



INSIDE

Stadtwerke München GmbH
Innovative Energie Pullach
Karlsruher Institut für Technologie

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

EINRICHTUNG EINES GEODÄTISCHEN BEOBACHTUNGSNETZES

KIT Teilverfahren

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Förderkennzeichen

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

| | |
|-----------------------------|---|
| Titel: | Einrichtung eines geodätischen Beobachtungsnetzes zur Erfassung des Einwirkungsbereiches der Geothermiestandorte Schäflarnstraße und Pullach |
| Arbeitspaket: | AP1.4: Deformationsmessungen an der Oberfläche |
| Meilenstein: | Schlussbericht |
| Fälligkeitsdatum: | 30.11.2024 |
| Tatsächliches Datum: | 30.11.2024 |
| Partner: | Zuständig: KIT Beteiligt: SWM, IEP, DLR |
| Ansprechpartner: | Malte Westerhaus Hansjörg Kutterer Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Geodätisches Institut Teilinstitut Geodätische Erdsystemwissenschaft Leitung: Prof. Dr Hansjörg Kutterer Englerstr. 7 76131 Karlsruhe |
| Autoren: | Malte Westerhaus, Bence Ambrus |
| Version: | 1.0 |

| Version | Datum | Beschreibung der Ergänzungen, Änderungen, Überprüfungen |
|----------------|--------------|--|
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |

INHALTSVERZEICHNIS

| | |
|---|----|
| ZUSAMMENFASSUNG | 5 |
| 1 EINGEHENDE DARSTELLUNG DER ARBEITEN | 6 |
| 1.1 GNSS Referenzstationen | 6 |
| 1.2 Radarinterferometrie | 12 |
| 1.3 C-Band Transponder | 15 |
| 1.4 Nivellement | 16 |
| 2 LITERATURVERZEICHNIS | 19 |

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: Standorte der vier permanenten GNSS-Referenzstationen, die im Rahmen von INSIDE installiert wurden, sowie einer SAPOS® Referenz-station der Landesvermessung (rote Symbole). Schwarze Linien geben die auf die Oberfläche projizierten Bohrpfade (in Planung für Baierbrunn) an. Grüne Symbole zeigen vermarkte Nivellement-Messpunkte. | 7 |
| Abbildung 2: (a, b) Konstruktionszeichnung einer Halterung für GNSS-Antenne und Transponder, angepasst an das Betriebsgebäude Pullach TH3, (c) Konstruktionszeichnung für Fundament und thermisch isolierten Pfeiler zur Aufnahme einer GNSS-Antenne in bodennaher Aufstellung, (d) Schaltplan der Solarversorgung an der Station Baierbrunn. | 8 |
| Abbildung 4: GNSS-Station Maria-Einsiedel-Bad mit Antennenhalterung (a, c) und Schaltschrank mit Receiver, GSM-Router und USV-Anlage (b). An der Antennenhalterung ist eine Plattform für einen C-Band Transponder angebracht (c)..... | 9 |
| Abbildung 3: GNSS-Station Schäftlarnstraße mit Antennenhalterung (a). Die Station hat gute Rundumsicht, gelegentliche Störungen durch Baufahrzeuge sind jedoch nicht ausgeschlossen (b)..... | 9 |
| Abbildung 5: GNSS-Station Pullach. b) zeigt den C-Band Transponder. In der Halterung sind spezielle Bohrungen zur Aufnahme sphärischer Prismen vorgesehen, mit dem sich das Phasenzentrum des Transponder in Relation zur GNSS-Antenne bzw. einem globalen Referenzsystem einmessen lässt. | 10 |
| Abbildung 6: GNSS-Station Baierbrunn. Es handelt sich um die einzige Pfeilerstation, die im Messgebiet realisiert werden konnte. Über tiefreichende Betonfundamente ist eine optimale Ankopplung der Antenne an den Boden gewährleistet..... | 11 |
| Abbildung 7: Prinzipskizze einer Synthetic-Aperture-Radar (SAR) Aufnahme. Der Satellit sendet ein Mikrowellensignal aus und registriert das Echo von Objekten am Erdboden. Aus der Signallaufzeit kann der Abstand zwischen Satellitenantenne und Objekt in Richtung der Verbindungsleitung (Line of Sight, (LoS)) bestimmt werden. Die Kombination von Aufnahmen aus auf- und absteigenden Orbits ermöglicht die Berechnung von Bodenverschiebungen in Ostwest-horizontaler und vertikaler Richtung. Im aufsteigenden Orbit bewegt sich der Satellit von Süd nach Nord (in die Bildebene hinein), im absteigenden Orbit von Nord nach Süd. | 13 |
| Abbildung 8: (links) geographische Lage der Szenen der C-Band Satelliten 1a und 1b aus auf- und absteigenden Orbits, die das Untersuchungsbiet München überdecken und für INSIDE nutzbar sind; (rechts) Lage der für INSIDE nutzbaren Szenen der X-Band Satelliten TerraSAR-X und TanDEM-X. | 14 |
| Abbildung 9: Lage der in INSIDE untersuchten Nivellementslien..... | 17 |
| Abbildung 10: Gesamtüberblick über die in INSIDE verwendeten geodätischen Messverfahren. Das Ziel ist es, die Eignung jeder Methode für die Bestimmung des Einwirkungsbereiches von Geothermieanlagen zu evaluieren, und Empfehlungen für ein modernes integriertes Monitoringsystem zu erarbeiten..... | 18 |

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Mess-Epochen der Nivellements, die für die Auswertung in INSIDE zur Verfügung standen. 17

ZUSAMMENFASSUNG

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

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

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

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

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

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

1 EINGEHENDE DARSTELLUNG DER ARBEITEN

1.1 GNSS REFERENZSTATIONEN

GNSS steht für Global Navigation Satellite Systems, ein Oberbegriff für globale Positionierungs- und Navigationssysteme. Das bekannteste Positionierungssystem ist das amerikanische GPS, das aus 24 Satelliten besteht, die die Erde in einer Höhe von 20.200 km auf sechs gegeneinander geneigten Umlaufenbenden umkreisen. Bei gleichzeitigem Kontakt zu mindestens vier Satelliten kann die Position eines einfachen Empfängers am Erdboden bei Verwendung des von den Satelliten abgestrahlten Code-Signales mit einer Genauigkeit im mehrfachen Meterbereich bestimmt werden. Zur Verbesserung der Beobachtungssituation können auch das europäische System GALILEO und das russische System GLONASS in Kombination mit GPS verwendet werden.

In der geodätischen Variante werden nicht der aufgeprägte Code, sondern die in unterschiedlichen Frequenzen abgestrahlten Trägersignale verwendet. Damit können Positionskoordinaten und deren zeitliche Änderungen mit einer Genauigkeit von 0.5 – 5 cm gemessen werden. Technische und analytische Voraussetzung für diese Genauigkeitssteigerung sind der Einsatz spezieller Antennen zur Unterdrückung von Mehrfachreflexionen, die Aufzeichnung von zwei Frequenzen zur Reduzierung ionosphärischer Einflüsse sowie die Modellierung troposphärischer Einflüsse auf die Signallaufzeit. Ein verbreitetes Verfahren ist die Differenzbildung zwischen zwei nahegelegenen GNSS-Empfängern. Abhängig vom Abstand, der 10 - 20 km möglichst nicht überschreiten sollte, heben sich im differentiellen Modus (DPGNSS) troposphärische Störungen weitgehend auf, und die Basislinie zwischen beiden Empfängern kann mit höchster Genauigkeit beobachtet werden. Zu diesem Zweck können auch Korrekturdaten verwendet werden, die z.B. durch den Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung (**SAPPOS®**) oder dem *International GNSS Service* (IGS) bereitgestellt werden.

GNSS ist in der Lagegenauigkeit vergleichbar mit anderen geodätischen Verfahren. Bei der Messung von Höhen und Höhenänderungen ist die Genauigkeit gegenüber dem Präzisionsnivelllement im kleinräumigen Bereich um mehr als eine Größenordnung schlechter. Dieser Unterschied verringert sich allerdings mit zunehmender räumlicher Ausdehnung eines Bodenbewegungseignisses. Darüber hinaus besitzt GNSS einige Alleinstellungsmerkmale:

- GNSS misst alle drei Komponenten des Verschiebungsvektors am Erdboden (NS, EW, vertikal), während es sich bei Nivellement und Radarinterferometrie um 1-dimensionale Verfahren handelt. Da bei einem Bodenbewegungseignis mit einer Quelle im Untergrund grundsätzlich 3-dimensionale Verschiebungen an der Erdoberfläche auftreten, kann GNSS somit wichtige Zusatzinformationen liefern.
- Bodenverschiebungen können kontinuierlich mit einem Abtastintervall von bis zu einer Sekunde aufgezeichnet werden. Damit lassen sich auch kurzzeitige Ereignisse erfassen, etwa bei einem Schadensfall an einer Geothermieanlage. Die Wiederholraten der beiden anderen Verfahren liegen bei mehreren Tagen (Radarinterferometrie) und einem bis mehreren Jahren (Nivellement).
- GNSS gilt als absolutes Messverfahren, da es an einen globalen Referenzrahmen angekoppelt ist. Es ist daher nicht wie das Nivellement auf den direkten Anschluss an einen lokalen Referenzpunkt angewiesen. Auch im differentiellen Modus ist ein Anschluss an überregionale Referenzstationen, die von der Landesvermessung oder internationalen GNSS-Diensten betrieben werden, ohne zusätzlichen Aufwand möglich.

