



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

ANALYSE VON TERRESTRISCHEN UND SATELLITENGESTÜTZTEN DEFORMATIONSMESSUNGEN

KIT Teilvorhaben

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: | Analyse von terrestrischen und satellitengestützten Deformationsmessungen zur Bestimmung von Oberflächenbewegungen in München |
| Arbeitspaket: | AP 3.3: Prozessieren von 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, Efthymios Tsantopoulos, Markus Even, Chavosh Almassian |
| Version: | 1.0 |

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

INHALTSVERZEICHNIS

| | |
|--|----|
| ZUSAMMENFASSUNG | 6 |
| 1 EINGEHENDE DARSTELLUNG DER ARBEITEN | 8 |
| 1.1 Änderungen ursprünglich geplanter Arbeiten | 8 |
| 1.2 Nivellement..... | 8 |
| 1.3 GNSS Referenzstationen | 10 |
| 1.4 SAR-Interferometrie und Vergleich C-Band und X-Band..... | 16 |
| 1.5 Ergebnisse des Transponderexperiments | 26 |
| 1.6 BBD und EGMS | 29 |
| 1.7 Bodenbewegungen im Großraum München | 34 |
| 2 LITERATURVERZEICHNIS..... | 45 |

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

| | |
|---|----|
| Abbildung 1: Ergebnisse der wiederholten Nivellements im obertägigen Bereich der durch Stadtwerke München, Innovative Energie Pullach und Wärmeversorgung Ismaning GmbH & Co. KG betriebenen Geothermiebohrungen. Für die Standorte Freiham, Riem und Ismaning werden Hebungs-/Senkungsraten in <i>mm/Jahr</i> dargestellt, an den anderen Standorten Höhendifferenzen in der Einheit <i>mm</i> . Die Farbskala gilt für beide Datentypen. Nur im Zentrum von München werden signifikante Höhenänderungen in der Fläche beobachtet, an anderen Standorten treten vereinzelte Punktbewegungen auf. Für das Netz Schäftlarnstraße wird die Höhendifferenz März 2022 – März 2021 dargestellt. | 9 |
| Abbildung 2: Komponenten des Verschiebungsvektors in Ost-, Nord- und Vertikalrichtung (von oben) an der Dachstationen Maria-Einsiedel-Bad (links) und der Pfeilerstation Baierbrunn (rechts). Alle Komponenten sind relativ zur IGS-Station Oberpfaffenhofen, die als Referenz verwendet wurde. | 13 |
| Abbildung 3: Komponenten des Verschiebungsvektors in Ost-, Nord- und Vertikalrichtung (von oben) an den Dachstationen Pullach (links) und Schäftlarnstraße (rechts), relativ zur IGS-Station Oberpfaffenhofen. | 13 |
| Abbildung 4: Signaldekomposition der Ostkomponente an den Stationen Maria-Einsiedel-Bad (links) und Baierbrunn (rechts) in eine Trendkomponente (mitte) und einen saisonalen- und Rauschanteil (unten). Das negative Vorzeichen des Trends deutet auf eine scheinbare Bewegung der Stationen nach Westen. Weitere Untersuchungen auf Basis längerer Zeitreihen sind notwendig, um zu entscheiden, ob dieses Signal eine reale Lageänderung anzeigt oder auf einen anderen, noch nicht erkannten systematischen Einfluss zurückzuführen ist. | 14 |
| Abbildung 5: Ausschnitt aus der Weltspannungskarte. Die maximale horizontale Hauptspannung am Alpenrand ist in Nordsüdrichtung ausgerichtet und zeigt eine Einengungsbewegung durch die Kollision der eurasischen und afrikanischen Platte an. Östlich von München ist eine lokale Abweichung der Spannungsorientierung um 90° zu erkennen. Dies würde mit der scheinbaren Westbewegung der INSIDE-Stationen übereinstimmen, muss aber weiter untersucht werden. | 15 |
| Abbildung 6: Aufnahmegeometrie der SAR-Interferometrie. (a) zeigt die Situation bei einem Höhenmodellfehler Δz und einer Abweichung Δx der Position des Streuzentrums von der Mitte der Auflösungszelle. (b) zeigt die Situation bei einer Verschiebung des Rückstreuers zwischen dem Zeitpunkt <i>tm</i> der Masteraufnahme und dem Zeitpunkt <i>ts</i> der Slaveaufnahme..... | 17 |
| Abbildung 7: Vergleich der Überdeckung und PS-Punktdichten der TerraSAR-X-Analyse des DLR und der Sentinel-1-Analyse des GIK..... | 22 |

Abbildung 8: Der Ausschnitt (Gemeinde Grünwald) zeigt exemplarisch die deutlich höhere räumlich Auflösung der X Band-Satelliten TerraSAR-X und Tandem-X gegenüber den C-Band Satelliten Sentinel-1 a und b. WRBU ist das Kürzel für die seismische Station Wörnbrunn. 23

Abbildung 9: Exemplarische X-Band Zeitreihe für einen PS-Punkt in unmittelbarer Nähe der GNSS-Antenne an der Station Maria-Einsiedel-Bad..... 23

Abbildung 10: Lage von PS-Punkten aus der X-Band-Analyse des DLR sowie einige Zeitreihen für die Geothermieanlage Kirchstockach. An der westliche Ecke einer Metalldachkonstruktion (vergl. Abbildung 11) vergrößert sich der Abstand zum Satelliten kontinuierlich. Da es sich um Line-of-sight (LoS) Ergebnisse von Aufnahmen aus dem aufsteigenden Satellitenorbit handelt, kann die Zunahme durch eine ostwärts und/oder abwärts gerichtete Verschiebung erklärt werden. Unter Berücksichtigung der speziellen Konstruktion handelt es sich vermutlich um eine lokale Absenkung auf Grund von Setzungsbewegungen oder Gebäudeinstabilitäten.24

Abbildung 11: Blick auf die Konstruktion der Hallendächer der Anlage Kirchstockach ((a), (b)). Auf dem Metalldach sind in regelmäßigen Abständen Ventilatorschächte angeordnet, die als gute Rückstreuer fungieren und mit wenigen Ausnahmen durch PS-Punkte belegt sind. Das Beispiel macht deutlich, dass sich die Ergebnisse einer multitemporalen Analyse von TerraSAR-X-Daten eindeutig Gebäuden oder Gebäudeteilen zuordnen lassen (das vorgelagerte Gebäude ist neueren Datums und wurde erst während der Akquisition des Datenstapels errichtet). TerraSAR-X Interferometrie ist damit sehr gut geeignet, um sensible Anlagen innerhalb des (erweiterten) Einwirkungsbereiches zu überwachen. (c) zeigt die Lage von PS-Punkten aus der C-Band-Analyse des GIK in LoS für den aufsteigenden Orbit. Es etablieren sich deutlich weniger Punkte; sie lassen eine Überwachung der Anlage insgesamt, aber nicht einzelner Gebäude zu. Bildquellen: (a) Google, Landsat Copernicus, (b) SWM..... 25

Abbildung 12: Ausschnitte der Mittlere-Amplituden-Bilder von Maria-Einsiedel-Bad. Links: aufsteigender Orbit 117. Rechts: absteigender Orbit 168. Pfeile kennzeichnen die Position des Transponders 27

Abbildung 13: Ausschnitte der Mittlere-Amplituden-Bilder von Pullach. Links: aufsteigender Orbit 117. Rechts: absteigender Orbit 168. Die Transponder werden hier besonders deutlich, da keine weiteren Reflektoren im Umkreis vorhanden sind..... 27

Abbildung 14: Detail der Mittlere-Amplituden-Bilder mit Transponder: a) Maria-Einsiedel-Bad, aufsteigender Orbit. b) Maria-Einsiedel-Bad, absteigender Orbit. c) Pullach, aufsteigender Orbit. d) Pullach, absteigender Orbit..... 28

Abbildung 15: Transponder Maria-Einsiedel-Bad, Pixel mit bester Signalqualität gemessen an DA und γ . Rechts: aufsteigender Orbit 117. Links: Absteigender Orbit 168..... 28

Abbildung 16: Transponder Pullach, Pixel mit bester Signalqualität gemessen an DA und γ . Rechts: aufsteigender Orbit 117. Links: Absteigender Orbit 168..... 29

Abbildung 17: Die Produkte der Bodenbewegungsdienste sind über Webportale abrufbar, hier exemplarisch das Portal des EGMS. Dargestellt ist die aus einer Kombination von Beobachtungen aus auf- und absteigenden Überflügen abgeleitete Vertikalkomponente. Grundlage ist eine Persisten-Scatterer-Analyse der Sentinel-1 Radaraufnahmen von Januar 2018 bis Dezember 2022..... 31

Abbildung 18: Vergleich von vertikalen Verschiebungsraten im Umfeld von Geothermieanlagen, abgeleitet aus Wiederholungsnivellements (Dreiecke) und dem vertikalen PSI-Produkt des EGMS (Kreise). (a) Freiham, (b) Riem..... 34

Abbildung 19: Vergleich von vertikalen Verschiebungsraten im Umfeld der Geothermieanlage Ismaning, abgeleitet aus Wiederholungsnivellements (Dreiecke) und dem vertikalen PSI-Produkt des EGMS (Kreise).... 35

Abbildung 20: Vergleich von Höhendifferenzen Sept. 2020 – Sept. 2019 im Umfeld von Geothermieanlagen, abgeleitet aus Wiederholungsnivellements (Dreiecke) und dem vertikalen PSI-Produkt des EGMS (Kreise). (a) Pullach, (b) Kirchstockach..... 36

Abbildung 21: Höhendifferenzen März 2022 – März 2021 in der Umgebung der Geothermieanlage am Kraftwerk München Süd (Schäftlarnstraße), abgeleitet aus Wiederholungsnivellements (Dreiecke) und dem vertikalen PSI-

Produkt des EGMS (Kreise). Das rote Rechteck markiert den Bereich, aus dem die Zeitreihen in Abbildung 24 zusammengestellt wurden. „Ref.-Punkt“ bezeichnet den Höhenanschlusspunkt des Nivellements; die EGMS-Resultate sind absolut kalibriert mit Bezug zum Europäischen Referenzrahmen ETRF2000. 37

Abbildung 22: Höhenänderungen am Anschlussterminal der Bohrungen auf dem Gelände des Kraftwerks Süd in der Schäftlarnstraße. (a) März 2022 – März 2021, (b) März 2024 – März 2022. 38

Abbildung 23: Höhendifferenzen März 2022 – März 2021 in der Umgebung der Geothermieanlage am Kraftwerk München Süd (Schäftlarnstraße), abgeleitet aus Wiederholungsnivellements (Dreiecke) und einer PSI-Analyse von 291 Sentinel-1 Szenen aus auf- und absteigenden Orbits, durchgeführt am GIK (Kreise). Das rote Rechteck markiert den Bereich, aus dem die Zeitreihen in Abbildung 24 zusammengestellt wurden. „Ref.-Punkt“ bezeichnet den Höhenanschlusspunkt des Nivellements; das Referenzgebiet der PSI-Resultate liegt außerhalb des Bildes im Norden. 39

Abbildung 24: PSI-Zeitreihen aus einem ca. **1 km²** Gebiet im Hebungsbereich nördlich der Re-Injektionsbohrungen Bohrungen TH3 und TH5. Die vertikale Linie markiert den Betriebsbeginn der Geothermieanlage Schäftlarnstraße. 40

Abbildung 25: Höhendifferenzen in der Umgebung der Geothermieanlage am Kraftwerk München Süd (Schäftlarnstraße), abgeleitet aus Wiederholungsnivellements für den Zeitraum März 2024 – März 2021 (Dreiecke) und der PSI-Analyse des GIK für den Zeitraum Dezember 2023 – März 2021 (Kreise). Rote Rechtecke markieren den Bereich, aus dem die Zeitreihen in Abbildung 26 zusammengestellt wurden. 41

Abbildung 26: PSI-Zeitreihen aus jeweils einem ca. **1 km²** Gebiet im Hebungsbereich nördlich der Re-Injektionsbohrungen Bohrungen TH3 und TH5 (links, Rechteck 1 in Abbildung 25) und einem Vergleichsgebiet westlich der Isar (rechts, Rechteck 2 in Abbildung 25) 42

Abbildung 27: Detailkarte des Senkungsgebietes im Bereich der Bauarbeiten zur 2. Stammstrecke an der Untergrundstation Marienhof mit angepasster Farbskala (oben), Ost-West-Profil durch das Maximum der Absenkung (unten). Die Fehlerbalken wurden aus einer statistischen Analyse der räumlichen Streuung der vertikalen PSI-Komponente der GIK-Analyse bestimmt. Die beobachtete Absenkung ist hoch signifikant, die Absenkungsmulde kann mittels PSI detailliert vermessen werden. 43

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Einstellung einiger wichtiger StaMPS-Analyseparameter der PS-Prozessierung am GIK 21

Tabelle 2: Unterschiede der Bodenbewegungsdienste 32

ZUSAMMENFASSUNG

In AP 3.3 wurden die verschiedenen geodätischen und Fernerkundungs-Datensätze aufbereitet, analysiert und in verschiedenen Zusammenhängen miteinander verglichen und interpretiert. Im Folgenden werden die wesentlichen Resultate und Schlussfolgerungen unter zwei Gesichtspunkten zusammengefasst.

Schlussfolgerungen zu Genauigkeiten, Stabilität und Einsatzmöglichkeiten

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

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

Persistent-Scatterer SAR-Interferometrie: Ein Vergleich von Persistent-Scatterer-Analysen (PSI) der Sentinel-1 Radarbilder im C-Band (Wellenlänge $\lambda = 5.88 \text{ cm}$) mit den TerraSAR-X Ergebnissen im X-Band ($\lambda = 3.10 \text{ cm}$) brachte das erwartete Ergebnis: auf Grund der ca. 10 mal besseren räumlichen Auflösung der X-Band Daten ist die Abdeckung mit für Deformationsmessungen verwendbaren PS-Punkten erheblich dichter als im C-Band. Ein instruktives Beispiel für die Leistungsfähigkeit von TerraSAR-X Beobachtungen ist die Geothermieanlage Kirchstockach, wo die PS-Punkte sehr plausibel Strukturen auf zwei langgestreckten Metalldachkonstruktionen zuzuordnen sind, und Absenkungen einzelner Gebäudeteile detektiert werden können. Die mittlere Standardabweichung der 134 PS-Zeitreihen auf der Anlage beträgt 1.7 mm . Die beobachteten Bewegungen haben nicht direkt mit geothermischer Produktion zu tun, sondern sind vermutlich auf Instabilitäten der Struktur oder lokale Bodenkompaktion zurückzuführen. Sie lassen aber das Potential von X-Band für das Monitoring sensibler Gebäude und Infrastrukturobjekte innerhalb eines Einwirkungsbereiches (Klasse II nach MarkschBergV) erkennen. Ein entsprechender Einsatz wäre jedoch vor dem Hintergrund der erwarteten

Großräumigkeit der Oberflächendehformationen und der mit der Beschaffung von TerraSAR-X Radarszenen verbundenen Kosten zu prüfen.

Fallstudie zu Oberflächenbewegungen in München

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

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

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

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

1 EINGEHENDE DARSTELLUNG DER ARBEITEN

1.1 ÄNDERUNGEN URSPRÜNGLICH GEPLANTER ARBEITEN

Am 30.11.2022 fiel ein Server am Geodätischen Institut aus, auf dem unter anderem die InSAR- und GNSS-Daten des Inside-Projektes prozessiert und analysiert wurden. Die Tragweite des Vorfalls wurde im Januar 2023 erkannt, nachdem eine genaue Untersuchung durch Spezialisten des Steinbuch-Rechenzentrums am KIT ergeben hatte, dass der Server durch einen Angriff von außen gehackt wurde. Im Verlauf dieser Attacke wurden die Festplatten des Raid-Systems formatiert und alle Daten, Ergebnisse und internen Backups unwiderruflich gelöscht. Dies betraf insbesondere die Persistent-Scatterer Analyseergebnisse der Radarszenen des Satelliten Sentinel 1a und b, sowie die Aufbereitung und Analyse der GNSS-Daten mit der Bernese-Software. Die Rohdaten der GNSS-Stationen, die Sentinel-1 Radarszenen sowie die vom DLR zur Verfügung gestellten Analyseergebnisse für TerraSAR-X waren von dem Angriff nicht betroffen, da sie auf einem anderen Server gespeichert waren.

Fast zeitgleich mit dem Ausfall des Servers hat der Projektmitarbeiter Bence Ambrus zum 31.12.22 planmäßig das KIT verlassen, um eine Stelle an der TU Budapest anzunehmen. Bedingt durch den Ausfall des Rechners ist Herr Ambrus nicht mehr dazu gekommen, seine Ergebnisse zu sichern, für einen Projektbericht zusammenzustellen und zu publizieren. Während der zwei Verlängerungsphasen von INSIDE konnten die SAR- und GNSS-Daten durch den Einsatz von wissenschaftlichen Hilfskräften und der vorübergehenden Einstellung von Doktoranden reprozessiert bzw. neu prozessiert werden. Allerdings konnten nicht alle Tätigkeiten eines kontinuierlich eingestellten Projektmitarbeiters lückenlos übernommen werden, was sich unter anderem in Verzögerungen bei der technischen Betreuung der Messstationen niederschlägt.

Diese Situation hat zu einer Veränderung der Schwerpunkte der methodischen Arbeiten und der Dateninterpretation beigetragen. Zurückgestellt wurden der Einsatz von kohärenzbasierten Filtermethoden zur Nutzung von flächenhaften Radarrückstreuern, die Umstellung der InSAR-Prozessierung von statischen auf dynamische Bildstapel zur zeitnahen Aufdatierung der Ergebnisse sowie die mathematische Kombination von satellitengestützten und terrestrischen Messmethoden zur Ableitung von dreidimensionalen Verschiebungsfeldern. Auf der anderen Seite kam mit dem Beginn der operationellen Phase des nationalen sowie des europäischen Bodenbewegungsdienstes im Frühjahr 2022 ein neuer Arbeitsschwerpunkt hinzu, der bei Antragstellung in dieser Form nicht absehbar war. Wir haben die große Bedeutung der kostenfrei über Webportale angebotenen Produkte der Bodenbewegungsdienste für die Bestimmung und das Monitoring des Einwirkungsbereiches von Geothermieranlagen erkannt, die Produkte evaluiert, eine Fallstudie für München erarbeitet sowie ein Konzept erstellt (AP 5.2), das die Probleme der bisherigen Vorgehensweise aufzeigt und ein modernes, integriertes Monitoringsystem skizziert. Auf Grund der unmittelbaren Bedeutung dieser Tätigkeiten für die Dokumentationspflichten der Projektpartner SWM und IEP im Hinblick auf die Auswirkungen der geothermischen Produktion auf Bodendeformationen haben wir die entsprechende Verschiebung der Arbeitsschwerpunkte vorgenommen.

In den Abschnitten 1.1 bis 1.6 werden zunächst die methodische Vorgehensweise sowie die Analyseergebnisse und Produkte der einzelnen Experimente vorgestellt. Abschnitt 1.7 befasst sich mit einer synoptischen Betrachtung zu Oberflächendeformationen im Großraum München. In die Studie zur Bestimmung und Monitoring des Einwirkungsbereiches durch Geothermieranlagen in München fließen neben den hier vorgestellten Deformationsanalysen auch die Ergebnisse von numerischen Modellierungen der Projektpartner ein. Die Studie wird als separater Berichtsteil zu AP 5.2 vorgestellt.

