismischen Vorgängen sowie Deformationsprozessen, einschließlich der potenziell damit einhergehenden gekoppelten thermisch-hydraulisch-mechanischen und strukturgeologischen Prozesse in geothermischen Reservoiren, unter anderem über Kosten-Nutzen-Analysen, zu geben. Zudem war geplant, die Ergebnisse der seismologischen und geodätischen Messungen mit den Betriebsabläufen in Teilaufgabe AP5.3 und den numerischen Modellergebnissen in AP5.4 zu vergleichen, um in Teilaufgabe AP5.5 ein Konzept für ein dynamisches Reservoirmanagementsystem zu erarbeiten. In AP5.6 sollten schließlich Handlungsempfehlungen für betriebliche Maßnahmen zum Entgegenwirken möglicher sich entwickelnder spürbarer seismischer Ereignisse und schadbringender Bodenhebungen und -senkungen erarbeitet werden.

#### **Kosten-/Nutzenanalysen der seismischen Aufzeichnungen (AP5.1)**

Die in INSIDE verwendeten seismischen Messgeräte wurden vom Projektpartner KIT hinsichtlich der Sensitivität in der Auflösung bei der Datenerfassung sowie technischer Aspekte in der Handhabung bewertet (siehe Schlussbericht INSIDE-KIT und Azzola, 2024b).

#### **Integration Deformationsdaten und Kosten/Nutzenanalyse (AP5.2)**

Die Ergebnisse der INSIDE-Deformationsmessungen an der Erdoberfläche sind im Schlussbericht des Partners KIT sowie in dem Bericht zu AP5.2 (siehe Westerhaus, M., 2024c) bewertet.

#### **Interpretation der Seismizität und der In-situ Daten hinsichtlich betrieblicher Abläufe und geologisch/tektonischer Gegebenheiten (AP5.3)**

Wegen der äußerst geringen Anzahl an seismischen Ereignissen, die an den Standorten Pullach (zwei mikroseismische Vorgänge) und Schäftlarnstraße (ein mikroseismisches Ereignis) aufgezeichnet wurden, kann diese Aufgabe nicht zuverlässig erfüllt werden.

#### **Vergleich der numerischen Modellierungsergebnisse und der beobachteten Daten (AP5.4)**

Die Reservoirmodellierung der Geothermieanlage Schäftlarnstraße (siehe Abschnitt II.1.4) zeigt, dass im aktuellen Beobachtungszeitraum mit keinem seismischen Ereignis zu rechnen ist und die Bodendeformation an der Erdoberfläche vernachlässigbar ist.

#### **Verfahrensentwicklung zur Integration der Ergebnisse in ein dynamisches Reservoirmanagementsystem und zum Aufbau der technischen Umsetzungen in die Leitzentralen (AP5.5)**

Die Ziele von AP5.5 umfassten a) die Zusammenstellung der Anforderungen und die Entwicklung von Richtlinien für den Aufbau eines dynamischen Reservoirmanagementsystems (RMS), b) eine Verfahrensentwicklung zur Integration der Ergebnisse in ein RMS und zum Aufbau der technischen Umsetzungen in die Leitzentrale und c) die softwaretechnische Umsetzung und Integration der Ereignisse in den Betriebsablauf der Leitzentrale.

Die Anforderungen für die Erarbeitung eines mittel- bis langfristig aufzubauenden dynamischen RMS und zur Datenintegration wurden in INSIDE über eine RMS-Architektur mit drei Modulen „Database“, „Processing Center“ und „Dashboard“ erarbeitet (siehe Abbildung 26). Eine zentrale Rolle innerhalb des RMS-INSIDE-Konzepts nimmt das Modul „Database“ ein, einerseits als Austauschplattform für die in AP1 neu erhobenen und vorhandenen Daten, die in AP3 prozessierten Daten sowie die in AP4 numerisch modellierten Daten ein (siehe die in Abbildung 18 dargestellten Workflows zur Datenprozessierung). Andererseits ist das Modul „Database“ die Nahtstelle für die RMS-Module „Processing Center“ und „Dashboard“ (siehe Abbildung 26).

Die Anforderungen an die Daten und Workflows zur Datenbearbeitung wurden in AP2.1 unter Berücksichtigung verschiedener Zugriffsberechtigungen geplant. Aufgrund fehlender Ergebnisse in AP3 und AP4 für den Aufbau des Datenmanagements und RMS in AP2.2 innerhalb der INSIDE-Projektlaufzeit erfolgte die Erarbeitung des RMS-Konzepts über den Prototypen des kontinuierlichen sechsmonatigen DAS-Datenmonitorings in der Geothermieranlage Schäftlarnstraße. Über diesen Prototypen (Use Case des seismologischen Monitorings) konnte die grundsätzliche Eignung des INSIDE-Datenmanagements und des RMS-Konzepts, einschließlich der Umsetzung eines Big-Data-Managements (siehe Abschnitt II.2.2 in diesem Bericht), gezeigt werden.

Der konzeptionelle Vorschlag zur Datenintegration innerhalb der SWM-IoT-Plattform und zur Verlinkung zu weiteren außerhalb der SWM-IoT-Plattform aufzubauenden RMS-Systemkomponenten ist in der RMS-Systemlandschaft in Abbildung 27 dargestellt. Hierbei ist hervorzuheben, dass die für die Bewertung von Reservoirprozessen im Modul „Processing Center“ sowie die Empfehlungen für einzuleitende Maßnahmen zur Risikominimierung innerhalb des Moduls „Decision Center“ außerhalb der SWM-IoT-Datenplattform angesiedelt sind. Hintergrund dieser Planung ist es, im Sinne eines gemeinsamen Reservoirmanagements im Raum München bzw. für die ganzheitliche Betrachtung unter anderem der Reservoirdynamik zu Nachbarbohrungen, die Notwendigkeit der Einbeziehung einer Vielzahl von Modellrechnungen und Datenauswertungen von Dritten wie beispielsweise der GAB, TUM, LMU und anderen Beteiligten auf externen Systemen zu berücksichtigen. Die ursprünglich in INSIDE geplante Erarbeitung und Integration einer wissenschaftlich genutzten Software für das RMS konnte aus projektspezifischen Gründen nicht umgesetzt werden. Die Software war als Open Source vorgesehen, wobei das KIT in Python/+ObsPy und Matlab arbeitete und die Auswertemethoden sowie die Open-Source-Software MOOSE/TIGER (KIT-Entwicklung) unter Unterstützung der Projektpartner weiterentwickelt werden sollten. Die von der ERDWERK GmbH mit der kommerziellen Software Petrel™ durchgeführten Reservoirmodellierungen sollten in die zu entwickelnde Open-Source-RMS-Software über Konvertierungen integriert werden.