Mit diesen Eigenschaften ist GNSS eine wichtige Komponente in einem integrierten geodätischen Monitoringsystem. Im Rahmen von INSIDE wurden vier permanent arbeitende GNSS-Referenzstationen mit unterschiedlicher technischer Ausstattung errichtet. Das Ziel war es, die Leistungsfähigkeit eines kostengünstigen hybriden Netzwerkes, bestehend aus Ein- und Zweifrequenzempfängern für Monitoringaufgaben im Raum München zu bestimmen.

Im Gegensatz zu den anderen genannten Messverfahren müssen für den Einsatz von GNSS permanente Messeinrichtungen installiert werden. Die Empfangsanenne benötigt idealerweise Horizontfreiheit, um auch

Satelliten geringer Elevation erfassen zu können, und sollte möglichst direkt und solide an den Erdboden angekoppelt werden. Für den Betrieb des Empfängers sowie die Datenerfassung und –übertragung ist eine permanente Energieversorgung notwendig. In einem urbanen Gebiet wie München und Umgebung ist Horizontfreiheit im Allgemeinen nicht zu gewährleisten, und die benötigten Flächen sind entweder nicht vorhanden, oder die Installation öffentlich sichtbarer Messeinrichtung wird von den zuständigen Behörden nicht befürwortet. Daher waren bei der Einrichtung der INSIDE-Stationen verschiedene Kompromisse notwendig. Letztendlich konnten drei „Dachstationen“ und eine „Pfeilerstation“ realisiert werden. Während bei der Pfeilerstation durch bodennahe Aufstellung eine sehr gute Ankopplung an den Erdboden gewährleistet werden kann, werden Dachstationen an den Wänden oder im Dachbereich von Gebäuden installiert. Dies gilt als nicht optimale Lösung, da Eigenbewegungen der Gebäudestruktur zwischen Antenne und Erdboden nicht vollständig ausgeschlossen werden können. Allerdings wurde die Mehrzahl der GNSS-Referenzstation des **SAPOS®**-Netzwerkes sowie anderer kommerzieller GNSS-Korrekturdienste ebenfalls als Dachstation angelegt, sodass es sich um eine übliche Vorgehensweise handelt.

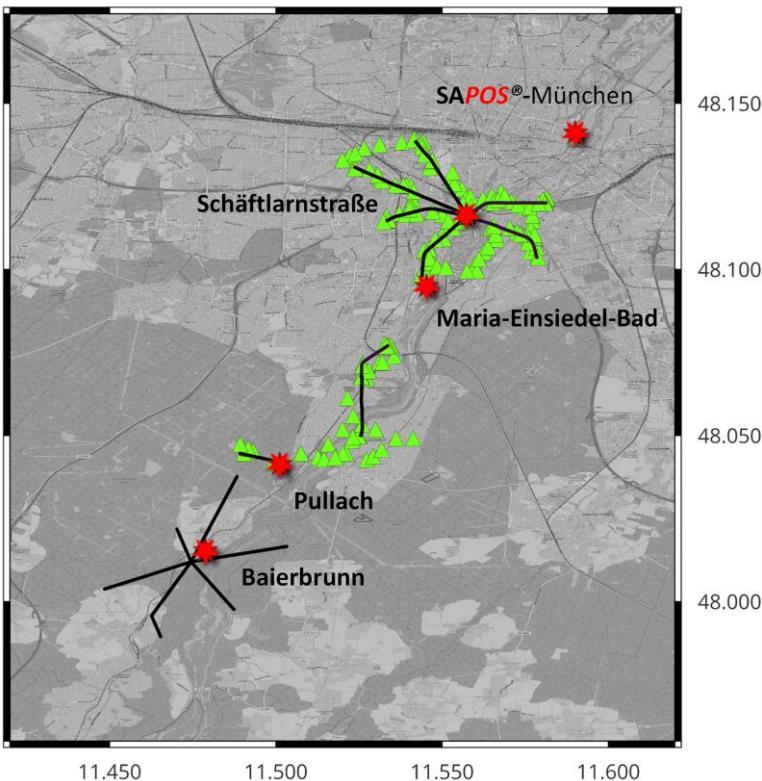


Abbildung 1: Standorte der vier permanenten GNSS-Referenzstationen, die im Rahmen von INSIDE installiert wurden, sowie einer **SAPOS®** Referenzstation der Landesvermessung (rote Symbole). Schwarze Linien geben die auf die Oberfläche projizierten Bohrpfade (in Planung für Baierbrunn) an. Grüne Symbole zeigen vermarkte Nivellement-Messpunkte.

abgeteuft wurden, bevor sie in mehreren 100 m Tiefe horizontal abgelenkt wurden, ist die GNSS-Lokation Schäftlarnstraße insbesondere zur schnellen Erfassung der Oberflächendeformationen durch potentielle Schäden an der Verrohrung im oberen Bereich der Bohrungen (z. B. Druckwasseraustritt in geringer Tiefe) geeignet (siehe Diskussion in AP 5.2). Die Station ist mit einer Ein-Frequenz-Option und einer kostengünstigen Antenne ausgerüstet. Die Messdaten werden einmal pro Tag über einen GSM-Router an das GIK übertragen. Die Spannungsversorgung erfolgt über Netzanschluss, eine USV-Anlage dient zur Überbrückung von Stromausfällen bis zu einigen Stunden (Abbildung 4 (b)).

Die endgültigen Standorte wurden im Verlaufe mehrerer Vorort-Besichtigungen zusammen mit den Projektpartnern ausgewählt (Abbildung 1). Anschließend wurden durch den Projektmitarbeiter am GIK detaillierte Konstruktionspläne für stabile Antennenhalterungen und die Pfeilerstation entworfen und durch Unternehmen vor Ort umgesetzt (Abbildung 2). Im Folgenden werden die vier Referenzstationen kurz beschrieben.

Schäftlarnstraße

Die Antenne befindet sich im Dachbereich eines soliden, mehrere Meter hohen Betriebsgebäudes auf dem Gelände des von den Stadtwerken München betriebenen Heizkraftwerks Süd (Abbildung 4). Die Rundumsicht ist sehr gut, sie wird lediglich im Südwesten durch hohe Gebäude und zwei Schloten behindert und kann temporär durch Bauarbeiten beeinflusst werden (Abbildung 4 (b)). Der Abstand zu den Bohrlochköpfen der sechs Geothermiebohrungen TH1 bis TH6 beträgt ca. 30 m. Da alle Bohrungen zunächst senkrecht

Maria-Einsiedel-Bad

Die Antenne befindet sich im Dachbereich eines soliden, ca. 3 Meter hohen Betriebsgebäudes auf dem Gelände des ebenfalls von den Stadtwerken München betriebenen Naturbades Maria-Einsiedel (Abbildung 3). Die technische Ausrüstung zur Erfassung der GNSS-Daten ist identisch zur Station Schäftlarnstraße. Zusätzlich wurde in unmittelbarer Nähe zur GNSS-Antenne auf derselben Halterung ein Transponder (auch als elektronischer Cornerreflektor (eCR) bezeichnet) zur Koordinierung radarinterferometrischer Datensätze installiert (Abbildung 3 (c)). Die Horizontfreiheit ist an diesem Standort durch Bäume im Osten und im Westen