1.2 NIVELLEMENT

Nach den Vorgaben der Einwirkungsbereichs-Bergverordnung werden wiederholte Präzisionsnivellements von den Geothermiebetreibern bei einem anerkannten Markscheider beauftragt. Im Rahmen von INSIDE standen die in AP 1.4 Tab. 1 aufgelisteten Messepochen an verschiedenen Standorten zur Verfügung. Bei den Daten handelt es sich um epochenweise, nach einem Standardverfahren durch den Markscheider ausgeglichene Höhenunterschiede, bezogen auf einen lokalen Referenzpunkt. Sofern drei oder mehr Messepochen vorlagen,

wurden für die folgende Auswertung im Hinblick auf zeitliche Höhenänderungen aus dem gegebenen Material lineare Höhenänderungsraten bestimmt. Liegen lediglich zwei Epochen vor, wurden Höhendifferenzen berechnet. Da in diesen Fällen laut Tab. AP 1.4 Tab. 1 das Messintervall ein Jahr beträgt, entsprechen sie jährlichen Hebungs-/Senkungsraten. Ein Sonderfall stellt das zweite Wiederholungsnivellement auf der Messlinie Schäftlarnstraße im März 2024 dar. Die Daten wurden uns unmittelbar vor Ende des Projektes zur Verfügung gestellt und konnten nur sehr kurzfristig in die Analysen aufgenommen werden. Auf Grund der speziellen Situation im Zentrum von München wurden keine Raten abgeleitet, sondern Höhendifferenzen zwischen den verschiedenen Kampagnen verwendet.

Zur Darstellung der Ergebnisse wurden die Daten in das Geographische Informationssystem QGIS (<https://www.qgis.org/>) eingelesen (Abbildung 1). Deutlich erkennbar ist ein höheres Rauschen an den Standorten Schäftlarnstraße, Pullach und Kirchstockach, da hier nur zwei Epochen vorliegen. Eine anhaltende Hebungs- oder Senkungstendenz ist an fünf der sechs Standorte nicht zu erkennen. Eine Ausnahme bildet das Netz Schäftlarnstraße, wo sich eine konsistente Hebungstendenz in nordwestlicher Richtung, dem Gebiet der Re-Injektionsbohrungen TH3 und TH5, ergibt. Der maximale Hebungsbetrag liegt bei 3.4 mm. Der Wert liegt deutlich über der erreichbaren Genauigkeit des Präzisionsnivelements von ca. 0.5 mm, sodass das Hebungseignis als signifikant betrachtet werden muss. Eine detaillierte Beschreibung und Interpretation dieser Beobachtung zusammen mit den Ergebnissen der SAR-Interferometrie wird in Abschnitt 1.7 durchgeführt.

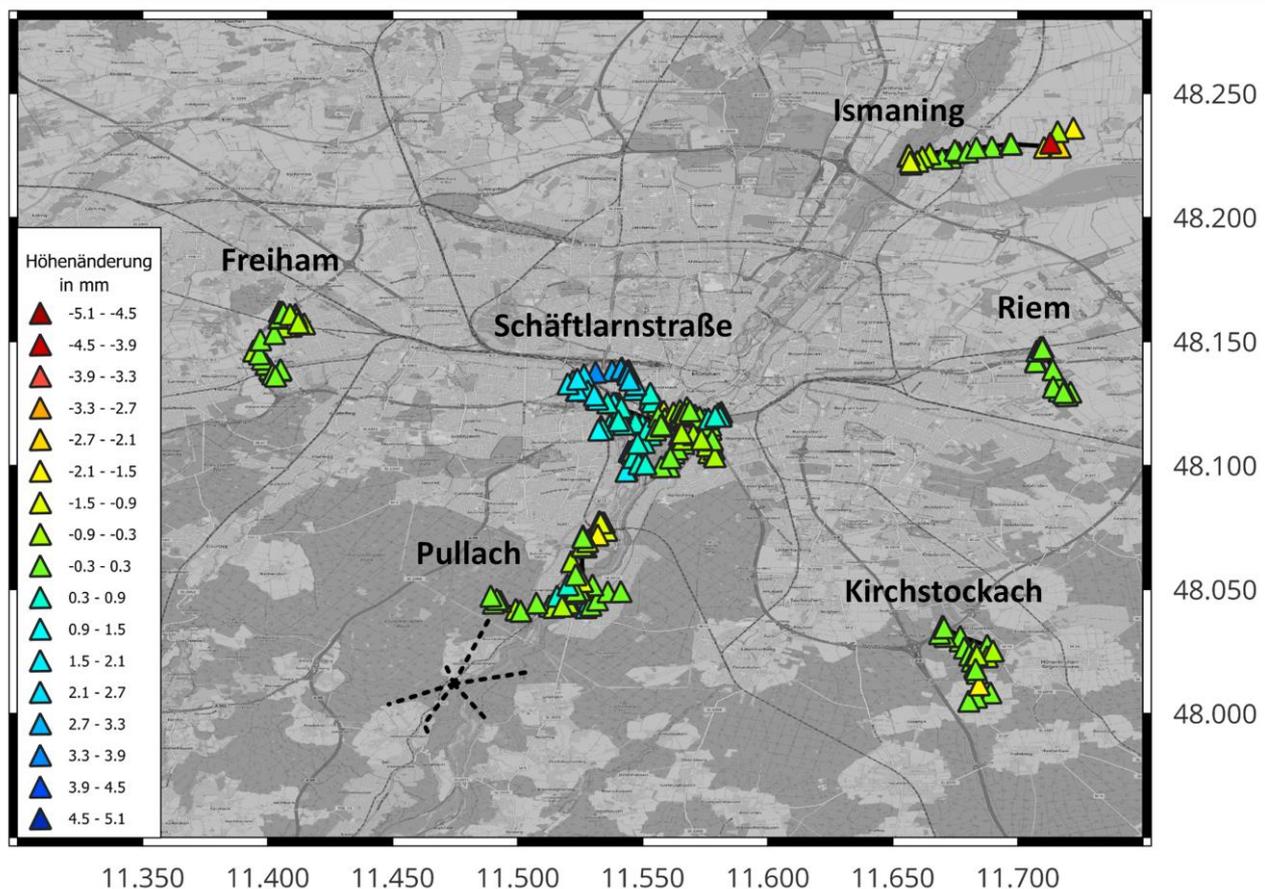


Abbildung 1: Ergebnisse der wiederholten Nivellements im obertägigen Bereich der durch Stadtwerke München, Innovative Energie Pullach und Wärmeversorgung Ismaning GmbH & Co. KG betriebenen Geothermiebohrungen. Für die Standorte Freigham, Riem und Ismaning werden Hebungs-/Senkungsraten in *mm/Jahr* dargestellt, an den anderen Standorten Höhendifferenzen in der Einheit *mm*. Die Farbskala gilt für beide Datentypen. Nur im Zentrum von München werden signifikante Höhenänderungen in der Fläche beobachtet, an anderen Standorten treten vereinzelt Punktbewegungen auf. Für das Netz Schäftlarnstraße wird die Höhendifferenz März 2022 – März 2021 dargestellt.

1.3 GNSS REFERENZSTATIONEN

Bei der Auswertung der GNSS-Daten lag der Fokus auf den folgenden Fragestellungen:

- Hochpräzise GNSS-Empfänger arbeiten mit mehreren Frequenzen, z.B. GPS mit L1: 15.75 MHz, L2: 12.27 MHz und L5: 11.76 MHz. Kombinationen der Frequenzen ermöglichen die Bestimmung ionosphärischer Laufzeitverzögerungen und können die Lösung von Phasenmehrdeutigkeiten unterstützen. Der Betrieb von Ein-Frequenz-Empfängern ist kostengünstiger, jedoch auf die Verwendung von Korrekturmodellen angewiesen, oder im differentiellen Auswertansatz auf eine nicht zu weit entfernte Referenzstation. Vor allem in kleinräumigen Netzen kann je nach Anwendungsfall eine flexible und passende Kombination von Mehr- und Einfrequenzausrüstungen zu guten Ergebnissen führen. Diese Option für ein kostengünstiges GNSS-Monitoringsystem für urbane Räume soll im INSIDE-Projekt evaluiert werden.
- GNSS gilt als absolutes Messverfahren, da sich die Beobachtungen auf einen globalen Referenzrahmen beziehen. Damit besteht die Möglichkeit, Referenzpunkte innerhalb eines großräumigen Deformationsgebietes zu definieren, die als Ausgangspunkt für lokale Nivellements nutzbar sind. Die Überprüfung von Eigenbewegungen dieser Referenzpunkte mittels eines geeigneten GNSS-Netzes ist mit erheblich geringerem Aufwand verbunden als die Verwendung langer Nivellementzüge zu Referenzpunkten außerhalb des Deformationsgebietes. Allerdings ist zu beachten, dass die Genauigkeit der GNSS-Vertikalkomponente aufgrund der Satellitengeometrie geringer ist als diejenige der Horizontalkomponenten. Ziel im INSIDE-Projekt war es, die erreichbaren Genauigkeiten für die o.g. Netzkonfiguration in München im Hinblick auf die Vorgaben der Markscheider-Bergverordnung zu überprüfen.
- In methodischer Hinsicht besteht die Aufgabe, die für ein Routine-Monitoring geeignetste Auswertestrategie zu evaluieren und soweit wie möglich zu automatisieren.

Für die Aufbereitung und Analyse der im Rahmen von INSIDE aufgezeichneten GNSS-Daten standen verschiedene Programmoptionen zur Auswahl: Bernese GNSS-Software (Dach et al., 2015), WASOFT (Wanninger, 2016) und RTKLIB (Takasu, 2009). Wie eingangs beschrieben, konnten die Prozessierungsansätze mit der Bernese Software nicht beendet werden. Nach verschiedenen Vorüberlegungen ist die Wahl schließlich auf RTKLIB gefallen.

RTKLIB ist ein kostenfrei verfügbares open-source Softwarepaket zur präzisen Auswertung von GNSS-Daten. Es steht unter *2-clause BSD licence* zur Verfügung und gestattet die Entwicklung und Weitergabe von kommerziellen und nicht-kommerziellen Produkten unter Beachtung der Lizenzvorgaben. Damit entfallen Beschaffungs- und Nutzungsgebühren für einen eventuellen Einsatz der in INSIDE entwickelten GNSS-Produkte durch die Betreiber von Geothermieranlagen in München. RTKLIB bietet alle gängigen Auswertansätze für den Realtime- oder Post-Processing Betrieb von GNSS-Netzen, sowohl für Einzelstationen (*precise point positioning*, PPP) als auch im differentiellen Modus. Die gewählte Auswertestrategie lässt sich weitgehend automatisieren, was den Einsatz in einem Reservoir-Management-System erleichtert.

Stationskonfiguration und technische Probleme

Die Analyse der GNSS-Datenreihen stand unter den eingangs skizzierten einschränkenden Rahmenbedingungen. Während der Corona-Lockdowns waren Ortsbegehungen zeitweise schwierig, und einige geeignete Flächen wurden von den zuständigen Besitzern nicht freigegeben. Dadurch wurde der Stationsaufbau verzögert, was zu teilweise recht kurzen Messreihen geführt hat. Auch die technische Betreuung der laufenden Stationen konnte nicht im notwendigen Maß gewährleistet werden. Die Betreuungssituation verschärfte sich insbesondere durch die planmäßige Rückkehr unseres Projektmitarbeiters Bence Ambros nach Budapest im Dezember 2022. In der Folge sind einige längere Datenlücken in den GNSS-Zeitreihen zu konstatieren.

Die Hauptursache für die Ausfallzeiten der Stationen waren Probleme mit der Datenübertragung. Die GNSS-Receiver verfügen zwar über einen internen Datenspeicher mit einer Datenkapazität von 1 GByte, was einem Zeitintervall von ca. 3 Monaten entspricht. Diese Zeitspanne hat jedoch unter den gegebenen Rahmenbedingungen in manchen Fällen nicht ausgereicht. Bei den verwendeten GNSS-Receiver handelt es sich um Leica GM30 Monitoring-Empfänger, die an vielen Referenzstationen weltweit im Dauerbetrieb eingesetzt werden. Sie verfügen über eine sog. „FTP-Push Funktion“, die im Prinzip eine einfache Datenübertragung per FTP über einen GSM-Router an den vorgesehenen Unix-Server am GIK zulässt. Damit entfällt die Notwendigkeit, an der Messstation zusätzlich einen Rechner oder Mini-PC zur Koordinierung des Datentransfers zu installieren. Aus Kompatibilitätsgründen innerhalb des INSIDE-Projektes wurden wie im seismischen Teilprojekt für den industriellen Einsatz spezifizierte LTE-Router RUT950 der Firma Teltonika eingesetzt, die einen zuverlässigen und sicheren Betrieb sicherstellen und eine sehr flexible Einsatzweise zulassen.

Der Betrieb einfacher zugänglicher FTP-Server an Rechenzentren ist aus Sicherheitsgründen heutzutage nicht mehr zulässig. Aus diesem Grund wurden auf den LTE-Router an den Stationen zwei VPN-Tunnel zur sicheren Kommunikation mit dem Rechenzentrum des KIT sowie der am GIK eingesetzten Workstation eingerichtet. Die Erfahrungen mit dem verwendeten Kommunikationsweg sind positiv, die VPN-basierte Datenübertragung läuft stabil. Probleme traten allerdings dadurch auf, dass seitens des KIT-Rechenzentrums während der Projektlaufzeit zweimal die VPN-Zertifikate erneuert wurden, außerdem änderte sich die IP-Adresse des GIK-Servers während eines Updates und dem damit verbundenen Neustart. Dies machte jeweils Re-Konfigurationen des Routers über Eingriffe vor Ort notwendig, wobei teilweise unerwartete Probleme mit der Software der Router auftraten. Sie erwiesen sich als lösbar, trugen jedoch zu den Ausfallzeiten bei.

Um die Notwendigkeit, die Router vor Ort zu rekonfigurieren, zu umgehen wurde eine Einbindung der Router in das Remote Management System (RMS) von Teltonika Networks getestet. Gegen einen Monatsbeitrag von 2,50 € pro Gerät erlaubt RMS eine vollständige Fernsteuerung der Router ohne die Notwendigkeit einer öffentlichen IP-Adresse. Die Erfahrungen mit diesem System sind nur teilweise zufriedenstellend: wenn eine RMS-Verbindung zum Router besteht, ist eine Kontrolle inklusive Software-Konfigurierung sehr bequem aus der Ferne möglich. Allerdings hält RMS die Verbindung nicht kontinuierlich aufrecht, sondern stellt diese nur in bestimmten Zyklen her. Es gibt keine Möglichkeit, eine Verbindung außerhalb dieser Zyklen zu forcieren. Wenn es Probleme mit der GSM-Anbindung vor Ort gibt, funktioniert auch die Fernbedingung über Teltonika RMS nicht.

Probleme mit der Mobilfunkanbindung traten insbesondere an der Station Pullach ab Mitte 2022 auf. Diese Station wurde wegen ihrer zentralen Lage im INSIDE-GNSS-Netzwerk mit der Multi-Frequenz-Option ausgerüstet und sollte als Referenzstation für die Ein-Frequenz-Stationen im Netz eingesetzt werden. Auf Grund vergleichsweise starker kurz- und langperiodischer Unruhe in den Daten war dies allerdings nur bedingt möglich. Stattdessen wurde die IGS-Station Oberpfaffenhofen mit der Kennung OBE400DEU verwendet. Der Internationale GNSS Dienst (IGS) betreibt derzeit ein globales GNSS-Referenz-Netzwerk von 520 Stationen, deren Daten kostenfrei zur Verfügung stehen. Die Station liegt westlich des INSIDE-Netzes mit Abständen von 21.06 km (Schäftlarnstraße), 19.92 km (Maria-Einsiedel-Bad), 17.31 km (Pullach) und 16.84 km (Baierbrunn). Die Abstände sind damit größer als ursprünglich geplant, trotzdem werden zufriedenstellende Ergebnisse erreicht.

Auswertung: Tests und Strategie

Verschiedene Test wurden durchgeführt um die optimale Vorgehensweise für die Prozessierung der GNSS-Daten mit RTKLIB fest zu legen:

- **Elevationswinkel.** Prinzipiell ist ein GNSS-Satellit für die Koordinatenbestimmung nutzbar, sobald er über dem Horizont steht. Der minimale Elevationswinkel (Satellitenhöhe über dem Horizont) beträgt daher 0° . Für die INSIDE Stationen in städtischem Gebiet ist eine vollständige Horizontfreiheit jedoch nicht gewährleistet. Die Einbeziehung nicht oder nur teilweise sichtbarer Satelliten kann auf Grund von Beugungseffekten die Qualität der Analyse verschlechtern. Es wurde daher für jede Station individuell ausgetestet, ab welcher Elevation ein Einfluss auf die Ergebnisse nicht mehr feststellbar ist. Für die minimal nutzbaren Elevationswinkel wurden Werte von 15° in Maria-Einsiedel-Bad und 10° an den anderen Stationen festgelegt.

- **Filterung.** RTKLIB verwendet Kalman-Filter zur Berechnung der Lösungen in verschiedenen differentiellen Anwendungen (statisch, kinematisch, *moving baseline*) Nach umfangreichen Tests wurde die Option *combined Kalman filtering* ausgewählt, bei der die Daten sowohl in zeitlich aufsteigender als auch absteigender Richtung gefiltert werden, um Konvergenzeffekte am Beginn und Ende der Datenreihen zu reduzieren.
- **Tagesmittelwerte.** Entsprechend der an den Receivern eingestellten Messepochen liefert die Analyse alle 30 Sekunden Werte für die Komponenten der Basislinie zur Referenzstation in Ost-, Nord- und Vertikalrichtung inklusive Standardabweichungen und einem Qualitätsmaß für die 30-sec Lösung. Die Messeinrichtungen sind damit in der Lage, schnelle Deformationsereignisse in allen drei Koordinatenrichtungen aufzulösen. Für die Analyse von langfristigen Trends oder jahreszeitlichen Variationen wird die hohe Datenrate jedoch nicht benötigt; üblicherweise werden dafür Tagesmittelwerte verwendet. Getestet wurden verschiedene Herangehensweisen für die Mittelbildung. Als optimale Lösung wird folgende Vorgehensweise vorgeschlagen: zunächst wird für jedes Stundenintervall der Median aus den fünf 30-sec-Werten mit den besten Qualitätsmaßen bestimmt. Im zweiten Schritt wird aus den daraus resultierenden 24 Medianwerten wiederum der Median bestimmt und als Tageswert festgelegt.

Basierend auf diesen Voruntersuchungen wurde der Ablauf der Datenprozessierung über Jupyter Notebooks (Python 3), Bash-Skripte und einen Konfigurationsfile für RTKLIB weitgehend automatisiert. Diese regeln den Download präziser IGS-Produkte (Orbitinformationen, Satellitenuhren, Erdorientierungsparameter), das Handling der Rohdaten, den Ablauf der Prozessierung sowie die grafische Darstellung der Ergebnisse. Voraussetzung ist ein Linux-Server oder eine Linux-Umgebung auf einem PC unter dem Betriebssystem Windows. Im Anschluss an die Prozessierung der Tagesmittelwerte kann eine Signalanalyse mittels geeigneter Programme wie TSAlyzer (Wu et al., 2017) vorgenommen werden. Für die folgenden Untersuchungen wurde die IGS-Station Oberpfaffenhofen als Referenzstation für eine Basislinienbestimmung im differentiellen Modus eingesetzt. Die Netzkonfiguration lässt Aussagen über Vertikal- und Ostwest-Horizontalbewegungen sowie Genauigkeiten zu. Wie im folgenden Abschnitt aufgegriffen wird, ist sie jedoch nicht geeignet für die vollständige Bestimmung des Verschiebungsvektors sowie des Straintensors.