Des Weiteren wurde die geplante zu erarbeitende Informationsplattform (Web-GIS/Dashboard) konzeptionell in Jupyter Notebook mit synthetischen Daten für den Use Case „Seismologisches Monitoring“ erarbeitet (siehe Abbildung 29). Für die Integration des Dashboards in den Betrieb sind weitere Planungen und Arbeiten notwendig. Das erarbeitete RMS-Konzept für den Use Case „Seismologisches Monitoring“ ist in Abbildung 28 dargestellt. Es umfasst ein Verarbeitungszentrum (Processing Center) für die Bewertung von In-situ-Überwachungsdaten und aus numerischen Reservoirmodellen ermittelten Daten, ein Dashboard zur Benachrichtigung der Stakeholder bei Überschreitung von Schwellenwerten und ein Entscheidungszentrum (Decision Center).

Hervorzuheben ist, dass die Betriebsabläufe eines geothermischen Systems sowie die im Production Scenario Module (Teil des Processing Center) vorgeschlagenen alternativen Produktionsszenarien bei Überschreitung von Schwellenwerten im Dashboard angezeigt werden. Im INSIDE-RMS-Konzept ist vorgesehen, dass Warnungen an verschiedene Benutzergruppen wie Reservoiringenieure, Anlagenfahrer, Anlagenbetreiber und ggf. die Bergbehörden ausgegeben werden. Vor der Einleitung von Maßnahmen wird vorgeschlagen, die alternativen Produktionsszenarien von einem Lenkungsausschuss freizugeben.

Das in Jupyter Notebook mit synthetischen (nicht real erfassten) Daten erarbeitete INSIDE-Prototyp-Dashboard für das seismologische Monitoring zeigt Abbildung 29. In dem für den Anwender „Reservoiringenieur“ vorgeschlagenen Dashboard mit einem Web-GIS, das die 2D-zeitliche Verteilung seismischer Ereignisse auf einer Karte und eine Zuordnung zum Ereignislevel (Magnitudenbewertung) ermöglicht (siehe linke Abbildung 29) und eine Abschätzung der Ereignisorte zum Bohrungsverlauf

bietet (siehe rechte Abbildung 29), ist derzeit keine Verknüpfung mit Datensystemen, Modellen und Analysemethoden und keine Integration in den Live-Betrieb möglich.

Die im INSIDE erarbeiteten konzeptionellen Entwürfe zu User Stories für das RMS (Use Cases zum Produktionsmonitoring für den Betrieb und Reservoircharakterisierung für Reservoiringenieure) sind in Abbildung 30 dargestellt und im Weiteren zu bearbeiten.

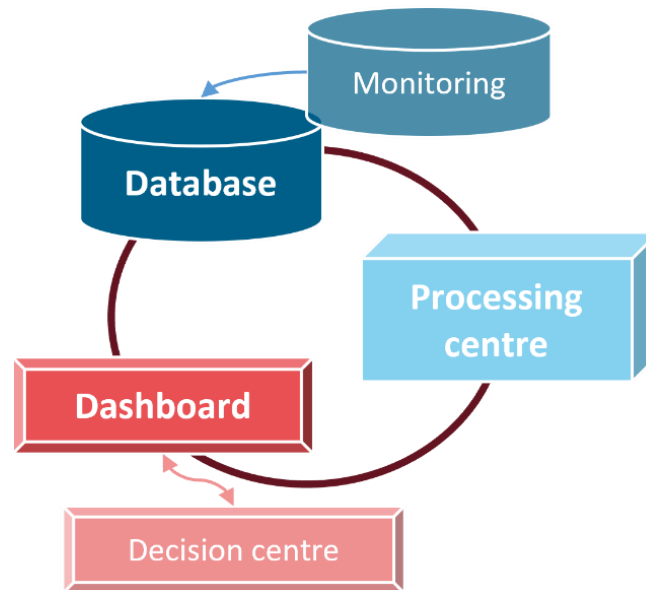


Abbildung 26: INSIDE Reservoirmanagementsystem (RMS) Konzept mit eingebundenen Modulen.

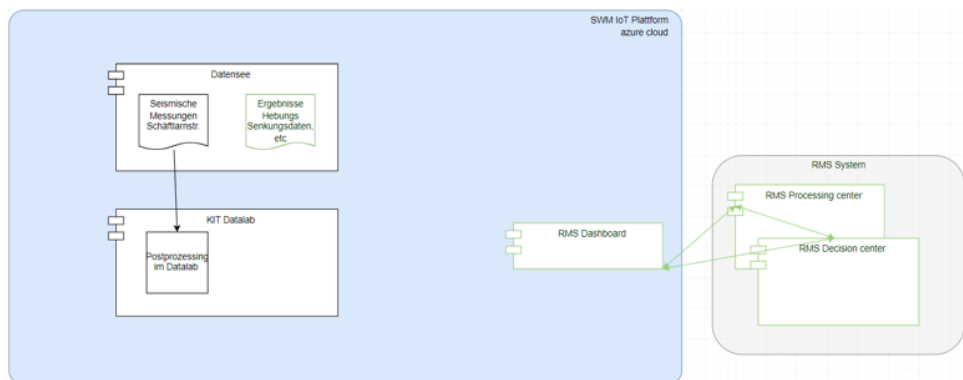


Abbildung 27: INSIDE Vision zur Systemlandschaft innerhalb und außerhalb der SWM IoT Azure Plattform (Stand: Mai 2024).