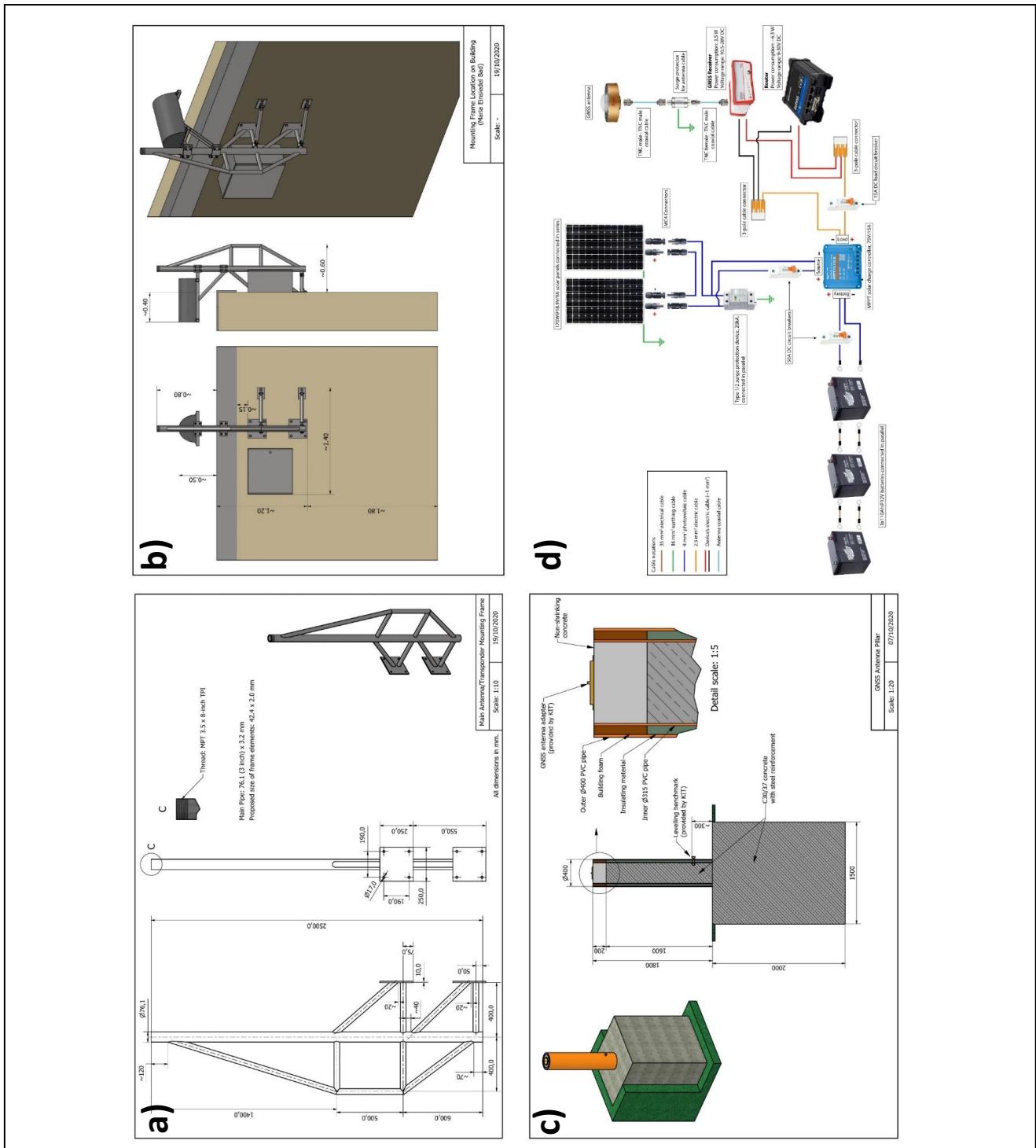


Abbildung 2: (a, b) Konstruktionszeichnung einer Halterung für GNSS-Antenne und Transponder, angepasst an das Betriebsgebäude Pullach TH3, (c) Konstruktionszeichnung für Fundament und thermisch isolierten Pfeiler zur Aufnahme einer GNSS-Antenne in bodennaher Aufstellung, (d) Schaltplan der Solarversorgung an der Station Baierbrunn.

der Antenne stark eingeschränkt. GNSS-Satelliten mit Elevationen unterhalb von 15° sind daher für die Datenauswertung nicht zu verwenden, was einen negativen Einfluss auf die Genauigkeit der Ergebnisse, insbesondere der Höhen, hat. Argumente für die Auswahl des Standortes waren neben logistischen Erwägungen die moderate Horizontalentfernung von ca. 360 m zum auf die Oberfläche projizierten Fußpunkt der zum Kraftwerk Schäftlarnstraße gehörenden Re-Injektionsbohrung TH6. Damit liegt die Station im zentralen Bereich eines durch hydraulische und/oder thermische Effekte im Bereich der Filterstrecke von TH6 ausgelösten Deformationseignisses an der Erdoberfläche (siehe Diskussion in AP 5.2).



Abbildung 4: GNSS-Station Schäftlarnstraße mit Antennenhalterung (a). Die Station hat gute Rundumsicht, gelegentliche Störungen durch Baufahrzeuge sind jedoch nicht ausgeschlossen (b). Bildquelle: Ambrus.



Abbildung 3: GNSS-Station Maria-Einsiedel-Bad mit Antennenhalterung (a, c) und Schaltschrank mit Receiver, GSM-Router und USV-Anlage (b). An der Antennenhalterung ist eine Plattform für einen C-Band Transponder angebracht (c). Bildquelle: Ambrus.

Pullach TH3

Im Gegensatz zum Standort Maria-Einsiedel-Bad ist am Standort Pullach TH3 die Horizontfreiheit zufriedenstellend gewährleistet. Weil zusätzlich ausreichend kurze Abstände zu den anderen GNSS-Stationen eingehalten werden können (Schäftlanstraße 9.3 km, Maria-Einsiedel_Bad 6.8 km, Baierbrunn 3.3 km) wurde ein vollausgerüsteter Zwei-Frequenz-Receiver sowie eine Choke-Ring-Antenne zur verbesserten Unterdrückung von Mehrwege-Effekten installiert. Die Station kann somit als lokale Referenz für differentielles GNSS mit den drei Ein-Frequenz-Stationen verwendet werden. Zusätzlich wurde ein weiterer Transponder auf der Antennenhalterung befestigt (Abbildung 5). Da der eingezäunte Platz um das Betriebsgebäude der TH3-Bohrung für den Einsatz schwerer Maschinen freigehalten werden musste, wurde auch an dieser Station eine Befestigung an der Gebäudewand gewählt. Der Abstand der GNSS-Antenne zur auf die Oberfläche projizierten Fußpunkt der Re-Injektionsbohrung Pullach TH3 beträgt ca. 930 m. Die Station liegt damit auf der Flanke eines durch hydraulische und/oder thermische Effekte im Bereich der Filterstrecke von TH3 ausgelösten Deformationseignisses an der Erdoberfläche. Gleichzeitig befindet sich die Station im Einflussbereich des Gesamteffektes der jeweils aus sechs Bohrungen bestehenden Geothermie-Standorte Schäftlarnstraße sowie des geplanten Standortes Baierbrunn (siehe AP 5.2). Abbildung 5 gibt einen Eindruck von den