Ergebnisse

Abbildung 2 zeigt den Vergleich der Dachstation Maria-Einsiedel-Bad (GBAD) mit der Pfeilerstation Baierbrunn (GBAI). In beiden Fällen sind die Variationen in den Datenreihen i. W. auf einen Bereich von $\pm 1 \text{ cm}$ begrenzt. Das Datenrauschen ist in GBAD signifikant höher, was auf Grund der Abschirmungseffekte durch die benachbarten Bäume (vergl. AP 1.4 Abbildung 4) zu erwarten war. Im Frühjahr 2022 ist eine Phase besonders auffälliger Störungen erkennbar, deren Ursache nicht bekannt ist. Möglicherweise wurde die GNSS-Antenne in dieser Zeit durch ein zusätzliches Objekt verstärkt abgeschattet. In der Ostkomponente (e-baseline) in GBAD zeichnet sich eine Variation mit Jahresperiode ab, die in Baierbrunn nicht erkennbar ist. In beiden Fällen ist typischerweise die Vertikalkomponente schlechter bestimmt.

Für die Bestimmung des (erweiterten) Einwirkungsbereiches gilt nach aktueller Praxis die Erfassung der Vertikalkomponente durch das Nivellement als ausreichend. Für Gebäudeschäden sind allerdings auch horizontale Zerrungen/Stauchungen und Rotationen von Bedeutung. Nach den Vorgaben der Markscheider-Bergverordnung (MarkschBergV) ist für die unmittelbare Bestimmung von Lage- und Höhenänderungen eine innere Genauigkeit (2σ -Vertrauensbereich) einzuhalten von 3 mm (Klasse 1), 5 mm (Klasse 2) und 20 mm (Klasse 3). Für die Tagesmittelwerte an der Pfeilerstation GBAI werden die Vorgaben für die Klasse 3 in allen drei Komponenten erreicht, in GBAD reicht die Genauigkeit der Vertikalkomponente nicht aus. Klasse 3 wird als ausreichend für die Bestimmung des Einwirkungsbereiches erachtet, sofern es keine hochsensiblen Anlagen gibt, die Beobachtungen höherer Genauigkeit erfordern. Unter diesen Voraussetzungen wäre GBAI als Referenzpunkt für Höhenmessungen zur Bestimmung des Einwirkungsbereiches der zukünftigen Geothermieanlage in Baierbrunn einsetzbar; damit würde die Notwendigkeit langer Nivellementzüge zu einem außerhalb des Einwirkungsbereiches gelegenen Referenzpunkt entfallen (siehe Diskussion unter AP 5.2).

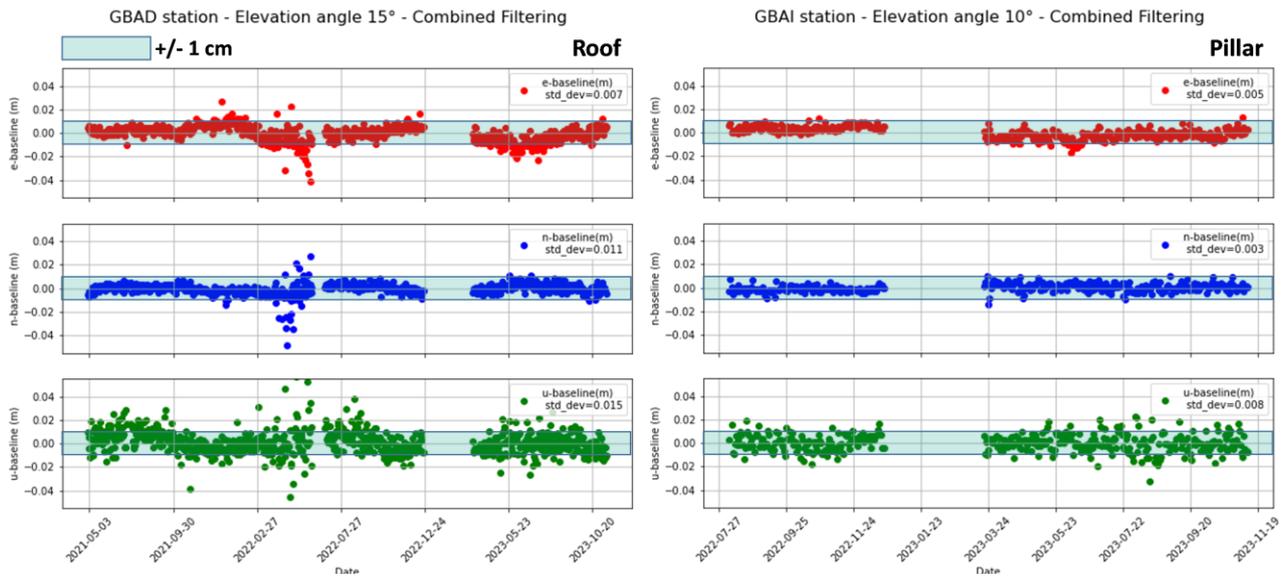


Abbildung 2: Komponenten des Verschiebungsvektors in Ost-, Nord- und Vertikalrichtung (von oben) an der Dachstationen Maria-Einsiedel-Bad (links) und der Pfeilerstation Baierbrunn (rechts). Alle Komponenten sind relativ zur IGS-Station Oberpfaffenhofen, die als Referenz verwendet wurde.

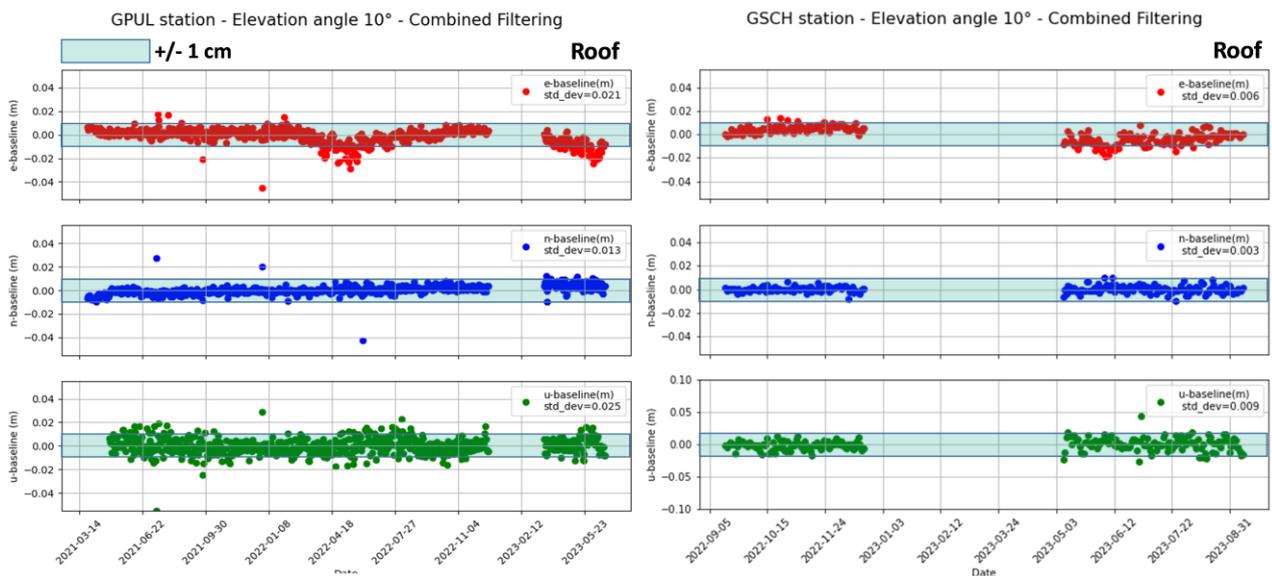


Abbildung 3: Komponenten des Verschiebungsvektors in Ost-, Nord- und Vertikalrichtung (von oben) an den Dachstationen Pullach (links) und Schäftlarnstraße (rechts), relativ zur IGS-Station Oberpfaffenhofen.

An den Stationen Pullach (GPUL) wird eine deutliche Anomalie in der Ostkomponente beobachtet (Abbildung 3). Sie tritt zeitgleich mit der Variation und den Störungen in Maria-Einsiedel-Bad im Frühjahr 2022 auf. Eine vergleichbare Variation deutet sich im Frühjahr 2023 an, sodass eine jährliche Periodizität nicht ausgeschlossen werden kann. Da in Baierbrunn kein derartiger Effekt beobachtet wird, wäre prinzipiell eine thermische Reaktion der Antennenhalterung oder des Gebäudes auf die Variation der Jahrestemperatur als Ursache denkbar. Allerdings ließe sich damit nur schwer erklären, warum weder in Maria-Einsiedel-Bad noch in Pullach ein vergleichbarer Effekt in der Nord-Komponente auftritt. Längere Messreihen sind notwendig, um dieser Frage auf den Grund zu gehen. Im Gegensatz zu den anderen Stationen wird in Pullach ein kontinuierlicher Trend in nördlicher Richtung erkennbar. Zieht man zusätzlich das vergleichsweise starke Datenrauschen in

Betracht, so könnte dies auf eine zu geringe Stabilität der tragenden Struktur deuten. Das Betriebsgebäude an der Bohrung TH3 in Pullach besitzt nicht die massiven Wände wie die Gebäude an den anderen Standorten und ist vermutlich nicht tief gegründet. Es wird vorgeschlagen, bei der geplanten Erweiterung des Bohrplatzes in Pullach und dem damit verbundenen Neubau der Betriebsgebäude von vornherein eine stabile Ankopplung der GNSS-Antenne vorzusehen.

Die Station Schäftlarnstraße (GSCH) bestätigt die Befunde der Stationen GBAD und GBAI (Abbildung 3). Die Genauigkeitsvorgaben für die Klasse 3 der MarkschesBergV werden erfüllt, allerdings sind quantitative Aussagen zur Qualität der Messungen durch die Kürze der Zeitreihe und die lange Datenlücke als vorläufig zu betrachten. Trotz dieser Einschränkungen können die permanenten GNSS-Stationen in unseren Augen eine wichtige Rolle als lokale Referenz- und Höhenanschlusspunkte in einem Gebiet übernehmen, in dem großräumige Deformationsprozesse auf räumlichen Skalen von 30 – 50 km durch Überlagerung der Aktivitäten verschiedener Geothermieanlagen zu erwarten sind (siehe AP 5.2). Bei der Diskussion der Eignung der INSIDE-Stationen ist zu bedenken, dass die genannten Standardabweichungen als Maß für die Messgenauigkeit Tagesmittelwerte betreffen. Einer der großen Vorteile kontinuierlicher Datenerfassung sind die weitreichenden Möglichkeiten zur Signalanalyse. Da die gekoppelten, durch die tiefe Geothermie angeregten thermo-hydraulischen Prozesse im Untergrund sehr langsam ablaufen, kann die Messgenauigkeit einer als langfristige Höhenreferenz eingesetzten GNSS-Station durch Mittelbildung (z. B. Jahresmittel) und/oder Tiefpassfilterung der Beobachtungsreihen deutlich verbessert werden. Es ist durchaus vorstellbar, dass genaue Vorgaben für eine solche Vorgehensweise in die MarkschesBergV aufgenommen werden könnten.

In diesem Zusammenhang ist eine Diskussion langfristiger Lage- oder Höhenänderungen an den Messstationen von Interesse. Mit Ausnahme der Ostkomponenten sowie der Nordkomponente in Pullach werden keine Trends in den Zeitreihen deutlich. Abbildung 4 zeigt exemplarisch die Ergebnisse einer Signaldekomposition der Ostkomponente mit TSAnalysier für GBAD und GBAI. Es ergibt sich an beiden Stationen ein kontinuierlicher negativer Trend von -3.3 mm/Jahr in GBAD und -6.2 mm/Jahr in GBAI, wobei das negative Vorzeichen eine scheinbare Bewegung nach Westen anzeigt. Einschränkend ist zu sagen, dass die Zeitreihe in GBAI sehr kurz für eine Trendbestimmung ist und die hohe Rate nicht überbewertet werden sollte. Eine entsprechende Analyse der Ostkomponenten an den Stationen GPUL und GSCH bestätigt den negativen Trend, wobei die Aussagekraft der berechneten Werte wegen der Kürze der Zeitreihen und den deutlich ausgeprägten jahresperiodischen Variationen in Pullach reduziert ist.

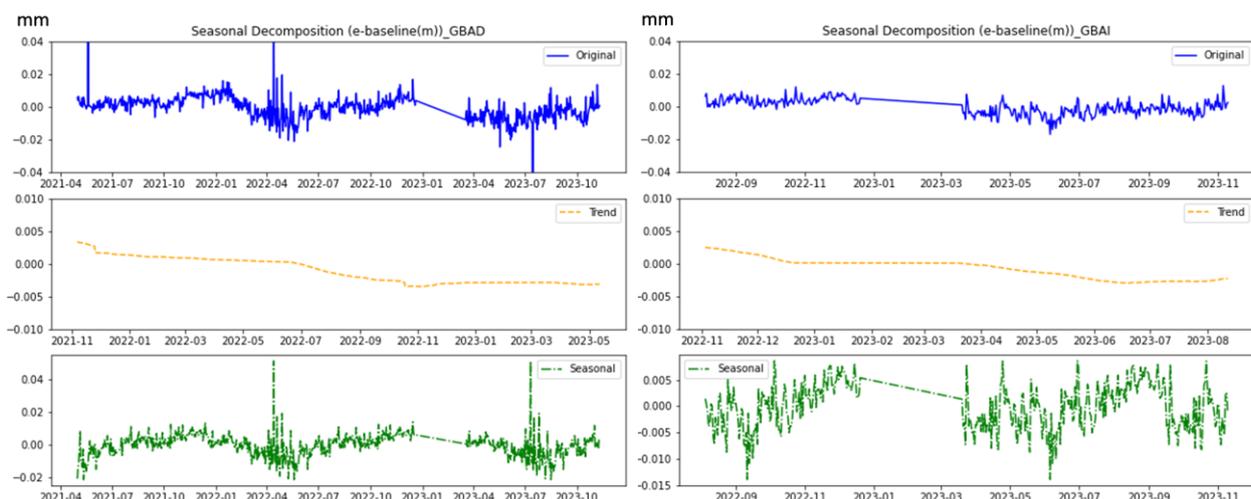


Abbildung 4: Signaldekomposition der Ostkomponente an den Stationen Maria-Einsiedel-Bad (links) und Baierbrunn (rechts) in eine Trendkomponente (mitte) und einen saisonalen- und Rauschanteil (unten). Das negative Vorzeichen des Trends deutet auf eine scheinbare Bewegung der Stationen nach Westen. Weitere Untersuchungen auf Basis längerer Zeitreihen sind notwendig, um zu entscheiden, ob dieses Signal eine reale Lageänderung anzeigt oder auf einen anderen, noch nicht erkannten systematischen Einfluss zurückzuführen ist.

Trotz der Einschränkungen durch die limitierte Datengrundlage ist die Feststellung bemerkenswert, dass die vier Stationen eine in Größe und Richtung vergleichbare, scheinbare Lageänderung erfahren. Über die Ursache kann auf Basis der vorliegenden Daten und Analysen nur spekuliert werden. Ein Einfluss der Prozessierungsstrategie ist nach gegenwärtigem Stand nicht ersichtlich, kann aber nicht ausgeschlossen werden. Interpretiert man das Signal als tatsächliche Verschiebung, so bedeutet es eine Verkürzung der Abstände zur westlich gelegenen IGS-Station Oberpfaffenhofen, die als Referenzstation für die differentielle Auswertung der INSIDE-GNSS-Stationen verwendet wurde. Berechnet man das Verhältnis der Verschiebungsraten (ca. -4 mm/Jahr) zur Länge der Basislinie (ca. 20 km), so ergibt sich ein kompressiver Strain in der Größenordnung von $2 \cdot 10^{-7}$, was für eine seismisch wenig aktive Region recht hoch ist. Die Richtung der Kompressionsachse ist um 90° gedreht bezüglich der im Voralpenland herrschend Nord-Süd-Ausrichtung der maximalen horizontalen Spannungsrichtung, die durch die fortgesetzte Kollision der afrikanischen und der eurasischen Platte im Mittelmeerraum mit der daraus resultierenden Auffaltung der Alpen dominiert wird. Ein Blick auf einen Ausschnitt der Weltspannungskarte (Heidbach et al., 2018) zeigt allerdings eine lokale Anomalie östlich von München, die mit der aus den GNSS-Ergebnissen abgeleiteten Einengungsrichtung übereinstimmt (Abbildung 5).

Es ist darauf hinzuweisen, dass die bisher verwendete Netzgeometrie für eine akkurate Bestimmung von Verschiebungen oder Deformationen in Nord-Süd-Richtung nicht geeignet ist. Es wird empfohlen, zu diesem Zweck mindestens zwei weitere Referenzstationen in unterschiedlichen Richtungen einzubinden, um die drei Komponenten des horizontalen Straintensors zu bestimmen. Weitere Untersuchungen auf Basis längerer Zeitreihen sind daher notwendig, um in dieser Frage weiterzukommen.

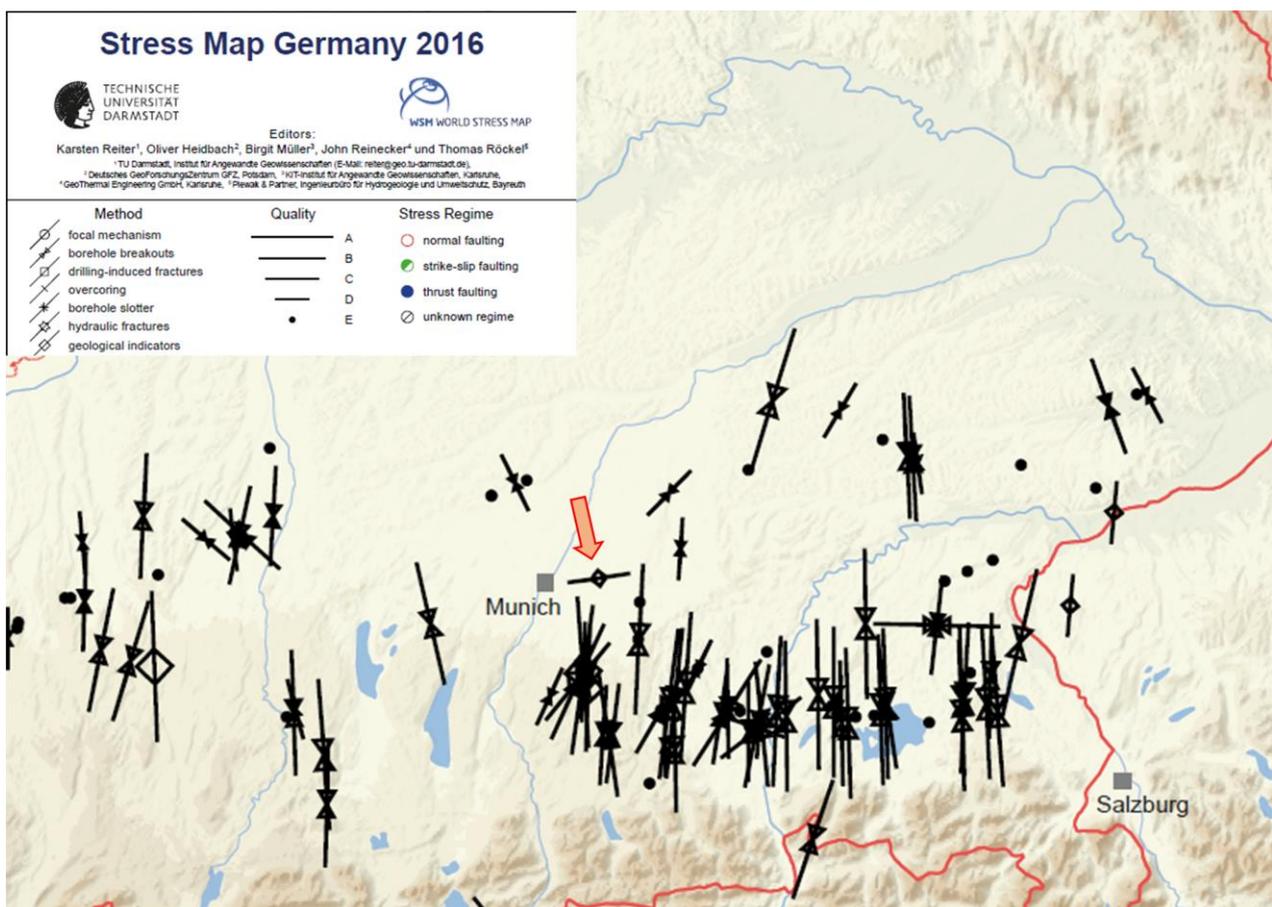


Abbildung 5: Ausschnitt aus der Weltspannungskarte. Die maximale horizontale Hauptspannung am Alpenrand ist in Nordsüdrichtung ausgerichtet und zeigt eine Einengungsbewegung durch die Kollision der eurasischen und afrikanischen Platte an. Östlich von München ist eine lokale Abweichung der Spannungsorientierung um 90° zu erkennen. Dies würde mit der scheinbaren Westbewegung der INSIDE-Stationen übereinstimmen, muss aber weiter untersucht werden.