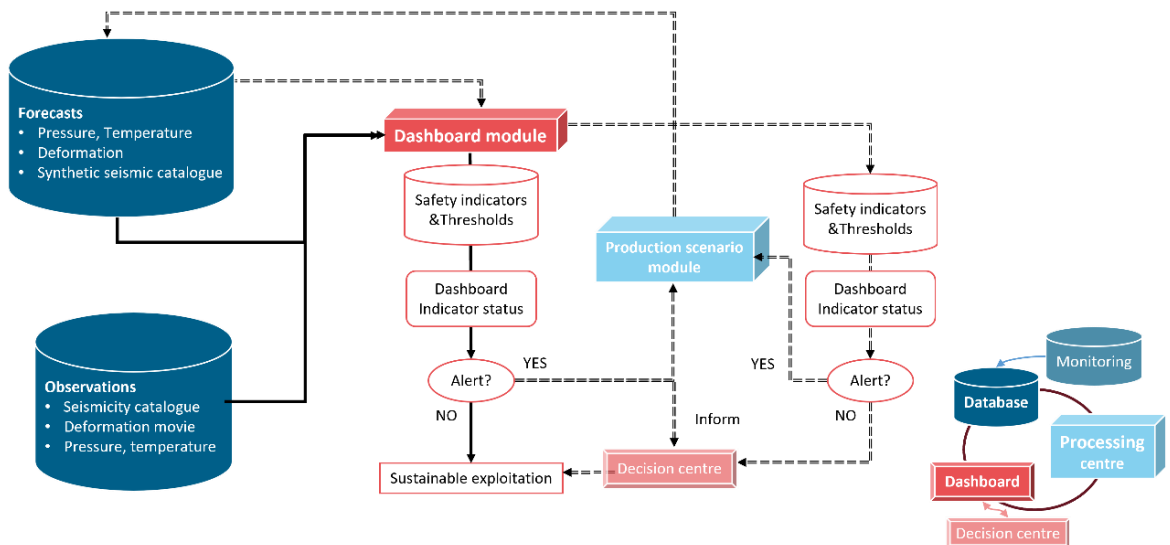


Abbildung 28: Schematische Darstellung des INSIDE Dashboards und des RMS-Entscheidungsfindungszentrum (Decision center) (umgezeichnet nach Gaucher et al. 2022).

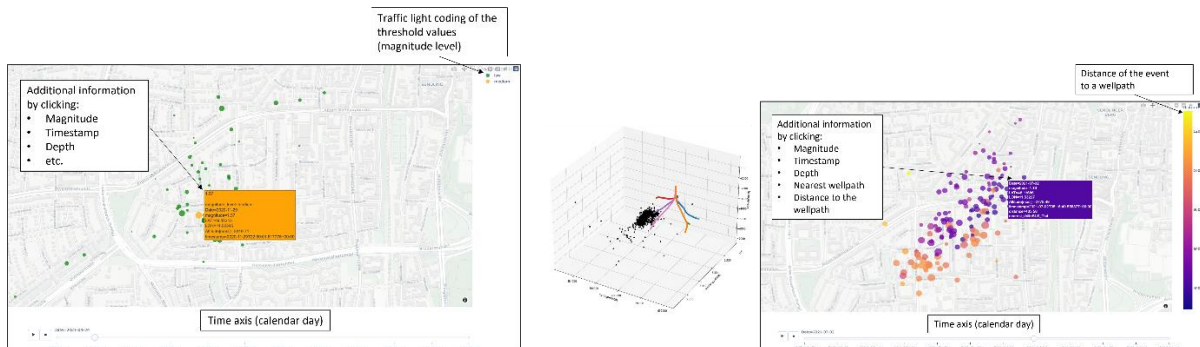


Abbildung 29: INSIDE Prototyp Dashboard für den Use Case „Seismologisches Monitoring“. Das Dashboard wurde in Jupyter Notebook mit synthetischen (nicht real erfassten) Daten erarbeitet und ist ein Vorschlag für das mittel- bis langfristig zu erarbeitende RMS-Dashboard. In der linken Abbildung ist die Verteilung synthetischer Ereignisorte hinsichtlich des zeitlichen Auftretens und ermittelter Magnitude sowie in der rechten Abbildung hinsichtlich des Abstandes zwischen synthetischen Ereignisorten und Bohrungsverläufen dargestellt.



**Roles / Personas**

<b>Name</b>	Dashboard Operator / Reservoir Engineer
<b>Skills</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Geological, Reservoir Modelling, interpreting reservoir data</li> </ul>
<b>Responsibilities</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>detect anomalies, suggestions to the operating personnel (plant operators), give warning or information, speaking to each other, no forms</li> </ul>
<b>Relationship to other Personas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Plant Operator</li> </ul>

<b>Name</b>	Plant Operator
<b>Skills</b>	
<b>Responsibilities</b>	
<b>Relationship to other Personas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dashboard Engineer</li> </ul>

<b>Name</b>	Role3
<b>Skills</b>	
<b>Responsibilities</b>	
<b>Relationship to other Personas</b>	

simple use case:  
 defined threshold was reached -> before adjusting the plant operations some modelling has to be done!  
 modelling with possible param changes: results shown on dashboard

**Dashboard:**

- observation inputs -> show past
- modelling inputs -> show expected future
  - forecasting pressure, flow rate, temperature as a field in the reservoir, data for the well (monitored values and calculated/proposed values) is included in the modelling of the reservoir data

Modelling is running permanently, shows forecasts.  
 Parameters are changed and are run in different modellings to see what changes/prevents seismics.

Open: Which values are needed in the control unit / needs the Plant Operator?

Alert systems are already implemented in the control units (high pressures, high temperatures, etc.), but no link to seismicity events.

Open: Can the Dashboard be linked to pressure, temperature data from the plant operation system?  
 Clarification needed!

Only initial values in the model!