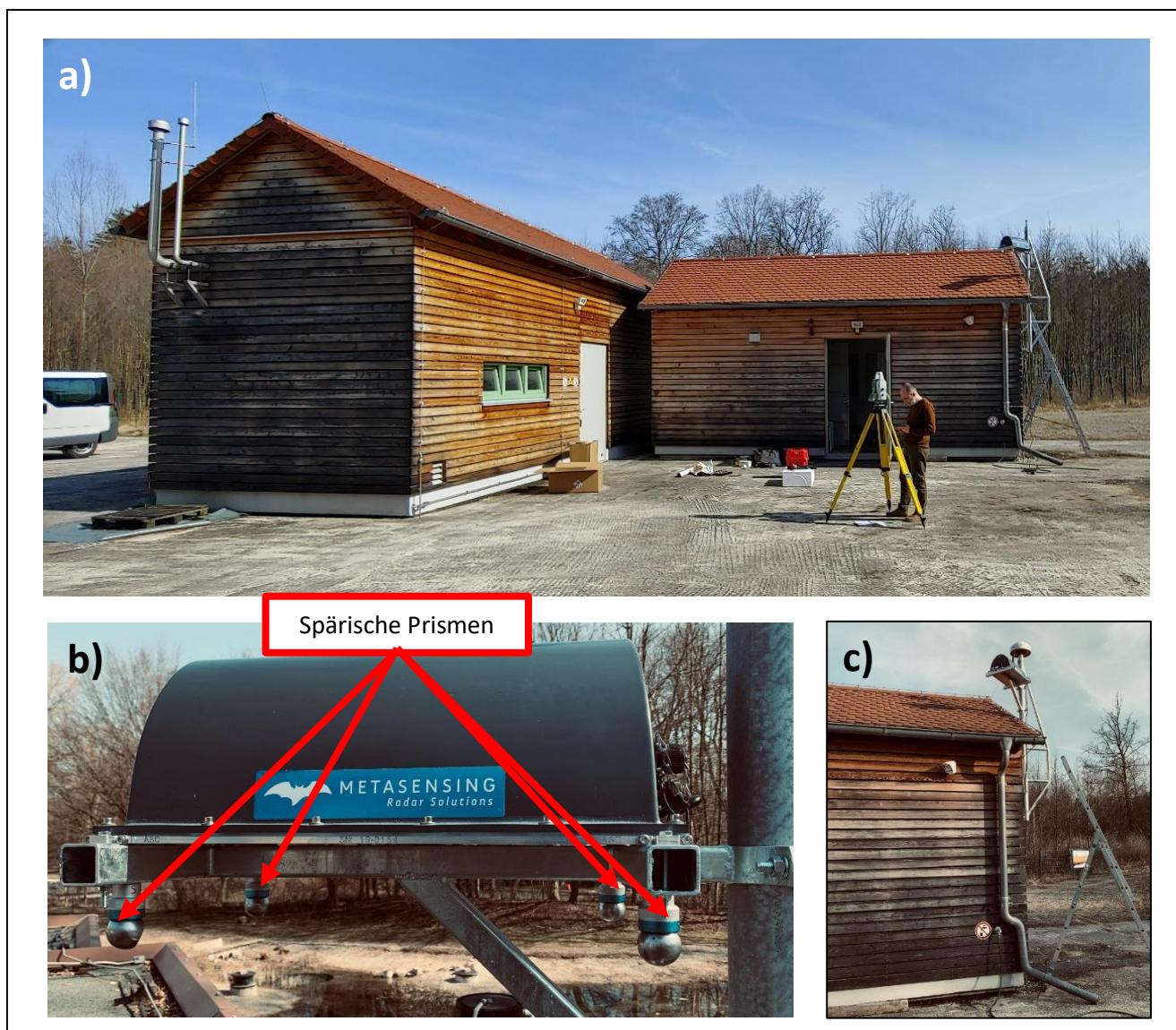


Abbildung 5: GNSS-Station Pullach. b) zeigt den C-Band Transponder. In der Halterung sind spezielle Bohrungen zur Aufnahme sphärischer Prismen vorgesehen, mit dem sich das Phasenzentrum des Transponder in Relation zur GNSS-Antenne bzw. einem globalen Referenzrahmen einmessen lässt. Bildquelle: (a) Westerhaus, (b, c) Ambrus.

Vermessungsarbeiten während der Installation der Messgeräte. In der Halterung für den Transponder sowie in der Aufnahmeplatte der GNSS-Antenne wurden Bohrungen zur Aufnahme spezieller Reflektoren vorgesehen, mit denen die Phasenzentren beider Geräte hochgenau bezüglich eines globalen Referenzrahmens eingemessen werden. Mit Hilfe des Transponders lässt sich die Georeferenzierung der verwendeten Radarszenen überprüfen. Er dient außerdem der Überführung von SAR-interferometrischen Datensätzen in einen GNSS-basierten Referenzrahmen sowie zur gegenseitigen Validierung von GNSS- und PSI-Zeitreihen.

Baierbrunn

Am Standort Baierbrunn konnte eine Pfeilerstation realisiert werden. Das notwendige Grundstück ($30 m^2$) wird von IEP gepachtet. Für den GNSS-Pfeiler wurde ein frostsicher gegründetes, eisenarmiertes Fundament betoniert (Abbildung 6). Der Pfeiler selbst besteht aus einer ins Fundament gelassenen PVC-Röhre mit einer Höhe von $1.60 m$ und einem Durchmesser von $31.5 cm$. Der Innenraum wird mit ebenfalls eisenarmiertem Beton aufgefüllt. Zur thermischen Isolierung wird eine zweite PVC-Röhre mit einem Durchmesser von $40 cm$ übergestülpt. Der Zwischenraum wird mit Isoliermaterial aufgefüllt. Ein zweites, ebenfalls frostsicheres Fundament ist für die Installation von zwei mechanischen Cornerreflektoren (oder Transpondern) vorgesehen. Insgesamt wurden ca. 7 Tonnen Beton verbaut; damit wurde eine hervorragende Ankopplung der Messgeräte an den Erdboden gewährleistet. Die messtechnische Ausrüstung der Station entspricht derjenigen der anderen Ein-Frequenz-Stationen. Zwei in Reihe geschaltete Solarpanel mit einer Leistung von $165 Wp$ ($24 V$) sowie drei parallel geschaltete Batterien mit einer Ladekapazität von insgesamt $300 Ah$ dienen der Energieversorgung.

Die GNSS-Messstation wurde im Hinblick auf die geplante Geothermieanlage Baierbrunn errichtet, die ursprünglich während der Laufzeit des Projektes INSIDE fertiggestellt werden sollte. Der Abstand zum vorgesehenen Bohrplatz beträgt ca. $500 m$. Nach den numerischen Modellierungen von Erdwerk liegt die



Abbildung 6: GNSS-Station Baierbrunn. Es handelt sich um die einzige Pfeilerstation, die im Messgebiet realisiert werden konnte. Über tiefreichende Betonfundamente ist eine optimale Ankopplung der Antenne an den Boden gewährleistet. Bildquelle: (a) Westerhaus, (b,c) Ambrus.

Station damit im Bereich des vermutlichen Maximums der langfristigen, durch Abkühlung im Untergrund hervorgerufenen Bodensenkungen (Gaucher et al, 2024). Da auf Grund der Verschiebung des Bohrbeginns die geodätische Zeitreihe bereits vor Aufnahme der Bautätigkeiten beginnt, bietet sich eine der seltenen Gelegenheiten, die zeitliche Variabilität des Hintergrundsignales ohne Einfluss der Anlage oder ihrer Errichtung zu erfassen.

1.2 RADARINTERFEROMETRIE

Bei der Radarinterferometrie handelt es sich um eine Auswertemethode, die auf regelmäßig erfassten SAR-Bildern beruht. SAR steht für Synthetic Aperture Radar, ein bildgebendes Radarverfahren, das durch Ausnutzung der Dopplerverschiebung eine hohe räumliche Auflösung im Meterbereich erzielt. Die operative Nutzung von SAR begann 1992 mit dem Start des ersten *European Remote Sensing Satellite* (ERS-1) der Europäischen Raumfahrtagentur ESA. Dank der vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten der Beobachtungstechnik im Bereich der Fernerkundung wurde in den letzten zwei Dekaden eine Reihe von SAR-Satellitenmissionen mit unterschiedlichen Aufgaben und Akquisitionsmodi entwickelt. Bei den derzeit aktiven SAR-Missionen liegt das Intervall für wiederholte Aufnahmen eines gewählten Untersuchungsgebietes zwischen 4 und 12 Tagen. Im Gegensatz zu optischen Satellitenmissionen senden SAR-Satelliten aktiv ein kohärentes Signal im Mikrowellenbereich aus und registrieren das vom Erdboden zurückgestreute Signal, das neben der Rückstreuintensität auch eine Bestimmung der Laufzeit und damit des Abstandes zwischen Radarantenne und Erdboden erlaubt (Abbildung 7).

Eine geeignete und vielfach verwendete Analysemethode zur Messung von Deformationen der Erdoberfläche ist die Persistent-Scatterer SAR-Interferometrie (PSI). Dabei wird die Phase des komplexen Radarsignals verwendet, um präzise Informationen über die zeitliche Änderung des Abstandes zwischen Bodenpunkt und Radarantenne zu erhalten. Durch Verwendung von großen Bildstapeln (mehrere 100 Szenen pro Messgebiet) können mittels Methoden der Signalverarbeitung und Statistik diejenigen Punkte am Boden identifiziert werden, deren Rückstreuverhalten zeitlich stabil ist. Diese sog. langzeitstabilen Rückstreuer (Persistent Scatterer oder PS-Punkte) werden für die Deformationsmessung verwendet. Die Alleinstellungsmerkmale des Verfahrens sind:

- Radarinterferometrische Verfahren liefern eine vergleichsweise sehr hohe räumliche Dichte von Messpunkten. Während sich die Anzahl verfügbarer Messpunkte bei klassischen geodätischen Messverfahren (Nivellement, Tachymetrie, GNSS-Messkampagnen) zwischen einigen 10 bis einigen 100 bewegt, kann die Anzahl nutzbarer PS-Punkte in urbanen Gebieten wie München bei einigen 10.000 bis über 1.000.000 liegen. Im Gegensatz zu den klassischen Verfahren können PS-Punkte allerdings nicht a-priori angelegt und vermarktet werden. Über Waldgebieten und landwirtschaftlich genutzten Flächen werden aufgrund zeitlicher Veränderungen des Rückstreuverhaltens im Allgemeinen keine PS-Punkte gefunden.
- Durch die Analyse von Bildstapeln, die über mehrere Jahre akquiriert werden, kann für jeden einzelnen PS-Punkt eine Zeitreihe mit einem Abtastintervall von wenigen Tagen abgeleitet und die Historie der (ggf. nicht-linearen) Bodenverschiebungen nachvollzogen werden. Das Messintervall terrestrischer geodätischer Verfahren wie dem Nivellement liegt i. A. zwischen einem bis mehreren Jahren.