1.4 SAR-INTERFEROMETRIE UND VERGLEICH C-BAND UND X-BAND

Grundlagen und Fragestellung

Die sogenannte „Auflösungszelle“ ist die physikalische Repräsentation eines Pixels im SAR-Bild. Es handelt sich um einen 2-dimensionalen Bereich auf der Erdoberfläche, dessen Abmessungen durch die räumliche Auflösung eines SAR-Systems als Funktion von Wellenlänge, Bandbreite und Einfallswinkel beschrieben werden. Die Kantenlänge einer Auflösungszelle ist um einen Faktor 10 – 100 größer als die Wellenlänge des Radarsignales, das mit kleinräumigen Bodenstrukturen in der Größenordnung weniger cm interagiert. Intensität und Phase des für die Zelle repräsentativen rückgestreuten Radarechos entstehen daher aus der vektoriellen Superposition der Echos von sehr vielen elementaren Rückstreuern innerhalb der Zelle.

Der Rückstreuprozess kann stochastisch beschrieben werden, aber nicht deterministisch modelliert werden. Intensität und Phase des Echos von nebeneinanderliegenden Zelle variieren daher in nicht vorhersagbarer Weise und überdecken die Nutzsignale. Einen Ausweg bietet die SAR-Interferometrie (InSAR), bei der zwei (oder mehrere) SAR-Aufnahmen voneinander abgezogen werden. Bei der Differenzbildung heben sich die Phasenteile durch die Rückstreuung heraus, sofern die Rückstreuereigenschaften zwar räumlich, aber nicht zeitlich variabel sind. Dies ist die Grundannahme der SAR-Interferometrie. Sofern zwischen beiden Aufnahmen, die mit einem zeitlichen Abstand und/oder leicht unterschiedlicher Position erfasst werden, Phasenteile wie z.B. Abstandsänderungen durch Bodendeformation oder Topographie auftreten, werden sie in der Differenz sichtbar.

In der Praxis ist die Zeitstabilität der Rückstreuereigenschaften nicht für jedes Pixel erfüllt. Aufgabe der multi-temporalen SAR-Interferometrie ist es, langzeitstabile Pixel zu detektieren, für die die zeitliche Variabilität unterhalb eines tolerierbaren Schwellwertes liegt. Dazu werden für jedes einzelne Pixel statistische Untersuchungen auf Basis großer SAR Bildstapel von mindestens 30 bis zu mehreren 100 Szenen durchgeführt. Die grundlegende Vorgehensweise wurde von Ferretti et al. (2001) entwickelt, zunächst für starke, punktförmige Rückstreuer (Persistent Scatterer, PS), deren Signal das Gesamtecho der Auflösungszelle dominiert. Die generische Persistent-Scatterer SAR-Interferometrie (PS.InSAR) durchläuft demnach folgende Schritte:

- (1) Wahl des Referenzbildes (Master), zu dem alle Phasendifferenzen gebildet werden
- (2) Koregistrierung
- (3) Erzeugung der differentiellen Interferogramme (Slave – Master)
- (4) Auswahl der PS-Kandidaten (PSC)
- (5) Geodätisches Netzwerk
- (6) Phasenabwicklung (unwrapping)
- (7) Atmosphärenfilterung
- (8) Finale Auswahl der PS-Punkte
- (9) Auswertung des Nutzsignales (ja nach Anwendung Deformation, Topographie oder Atmosphäre)
- (10) Geokodierung

Die Grundlage für die Anwendung der SAR-Interferometrie ist eine formelhafte Beschreibung der Phase, die geometrische und physikalische Einflüsse zugänglich macht. Abbildung 6 zeigt zwei Skizzen, an Hand derer geometrisch begründete Phasenteile berechnet werden können. Abbildung 6 (a) zeigt die Situation bei einem Lagefehler, der sich aus einem Höhenmodellfehler Δz und einer Abweichung Δx der Position des Streuzentrums (PS) von der Mitte der Auflösungszelle zusammensetzt. Ist der Lagefehler Null, so befindet sich der Rückstreuer an der Position (0,0) und $r_m(0,0)$ und $r_s(0,0)$ seien die Abstände zwischen Sensor und Streuer für Master und Slave. Diese lassen sich mit einem digitalen Geländemodell (DEM) und den Metadaten der beiden Aufnahmen (u.a. Orbitinformation, Referenzsystem) berechnen. Aus ihnen ergibt sich die sogenannte synthetische Phase, die man bei der Erzeugung differentieller Interferogramm subtrahiert:

$$\varphi_{synth} = \frac{4\pi}{\lambda} \cdot (r_m(0,0) - r_s(0,0)) \quad (1)$$

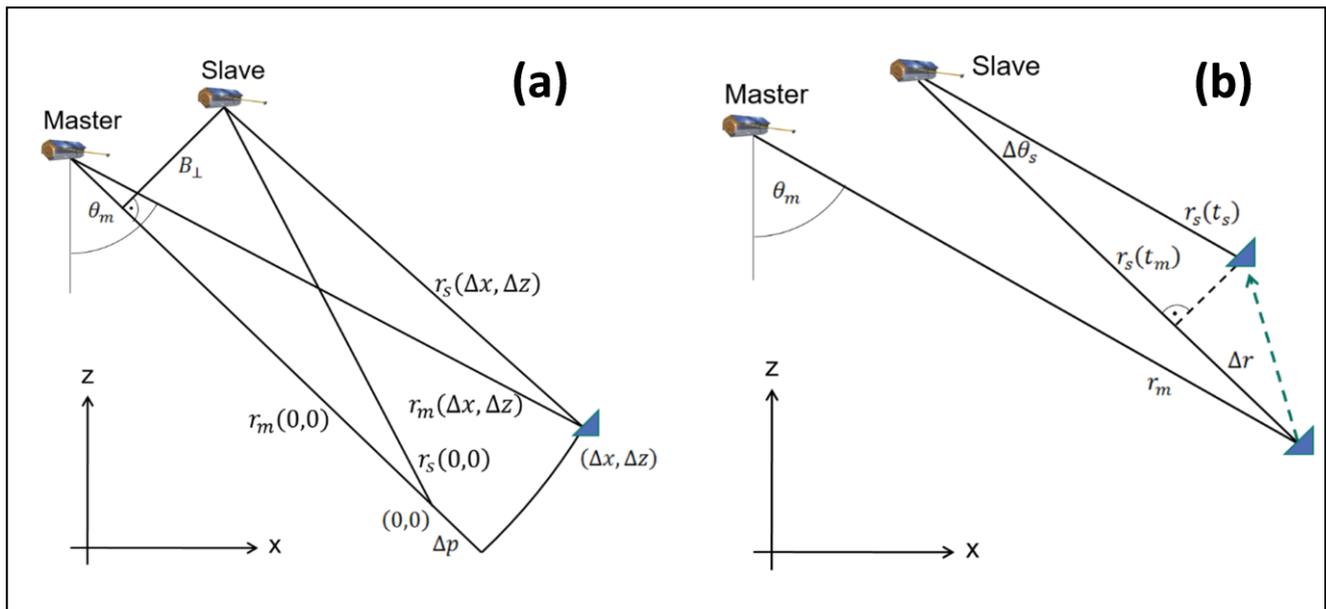


Abbildung 6: Aufnahmegeometrie der SAR-Interferometrie. (a) zeigt die Situation bei einem Höhenmodellfehler Δz und einer Abweichung Δx der Position des Streuzentrums von der Mitte der Auflösungszelle. (b) zeigt die Situation bei einer Verschiebung des Rückstreuers zwischen dem Zeitpunkt t_m der Masteraufnahme und dem Zeitpunkt t_s der Slaveaufnahme.

Ist die tatsächliche Position des Streuzentrums aber $(\Delta x, \Delta z)$, so ergibt sich in linearer Näherung

$$(r_m(\Delta x, \Delta z) - r_s(\Delta x, \Delta z)) - (r_m(0,0) - r_s(0,0)) \approx -\frac{B_{\perp}}{r_m(0,0)} \cdot \left(\frac{\Delta z}{\sin(\theta_0)} + \frac{\Delta p}{\tan(\theta_0)} \right) \quad (2)$$

Hierbei sind $r_m(\Delta x, \Delta z)$ und $r_s(\Delta x, \Delta z)$ die Abstände zum Sensor für Master und Slave, B_{\perp} die senkrechte Basislinie, θ_0 der Blickwinkel bzgl. $r_m(0,0)$ und $\Delta p = r_m(\Delta x, \Delta z) - r_m(0,0)$. Da sich der Lagefehler Δx und der Höhenmodellfehler Δz in Standardansatz nicht unabhängig voneinander bestimmen lassen (dies ist nur mit Zusatzinformationen möglich), wird im Allgemeinen $\Delta x = 0 \rightarrow \Delta p = 0$ gesetzt. Damit wird der vergleichsweise kleine Lagefehler in den Höhenfehler subsummiert.

Abbildung 6 (b) zeigt die Situation, wenn sich der Streuer zwischen dem Zeitpunkt t_m der Masteraufnahme und dem Zeitpunkt t_s der Slaveaufnahme verschoben hat. Die Projektion der Verschiebung auf die Sichtlinie entspricht einer Änderung des Signalwegs um Δr . Hinzu kommen troposphärische Einflüsse. Die Interferogrammphase kann damit wie folgt zerlegt werden:

$$\varphi_m - \varphi_s - \varphi_{synth} = -\frac{4\pi}{\lambda} \cdot \left(\frac{B_{\perp}}{r_m(0)} \cdot \left(\frac{\Delta z}{\sin(\theta)} + \frac{\Delta p}{\tan(\theta)} \right) + \Delta r \right) + \alpha_m - \alpha_s + n \quad (3)$$

φ_m und φ_s sind die Phase des Master bzw. des Slave und λ ist die Wellenlänge. α_m und α_s sind die troposphärische Verzögerungen zum Zeitpunkt der Masteraufnahme und zum Zeitpunkt des Slave. Alles, was soweit nicht beschrieben ist, ist im Rauschterm n zusammengefasst, unter anderem die Zeitvariabilität der Rückstreuereigenschaften.

Die PSI Deformationsanalyse ist ein mehrstufiges Verfahren, basierend auf der Separation der verschiedenen Signalanteile. Zunächst gilt es, den Rauschterm n zu isolieren und statistisch zu analysieren. Dazu werden zunächst PS-Kandidaten (PSC) auf Basis eines einfachen Kriteriums ausgewählt. Ferretti et al. (2001) schlagen dazu den Amplitudendispersionsindex D_A vor:

$$D_A = \frac{\sigma_A}{\mu_A} \quad (4)$$

mit: μ_A = zeitlicher Mittelwert der Signalamplituden eines Pixels, σ_A = Standardabweichung der Amplitudenwerte. Dabei wird über alle k Interferogramme gemittelt, die sich aus dem Bildstapel generieren lassen.

Für kleine Werte $D_A \lesssim 0.25$ ist der Dispersionsindex ein adäquates Proxy für ein geringes Phasenrauschen (Ferretti et al., 2001); Pixel, für die diese Bedingung zutrifft, werden als PSC bezeichnet, Pixel mit größeren D_A -Werten werden zunächst nicht berücksichtigt.

Für die PSC wird ein einfaches, meist zeitlich lineares Modell für den deformationsabhängigen Anteil der interferometrischen Phase $\phi = \phi_m - \phi_s$ angesetzt:

$$\phi_{x,defo}^k = -\frac{4\pi}{\lambda} T_k \cdot \Delta v_x \quad (5)$$

mit: k = Interferogrammindex, x = PSC-Index, T = zeitlicher Abstand zwischen Master und Slave des k -ten Interferogramms, Δv = Verschiebungsrate mit $T \cdot \Delta v = \Delta r$.

Ebenso wird ein Modell des Lage- und Höhenmodellfehlers angesetzt ($\Delta x = 0$) mit:

$$\phi_{x,topo}^k = -\frac{4\pi}{\lambda} \cdot \frac{B_{\perp,k,x}}{r_{m,x}(0) \cdot \sin(\theta_x)} \cdot \Delta z_x \quad (6)$$

Ein Modell für die troposphärische Verzögerung wird im Allgemeinen nicht angesetzt, da die Wettermodelle derzeit noch keine ausreichende räumliche und zeitliche Auflösung besitzen. Optimale Werte für die Unbekannten Δv_x und Δz_x werden mittels der zeitliche Kohärenz geschätzt:

$$\operatorname{argmax}_{\Delta v, \Delta z} \left\{ |\gamma_x| = \frac{1}{N} \cdot \left| \sum_{k=1}^N \exp \left(i \cdot (\phi_x^k - \phi_{x,defo}^k - \phi_{x,topo}^k) \right) \right| \right\} \quad (7)$$

Die optimierten Modelle werden von der beobachteten Phase ϕ abgezogen. Anschließend werden die atmosphärischen Verzögerungen unter Annahmen über das zeitliche und räumliche Verhalten der Atmosphäre über eine Kombination aus Hoch- und Tiefpassfiltern isoliert.

Dazu wird zunächst eine Phasenabwicklung (*phase unwrapping*) durchgeführt, um Phasensprünge, die ganzzahligen Vielfachen von 2π entsprechen, zu entfernen. Basierend auf der abgewickelten Phase kann nun der *Atmospheric Phase Screen* (APS) geschätzt werden. Im InSAR-Kontext wird unter APS nicht nur der Beitrag der troposphärischen Verzögerung zur Phase verstanden, sondern generell Anteile, die räumlich korreliert und zeitlich unkorreliert sind, wie sie z.B. auch durch Orbitfehler verursacht werden. Um starke Gradienten des APS auf Grund signifikanter Topographie oder zeitliche Muster wegen meteorologischen Änderungen im Jahresgang zu mildern, ist es hilfreich, eine APS-Korrektur mit Hilfe von Wetterdaten durchzuführen. Sie ist aber nicht präzise genug, so dass in jedem Fall eine raum-zeitliche Filterung durchgeführt wird, um verbliebene Anteile des APS zu separieren.

Im zweiten Schritt werden der APS auf die Pixelabstände des ursprünglichen Interferogramms interpoliert und von der Originalphase abgezogen. Anschließend wird ein neues Ensemble von PSC bestimmt. Man geht davon aus, dass nach Abzug der Atmosphäreneinflüsse mehr PSC von besserer Qualität gefunden werden. Anschließend wird für jeden PSC erneut die zeitliche Kohärenz maximiert. PS-Kandidaten oberhalb eines

vorgegebenen Schwellwertes (z.B. $\gamma = 0.75$) werden als PS ausgewählt. Im dritten Schritt können nun für jeden PS $\phi_{x,topo}^k$ und APS von der Originalphase abgezogen und der Deformationsanteil analysiert werden. In der Praxis werden Modellierung und Filterung nicht direkt auf den Phasenwerten, sondern auf Phasendifferenzen zwischen benachbarten PSC ausgeführt (\rightarrow geodätisches Netzwerk), um Störeinflüsse von Beginn an zu reduzieren. Das Netzwerk kann auch dazu genutzt werden, die Verteilung der PSC zu optimieren.

Es ist zu erwähnen, dass die SAR-Szenen vor einer PSI Analyse aus signaltheoretischen Erwägungen in beiden Koordinatenrichtungen um den Faktor 2 überabgetastet werden. Dadurch verdoppelt sich die räumliche Auflösung annähernd; während die nominelle Auflösung von Sentinel-1 im IW-Modus pauschal mit 20 m in Flugrichtung und 5 m in Seitwärtsrichtung angegeben wird, beträgt die effektive Pixelgröße im PSI Analyseergebnis über Mitteleuropa, abhängig vom Einfallswinkel des Signals, 13.9 m und 2.7 m. Nach der eigentlichen PS-Analyse stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung, um die detektierten PS Kohärenzbasiert oder mittels anderer Qualitätsparameter auszudünnen. Insbesondere über urbanen Gebieten stehen im Normalfall ausreichend viele PS-Punkte zur Verfügung, sodass es Sinn macht, nur Punkte höchster Qualität zu verwenden. Im ländlichen Bereich wird man häufig die Ansprüche senken, um eine genügend hohe Punktdichte zur räumlichen Erfassung eines Deformationsereignisses zu gewährleisten. Durch diese Maßnahmen kann die Anzahl der PS-Punkte bei gleicher Ausgangslage deutlich variieren; beim EGMS ist die Punktdichte der Produkte in LoS über Deutschland deutlich höher als beim BBD. Eine qualitätsbasierte Überprüfung von Messpunkten, verbunden mit einer Ausreißerdetektion und –eliminierung ist auch bei anderen geodätischen Verfahren wie GNSS und Nivellement üblich.

Seit der Veröffentlichung von Ferretti et al. (2001) wurde eine Reihe von unterschiedlicher Implementierungen des PS-Verfahrens entwickelt und auf den Markt gebracht. Sie unterscheiden sich in der Vorgehensweise bei der Auswahl der PSC, der finalen Festlegung der PS, den Modellansätzen, dem Unwrapping-Algorithmus oder den Filter- und Analyseparametern. Je nach Vorhandensein können Zusatzinformationen, z. B. modellgestützte (Teil-)korrekturen troposphärischer Einflüsse, hochaufgelöste Digitale Geländemodelle oder modellgestützte Unwrappingverfahren hinzugezogen werden. Weiterentwicklungen der multi-temporalen SAR-Interferometrie betreffen die kombinierte Verwendung von punktförmigen (PS) und flächenhaften Rückstreuern (Distributed Scatterer, DS), bei denen eine Vielzahl von Rückstreuern in der Auflösungszelle zum langzeitstabilen Signal beiträgt (Ferretti et al., 2011; Even et al. 2018) oder die Verwendung von Rückstreuern, die nur in einem Teil des Datenstapels als stabil betrachtet werden können (Dörr et al., 2022).