What should/can be displayed:  
 rate of events / how many are expected per hour  
 range of events / places affected / given areas

**User Stories**

<b>Description / Name</b>	Show warnings on seismic irregularities
<b>Process Flow</b>	Dashboard Operator I want to be informed immediately about seismic irregularities (model or observation) by means of a warning message, so that I am able to readjust the system and avoid damage, resulting on different levels of magnitude.
<b>Criteria / Details</b>	How are seismic irregularities defined? Should the system recognize these automatically? Which information is relevant for the user in this case? Does the engineer do an analyze himself after the warning? Where should he jump off? -> next user story

<b>Description / Name</b>	US2
<b>Process Flow</b>	As a I want to so that
<b>Criteria / Details</b>	

<b>Description / Name</b>	US3
<b>Process Flow</b>	As a I want to so that
<b>Criteria / Details</b>	

Abbildung 30: Nicht-konsolidierte Entwürfe der INSIDE-User-Stories und Benutzergruppen im Rahmen eines Brainstormings mit den Verbundpartnern (Stand: Oktober 2021).

## Mögliche operative Empfehlungen (AP5.6)

Ziel der Teilaufgabe AP5.6 war die Bewertung der betrieblichen Aktivitäten an den INSIDE-Untersuchungsstandorten auf Basis der Arbeitsergebnisse aus den AP1 bis AP4 sowie die Erarbeitung von Handlungsmaßnahmen zum Entgegenwirken von induzierter Seismizität und Bodendeformation. Diese Maßnahmen sollen zu einem nachhaltigen Reservoirmanagement hinsichtlich einer risikominimierten geothermischen Energiegewinnung aus der Tiefengeothermie beitragen.

Im Zeitraum des INSIDE-Projekts wurden am Geothermiestandort Schäftlarnstraße (GTH SLS/GTH SSU) keine Zusammenhänge zwischen den betrieblichen Vorgängen und den durch die seismologischen und geodätischen Monitoringsysteme erfassten Daten erkannt. Es ist anzumerken, dass im Zeitraum des seismologischen Monitorings zwischen März 2021 und Januar 2024 lediglich ein mikroseismisches Ereignis mit einer Magnitude  $M_w = -0,1$  an der Geothermieanlage Schäftlarnstraße erfasst wurde. Im weiteren Umgriff der Geothermieanlage Pullach wurden zwei mikroseismische Ereignisse und kein Ereignis an dem geplanten Geothermiestandort Baierbrunn erfasst. Mit den Geothermiebetreibern der benachbarten Geothermieanlagen in Unterhaching und Oberhaching (Grünwald) wurde sich zu möglichen betrieblichen Änderungen während der erfassten Ereignisse ausgetauscht. Dabei zeigten sich keine Änderungen in der Fahrweise, und ein Bezug der zwischen März 2021 und Januar 2024 erfassten mikroseismischen Ereignisse in Unterhaching und Oberhaching (Grünwald) konnte nicht ermittelt werden.

Des Weiteren weisen die im Rahmen der InSAR-Datenauswertungen ausgewerteten geodätischen Datenerfassungen, unter anderem über Sentinel C-Banddaten, derzeit keine dem Anlagenbetrieb zuordenbaren Bodendeformationen auf. Die mit Beginn des Erprobungsgebiets der Geothermieanlage Schäftlarnstraße Mitte 2021 erfasste minimale Hebung von ungefähr 3 mm im Bereich der Bohrungsendverläufe der Injektionsbohrungen Th3 und Th5 kann nicht ohne weiteres geothermischer Aktivität zugeordnet werden. Die prinzipielle Eignung des InSAR-Monitoringverfahrens zum Nachweis von Bodenhebungen und -senkungen konnte im INSIDE-Projekt durch die Erfassung der Bodensenkung von unter 1 cm (mit Sentinel-Daten) im Bereich der Tunnelarbeiten bzw. Bauwasserhaltung der Deutschen Bahn im Marienhof (Bauarbeiten der 2. Stammstrecke) gezeigt werden.

Eine wichtige Fragestellung in INSIDE war die Erarbeitung von Handlungsmaßnahmen zum Entgegenwirken induzierter Seismizität und Bodendeformation für eine sichere geothermische Energiegewinnung aus der Tiefengeothermie, die gleichzeitig wirtschaftliche Aspekte wie die Versorgungssicherheit gewährleistet. Derzeitige Überlegungen zu Maßnahmen umfassen die Änderung der Temperatur und des Drucks, eine Reduktion der in die Injektionsbohrung einzugebenden Thermalwassermenge sowie die Außerbetriebnahme des Geothermiebetriebs. Gerade im Hinblick auf die Gewährleistung der Versorgungssicherheit und Wirtschaftlichkeit ist eine vorübergehende Unterbrechung des Anlagenbetriebs zu vermeiden. Das bedeutet, dass die seismischen Risiken neben der Datenerfassung über Monitoringsysteme auch aus numerischen Modellbetrachtungen abzuleiten sind. Diese Modelle sollen bei absehbaren seismischen Risiken frühzeitig kontrollierte Maßnahmen zur Vermeidung spürbarer bzw. schadbringender Seismizität und Bodendeformation während des Anlagenbetriebs abschätzen und im Bedarfsfall anzeigen können. Wie in Abschnitt I.4 aufgeführt, gibt es derzeit keine für den Einsatz in hydrothermalen Systemen geeigneten Modellbetrachtungen zur Vorhersage von induzierter Seismizität und Bodendeformation, welche einen Bezug zu betrieblichen Änderungen in der Anlagenfahrweise ermöglichen. Über das in AP5.5 erarbeitete Konzept für einen Prototyp des RMS zur Überwachung und Bewertung von Reservoirprozessen konnte ein mögliches Ablaufschema für die Empfehlung von einzuleitenden Maßnahmen in INSIDE erarbeitet werden. Die Ableitung von Handlungsmaßnahmen über Modellbetrachtungen unter Berücksichtigung der betrieblichen Abläufe, der gekoppelten thermisch-hydraulisch-mechanischen und strukturgeologischen Prozesse im Untergrund sowie potentiell erfassbaren seismologischen und geodätischen Daten konnte in INSIDE aufgrund der verzögert vorliegenden Arbeitsergebnisse beim Aufbau der THM-S-Modelle nicht erfolgen. Der Status Quo zu den aus Reservoirmodellierungen (AP4) abzuleitenden Handlungsmaßnahmen umfasst Bezüge zwischen passiven seismischen Datenerfassungen und den Parametern Druck (P), Temperatur (T) und Schüttung (Fließrate des Thermalwasserstroms (Q)). In INSIDE wurden durch den Partner KIT-AGW am Geothermiestandort Pullach sowie am geplanten