Das Potential von PSI zum Erkennen und Messen von Bodenbewegungen ist in den letzten 20 Jahren durch eine Serie von Fallbeispielen nachgewiesen worden (Ferretti et al., 2001; Bamler et al., 2008; Crosetto et al., 2010; Even et al., 2020). Die Bandbreite reicht von der Beobachtung natürlicher Deformationsereignisse durch Erdbeben, Vulkanismus und Hangrutschungen bis hin zu kleinräumigen, anthropogenen Prozessen, die durch eine Bewirtschaftung des Untergrundes hervorgerufen werden (Rohstoffförderung, Geothermie, Grundwasserentnahme). Die Präzision von PSI-Zitreihen liegt je nach Produkt, Anzahl der verwendeten Satellitenszenen und Aufnahmemodus typischerweise zwischen 1 mm – 4 mm für Punktverschiebungen und 0.2 mm/Jahr – 0.6 mm/Jahr für Bewegungsraten.

Eine Besonderheit radarinterferometrischer Verfahren ist die Datenaufnahme in Schrägentfernung, der sog. *Line of sight* (LoS). Gemessen werden eindimensionale Projektionen der im Allgemeinen dreidimensionalen

Bodenverschiebungen in LoS. Durch Kombination von Aufnahmen aus Überflügen in Nord-Süd-Richtung (absteigender Satellitenorbit) und Süd-Nord-Richtung (aufsteigender Satellitenorbit) können die LoS-Messungen in Ost-West-horizontale und vertikale Verschiebungskomponenten aufgespalten werden (Abbildung 7). Die Messung von Bodenverschiebungen in Flugrichtung des Satelliten ist aufgrund des speziellen Aufnahmeverfahrens nicht möglich. Zur Kombination werden die unregelmäßig verteilten PS-Punkte aus beiden Orbits auf regelmäßige Gitter mit Punktabständen von 25 m, 50 m oder 100 m (C-Band, kleinere Gitterabstände bei X-Band möglich) interpoliert. An den Gitterpunkten werden die gesuchten Verschiebungskomponenten aus den LoS-Beobachtungen und der Kenntnis der Aufnahmegeometrie berechnet, wobei angenommen wird, dass die Nord-Süd-Komponente der Verschiebung gleich Null ist. Es ist an dieser Stelle möglich, weitere geodätische Datensätze (z. B. Nivellement, GNSS) zu integrieren, um die Lösung zu stabilisieren und alle drei Komponenten des Verschiebungsvektors zu bestimmen (Fuhrmann et al., 2015).

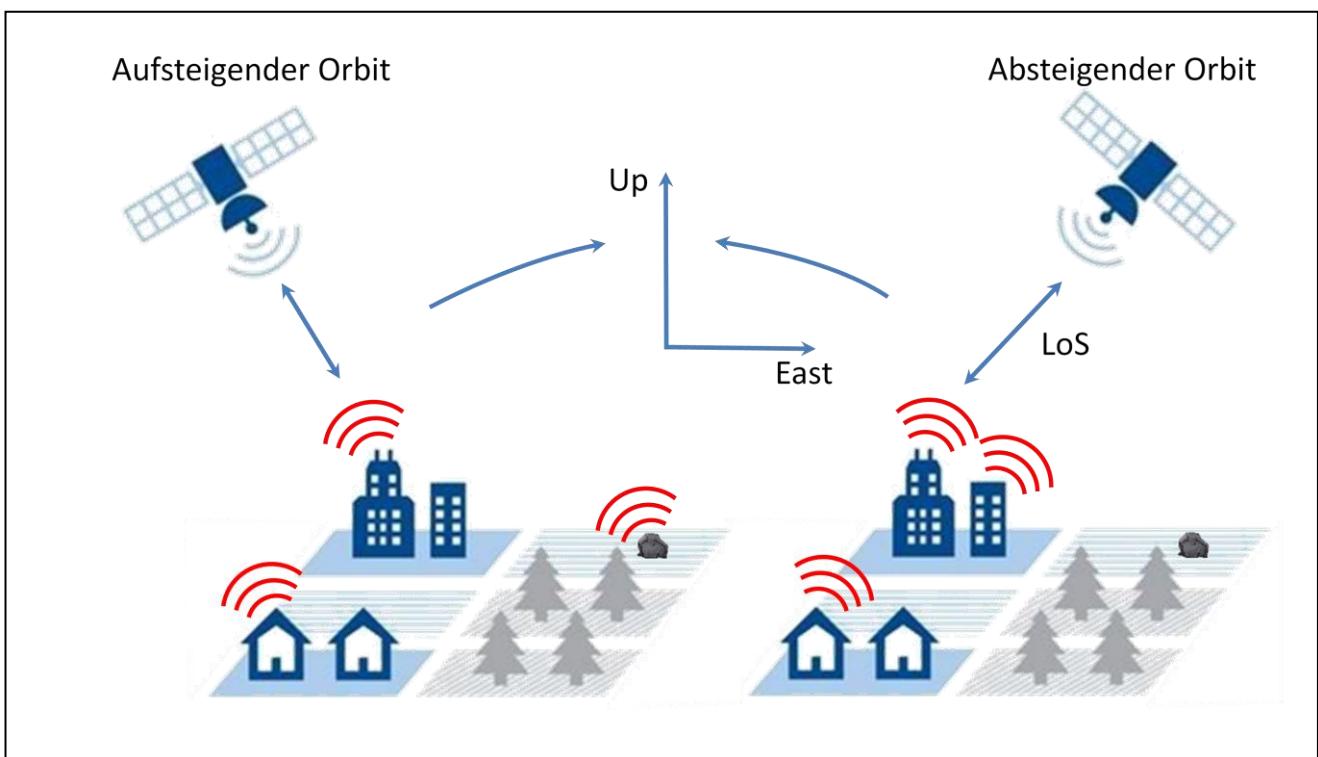


Abbildung 7: Prinzipskizze einer Synthetic-Aperture-Radar (SAR) Aufnahme. Der Satellit sendet ein Mikrowellensignal aus und registriert das Echo von Objekten am Erdboden. Aus der Signallaufzeit kann der Abstand zwischen Satellitenantenne und Objekt in Richtung der Verbindungsgeraden (Line of Sight, LoS) bestimmt werden. Die Kombination von Aufnahmen aus auf- und absteigenden Orbits ermöglicht die Berechnung von Bodenverschiebungen in Ostwesthorizontaler und vertikaler Richtung. Im aufsteigenden Orbit bewegt sich der Satellit von Süd nach Nord (in die Bildebene hinein), im absteigenden Orbit von Nord nach Süd.

Für INSIDE wurden Datenstapel der Satellitenmissionen Sentinel-1 und TerraSAR-X mit unterschiedlichen Bildeigenschaften verwendet. Sentinel-1 ist die aktuelle SAR-Mission der Europäischen Raumfahrtagentur ESA. Sie besteht aus einem Satellitenpaar (S-1a, S-1b), das im gleichen Orbit um 180° versetzt die Erde umrundet. Die C-Band Satelliten liefern im regulär über Land verwendeten *Interferometric Wide Swath (IW)* Aufnahmemodus eine Bildauflösung von 5 m x 20 m. Die Wiederholrate der Akquisitionen eines einzelnen Satelliten beträgt 12 Tage; bei Verwendung von Aufnahmen beider Satelliten reduziert sie sich auf 6 Tage. S-1a wurde am 3. April 2014 gestartet und arbeitet seitdem unterbrechungsfrei. S-1b folgte am 25. April 2016 und wurde, nachdem im Dezember 2021 Probleme mit der Stromversorgung auftraten, am 3. August 2022 offiziell aufgegeben. Für die Interferometrie sind kombinierte Datenstapel beider Satelliten verwendbar, mit einer nach Verfügbarkeit variablen Abtastrate von 6 oder 12 Tagen. Abbildung 8 (links) zeigt die Lage der für INSIDE nutzbaren Sentinel-1-Szenen aus auf- und absteigenden Orbits.