Mit den verschiedenen Implementierungen und Erweiterungen werden die Ergebnisse einer PS-Analyse abhängig von der gewählten Software und/oder den gewählten Einstellungen der Analyseparameter. Diese oft als Prozessierungsrauschen bezeichnete Unsicherheit addiert sich auf den Rauschterm n . Dies trägt dazu bei, dass das Messrauschen in PSI-Zeitreihen um einen Faktor 5 – 10 größer ist als dies für ein kleinräumiges Präzisionsnivellement der Fall ist. Es ist jedoch festzuhalten, dass die Unsicherheit in den PSI-Ergebnissen unabhängig von der Analysemethode und bei Kenntnis-basierter Einstellung der Parameter im Allgemeinen unterhalb von 5 mm liegt und damit geringer ist als diejenige von GNSS-Messungen. Aufgrund der Stochastizität der Rauschanteile kann der Messfehler bei einzelnen PS-Punkten jedoch größer sein. Problematisch kann es werden, wenn die zeitlichen oder räumlichen Verschiebungsgradienten Werte von $\lambda/4$ pro Aufnahmeintervall beziehungsweise $\lambda/4$ pro Pixelabstand erreichen, weil dann die Gefahr von Fehlern in der Phasenabwicklung zunimmt.

Aufgabe des GIK im Projekt INSIDE war es, die PSI Ergebnisse anderer Institutionen (DLR, BBD, EGMS) mit eigenen Analysen zu vergleichen und gegenseitig zu validieren. Hauptfragestellungen sind:

- Für welche Teilaufgaben bei der Bestimmung und Überwachung des Einwirkungsbereiches sowie des erweiterten Einwirkungsbereiches lohnt sich der Einsatz der für kommerzielle Anwendung kostenintensiven TerraSAR-X Daten? Welche dieser Aufgaben können ohne Einbuße an Aussagekraft mit den kostenfreien Sentinel-1 C-Band Daten erledigt werden?
- Welche Rolle können die für alle Anwendungen kostenfreien Produkte der Bodenbewegungsdienste BBD und EGMS bei der Erfüllung dieser Aufgaben übernehmen? Der große Vorteil dieser Produkte ist, dass neben den frei verfügbaren Sentinel-1 Bildern auch keine Aufwendungen für die PS-Prozessierung notwendig sind.

PSI Auswertansatz am GIK

Am GIK wird mit Software-Paketen gearbeitet, die unter der Lizenz GNU GPL v3.0 zur freien Verfügung, Erweiterung und Re-distribution zur Verfügung stehen:

- SNAP (*Sentinel Application Platform*): Frei verfügbare Toolbox der ESA zur Vorverarbeitung der SAR-Bilder von Sentinel-1, aber auch anderen Satellitenmissionen im C-, X- und L-Band. Quelle: <https://step.esa.int/main/download/snap-download/>
- StaMPS (*Stanford Method for PS*): Open Source Programmpaket für multi-temporale SAR-Interferometrie, implementiert in Matlab, einer proprietären, skript-basierten Softwareumgebung zur Lösung mathematischer Probleme und der graphischen Darstellung der Ergebnisse. StaMPS ist für den Import von Interferogrammen aus verschiedenen Vorverarbeitungsprogrammen (ISCE, GAMMA, SNAP, DORIS + ROI_PAC) geeignet. Quelle: <https://github.com/dbekaert/StaMPS>; Referenzen: Hooper et al. (2004), Hooper et al. (2007), Hooper et al. (2008)
- Train (*Toolbox for Reducing Atmospheric InSAR Noise*): Open source Programmpaket zur Einbindung aktueller Methoden für troposphärische Korrekturen in die PSI Prozessierungskette. TRAIN ist Matlab-basiert und kompatibel mit StaMPS. Quelle: <https://github.com/dbekaert/TRAIN>; Referenzen: Bekaert et al. (2015a), Bekaert et al. (2015b)

Die Programmpakete StaMPS und TRAIN sind sehr flexibel einsetzbar und ermöglichen die Entwicklung und Einbindung eigener Ansätze und Subroutinen in die Prozessierungskette, was für wissenschaftliche Anwendungen sehr vorteilhaft ist.

Am GIK wird die Vorverarbeitung der SAR-Bilder mit SNAP durchgeführt. Sie umfasst unter anderem die folgenden wesentlichen Schritte:

- Zuschnitt der Bilder auf das unmittelbare Messgebiet zur Reduzierung des Prozessierungsaufwandes. Für Sentinel-1 Bilder, die mit dem speziellen ScanSAR-Modus TOPSAR (*Terrain Observation with Progressive ScanSAR*) erfasst wurden, beinhaltet dies Auswahl und gegebenenfalls Kombination geeigneter Beobachtungstreifen (*subswath*) und Aufnahmesequenzen (*burst extraction*). Das Datenhandling wird mit GIK-eigenen Python-Skripten unterstützt.
- Auswahl der Masterszene, die von allen anderen Aufnahmen zur Interferogrammbildung abgezogen wird. Dabei werden unter anderem Wetterdaten hinzugezogen, um Aufnahmesituationen bei Extremwetterlagen, Schneebedeckung oder hohe Luftfeuchtigkeit zu vermeiden. Für die Analyse der INSIDE-Daten wurden Aufnahmen am 11.09.2021 im absteigenden Orbit und 11.02.2023 im aufsteigenden Orbit als Master ausgewählt.
- Koregistrierung aller Szenen eines Orbits auf die entsprechende Masterszene mit state-of-the-art Verfahren.
- Subtraktion langwelliger topographischer Phasenanteile mit Hilfe des SRTM1-Geländemodelles.
- Interferogrammbildung und Transformation aus Radarkoordinaten in geographische Koordinaten (*geocoding*).

Im Anschluss wird eine PSI-Analyse mit StaMPS durchgeführt. Die Software ist vollständig mit Matlab-Skripten organisiert, sodass sie beliebig überprüft, verändert und erweitert werden kann. Am GIK steht eine Reihe von zusätzlichen Subroutinen zur Verfügung, unter anderem zur Vorprozessierung von Distributed Scatterern (DS) sowie der gemeinsamen Analyse von PS und DS (Even, 2019).

StaMPS unterscheidet sich in zwei wichtigen Punkten von der allgemeinen Vorgehensweise nach Ferretti et al. (2001). Zur Isolierung des Rauschanteils n in der interferometrischen Phase (2) wird kein explizites Deformationsmodell verwendet, um zu vermeiden, dass residuale Deformationen, die durch die a-priori Modelle nicht adäquat beschrieben werden, in den Rauschterm gedrückt werden und das Auffinden von geeigneten PSC erschweren. Stattdessen wird die Deformationsphase zusammen mit anderen räumlich korrelierten Phasenanteilen über einen adaptiven Tiefpassfilter entfernt. Die PS werden nicht über die zeitliche Kohärenz

(Gl. (7)), sondern mittels einer eigenständigen statistischen Analyse des Phasenrauschens ausgewählt (Hooper, 2007).

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die gewählte Einstellung einiger wichtiger Parameter für die PS-Analyse in StaMPS. Da in den TerraSAR-X Analyseergebnisse der DLR sowie den C-Band Produkten von BBD und EGMS nur langzeitstabile Punktstreuer (PS) verwendet wurden, wurde aus Gründen der besseren Vergleichbarkeit auf die ursprünglich geplante gemeinsame Prozessierung von PS und DS in StaMPS verzichtet.

Tabelle 1: Einstellung einiger wichtiger StaMPS-Analyseparameter der PS-Prozessierung am GIK

| Parameter | default | gewählt | Beschreibung |
|------------------|---------|---------|---|
| max_topo_error | 20 | 30 | Maximaler unkorrelierter DEM error (in m). Innerhalb des Bereichs 0 – 30 m werden Korrekturwerte Werte für die PS-Punkthöhe bestimmt. |
| filter_grid_size | 50 | 100 | Gittergröße für die Filterung räumlich korrelierter Phasenanteile. |
| clap_win | 32 | 64 | CLAP (Combined Low-pass and Adaptive Phase): Angabe für den Durchlassbereich des 2-D adaptiven Tiefpassfilters zur Isolierung des Phasenrauschens n (Pixel x Pixel). |
| unwrap_grid_size | 200 | 100 | Gittergröße für die Phasenabwicklung. |
| unwrap_time_win | 730 | 183 | Durchlassbereich in Tagen für einen Gauss-Tiefpassfilter zur Glättung der Phasendifferenz benachbarter Pixel. Unterstützt die Phasenabwicklung. |
| scn_time_win | 365 | 720 | Zeitlicher Hochpass zur Abspaltung langwelliger Phasenanteile vom troposphärischen Phasenterm. |
| scn_wavelength | 100 | 2000 | Räumlicher Tiefpass zur Abspaltung des Rauschanteils vom atmosphärischen Phasenterm |
| tropo_method | a_l | a_l | lineare troposphärische Korrektur auf der Basis von TRAIN |
| scla_deramp | n | y | Subtraktion einer Phasenrampe vor der Phasenabwicklung |

Ergebnisse: Vergleich C- und X-Band

Abbildung 7 zeigt einen Überblick der Punktdichte aus einer PS-Analyse eines TerraSAR-X Stapels von Nov. 2015 bis Dez. 2021 (DLR, aufsteigender Orbit) und eines Sentinel-1 C-Band Stapels über den Zeitraum Okt. 2014 bis April 2020 (GIK, aufsteigender Orbit). Großräumig betrachtet sieht das Ergebnis sehr ähnlich aus. Die städtischen Bereiche von München und der umliegenden Gemeinden sind homogen von PS-Punkten abgedeckt. Über Waldgebieten und landwirtschaftlich genutzten Flächen werden keine langzeitstabilen Rückstreuer gefunden, da sich hier die Rückstreuereigenschaften wegen des Pflanzenwachstums und ständigen Veränderungen durch Wind und Wasser in nicht präzifizierbarer Weise ändern. Zu beachten ist, dass ein westlicher Streifen des Münchner Stadtgebietes sowie der Bereich um die Bohrung TH3 in Pullach vom TerraSAR-X Orbit nicht abgedeckt ist, sodass dort keine PS gefunden werden können.

Die Unterschiede in Punktdichte und -verteilung, die mit beiden Datensätzen erreicht werden, werden sehr deutlich in dem in Abbildung 8 gezeigten Ausschnitt über dem östlichen Rand der Gemeinde Grünwald bei München. Die nominelle räumliche Auflösung der Sentinel-1 Radarszenen (5 x 20 m) ist um einen Faktor 10 geringer als bei TerraSAR-X Szenen im *Stripmap*-Aufnahmemodus (3 x 3 m), was sich in der Punktdichte sehr deutlich widerspiegelt. Zudem besteht die Gefahr, dass in einer großen Auflösungszelle nicht nur ein einzelner, sondern mehrere punktförmige, langzeitstabile Rückstreuer großer Intensität aktiv sind. Das kann zu Interferenzen führen, die sich aufgrund der wechselnden Aufnahmegeometrie durch unterschiedliche Satellitenkonstellationen zeitlich verändern, sodass der Auswertalgorithmus das von der Zelle zurückgestreute Signal unter Umständen als nicht stabil bewertet. Solche geometrischen Dekorrelationen könnten eine Ursache dafür sein, dass im Bereich des Forsthauses Wörnbrunn am östlichen Bildrand, wo sich die seismische Station WRBU befindet, 32 X-Band PS, aber kein einziger C-Band PS gefunden werden. Auf der anderen Seite reagieren X-Band-Aufnahmen empfindlich auf Dekorrelationseffekte wie Wasserdampfvariationen in der Troposphäre oder geringfügige Veränderungen der Oberflächenstruktur. Die endgültige Anzahl der verwendeten PS-Punkte im C- und X-Band-Bereich hängt daher von der jeweiligen Aufnahmesituation sowie von den Auswahl- und Qualitätskriterien der Datenanalyse ab.

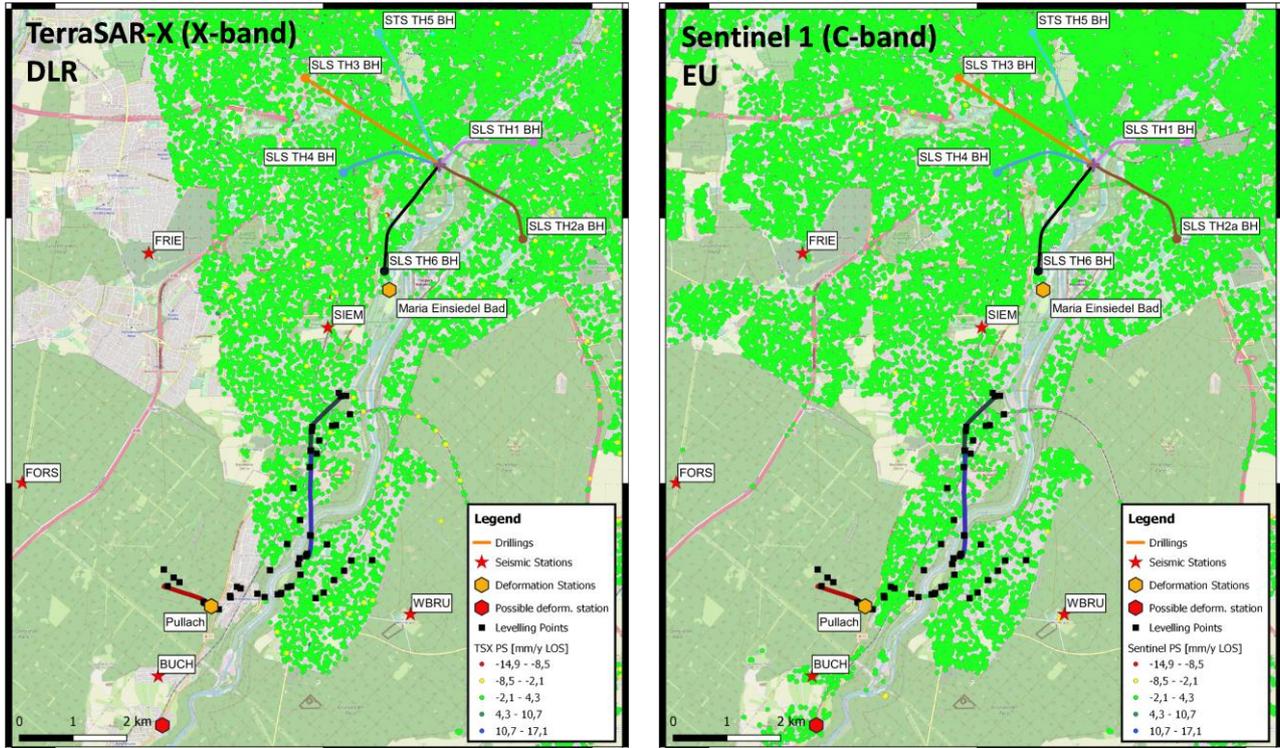


Abbildung 7: Vergleich der Überdeckung und PS-Punktdichten der TerraSAR-X-Analyse des DLR und der Sentinel-1-Analyse des GIK

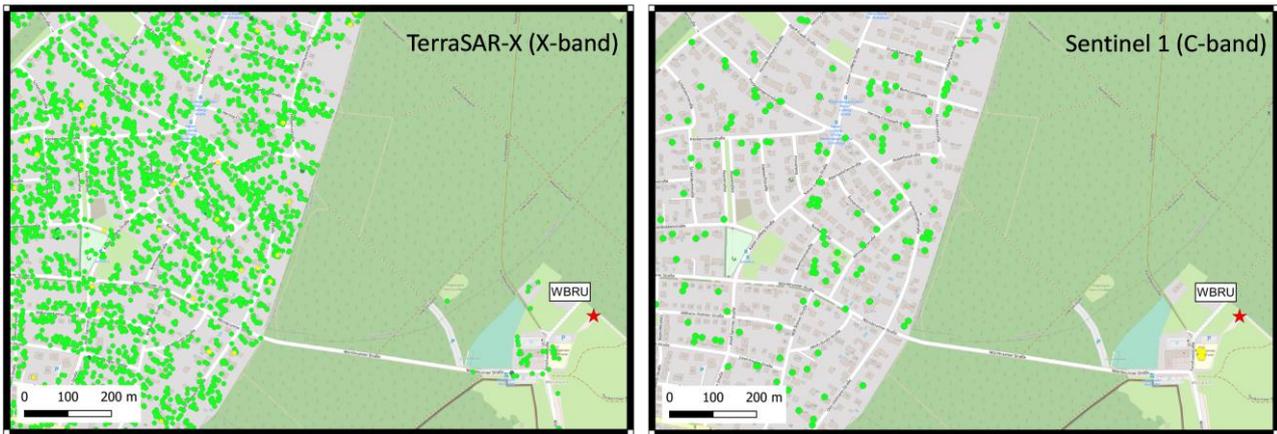


Abbildung 8: Der Ausschnitt (Gemeinde Grünwald) zeigt exemplarisch die deutlich höhere räumlich Auflösung der X Band-Satelliten TerraSAR-X und Tandem-X gegenüber den C-Band Satelliten Sentinel-1 a und b. WBRU ist das Kürzel für die seismische Station Wörnbrunn.

Abbildung 9 zeigt die gesamte Zeitreihe für einen PS-Punkt im X-Band, der sich am Betriebsgebäude in Maria-Einsiedel-Bad in unmittelbarer Nähe zur GNSS-Antenne etabliert. Die Standardabweichung des Rauschanteils beträgt 2 mm und ist damit deutlich geringer als das Rauschen in den GNSS-Zeitreihen der Tagesmittelwerte. Die rote Linie zeigt eine lineare Verschiebungsrate von $+0.7\text{ mm/Jahr}$ an diesem Punkt, die standardmäßig von den Auswertelgorithmen aus den PS-Zeitreihen bestimmt und für jeden PS in Form von Übersichtskarten der Verschiebungsraten bzw. Punktgeschwindigkeiten dargestellt wird. Eine genauere Betrachtung zeigt jedoch, dass eine lineare Rate kein gutes Modell für diese Zeitreihe ist. Stattdessen scheint die Verschiebungsrate in den ersten drei Jahren bei ca. $+1\text{ mm/Jahr}$ gelegen zu haben, während es für den zweiten Abschnitt keine Hinweise auf Bodenbewegungen gibt. Das wird von den GNSS-Zeitreihen der Station GBAD bestätigt, die für den Zeitraum ab März 2021 keine, oder nur sehr geringe Verschiebungen anzeigen (vergl. Abbildung 2). Zu beachten ist, dass die TerraSAR-X Zeitreihe Bewegungen in Schrägentfernung (LoS) anzeigt und daher nicht direkt mit den horizontalen oder vertikalen GNSS-Verschiebungskomponenten verglichen werden kann.