Standort Baierbrunn dynamische 3D- und zeitliche P-, T-Modellbetrachtungen durchgeführt und ein auf den Raum München adaptiertes 3D- und zeitliches THM-S-Modell erarbeitet. Bezüge zur Temperatur- und Druckprognose hinsichtlich seismischer Prozesse und Bodendeformationen sowie betrieblicher Abläufe über vollgekoppelte Modellierungen konnten innerhalb der INSIDE-Projektlaufzeit nicht weiterverfolgt werden.

Erste Überlegungen zur Einleitung von Gegenmaßnahmen zu seismischen Ereignissen und Bodendeformationen beim Betrieb von Geothermieanlagen wurden in INSIDE durch die Erstellung erster Use Cases bzw. User Stories erarbeitet. Generell ist bezüglich der Notwendigkeit der Erarbeitung von Maßnahmen zur seismischen Risikominimierung darauf hinzuweisen, dass seismische Ereignisse beim Betrieb von Geothermieanlagen aufgrund der dynamischen Prozesse während der Zirkulation des Thermalwassers zur Gewinnung der Erdwärme sowie der Spannungsumlagerungen an den Verwerfungen und Störungen im Raum München auftreten können (siehe Abschnitt I.4, Seithel et al. 2019a, b). Ob diese Untergrundprozesse mit Magnituden weit unterhalb der Spürbarkeit über seismologische Datenerfassungen registriert werden, hängt im Wesentlichen von der Auslegung der Monitoringnetze ab (siehe Abschnitt I.4).

Folgende Überlegungen und Optionen wurden in INSIDE zu möglichen Gegenmaßnahmen zur Risikominimierung fühlbarer seismischer Ereignisse und Bodendeformationen erarbeitet:

- 1) Reduktion der Förderrate (Verringerung der Fließrate des Thermalwassers) durch Druckentlastung/-beaufschlagungen. Bei der Beeinflussung der Förderraten durch Druckinjektionen sind die nachfolgenden Reaktionen im Untergrund zu berücksichtigen. Das heißt, das seismische Risiko muss weiterhin überwacht und durch Modellrechnungen abgeschätzt werden.
- 2) Regelung der Injektionstemperatur. Diese Option ist jedoch aufgrund der zusätzlichen Energieeinbringung nicht wirtschaftlich.

Bezugnehmend auf 1) und 2) sind injektionsseitige Temperatur- und Druckänderungen aus wirtschaftlichen Gründen schwierig umsetzbar und führen bei kurzfristiger Umsetzung möglicherweise zu nicht gewünschten Lastwechseln. Diese können infolge geomechanischer Spannungsauswirkungen im Gesamtsystem des Untergrundes zur Auslösung noch stärkerer seismischer Ereignisse und Bodendeformationen führen. Insbesondere die Einleitung von abgekühltem Thermalwasser in Option 1) kann ggf. zur Lösung von Karbonaten und folglich zur Spannungsumlagerungen führen. Diesbezüglich muss mittels mittel- bis langfristig umzusetzender Modellbetrachtungen geklärt werden, ob das Thermalwasser warm oder kalt injiziert werden soll. Diese Modellbetrachtungen sollten zeitgleich mit der Erarbeitung standortkalibrierter THM-S-Modelle auf Basis erhobener Reservoir- und Betriebsdaten durchgeführt werden. Gleichwohl gilt nach aktuellem wissenschaftlich-technischen Stand die Injektionsrate als der einzige Betriebsparameter, der für die Minderung induzierter Seismizität relevant ist (Option 1).

Aufgrund der fehlenden Zwischenergebnisse zur Entwicklung eines im Betrieb anwendbaren RMS zur Vergabe von Handlungsempfehlungen wurde mit den INSIDE-Verbundpartnern im Februar 2021 abgestimmt, dass in INSIDE ausschließlich ein Prototyp-RMS erarbeitet wird. Dieses RMS berücksichtigt nicht kalibrierte THM-S-Modelle und die Einbindung der erarbeiteten Maßnahmen zur Risikominimierung spürbarer Seismizität und Bodendeformation. Testläufe in der Leitzentrale und Betriebsdatenerfassungssysteme, welche die Erarbeitung und Entwicklung der in Abbildung 18 dargestellten Abläufe/Prozessroutinen in der Datenverarbeitung sowie eventuell erforderliche Software- und/oder Codeweiterentwicklungen umfassen, wurden ebenfalls nicht einbezogen. Eine diesbezügliche Anmerkung ist, dass durch Dritte, wie die LMU im Rahmen der GAB, ein aktuelles Vorhaben zum seismischen Risikomanagement begonnen wurde. Etwaige Planungen zur Weiterbearbeitung der in INSIDE begonnenen Kooperation zwischen KIT-GIK (Rahim Habibi) und LMU (Thomas Ulrich) zur Erarbeitung von THM-S-Modellierungen stehen derzeit noch aus. Diese bedürfen einer engen Abstimmung zwischen Betreibern, wissenschaftlichen Partnern sowie Behörden unter Beteiligung verschiedener technologischer Bereiche. Ein erster Schritt zur weiterführenden Kooperation wurde während des INSIDE-Abschlusstreffens am 7. Mai 2024 durch die oberste Bergbehörde (StMWi) in

einer Beteiligung des innerhalb des vom StMWi finanzierten Vorhabens „Reservoirmanagementmodell Bayerisches Molassebecken“ (ReMol) vorgeschlagen.