Sentinel-1 ist Teil der Flotte der Sentinel-Satelliten, die den Kern der Geodaten-Infrastruktur des europäischen Erdbeobachtungsprogramms Copernicus bilden. Die auf Nachhaltigkeit und langfristige Nutzung angelegten Satellitenmissionen beinhalten die Bereitstellung baugleicher Nachfolgesatelliten zur Aufrechterhaltung der Beobachtungskonstellation. Der Start von Sentinel-1c ist auf Dezember 2024 terminiert; er soll die Aufgaben von S-1b übernehmen. S-1d ist im Bau und für einen Start im vierten Quartal 2025 vorgesehen. Entsprechend der Philosophie des Copernicus-Programms handelt es sich bei Sentinel-1 um eine Erdbeobachtungsmission: Aufnahmen der Erdoberfläche werden nach einem festgelegten Programm mit hoher Regelmäßigkeit durchgeführt und archiviert. Die Satellitenszenen sind für öffentliche Institutionen sowie Privatunternehmen oder -personen kostenfrei verfügbar. Die X-Band Mission TerraSAR-X/Tandem-X dagegen wird in privat-öffentlicher Partnerschaft zwischen dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) und Airbus Defence and Space betrieben. Aufnahmen werden (mit Ausnahmen) nur erhoben, wenn sie von wissenschaftlichen oder privatwirtschaftlichen Institutionen kostenpflichtig beauftragt werden. Vorhandene Aufnahmen werden archiviert und stehen, ebenfalls gegen Bezahlung, auch anderen Nutzern zur Verfügung. Für wissenschaftliche Projekte gelten reduzierte Gebühren, die bei einer Förderung durch den Bund entfallen.

TerraSAR-X und Tandem-X sind baugleiche Satelliten, die im Gegensatz zu Sentinel-1 in enger Konfiguration fliegen, was eine außerordentlich hohe Vielseitigkeit und Flexibilität der Mission fördert. Die Startdaten der Satelliten sind 15. Juni 2007 (TerraSAR-X) und 21. Juni 2010; sie arbeiten seitdem mit außerordentlicher Stabilität und Zuverlässigkeit. In dem für das Monitoring größerer Gebieten geeigneten *stripmap*-Beobachtungsmodus erreicht TerraSAR-X durch Kombination einer kurzen Signalwellenlänge und großer Bandbreite eine im Vergleich zu Sentinel-1 deutlich höhere Auflösung von 3 m x 3 m. Dadurch können kleinere Strukturen untersucht werden, und die Anzahl der für Deformationsmessungen verfügbaren PS-Punkte steigt im Vergleich zu Sentinel-1 beträchtlich.

Bei Antragstellung lag seitens der DLR bereits eine fertige PSI-Auswertung der TerraSAR-X Daten über München aus dem aufsteigenden Orbit (Track 55) für den Zeitraum Nov. 2015 bis Mai 2018 vor. Um doppelte Arbeit zu vermeiden, und um die Expertise der in Oberpfaffenhofen ansässigen DLR für das INSIDE-Projekt verfügbar zu machen, wurden die Analyseergebnisse per Unterauftrag eingekauft. Gleichzeitig wurde eine PSI-Analyse der Daten des Zeitraums Mai 2018 bis Jahresende 2021 sowie eine Reprozessierung bzw. Homogenisierung des gesamten Datensatzes bei der DLR beauftragt. Abbildung 8 (rechts) zeigt die Lage der für den Raum München zur Verfügung stehenden X-Band Datenstapel. Ansprechpartner bei der DLR ist Dr. Christian Minet.

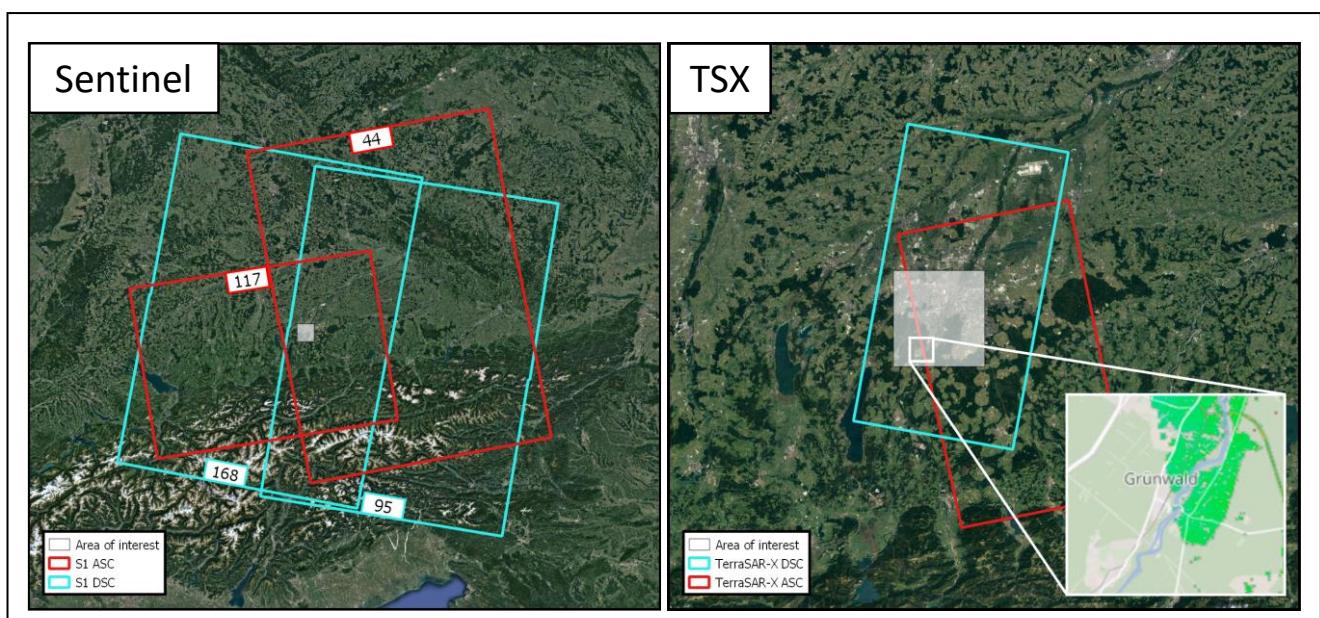


Abbildung 8: (links) geographische Lage der Szenen der C-Band Satelliten 1a und 1b aus auf- und absteigenden Orbits, die das Untersuchungsbiet München überdecken und für INSIDE nutzbar sind; (rechts) Lage der für INSIDE nutzbaren Szenen der X-Band Satelliten TerraSAR-X und TanDEM-X.

Bodenbewegungsdienste

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

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

Während sich der BBD auf Deutschland beschränkt, bietet der EGMS Bodenbewegungskarten für alle beteiligten europäischen Länder an. Beide Dienste verwenden jedoch für den Bereich Deutschland dieselbe Datenbasis. Geringe Unterschiede in den über WebGIS angebotenen Produkten sind auf die Endaufbereitung der Daten zurückzuführen, z. B. die Auswahl von GNSS-Stationen zur Kalibrierung, die Größe des Interpolationsgitters sowie unterschiedliche Genauigkeitsanforderungen als Auswahlkriterium für PS-Punkte. Beide Bewegungsdienste bieten in ihrem Katalog sowohl die LoS-Ergebnisse als primäre Ausgangsprodukte der PSI-Prozessierung sowie die bewegungszerlegten „Ortho-Produkte“ in Ost-West-horizontaler und vertikaler Richtung an. Die Produkte bestehen aus Karten der mittleren Geschwindigkeiten an den PS-Punkten. Für jeden einzelnen Punkt ist zudem die Zeitreihe der Bodenverschiebungen kostenfrei im Download zu erhalten. Derzeit werden die Produkte im jährlichen Turnus aufdatiert, für die Zukunft sind schnellere Erneuerungszyklen nicht ausgeschlossen. Die Genauigkeiten der Produkte der Bodenbewegungsdienste wurden von Even et al. (2024) mit guten Ergebnissen evaluiert.

Beide Dienste werden sich in Zukunft weiterentwickeln. Das betrifft zum einen die grundlegenden Analysemethoden, wo eine Verdichtung der nutzbaren Punkte durch die kombinierte Analyse von punktförmigen (*Persistent Scatterer*, PS), flächenhaften (*Distributed Scatterer*, DS) und nur phasenweise stabilen (*Partial Scatterer*, TPS) Rückstreuer angedacht wird, zum anderen die Bereitstellung von Webtools zur einfachen und flexiblen Darstellung und Weiterverarbeitung der Produkte durch den Nutzer. Die langfristige Bereitstellung der Produkte ist über das Copernicusprogramm sichergestellt. Ob beide Dienste in Zukunft weiterhin unabhängig voneinander betrieben werden, ist zum jetzigen Zeitpunkt nicht sicher. Es lohnt sich daher, beide Angebote im Auge zu behalten.