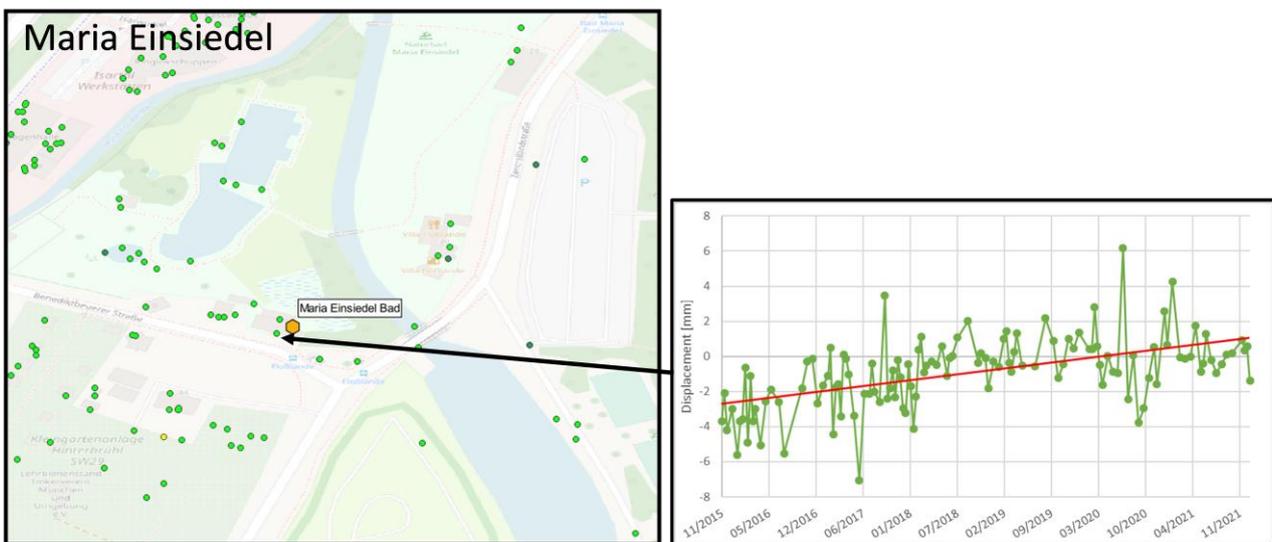


Abbildung 9: Exemplarische X-Band Zeitreihe für einen PS-Punkt in unmittelbarer Nähe der GNSS-Antenne an der Station Maria-Einsiedel-Bad.

Abbildung 10 zeigt ein Beispiel für das Potential von PSI-Analysen im X-Band Bereich für die Überwachung sensibler Anlagen innerhalb des Einwirkungsbereiches. Auf dem Betriebsgelände der Geothermieanlage Kirchstockach etablieren sich 134 PS-Punkte. Die höchste Punktdichte mit einer sehr regelmäßigen Verteilung findet sich auf zwei langgestreckten, rechteckigen Strukturen nahe der südwestlichen (S1) und nordwestlichen (S2) Grenzen des Betriebsgeländes. Es handelt sich dabei um Metalldächer, die auf einer Konstruktion aus Metallstreben ruhen. Auf den Dächern befinden sich in Doppelreihe Ventilatorschächte mit einem Durchmesser von ca. 6 m, 28 Schächte auf der größeren Struktur im Südwesten und 14 Schächte auf der nordwestlichen Struktur (Abbildung 11). Die Ventilatorschächte stellen sehr gute Radarreflektoren dar, was sich an den in regelmäßigen Abständen angeordneten PS-Punkten gut nachvollziehen lässt.

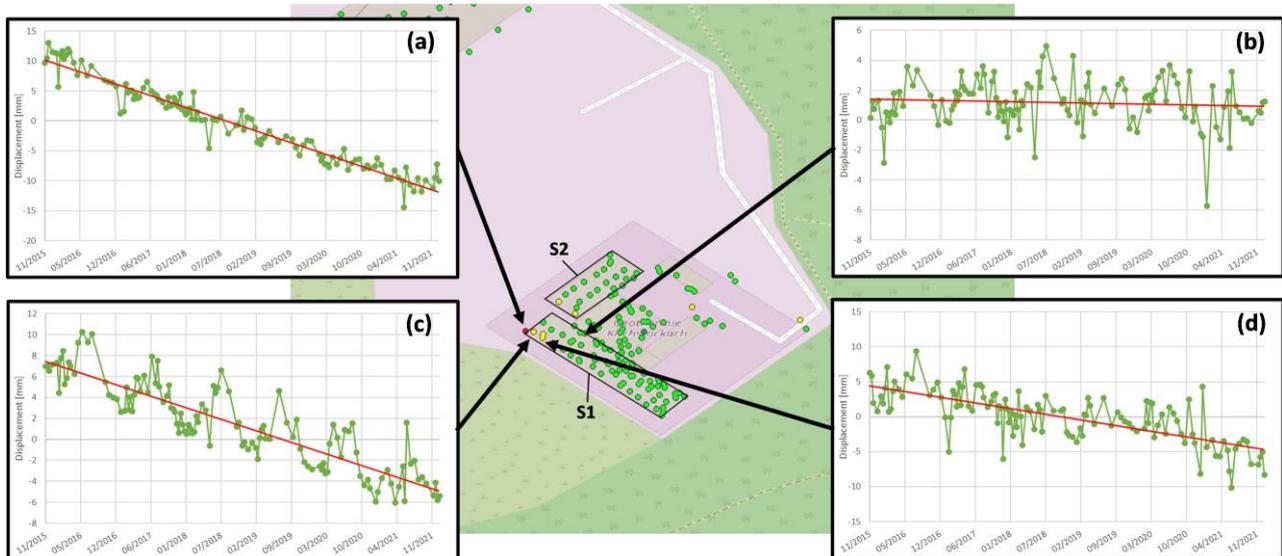


Abbildung 10: Lage von PS-Punkten aus der X-Band-Analyse des DLR sowie einige Zeitreihen für die Geothermieanlage Kirchstockach. An der westliche Ecke einer Metalldachkonstruktion (vergl. Abbildung 11) vergrößert sich der Abstand zum Satelliten kontinuierlich. Da es sich um *Line-of-sight* (LoS) Ergebnisse von Aufnahmen aus dem aufsteigenden Satellitenorbit handelt, kann die Zunahme durch eine ostwärts und/oder abwärts gerichtete Verschiebung erklärt werden. Unter Berücksichtigung der speziellen Konstruktion handelt es sich vermutlich um eine lokale Absenkung auf Grund von Setzungenbewegungen oder Gebäudeinstabilitäten.

Die Zeitreihen der meisten dieser PS-Punkte zeigen nur geringe und nicht-signifikante Verschiebungsraten und damit stabile Verhältnisse an (Abbildung 10 (b)), diese Punkte sind auf der Karte als grün eingefärbte Kreise markiert. Das Datenrauschen, gemittelt über alle PS-Punkte auf der Anlage, liegt bei 1.7 mm. Gelbe und rote Farben markieren höhere Verschiebungsraten. Dies ist bei insgesamt 8 Punkten der Fall, Beispiele werden in Abbildung 10 (a, c, d) gezeigt. Die größten Raten von bis zu $-3,7 \text{ mm/Jahr}$ treten an der westlichen Ecke von Struktur S1 auf. Die Zeitreihe in Abbildung 10 (c) enthält jährliche Variationen einer Amplitude von ca. 3 mm, wobei das Maximum in den Sommermonaten auftritt. Es liegt nahe, diese Beobachtung mit einer thermischen Expansion der Metallstruktur, bedingt durch die jahreszeitlichen Schwankungen der Temperatur, zu erklären. Allerdings ist der Effekt nicht in allen Zeitreihen mit der gleichen Größenordnung erkennbar.

Obwohl die verwendeten TerraSAR-X Zeitreihen Verschiebungen in Schrägentfernung repräsentieren, kann man davon ausgehen, dass die hohen Raten durch Absenkungsbewegungen hervorgerufen werden. Vermutlich handelt es sich um eine Setzungserscheinung durch eine punktuelle Instabilität des Baugrundes oder der Struktur selbst. Insgesamt zeigt dieses Beispiel, dass sich PS-Punkte, die aus einer Analyse von TerraSAR-X-Daten hervorgehen, Gebäuden eindeutig zuordnen lassen und es ermöglichen, auch Bewegungen von Gebäudeteilen

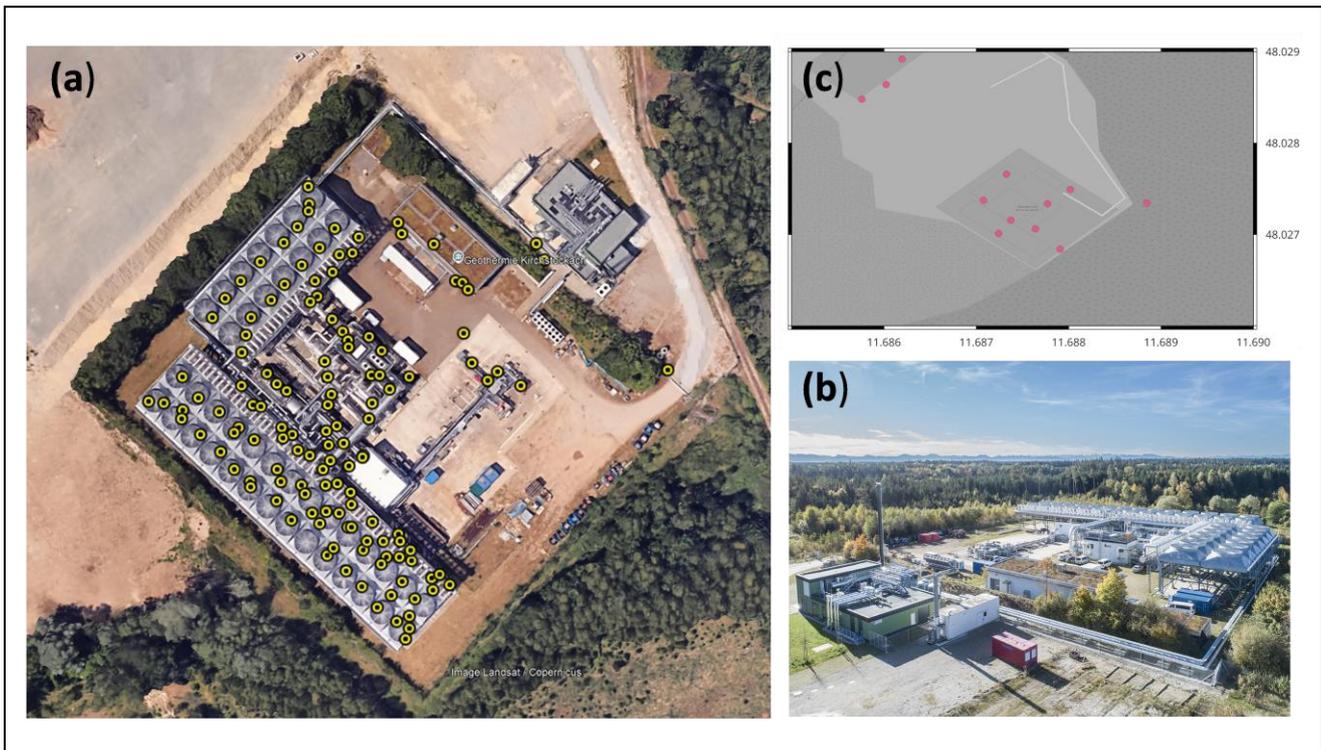


Abbildung 11: Blick auf die Konstruktion der Hallendächer der Anlage Kirchstockach ((a), (b)). Auf dem Metalldach sind in regelmäßigen Abständen Ventilatorschächte angeordnet, die als gute Rückstreuer fungieren und mit wenigen Ausnahmen durch PS-Punkte belegt sind. Das Beispiel macht deutlich, dass sich die Ergebnisse einer multitemporalen Analyse von TerraSAR-X-Daten eindeutig Gebäuden oder Gebäudeteilen zuordnen lassen (das vorgelagerte Gebäude ist neueren Datums und wurde erst während der Akquisition des Datenstapels errichtet). TerraSAR-X Interferometrie ist damit sehr gut geeignet, um sensible Anlagen innerhalb des (erweiterten) Einwirkungsbereiches zu überwachen. (c) zeigt die Lage von PS-Punkten aus der C-Band-Analyse des GIK in LoS für den aufsteigenden Orbit. Es etablieren sich deutlich weniger Punkte; sie lassen eine Überwachung der Anlage insgesamt, aber nicht einzelner Gebäude zu. Bildquellen: (a) Google, Landsat Copernicus, (b) SWM.

mit hoher Signifikanz und enger zeitlicher Beobachtungsrate von 11 Tagen zu verfolgen. Dass diese Beobachtungen in Schrägentfernung stattfinden, ist für das Monitoring zweitrangig. Zudem besteht die Möglichkeit, SAR-Aufnahmen aus auf- und absteigenden Orbits zu kombinieren und damit Bewegungen in vertikaler und horizontaler Richtung zu bestimmen. Die geometrische Orbitkombination dürfte bei TerraSAR-X in urbanen Bereichen ab Gittergrößen von $5 \times 5 \text{ m}$ sinnvoll möglich sein. Die reduzierte räumliche Auflösung ließe damit bei größeren Gebäude oder Anlagen wie im gegebenen Beispiel eine Zuordnung der PS zu Gebäuden oder Gebäudeteilen weiterhin zu. Erfahrungsgemäß reduziert sich das Datenrauschen durch räumliche Mittelbildung bei der Interpolation auf das Gitter, sodass X-Band PSI ohne Einschränkung nach MarksbergV für die Überwachung empfindlicher baulicher Anlagen geeignet ist.

Im Ergebnis der Sentinel-1-Analyse am GIK ist die Geothermieanlage durch acht PS-Punkte abgedeckt (Abbildung 11 (c)). In den Webportalen des BBD und des EGMS sind größere LoS-Punktmengen abrufbar, was an unterschiedlich gewählten Qualitätskriterien liegt. Nach dem Daten-Download hat der Nutzer die Möglichkeit, Qualität und Dichte der PS-Punkte über die Kohärenz zu steuern. Die Verteilung der PS-Punkte im C-Band ist jedoch in keinem Fall so regelmäßig wie in den X-Band Ergebnissen. Im C-Band lässt sich die Anlage insgesamt überwachen, eine explizite Zuordnung der Punkte zu bestimmten Strukturen oder Gebäudeteilen ist jedoch nicht im gleichen Maße möglich. Wie in den folgenden Abschnitten gezeigt werden wird, ist C-Band stattdessen für ein flächenhaftes Monitoring großräumiger Bodenbewegungsereignisse geeignet, wie sie durch den Betrieb von Geothermieanlagen zu erwarten sind.

1.5 ERGEBNISSE DES TRANSPONDEREXPERIMENTS

Auswertungsansatz

Bei der interferometrischen Prozessierung verhalten sich die vom Transponder gesendeten Signale wie ein langzeitstabiler Rückstreuer (PS-Punkt) mit dem Unterschied, dass seine Lage im Gegensatz zu derjenigen natürlicher Rückstreuer genau bekannt und einmessbar ist. Um „Transponder“-PS zu bewerten, wurde die Stärke und Stabilität der Amplituden ausgewertet sowie eine Analyse der Phasenstabilität durchgeführt. Dazu wurde wie folgt vorgegangen:

- Zu jeder untersuchten Aufnahmeconfiguration wurden alle verfügbaren Sentinel-1-Aufnahmen im Beobachtungszeitraum mit SNAP interferometrisch prozessiert und zum Einlesen für StaMPS exportiert.
- Für jeden Stapel wird ein Bild der mittleren Amplituden generiert.
- Um die Position des Reflektors im Bildraaster zu bestimmen, wurde aus dem Mittlere-Amplituden-Bild ein Detail ausgeschnitten, so dass in seinem Zentrum die von SNAP herausgeschriebenen geographischen Koordinaten mit den eingemessenen des Reflektors übereinstimmen. Entsprechend der Positionierungsgenauigkeit der SAR-Daten findet sich in einem gewissen Abstand zum Zentrum eine Gruppe mit einigen sehr hellen Pixeln, die durch den Reflektor erzeugt wurden. Bei Transpondern kann eine geringe Fehlpositionierung hinzukommen, die durch den Zeitunterschied zwischen Detektion des Signals des Satelliten und Aussenden des verstärkten Signals durch den Transponder entsteht.
- Für alle Pixel der Gruppe werden die Zeitreihen analysiert. Die Qualität des besten Pixels entspricht der Qualität des PS, der mit dem Reflektor erzeugt wird.
- Ein Phasenmodell mit Schätzung des Höhenmodellfehlers und einer temperaturabhängigen Dilatation wurde eingeführt, da eine temperaturabhängige Bewegung der Transponder auf Grund der Aufstellung auf einem an einer Gebäudewand angebrachten Metallgestell nicht ausgeschlossen werden kann.

Als Kennzahl für die Qualität einer Zeitreihe wurde der Amplitudendispersionsindex D_A (4) berechnet, sowie mit allen umliegenden PS die zeitlichen Kohärenzen γ (Gl. (7)) bestimmt. Für Werte nahe Null ist die Amplitudendispersion näherungsweise gleich der Standardabweichung der Phase, zu ihrer Berechnung wird die Phase allerdings nicht benutzt. Die zeitliche Kohärenz nutzt die Phaseninformation, kann aber nur eine Aussage über die Qualität der Differenzphase des Reflektorpixels und des benachbarten PS machen. Hier wird also indirekt geschlossen: gibt es benachbarte PS, für die ein guter Wert von γ resultiert, muss auch die Phase des Reflektors stabil sein. Üblicherweise werden Werte von $\gamma \geq 0.7$ als ausreichend angesehen. Der bestmögliche Wert wäre 1. Die Aussagekraft von γ hängt vom Vorhandensein guter PS in der Nähe und von den troposphärischen Verhältnissen ab, aber auch vom verwendeten Phasenmodell. Zur Bewertung der Stabilität der Phasen wurde der Median der zeitlichen Kohärenzen der Differenzphasen der Transponderpixel mit benachbarten PS bestimmt. Um den Einfluss der Variation der troposphärischen Verzögerung klein zu halten, wurden PS mit Abständen zwischen 50 m und 750 m zum Transponder betrachtet. Außerdem wurde eine Korrektur von Höhenmodellfehlern und thermischen Bewegungen durchgeführt. Der Wahl des Medians der zeitlichen Kohärenzen als Kennzahl für die Phasenstabilität haftet eine gewisse Willkür an. Da er hohe Werte ergab, genügt er aber, um die Eignung der Transponder als künstliche Rückstreuer zu belegen.

Da einige der Transponder nicht über den ganzen betrachteten Zeitraum sichtbar waren, wurden in diesen Fällen die Kennzahlen basierend auf den Daten der Zeitpunkte berechnet, zu denen der Transponder sichtbar war.

Ergebnisse



Abbildung 12: Ausschnitte der Mittlere-Amplituden-Bilder von Maria-Einsiedel-Bad. Links: aufsteigender Orbit 117. Rechts: absteigender Orbit 168. Pfeile kennzeichnen die Position des Transponders

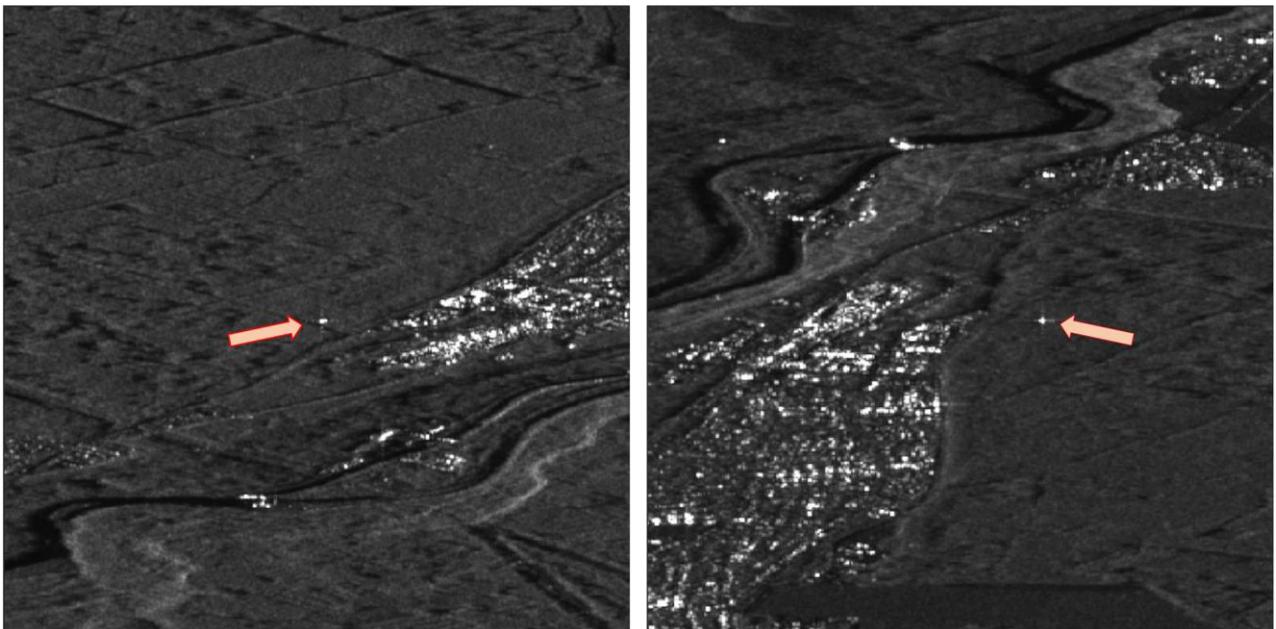


Abbildung 13: Ausschnitte der Mittlere-Amplituden-Bilder von Pullach. Links: aufsteigender Orbit 117. Rechts: absteigender Orbit 168. Die Transponder werden hier besonders deutlich, da keine weiteren Reflektoren im Umkreis vorhanden sind.