Bei den mittel- bis langfristig zu erarbeitenden Maßnahmen ist zu bedenken, dass auftretende induzierte Seismizität von mehreren Einflussfaktoren wie der Untergrundstruktur und den vorausgegangenen Betriebsmaßnahmen abhängt. Die Korrelation induzierter Seismizität mit der Injektionsrate erfasst daher nur einen Teil dieser multiparametrischen Interaktion. Aus Betreibersicht ist jedoch derzeit die Injektionsrate, wie eingangs erwähnt, der einzige Parameter, mit dem man die Seismizität steuern bzw. kontrollieren kann.

## II.1.6. Kommunikation - Arbeitspaket 6 (Leitung: IEP)

### Entwicklung von Kommunikationskonzepten und einer Kommunikationsstrategie zur Erhöhung der Akzeptanz der Geothermie (AP6.1), Umsetzung der Kommunikationsstrategie (AP6.2)

Ziel des AP6.1 war es, gemeinsam mit den Partnern eine Kommunikationsstrategie zu erarbeiten und in AP6.2 anzuwenden. Mit den Verbundpartnern wurde vereinbart, dass das Ziel der INSIDE-Kommunikationsstrategie nicht die Erhöhung der Akzeptanz der Geothermie, sondern die Vermittlung der INSIDE-Forschungsergebnisse ist. Der Schwerpunkt lag dabei auf der transparenten Vermittlung von Kenntnissen zu Seismizität und Deformationen an die Öffentlichkeit und weitere Stakeholder.

Zusammen mit der Publishing Group wurde im Juli 2023 eine Kommunikationsstrategie erarbeitet (siehe Ergebnisbericht M6.1.1 aus Juli 2023; Thiemann, 2023) und in AP6.2 unter anderem über Filmbeiträge, Social Media und die INSIDE-Homepage ([Inside \(inside-geothermie.de\)](https://www.inside-geothermie.de)) umgesetzt.

### Bewertung der Kommunikationsstrategie (AP6.3)

Die Ergebnisse zur Teilaufgabe AP6.3 sind im Abschlussbericht des Partners IEP aufgeführt.

### Wissenstransfer, u. a. peer-reviewed Publikationen, wissenschaftliche Konferenzen, Workshops (AP6.4)

Eine Übersicht zu den INSIDE-Beiträgen, die während der Projektlaufzeit im Rahmen der Kommunikationsstrategie erfolgten, ist in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7: Übersicht zu den INSIDE Veröffentlichungen im Rahmen der Kommunikationsstrategie (Stand: 01.10.2024).

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.
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.
01.04.2022	Pressemittteilung zu INSIDE Projekt auf SWM Presseseite und SWM Medienverteiler <a href="https://www.swm.de/presse">https://www.swm.de/presse</a> : 01.04.2022, Verteiler der Pressemeldung auch über dpa bundesweit (~980 Abrufe).
April 2022	Socialmedia: Tweet zu INSIDE mit Link zum Video auf SWM Twitterkanal 1.4. (15.000 Follower), Post mit Video auf SWM Facebookkanal 03.04.2022, Thema im SWM Kundennewsletter April 2022 (26.000 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 IEP und SWM
24.10.2024	Veröffentlichung des INSIDE Abschlussbeitrags aus der Zeitschrift Geothermische Energie (Bergdolt, 2024) im Magazin-Bereich auf SWM Homepage: <a href="https://www.swm.de/unternehmen/magazin/energie/geothermie-forschung">https://www.swm.de/unternehmen/magazin/energie/geothermie-forschung</a> .



### **II.1.7. Projektmanagement - Arbeitspaket 7**

Mit den Verbundpartnern und weiteren Projektbeteiligten wurde sich regelmäßig über den Leistungsstand, Termine und Kosten ausgetauscht. Die Koordination der halbjährigen Verbundtreffen sowie gemeinsamer Arbeitstreffen erfolgte durch den Projektkoordinator KIT. Im Rahmen der Projektzusammenarbeiten zu Datenmanagement und Reservoirmanagement (AP2, AP5.5), zum Deformationsmonitoring (AP3.3) und zu den Crosswell-Messungen (AP1.3, AP3.2) wurden durch die SWM Arbeitstreffen unter Beteiligung der Verbundpartner und weiterer Expertinnen und Experten zur Koordination und Wissenstransfer organisiert.

Zur Außendarstellung des INSIDE-Projekts hat die SWM auf mehreren Kongressen und Tagungen berichtet. Mit dem PtJ wurde sich regelmäßig zum Arbeitsfortschritt ausgetauscht, unter anderem während der Verbundtreffen und darüber hinaus bei Bedarf.

## **II.2. Die wichtigsten Punkte des Zahlenmäßigen Nachweises**

Die Gesamtkosten konnten im Rahmen der beantragten Mittel eingehalten werden. Aufgrund des Wegfalls der Beschaffung von Hardware und Software, der Minderleistungen bei den DAS-Messungen (weniger Kapazitäten in der SWM IoT-Plattform Azure eingesetzt) und des Nicht-Einsatzes von automatischen Beprobungsaufnehmern für das Thermalwasser wurde das genehmigte Budget unterschritten.

Die Plankosten des Vorhabens lagen insgesamt bei 1.358.377,00 €. In der Nachkalkulation lagen die Gesamtkosten bei 995.721,46 €. Die Personalkosten betragen 249.017,90 € (Nachkalkulation vom 19.11.2024) und die sonstigen unmittelbaren Vorhabenskosten 746.703,56 € (Nachkalkulation vom 19.11.2024). In dem Vorhaben wurden keine Reisekosten aufgewendet.

Der zahlenmäßige Nachweis gemäß Nr. 19.3 NKBF 98 für die Zeit vom 01.09.2019 bis 31.05.2024 zum Zuwendungsbescheid des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz vom 27.08.2019 wurde am 19.11.2024 eingereicht.

## **II.3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten**

Durch das INSIDE-Gemeinschaftsprojekt konnte ein Beitrag zum verfeinerten mikroseismischen Monitoring und zur Überwachung von Hebungen und Senkungen mittels satellitengestützter Verfahren sowie zur Entwicklung eines Reservoirmanagementsystems geleistet werden. Eine große Rolle im Bereich Big-Data-Transfer, -Speicherung und -Prozessierung unter Einbindung eines breiten Umfelds spielte hierbei das in AP2 erarbeitete Datenmanagement.