1.3 C-BAND TRANSPONDER

Radarreflektoren werden im Kontext von SAR-Bildaufnahmen und SAR-Interferometrie verwendet, um punktuell definierte Rückstrebungen zu gewährleisten. Sie haben folgende Hauptaufgaben:

- Geometrische und radiometrische Kalibrierung von SAR-Sensoren
- Validierung gegen andere geodätische Techniken, gegebenenfalls Überführung der InSAR-Ergebnisse in globale Referenzrahmen

- Erzeugen von PS-Punkten an gewünschten Positionen und Objekten zum Zweck des Monitorings oder zur Netzwerkverdichtung

Man unterscheidet zwischen passiven und aktiven Reflektoren. Die für passive Reflektoren am häufigsten gewählte Bauweise ist es, drei senkrecht zueinanderstehende Metallflächen zu kombinieren; sie werden als Cornerreflektoren (CR) bezeichnet. Nach individueller Ausrichtung auf den Orbit des verwendeten SAR-Satelliten wird das Signal in die gleiche Richtung zurückreflektiert, aus der es eingefallen ist. Das Phasenzentrum des CR ist geodätisch exakt einmessbar, die Signalintensität kann über Größe und Bauweise des CR berechnet werden. Transponder, auch elektronische Corner-Reflektoren (ECR) genannt, sind Geräte, die das einfallende Radarsignal elektronisch duplizieren und mit sehr kurzer Zeitverzögerung verstärkt zurücksenden. Sie können auf die gleiche Weise wie CR eingesetzt werden, wobei ein einzelner Transponder in der Regel den aufsteigenden und absteigenden Orbit parallel nutzen kann. Sie sind kleiner und leichter als CR, was insbesondere in nicht gut zugänglichem Gelände ein Vorteil ist, und gelten als weniger anfällig für Windböen, Niederschlag oder Ansammlung von Schmutz. Nachteile sind die Notwendigkeit einer Stromversorgung (ggf. solar) und einer Betriebserlaubnis.

Um Transponder betreiben zu dürfen, wird eine Frequenzzuteilung der Bundesnetzagentur benötigt. Zu unterscheiden sind eine dauerhafte und eine versuchsweise Nutzung. Für die in INSIDE eingesetzten Transponder wurde gebunden an die Aufstellungsorte für eine Frequenz von 5405 MHz eine Erlaubnis für Versuchsfunkanwendungen im Zeitraum 15.07.2021 bis 30.11.2025 erteilt. Im Antrag müssen verschiedene technische Angaben gemacht werden (Position, Zeiten der Aktivität, Sendeleistung und -frequenz, Bandbreite, Richtung der Signalausbreitung).

Als käuflich erwerbbare Geräte stehen im Kontext von Monitoringanwendungen ausschließlich C-Band-Transponder der Firma Metasensing (MetaSensing BV, Huygensstraat 44, 2201DK Noordwijk, The Netherlands, Tel: +31 71 751 5960, Email: info@metasensing.com) zur Verfügung. Sie werden seit ca. 10 Jahren individuell für den Besteller angefertigt. Metasensing entwickelt seine Transponder kontinuierlich weiter, um Problemen entgegenzuwirken, die während des Betriebs von seinen Kunden beobachtet werden. Dazu gehören Ausfälle wegen Eindringen von Wasser, temperaturabhängiger Batterieleistung oder Überhitzung. Es besteht daher weiterhin Bedarf, die Geräte im Einsatz zu testen. Ziele im INSIDE-Projekt sind Aussagen zur Langzeitstabilität der Transponder und zur Frage, ob Transponder bei der Zusammenführung von Ergebnissen aus verschiedenen Messverfahren in einem angewandten Monitoringeinsatz einen signifikanten Beitrag leisten können. Die anfallenden Kosten für die Frequenzzuteilung und den Sendebetrieb wurden von der Abteilung Sicherheit und Umwelt des KIT übernommen.

1.4 NIVELLEMENT

Das Standardverfahren zur Bestimmung des (erweiterten) Einwirkungsbereiches ist das Präzisionsnivelllement. Angewendet wird im Allgemeinen das geometrische Nivellement, bei dem der Höhenunterschied zu einem waagerecht aufgestellten Nivelliergerät an Nivellierlatten abgelesen wird, die senkrecht auf die Messpunkte gestellt werden. Die Alleinstellungsmerkmale des Nivellements sind:

- Es besitzt von allen geodätischen Verfahren die höchste Genauigkeit bei der Bestimmung von Höhen und Höhenunterschieden. Auf innerstädtischen, d.h. relativ kurzen Messlinien kann eine Präzision (Standardabweichung) im Submillimeterbereich erreicht werden;
- Die Messwerte werden ohne aufwändige Prozessierungsschritte in ein standardisiertes Ausgleichungsmodell eingeführt;
- Die Messpunkte werden auf der Basis geodätischer, bergmännischer und vermessungstechnischer Expertise angelegt und fest vermarkt. Die Lage der Punkte kann mit cm-Genauigkeit bzgl. eines geeigneten Referenzsystems eingemessen werden.

Nivellitische Messungen werden bereits seit über 170 Jahren mit vergleichbar guter Genauigkeit durchgeführt. Aufgrund der langenjährigen Erfahrung mit der Messmethode, der einfachen Anwendung und Auswertung, der genau bekannten Messpunktlage sowie der außerordentlich hohen Genauigkeit gilt das Nivellement als das einzige anerkannte Verfahren zur Beweissicherung bei Verdacht auf Schäden an Gebäuden oder Infrastruktur

durch Bodenbewegungen. Wie in AP 5.2 diskutiert wird, hat das Nivellement jedoch auch einige Nachteile, insbesondere bei der Erfassung großflächiger Deformationsergebnisse, deren räumliche Ausprägung nicht a priori bekannt ist.

Im Rahmen von INSIDE wurden Wiederholungs-Nivellements von allen Standorten der Projektpartner SWM und IEP untersucht und mit den Ergebnissen der anderen Verfahren verglichen. Über Kontakte der Geothermiebetreiber untereinander wurden auch Daten der Anlage Ismaning für das Projekt zur Verfügung gestellt. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Messepochen an allen Standorte. Die 3. Messung auf der Linie Schäftlarnstraße stand erst kurz vor Projektende zur Verfügung sodass sie nicht mehr vollständig in die Untersuchungen integriert werden konnte. Abbildung 1 zeigt die Lage der lokalen Nivellementslinien im Raum München. Abbildung 10 gibt einen kondensierten Überblick über alle im geodätischen Teilprojekt angewendeten und Verfahren. Das Ziel der Untersuchungen waren Aussagen zur Eignung aller drei hier vorgestellten Verfahren im Hinblick auf die Erfassung des Einwirkungsbereiches von Geothermieranlagen sowie Empfehlungen für ein verbessertes und kostengünstiges integriertes Messkonzept.

Tabelle 1: Mess-Epochen der Nivellements, die für die Auswertung in INSIDE zur Verfügung standen.

| Nivellement | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | 2024 |
|------------------|--------|------|--------|--------|--------|------------------|---------------------|------|
| Freiham | 08.11. | | | 18.06. | | 13.04. | | |
| Riem | | | 04.09. | 05.06. | | 11.04. | | |
| Izmaning | | | 21.03. | 17.06. | 20.04. | 12.04. (tw) | | |
| Kirchstockach | | | 10.09. | 28.09. | | | | |
| Pullach | | | 12.09. | 29.09. | | | | |
| Schäftlarnstraße | | | | | 29.03. | 09.03. | 18.03 | |
| | | | | | | Höhendifferenzen | Höhenänderungsraten | |