Die Abbildung 12 bis Abbildung 14 zeigen Mittlere-Amplituden-Bilder der beiden Standorte in München für auf- und absteigende Orbits. Die Amplitundispersion nimmt sehr gute Werte von nahe oder besser als 0.1 an (als Auswahlkriterium für PS-Kandidaten wird standardmäßig ein Wert von 0.25 vorgeschlagen (Ferretti et al., 2001)), mit Ausnahme des ECR am Maria-Einsiedel-Bad im absteigenden Orbit, wo das Signal vermutlich durch

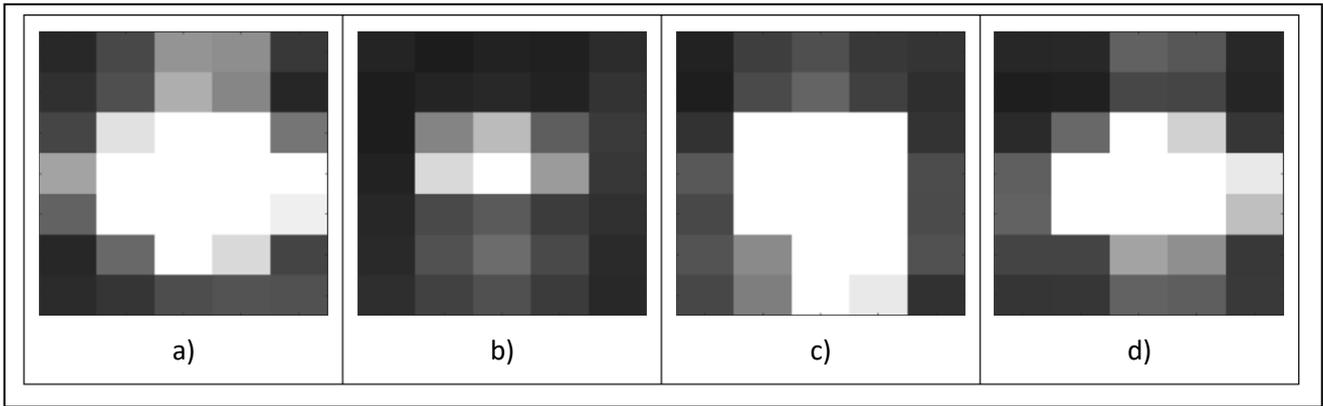


Abbildung 14: Detail der Mittlere-Amplituden-Bilder mit Transponder: a) Maria-Einsiedel-Bad, aufsteigender Orbit. b) Maria-Einsiedel-Bad, absteigender Orbit. c) Pullach, aufsteigender Orbit. d) Pullach, absteigender Orbit.

Bäume in der Nähe der Station abgeschirmt wurde (Abbildung 15 und Abbildung 16, oben). An der Station Pullach wird Mitte März 2023 ein abrupter Zusammenbruch der Signalstärke aufgrund eines technischen Problems am Transponder beobachtet.

Die gefundenen Medianwerte von $\gamma \geq 0.9$ sprechen für eine sehr gute Phasenstabilität (Abbildung 15 und Abbildung 16, unten). Die Ausnahme ist wieder der ECR am Maria-Einsiedel-Bad im absteigenden Orbit. Insgesamt zeigen sich die Transponder geeignet zur Erzeugung hochqualitativer künstlicher Radarrückstreuer. Der Ausfall des Transponders in Pullach muss allerdings weiter untersucht werden. Er könnte bedeuten, dass die technische Langzeitstabilität der Transponder weiter verbessert werden muss.

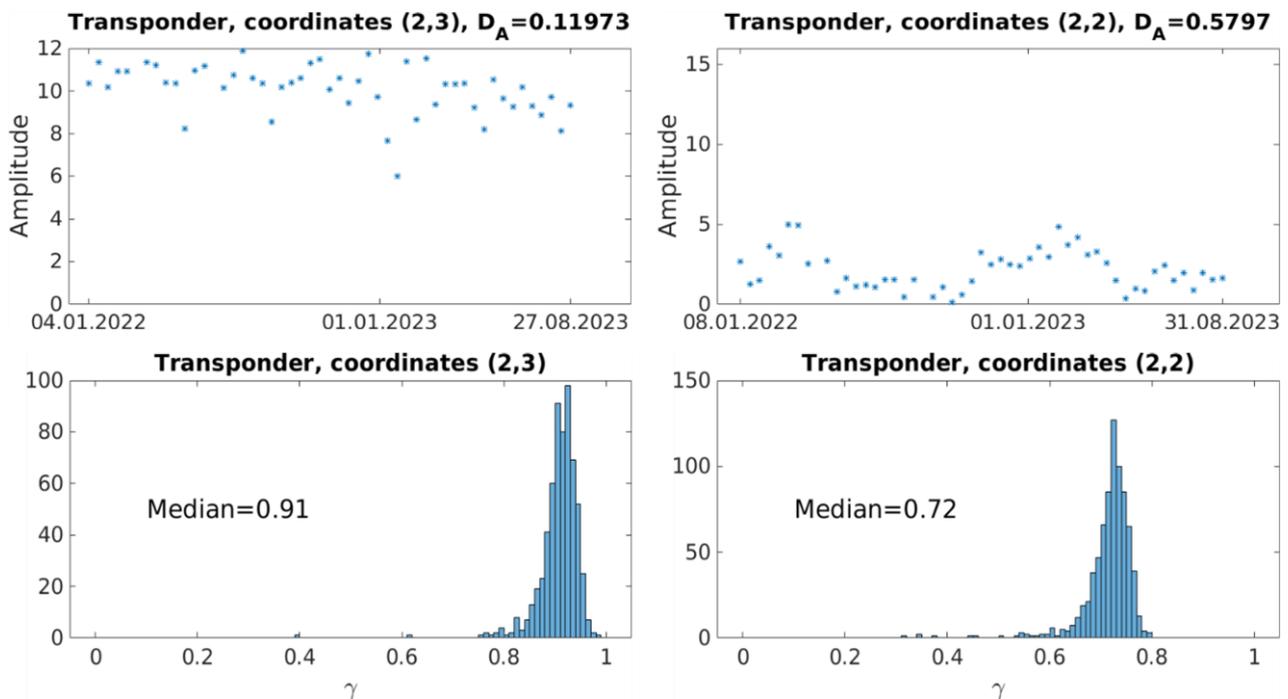


Abbildung 15: Transponder Maria-Einsiedel-Bad, Pixel mit bester Signalqualität gemessen an D_A und γ . Rechts: aufsteigender Orbit 117. Links: Absteigender Orbit 168.

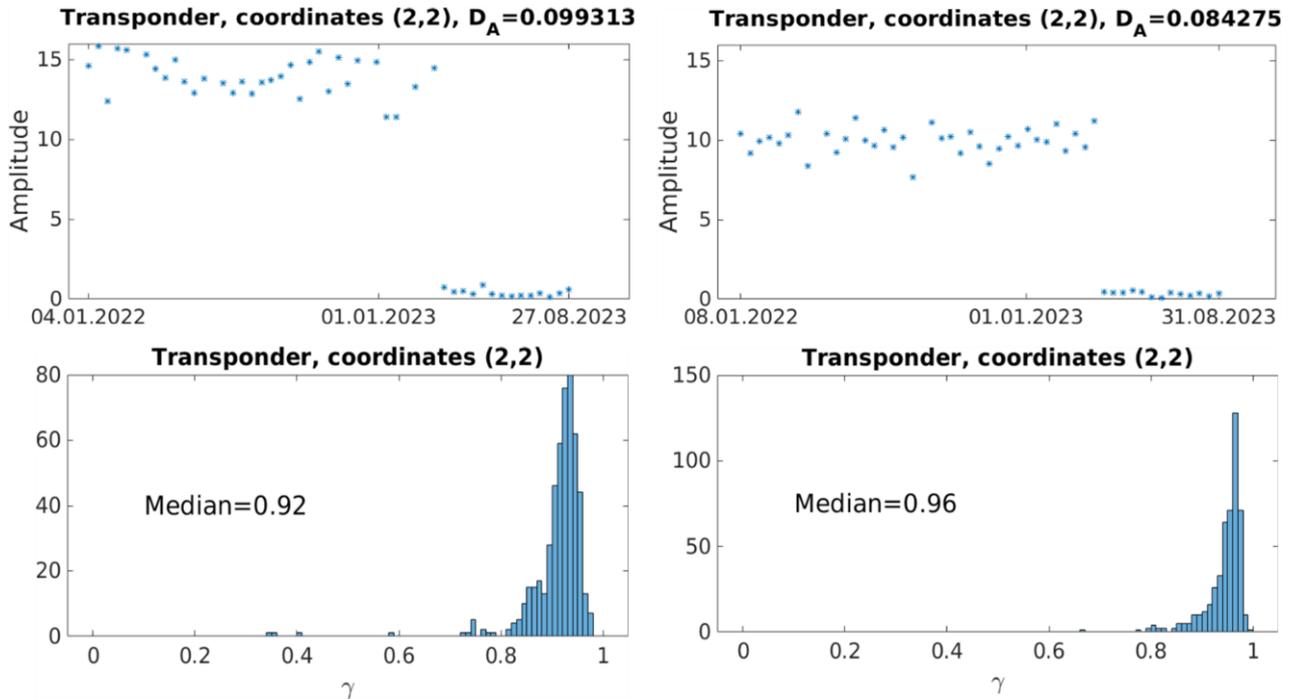


Abbildung 16: Transponder Pullach, Pixel mit bester Signalqualität gemessen an D_A und γ . Rechts: aufsteigender Orbit 117. Links: Absteigender Orbit 168.

1.6 BBD UND EGMS

In der ersten Jahreshälfte 2022 wurden nach einer längeren Test- und Vorbereitungsphase landesweite Karten der Oberflächendeformation durch den Bewegungsdienst Deutschland (BBD) und den European Ground Motion Service (EGMS) veröffentlicht. Sie basieren auf einer State-of-the-art Prozessierung der Sentinel-1 Radardaten nach der Methode der Persistent-Scatterer (PSI) Analyse. Im europäischen Ausland wird eine Kombination von PS und Distributed-Scatterern (DS) verwendet; letzteres steht für Deutschland derzeit noch nicht zur Verfügung. Die Dienste bieten verschiedene Produkte und Zeitreihen für Verschiebungen und Verschiebungsraten in Schrägentfernung (Line-of-sight, LoS) sowie vertikaler und Ost-West-horizontaler Richtung in an. Alle Produkte werden in einem 12-monatigen Turnus aufdatiert.

Die Ergebnisse stehen auch für kommerzielle Anwendungen zur freien Verfügung und sind damit für die Projektpartner SWM und IEP sowie andere Geothermiebetreiber im Großraum München von großem Interesse. Dies ist umso mehr der Fall, da die Sentinel-1 Satellitenmission auf Nachhaltigkeit angelegt ist, und die Radar-Akquisitionen sowie die abgeleiteten Produkte der Bewegungsdienste bei weiter steigender Qualität und kürzeren Innovationszyklen für die kommende Dekade gesichert sind. Mit der Nutzung dieser Dienste entfällt für die Betreiber die Notwendigkeit, eigene PSI-Prozessierungen durchzuführen oder in Auftrag zu geben. Sie bieten daher eine hervorragende Möglichkeit, sich das Potential der Radarinterferometrie zur flächenhaften Erfassung von Bodenbewegungen für die Bestimmung des Einwirkungsbereiches nutzbar zu machen.

Beschreibung des BBD

Der unter 1.4 vorgestellte Ansatz gilt für die PS-Prozessierung einer einzelnen SAR-Szene, die für Sentinel-1 im IW-Akquisitionsmodus ein Bodenareal von 400 x 250 km überdeckt. Dies reicht für die meisten lokalen oder regionalen Anwendungen, für die Erstellung eines landesweiten oder europaweiten Produktes muss jedoch

eine Reihe zusätzlicher Schritten unternommen werden, um die Szenen-weise zur Verfügung stehenden Interferogramme glatt und blattschnittfrei aneinander zu setzen (Mosaikierung). Dazu wurde am Erdbeobachtungszentrum der DLR der *Interferometric Wide Area Product (IWAP)*-Prozessor entwickelt [DLR 2022] und für den BBD eingesetzt. Einige generelle Informationen finden sich in [Kalia 2022]. In die PS-Prozessierungskette wurde eine Atmosphärenkorrektur nach Adam (2019) eingeführt; zur Reduzierung troposphärisch bedingter Phasenanteile wurde der ECMWF ERA5 Datensatz mit 3 Monaten Latenz, 31 km räumlicher Auflösung, 137 vertikalen Ebenen bis 1 Pa und 1 Stunde Output Sampling [ERA5] genutzt. Globale Karten des ionosphärischen Gesamtelektroneninhaltes (*total electron content, TEC*) mit einer Latenz von 5 Tagen, 2-8 TECU-Genauigkeit, räumlicher Auflösung von 5° Länge x 2,5° Breite und zeitlicher Auflösung von 2 Stunden [CODE] wurden zur Reduzierung des ionosphärisch bedingten Phasenanteils genutzt.

Die InSAR-Ergebnisse wurden mit GNSS-Daten nach dem Ansatz von Parizzi et al. (2020) kalibriert. Bei diesem Schritt werden langwelligen Verschiebungsanteile, die durch die am Beginn der Kette stehenden Prozessierung einzelner Sentinel-1 Szenen verloren gehen, rekonstruiert. Starre Plattenverschiebungen werden korrigiert, so dass alle Verschiebungen relativ zur Eurasischen Platte im Bezugssystem des Europäischen Terrestrischen Referenzsystems 1989 (ETRS89) angegeben sind. Für die Orbitkombination wird ein 50m x 50m-Raster und 6 Tage-Resampling (stückweise-linear) verwendet. Die Bewegungszerlegung wird durchgeführt, wenn mindestens ein PS aus aufsteigendem Orbit und ein PS aus absteigendem Orbit in der Gitterzelle vorhanden sind. Die angewendeten Techniken werden in Gonzalez et al. (2018) und Parizzi et al. (2021) evaluiert. Mit dem neuesten Release am 30.09.2022 hat sich die Anzahl der Punkte erhöht, da sich ein Qualitätskriterium für die Auswahl der PS geändert hat. Die Schranke für die zeitliche Kohärenz wurde von 0.85 auf 0.75 gesenkt.

Im Viewer des BBD können folgende auf PSI-Produkten basierenden Layer visualisiert werden: LoS Beobachtungen aus auf- und absteigenden Orbits, Vertikalverschiebungen sowie Horizontalverschiebungen in Ost-West-Richtung. Zeitreihen werden für jeden Punkt durch Anklicken angezeigt. Für jedes Produkt können Datensätze heruntergeladen werden, indem ein Polygon eingezeichnet wird. Die Fläche ist auf 400 km² beschränkt, es können aber mehrere Downloads nacheinander getätigt werden. Für institutionelle, operative Anwendungen ist auf Anfrage ein größeres Datenvolumen per ftp zu erhalten. Die Daten werden im csv-Format zur Verfügung gestellt; die Spalten der Tabelle sind in den Nutzungshinweisen [Kalia 2022] im Einzelnen beschrieben.

Beschreibung EGMS

Die Produkte des EGMS werden von einem Konsortium aus vier Firmen, der Operational Ground motion InSAR Alliance (ORIGINAL), basierend auf Daten der Sentinel 1-Satelliten generiert. Die beteiligten Firmen sind e-GEOS, TRE Altamira, NORCE und GAF AG. Letztere ist für die Prozessierung Deutschlands zuständig und nutzt dafür unter Lizenz den IWAP-Prozessor der DLR. Eine schlagwortartige Übersicht über die verwendete Algorithmik findet sich in [EGMS Theory 2021], S. 61. Insbesondere werden Korrekturen mit externen Daten durchgeführt:

1. Troposphärische Verzögerungen basierend auf ERA5-Daten des ECMWF
2. Ionosphärische Verzögerungen basierend auf CODE-Daten der Universität Bern [CODE]
3. Erdzeiten basierend auf Parametern aus der NASA NAIF-Datenbank

Die Spezifikationen des Dienstes und seiner Produkte finden sich in den *End User Requirements* [EGMS Requirements 2021]. Die Visualisierung der Bewegungen und der Zugang zu den Daten erfolgen über eine WebGIS-Anwendung (*Viewer*).

Im Viewer des EGMS können folgende auf InSAR-Produkten basierenden Layer visualisiert werden: kalibrierte Produkte in LoS sowie Orthoprojekte in Vertikal- und Ost-West-horizontaler Richtung. Die kalibrierten und Orthoprojekte wurden mit Hilfe des European GNSS *positioning framework* kalibriert. Die Bewegungen der Produkte sind in ETRF2000 (Realisierung des ETRS89) angegeben [EGMS Theory 2021] und somit relativ zum stabilen Teil der eurasischen Platte. Damit ist der Referenzrahmen im Wesentlichen der gleiche wie beim BBD. Allerdings unterscheidet sich die GNSS-basierte Kalibrierung im Detail durch die unabhängige Implementierung

maßgeblicher Algorithmen sowie die Verwendung einer unterschiedlichen Anzahl von GNSS-Stationen (vergl. [EGMS Theory 2021] und (Parizzi et al., 2020). Unter anderem gehen die deutschen SAPOS®-Stationen nicht in EGMS-Produkte ein. Im Gegensatz zum BBD bietet der EGMS kein vollständig mosaikiertes LoS-Produkt für die gesamte Fläche an. Stattdessen besteht im EGMS-Viewer die Möglichkeit, das kalibrierte Produkt für einzelne Beobachtungstreifen auszuwählen. Für jeden Streifen bekommt man eine Karte von PS- und ggf. DS-Punkten, deren Farbe die mittlere Bewegungsrate in $mm/Jahr$ relativ zu einem virtuellen Referenzpunkt in LoS darstellt. Durch Anklicken eines Punktes erhält man einen Plot der Zeitreihe zu diesem Punkt sowie neben den Zahlenwerten der Zeitreihe u.a. folgende Informationen: Track, Mode, Burst, MP Typ, Länge, Breite, Hochwert, Rechtswert, Höhe, Höhe (WGS84), RMS, zeitliche Kohärenz, Amplitudendispersion, Einfallswinkel, Heading, einen Vektor in Richtung LoS, die mittlere Geschwindigkeit und ihre Standardabweichung, die Beschleunigung und ihre Standardabweichung, die Saisonalität und ihre Standardabweichung. Die Produkte werden jedes Jahr im vierten Quartal aufdatiert. Dabei wird ein gleitendes Zeitfenster von 5 Jahren verwendet, um zu vermeiden, dass mit dem Anwachsen der Zeitreihen zu viele PS-Punkte wegen „Überalterung“ verschwinden. Frühere Zeiträume sind aber archiviert und können bei Bedarf ebenfalls verwendet werden.