Die im Rahmen von INSIDE erstellte Homepage diente während des Projekts und voraussichtlich bis 2027 der Außendarstellung der Themenfelder induzierte Seismizität und Bodendeformationen, unter anderem für die Öffentlichkeit und Politik.

## **II.4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplanes**

Das in INSIDE angepasste Geschwindigkeitsfeld bietet eine gute Grundlage zur Ereignislokation und sollte mit weiteren Wissensträgern wie dem GOF, der GAB und ERDWER GmbH kontinuierlich aktualisiert werden. Dies ist insbesondere im Hinblick auf die Reservoircharakterisierung und die Zuordnung potenziell aufgetretener Ereignisse zu den Bohrungen ein entscheidender Schritt. Nur wenn Ereignisse genau hinsichtlich der Lage und Tiefe geortet werden, ist eine Aussage mit Bezug zum Reservoir und anderen Vorgängen wie Spannungsumlagerungen im Umfeld von Störungen und Verwerfungen möglich. Gleichermaßen sind genaue Ortungsergebnisse für die Kalibrierung zukünftiger Modelle dringend erforderlich.

Glasfaserkabeleinbauten in Tiefengeothermiebohrungen sind derzeit teuer. Soll sich diese Technologie zum seismischen Monitoring etablieren, muss sich der Markt entsprechend entwickeln. Aus wissenschaftlicher Sicht sind für eine mittel- bis langfristige Nutzung der Technologie Verfahren zur Datenkomprimierung zu entwickeln, unter anderem durch Machine-Learning-Methoden.

Die Tracerversuche an der Schäftlarnstraße haben hervorragende Daten zu den Fließpfaden zwischen den Bohrungen geliefert. Diese Daten sind essenziell für ein thermisches Reservoirmanagement von Multi-Bohrungssystemen und sollten für zukünftige Multi-Bohrungsprojekte im Zuge des Reservoirmanagements standardmäßig eingesetzt werden.

Besonders hervorzuheben ist, dass der INSIDE-Prototyp RMS zum seismologischen Monitoring ein visionärer Vorschlag war. In der Erarbeitung des Konzepts war ursprünglich vorgesehen, weiteren Anwendern (Betreibern, Behörden, Öffentlichkeit) Zugänge und/oder Verlinkungen zu anderen

Systemlandschaften außerhalb von Microsoft Azure zu ermöglichen. Die Vision dahinter war, die gemeinsame Erarbeitung von Modellen und Auswerteverfahren zur Entwicklung von Maßnahmen gegen Seismizität und Bodendeformation zu fördern.

## **II.5. Bekanntgewordene Fortschritte während des Projektes auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Während der Laufzeit von INSIDE hat BRGM/INERIS im Jahr 2023 einen Handlungsleitfaden zum Umgang mit induzierter Seismizität beim Betrieb von Tiefengeothermieanlagen in Frankreich erstellt (siehe Beitrag vom 09.08.2023, abgerufen am 10.10.2024 in [Gute Praktiken induzierte Seismizität – Geothermie \(geothermie-schweiz.ch\)](#)). Dieser Leitfaden basiert auf Empfehlungen aus passiven seismischen Datenauswertungen und nicht auf THM-seismischen Prognosemodellierungen und umfasst Handlungsempfehlungen zu Anpassungen in der Anlagenfahrweise bei seismischen Risiken. Nach Kenntnis des INSIDE-Projektteams gibt es für das bayerische Molassebecken und hydrothermale Geothermieprojekte derzeit keine abgeleiteten Handlungsmaßnahmen zur Entgegenwirkung von Seismizität.

Im Rahmen des Projektes SEIGER (BMW - FKZ: 03EE4003) wurden unter anderem beim Abschlusstreffen am 20.01.2023 Empfehlungen zu seismischen Monitoringsystemen im urbanen Umfeld mit einer Präferenz zu Geophonen in Monitoringbohrungen und/oder Glasfaserkabeln gegeben. Des Weiteren wurde in SEIGER von der BGR ein Machine-Learning-Detektor zur Erfassung seismischer Ereignisse entwickelt und mit Daten aus Insheim getestet. Ziel der Untersuchungen war es, aus passiven seismischen Daten betriebliche Veränderungen zum Fließregime abzuleiten.