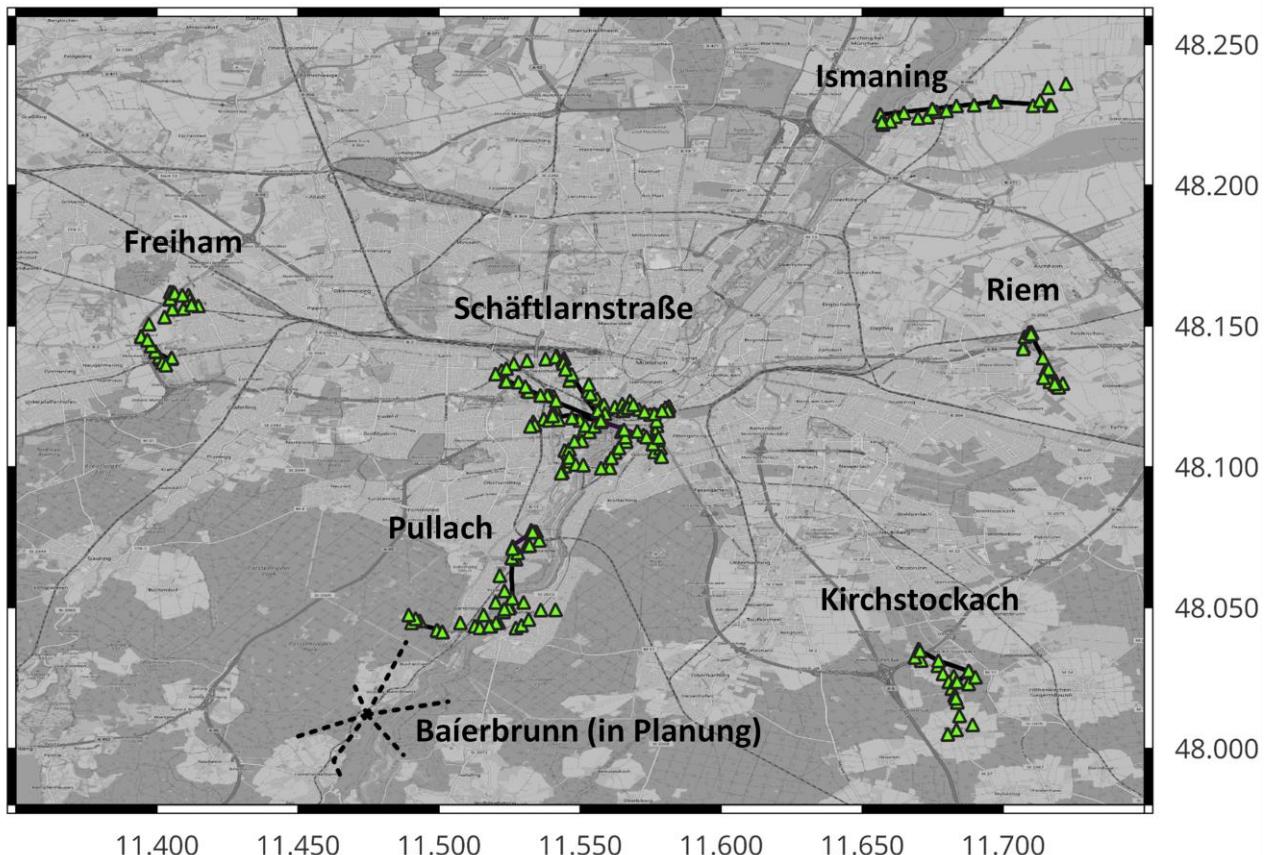


Abbildung 9: Lage der in INSIDE untersuchten Nivellementslien.

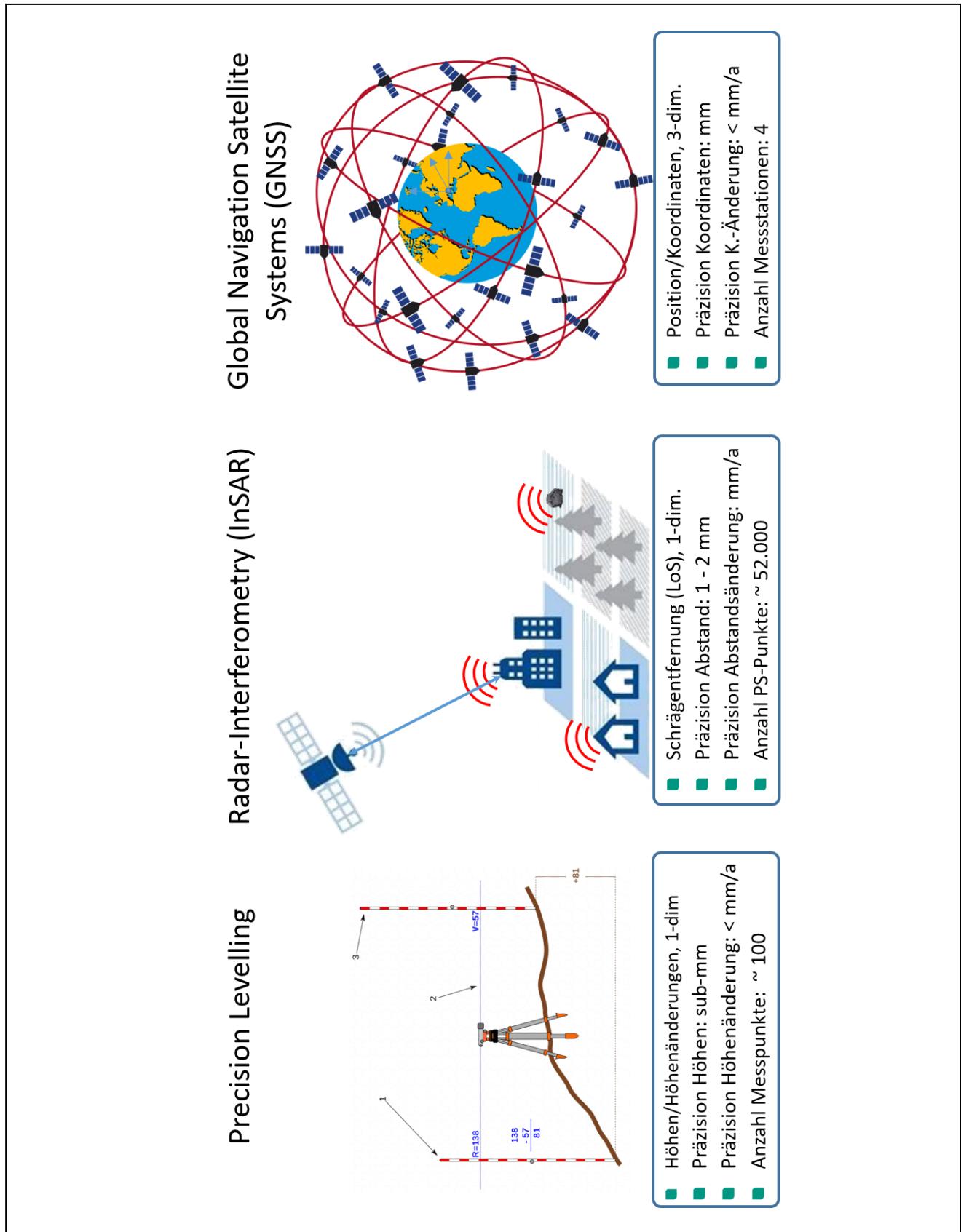


Abbildung 10: Gesamtüberblick über die in INSIDE verwendeten geodätischen Messverfahren. Das Ziel ist es, die Eignung jeder Methode für die Bestimmung des Einwirkungsbereiches von Geothermieanlagen zu evaluieren, und Empfehlungen für ein modernes integriertes Monitoringsystem zu erarbeiten.

2 LITERATURVERZEICHNIS

Bamler, R., Adam, N., Hinz, S., Eineder, M. (2008): SAR-Interferometrie für geodätische Anwendungen, AVN 7/2008, 243-252, 2008.

Crosetto, M., Monserrat, O., Iglesias, R., Crippa, B. (2010): Persistent Scatterer Interferometry: Potential, Limits and Initial C-and X-band Comparison. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. Vol. 76, N. 9, pp. 1061-1069, 2010.

Even, M.; Westerhaus, M.; Simon, V. (2020): Complex Surface Displacements above the Storage Cavern Field at Epe, NW-Germany, Observed by Multi-Temporal SAR-Interferometry. *Remote sensing*, 12 (20), Art.-Nr. 3348. doi:10.3390/rs12203348.

Even, M. Westerhaus, M., Kutterer, H. (2024): German and European Ground Motion Service – a Comparison, PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science, Volume 92, pages 253–270.

Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F. (2001): Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 39(1):8-20.

Fuhrmann, T., Caro Cuenca, M., Knöpfler, A., van Leijen, F. J., Mayer, M., Westerhaus, M., Hanssen, R. F., Heck, B., (2015): Estimation of small surface displacements in the Upper Rhine Graben area from a combined analysis of PS-InSAR, levelling and GNSS data. *Geophys. J. Int.*, 203(1):614–631.

Gaucher, E., Savvatis, A., Habibi, R., Egert, R. et al., Geothermal Reservoir Numerical Modelling, Forschungsprojekt INSIDE – Einblicke und Ergebnisse, Foliensatz zum Abschlusstreffen, S. 85 – 113, Pullach, 07. Mai 2024, www.inside-geothermie.de/publikationen, abgerufen 17.07.2024.