## II.6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

- Azzola, J., Gaucher, E., 2020. Seismisches Netzwerk INSIDE: Planungs- und Designphase, INSIDE Projekt. Karlsruhe Institut für Technologie. Bericht. <https://doi.org/10.5445/IR/1000177798>
- Azzola, J., Gaucher, E., 2021a. Seismisches Netzwerk INSIDE: Aufbau und Inbetriebnahme, INSIDE Projekt. Karlsruhe Institut für Technologie. Bericht. <https://doi.org/10.5445/IR/1000177799>
- Azzola, J., Gaucher, E., 2021b. Sparker survey at Schäftlarnstraße: Design, Field acquisition and Data processing, INSIDE Project. Karlsruhe Institute of Technology. Bericht. <https://doi.org/10.5445/IR/1000177800>
- Azzola, J., Gaucher, E., Bögelspacher, F., Baasch, R., Betzl, B. & Schulz, I., 2021c. 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., Frietsch, M., *et al.*, 2022a. 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>.
- Azzola, J., 2022b. 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, France.
- 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 Fransisco, 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., Thiemann, K. & Gaucher, E., 2023d. 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>
- Azzola, J., Gaucher, E., 2023e. Seismisches Netzwerk INSIDE: Aufbau und Inbetriebnahme des Mini-Arrays, INSIDE Projekt. Karlsruhe Institut für Technologie. Bericht. <https://doi.org/10.5445/IR/1000177794>
- Azzola, J. & Gaucher, E., 2024a. 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., Gaucher, E., 2024b. INSIDE seismic monitoring approaches: Capabilities versus costs, INSIDE Project. Karlsruhe Institute of Technology. Bericht. <https://doi.org/10.5445/IR/1000177812>
- Azzola, J., Gaucher, E., 2024c. P- and S-wave velocity models for the INSIDE study area, INSIDE Project. Karlsruhe Institute of Technology. Bericht. <https://doi.org/10.5445/IR/1000177806>
- Azzola, J., Gaucher, E., 2025. INSIDE seismic monitoring: Methodology and results, INSIDE Project. Karlsruhe Institute of Technology. Bericht. <https://doi.org/10.5445/IR/1000177804>
- 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.
- 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., 2022a. Vergleich von Moose/TIGER und Comsol Multiphysics anhand eines THM Modells des Standortes Pullach, INSIDE Projekt. Karlsruher Institut für Technologie. Bericht. <https://doi.org/10.5445/IR/1000177808>
- Egert, R., Gaucher, E., Savvatis, A., Goblirsch, P. & Kohl, T., 2022b. 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>.
- Egert, R., 2023. Numerische Vorhersage betriebsbedingter Reservoir- und Oberflächenveränderungen am Standort Pullach, INSIDE Projekt. Karlsruher Institut für Technologie. Bericht. <https://doi.org/10.5445/IR/1000177809>
- ERDWERK, 2020a. Aktenvermerk „Angebotsauswertungen zur Crosswell-Messung GTH SLS“ von ERDWERK GmbH vom 06.05.2020. Unveröffentlicht.
- Forbriger, T., Karamzadeh, N., Azzola, J., Gaucher, E., Widmer-Schmidrig, R. & Rietbrock, A., 2024. On DAS recorded strain amplitude. Submitted
- 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., Azzola, J., Thiemann, K., Schulz, I., Steiner, U., Meinecke, M. & Dirner, S., 2020a. 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., Steiner, U., et al., 2020b. 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., Kising, Y.-P., et al., 2021. Monitoring the long-term pump-tests at the Schäftlarnstraße geothermal field using Distributed Acoustic Sensing (DAS). Presented at the Deutscher Geothermie Kongress, Online.
- Gaucher, E., Hansinger, M., Goblirsch, P., Azzola, J. & Thiemann, K., 2022a. Towards a geothermal reservoir management system. Presented at the European Geothermal Congress 2022, Berlin, Germany. <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000152177>
- Gaucher, E., Egert, R., 2022b. Statisches Geomechanisches Modell: Schäftlarnstraße, Pullach, Baierbrunn, INSIDE Projekt. Karlsruher Institut für Technologie. Bericht. <https://doi.org/10.5445/IR/1000177807>
- 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., Baasch, R., Goblirsch, P., Thiemann, K., Azzola, J., Westerhaus, M., et al., 2024. Abschlusstreffen Forschungsprojekt INSIDE – Einblicke und Ergebnisse. Presented at the Abschlusstreffen Forschungsprojekt INSIDE, Pullach. <https://doi.org/10.5445/IR/1000177823>
- 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.
- 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. The Geological Society of London, Special Publications (548).
- 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, Vienna, Austria. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-8787>
- 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 Geothermieanlage Schäftlarnstraße und ausgewählter Literatur zur Riffentwicklung im Unteren Tithon (Raum Regensburg-Kelheim). Unveröffentlichte Präsentation Prof. Koch zum INSIDE Workshop vom 21.12.2021.
- 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. Unveröffentlichter Bericht.
- 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. Unveröffentlichter Bericht.
- 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". Unveröffentlichter Bericht.
- Schwarz, B. et al. 2020. Bericht Machbarkeitsanalyse zu den INSIDE Crosswell-Messungen am Geothermiestandort Schäftlarnstraße, München. GeoForschungsZentrum Potsdam. Unveröffentlichter Bericht vom 09.12.2020.
- Steiner, U., 2020. 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., 2022a. F&E-Projekt INSIDE: Seismizität und Bodendeformation – Spannungsumlagerungen im Untergrund durch Tiefengeothermie. Presented at the Geothermie in der Praxis Workshop, Technical University of Munich.
- Thiemann, K., Azzola, J., Hansinger, M., Gaucher, E. & Meinecke, M., 2022b. GFK - DAS Datenmanagement. Presented at the European Geothermal Congress 2022, Berlin, Germany. <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000176991>
- Thiemann, K., 2023. INSIDE Kommunikationsstrategie, INSIDE Projekt. SWM Services GmbH. Unveröffentlichter Bericht.

- Thiemann, K., Beichel, K. 2024a. Probenentnahmen und Untersuchungen an Kernen, INSIDE Projekt. SWM Services GmbH. Unveröffentlichter Bericht.
- Thiemann, K., 2024b. Bohrlochlogging-Kampagne Geothermieanlage Schäftlarnstraße, INSIDE Projekt. SWM Services GmbH. Unveröffentlichter Bericht.
- 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.
- Westerhaus, M., Ambrus, B., 2024a. Einrichtung eines geodätischen Beobachtungsnetzes zur Erfassung des Einwirkungsbereiches der Geothermiestandorte Schäftlarnstraße und Pullach, INSIDE Projekt. Karlsruher Institut für Technologie. Bericht. <https://doi.org/10.5445/IR/1000177881>
- Westerhaus, M., Ambrus, B., Tsantopolous, E., Even, M., Almassian, C., 2024b. Analyse von terrestrischen und satellitengestützten Deformationsmessungen zur Bestimmung von Oberflächenbewegungen in München, INSIDE Projekt. Karlsruher Institut für Technologie. Bericht. <https://doi.org/10.5445/IR/1000177880>
- Westerhaus, M., Kutterer, H., Ambrus, B., 2024c. Konzept für ein Integriertes Geodätisches Beobachtungssystem zur Überwachung des Erweiterten Einwirkungsbereiches im Raum München, INSIDE Projekt. Karlsruher Institut für Technologie. Bericht. <https://doi.org/10.5445/IR/1000177822>

### **III. Erfolgskontrollbericht**

[leere Seite]

#### **IV.      Berichtsblatt**



[leere Seite]