Das Orthoproduct zeigt die auf Basis der verfügbaren Tracks geschätzten Bewegungen in vertikaler und Ost-West-Richtung und bedeckt die gesamte Fläche der Mitgliedsstaaten von Copernicus sowie Großbritannien. Wie beim kalibrierten Produkt wird die mittlere Bewegungsrate in $mm/Jahr$ farbcodiert dargestellt. Durch Anklicken eines Punktes erhält man eine Grafik der Zeitreihe sowie relevante Zusatzinformationen wie Hochwert, Rechtswert, Höhe, RMS, die mittlere Geschwindigkeit und ihre Standardabweichung, die Beschleunigung und ihre Standardabweichung, sowie die Saisonalität und ihre Standardabweichung. Zum Download von Daten muss man sich als Nutzer registrieren. Eingeloggt zeichnet man ein Polygon, das den gewünschten Bereich umschließt. Daraufhin werden Datenpakete zum Herunterladen angeboten. Diese werden allerdings nicht individuell zugeschnitten, sondern bestehen beim kalibrierten Produkt aus denjenigen 100 km x 100 km-Kacheln, die eine Überschneidung mit dem gezeichneten Polygon haben.

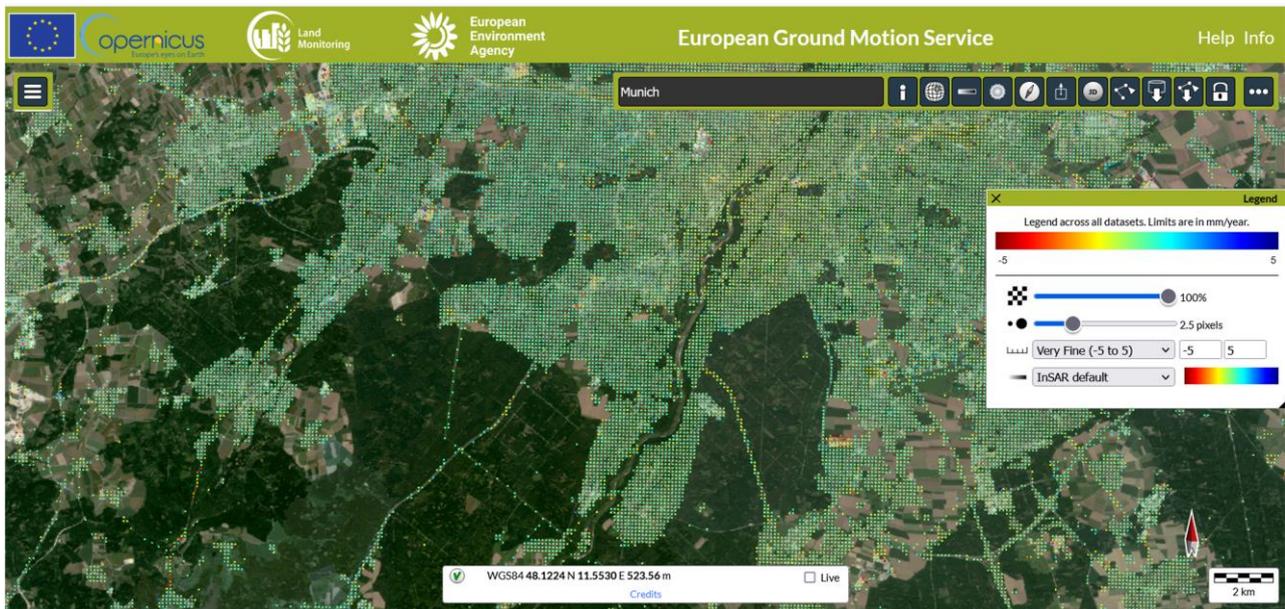


Abbildung 17: Die Produkte der Bodenbewegungsdienste sind über Webportale abrufbar, hier exemplarisch das Portal des EGMS. Dargestellt ist die aus einer Kombination von Beobachtungen aus auf- und absteigenden Überflügen abgeleitete Vertikalkomponente. Grundlage ist eine Persisten-Scatterer-Analyse der Sentinel-1 Radaraufnahmen von Januar 2018 bis Dezember 2022.

Qualität der Dienste

Die Prozessierung für den BBD und ebenfalls die von Deutschland und seinen Nachbarländern für den EGMS wird mit dem am Erdbeobachtungszentrum der DLR entwickelten *Interferometric Wide Area Product (IWAP)*-

Tabelle 2: Unterschiede der Bodenbewegungsdienste.

| | BBD | EGMS in Deutschland Germany |
|-------------------------|----------------------|------------------------------------|
| GNSS-Kalibrierung | GRAF, SAPOS® | EPND, NGL |
| Gitterweite | 50 m x 50 m | 100 m x 100 m |
| Zeitintervall | 04.2015 - 12.2021 | 01.2018 - 12.2022* |
| Typ der Rückstreuer | PS | PS |
| Auswahlkriterium für PS | Kohärenz ≥ 0.75 | RMS ≤ 5 mm |
| Bewegungsmodell | linear + sinusoid | linear + sinusoid |

* nach neuem Update ist aktuell der Zeitraum 01.2019 – 12.2023 abrufbar.

GRAF: Geodätisches Referenznetz Deutschland; SAPOS®: Satellitenpositionierungsdienst der deutschen Landesvermessung;

EPND: EUREF permanent Network, NGL: Nevada Geodetic Laboratory.

RMS: *Root Mean Square Error*, maximale zugelassene Abweichung vom Bewegungsmodell bei der PS-Auswahl

Prozessor durchgeführt [DLR 2022]. Da die DLR weltweit zu den führenden Institutionen auf dem Gebiet der Radarinterferometrie zählt, kann man davon ausgehen, dass die erstellten Produkte von der höchsten Qualität sind, die mit der verwendeten Datengrundlage und einer Massenverarbeitung von Daten derzeit erreichbar ist. Unterschiede in der Prozessierung für die beiden Dienste, soweit bekannt, sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Während die öffentlich zugängliche Dokumentation beim BBD sehr dünn ist, finden sich auf der Homepage des EGMS ausführliche und aussagekräftige Unterlagen. Für die Frage der Datenqualität ist der *Quality Assurance & Control Report* [EGMS Quality 2022] die wichtigste Quelle. Aus einer Untersuchung der Abweichungen zwischen den Resultaten verschiedener internationaler Datenprozessierungszentren in neun Testgebieten ergeben sich folgende Qualitätszahlen:

- Der 3D-Geokodierungsfehler der Produkte liegt zwischen 4 und 7 Meter.
- Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung (Root Mean Square Error (RMSE), enthält stochastisches Rauschen und systematische Verzerrungen):
 - 2,9 mm für das Basisprodukt
 - 3 mm für das kalibrierte Produkt
 - 2,1 mm für das Orthoprodukt (vertikal)
 - 2,5 mm für das Orthoprodukt (Ost-West-Richtung)
- Die Unterschiede in der mittleren Bewegungsrate liegen für das Orthoprodukt bei 0.5 mm/Jahr Verzerrung und 1 mm/Jahr Standardabweichung.

PS-Punktkandidaten, deren Zeitreihen einen $\text{RMSE} > 5 \text{ mm}$ relativ zum gewählten Bewegungsmodell aufweisen, werden nicht verwendet.

Am GIK wurde die Genauigkeit beider Dienste für verschiedene Fallstudien in Deutschland untersucht (Even et al., 2024a). Dabei wurden die Dienste untereinander evaluiert und, soweit verfügbar, mit Nivellements und GNSS-Zeitreihen verglichen. In Gebieten mit flächenhaften, langsam voranschreitenden Bodenbewegungen (bergbaubedingte Absenkungen sowie Bodenhebungen im Nachbergbau im Saarland und Nordrhein-Westfalen) sind die Standardabweichungen der Differenzen der Produkte untereinander sowie der Differenzen der Produkte zu den Vergleichsdaten generell kleiner als 3 mm und bestätigen damit die Angaben des EGMS

Quality Reports. Ein Vergleich mit SAPOS®-Stationen in Baden-Württemberg bestätigt die etwas bessere Kalibrierung der BBD-Produkte, allerdings sind auch die Verzerrungen bei den EGMS-Produkten gering (BBD: -0.16 mm/Jahr , EGMS: -0.45 mm/Jahr für vertikale Verschiebungsraten). Über einem Kavernen-Gasspeicher in Norddeutschland, einem Gebiet mit teilweise schnellen, zeitlich sehr variablen Senkungsraten im cm-Bereich, treten größere Differenzen zu den Vergleichsdaten mit Standardabweichung bis zu 8 mm auf. In diesem Fall sind die globalen Parametereinstellungen der Wide-Area-Produkte nicht geeignet, das lokale Bewegungsereignis adäquat zu beschreiben. Durch eine für die lokalen Verhältnisse optimierte Einstellung der Analyseparameter lassen sich die Differenzen zwischen PSI Zeitreihen und Vergleichsdaten deutlich reduzieren (Seidel et al., 20214).

Insgesamt zeigt die Vergleichsuntersuchung, dass die Qualität der Produkte von BBD und EGMS in den meisten der untersuchten Fälle hoch ist und für das Monitoring von Bodenbewegungsereignissen mit Unsicherheiten $< 3 \text{ mm}$ eingesetzt werden kann. Verhältnisse wie in einem Gasspeicher, wo je nach Bedarf kurzzeitig große Gasmengen in vergleichsweise geringer Tiefe von 1000 m aus- und eingespeichert werden, sind für ein stetig bewirtschaftetes Geothermiefeld mit Bohrtiefen von 3000 m nicht zu erwarten.

Langfristige Verfügbarkeit

Die Finanzierung des EGMS als Teil des europäischen Erdbeobachtungsprogramm Copernicus ist mittelfristig bis einschließlich 2027 gesichert [EU 2021]. Die Fortführung von Copernicus über 2027 hinaus befindet sich in der Vorbereitung. Da die ESA beginnend mit ERS-1/2, über ENVISAT und aktuell Sentinel 1 seit 1992 eine weitgehend kontinuierliche Erdbeobachtung mit C-Band SAR-Sensoren ermöglicht hat, kann man optimistisch sein, dass diese Fähigkeit auch nach 2027 zur Verfügung steht. Gleichzeitig steht zu erwarten, dass sich die Qualität der Analyseergebnisse kontinuierlich weiterentwickelt. Unter anderem ist es geplant, teilzeit-stabile Rückstreuer (TPS) einzubinden, die nur in einem zeitlich beschränkten Abschnitt des Datenstapels wirksam sind. Damit kann die Punktdichte weiter erhöht werden, und es wird einem Verlust von langzeitstabilen Rückstreuern vorgebeugt, der auftreten kann wenn die Analysefenster zu lang werden. Selbst bei sehr guten Rückstreuern besteht eine wachsende Wahrscheinlichkeit, dass sich über lange Zeiträume Veränderungen am Boden ereignen, die dazu führen können, dass der Analysealgorithmus diese Punkte nicht mehr als stabil deklariert.

Inwieweit der BBD als eigenständige Alternative zum EGMS weitergeführt werden wird, ist nicht vollständig abzusehen. Derzeit werden seitens des Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe ausführliche Vergleiche zwischen BBD und EGMS durchgeführt. Das wahrscheinlichste Szenario ist, dass beide Dienste in Zukunft eine durch EGMS beauftragte Basisprozessierung der GAF-AG verwenden werden, jedoch die Kalibrierung mit GNSS-Daten weiterhin individuell durchführen. Es ist geplant, für den Web-Dienst des BBD verschiedene Hilfsprogramme zur einfachen Handhabung und Weiterverarbeitung der Produkte für die individuellen Bedürfnisse der Nutzer bereitzustellen.

1.7 BODENBEWEGUNGEN IM GROßRAUM MÜNCHEN

Im folgenden Abschnitt werden die durch das Vermessungsbüro ÖbVI Dipl.-Ing. S. Gütz (Wilhelm-Leibl-Str. 11, 50999 Köln, guetz@netcologne.de) im Auftrag der Betreiber erhobenen Wiederholungsnivellements mit den Ergebnissen der PSI Analysen verglichen. Wir verwenden dabei das vertikale Orthoprodukt des EGMS für den 5-Jahreszeitraum Januar 2018 – Dezember 2022, um das Nutzungspotential dieses Dienstes zu evaluieren. Zu Vergleichszwecken verwenden wir die Ergebnisse einer am GIK durchgeführten PSI-Analyse für den Zeitraum Januar 2019 – Dezember 2023, auf deren Basis die Datenreihen bis kurz vor Projektende aktualisiert werden können. Produkte des BBD werden nicht verwendet, da dessen Datensätze zum Zeitpunkt der Untersuchung bereits Dezember 2021 enden. Das Ziel der vorgestellten Arbeiten ist es, eine Fallstudie für München zu erarbeiten, die die Leistungsfähigkeit der PSI Analysen im Vergleich zum Nivellement evaluiert.

Peripherie und Umland

Abbildung 18 (a) zeigt einen Kartenausschnitt um die zur SWM gehörende Geothermieanlage Freiham. Für Freiham liegen drei Wiederholungsnivellements über einen Zeitraum von 6 Jahren vor (siehe AP 1.4 Tab. 1). Daher können zeitlich lineare Höhenänderungsraten berechnet werden, die mit vertikalen Verschiebungsraten an den Gitterpunkten des vertikalen EGMS-Produktes verglichen werden. Die vermarkten Messpunkte des Nivellements werden in Abbildung 18 (a) als Dreiecke symbolisiert, die Einfärbung gibt die Rate in mm/Jahr an. Kreise markieren die vertikale Verschiebungsrate an den Kreuzungspunkten des Gitters (100 x 100 m), das vom EGMS zur Bestimmung der Vertikalkomponente auf Basis der LoS-Ergebnisse aus auf- und absteigenden Orbits verwendet wurde. Die Gitterpositionen, für die Werte berechnet werden konnten, sind ebenfalls entsprechend der Rate farblich markiert. Obwohl es sich dabei nicht um die tatsächlichen Positionen der prozessierten PS-Punkte handelt, sollen im Folgenden aus Gründen der Einfachheit auch die Gitterpunkte als PS bezeichnet werden.

Für den Vergleich wurden alle PS-Punkte des EGMS Datensatzes bis zu einem Abstand von 250 m von der Nivellementlinie ausgeschnitten. Die Anlage liegt am Rand des Stadtgebietes; PS-Punkte finden sich in den bebauten Bereichen und entlang von Abschnitten der A99 im Westen. Bei Infrastruktureinrichtungen wie

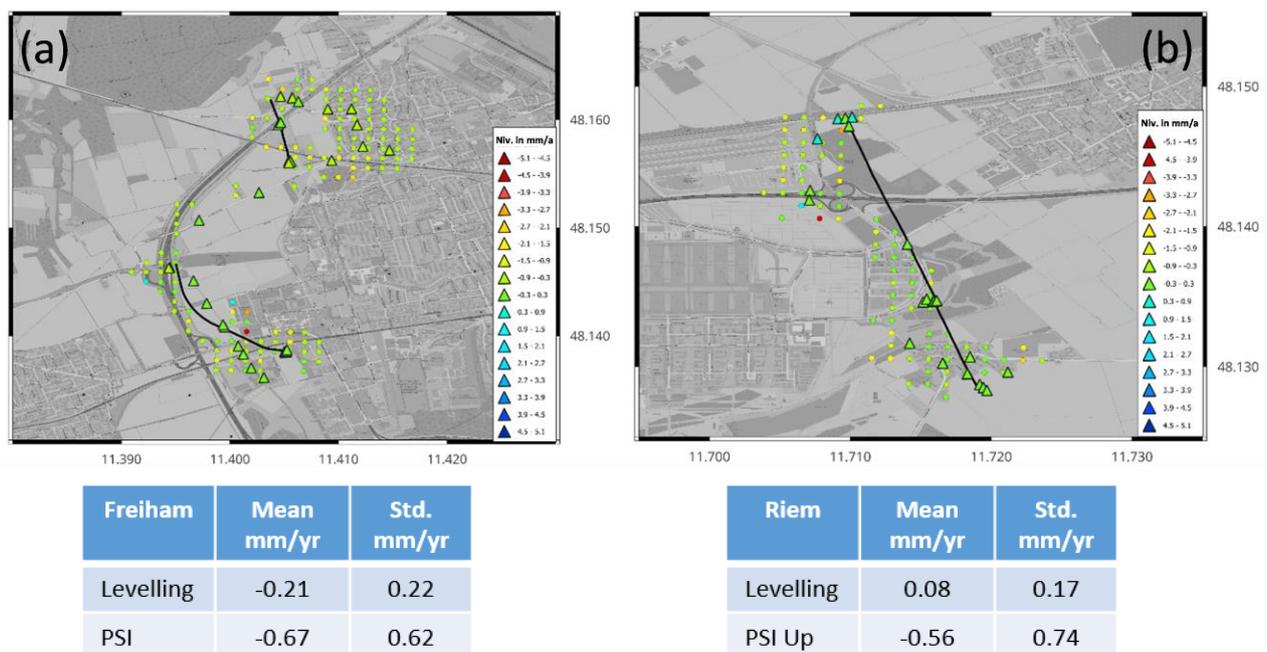


Abbildung 18: Vergleich von vertikalen Verschiebungsraten im Umfeld von Geothermieanlagen, abgeleitet aus Wiederholungsnivellements (Dreiecke) und dem vertikalen PSI-Produkt des EGMS (Kreise). (a) Freiham, (b) Riem

großen Verkehrswegen können Leitplanken, Straßenböschungen oder Beleuchtungsmasten für zeitstabile Radar-Rückstreubedingungen sorgen. Das Nivellement wird jedoch teilweise entlang von kleineren, durch die Felder führenden Straßen ausgeführt; in diesen Bereichen finden sich keine direkt benachbarten PS-Punkte. Für beide Datensätze herrschen grüne Punktfarben vor. Demnach sind im Messzeitraum keine signifikanten Bodenbewegungen beobachtet worden.

Um einen Vergleichsmaßstab zu haben, wurde für beide Datensätze die mittlere Verschiebungsrate und deren Standardabweichung berechnet. Es ergeben sich Mittelwerte von -0.21 mm/Jahr für das Nivellement und -0.67 mm/Jahr für PSI. Beide Datensätze weisen daher eine geringe Absenkungstendenz aus, ein Blick auf die Standardabweichungen zeigt jedoch, dass die beobachteten Raten in beiden Fällen nicht signifikant sind. Die Präzision der Nivellements ist um einen Faktor 3 besser als bei den PSI Resultaten. Dies liegt vollständig im Rahmen dessen, was man auf Grund des höheren Rauschens in den PS-Zeitreihen erwarten kann. Der Unterschied ist jedoch nicht sehr groß.

Ein sehr ähnliches Bild ergibt sich für die SWM-Anlage in Riem (Abbildung 18 (b)). An diesem Standort liegen ebenfalls drei Nivellementkampagnen über einen Zeitraum von vier Jahren vor. Wie in Freiham zeigen die Messwerte beider Methoden stabile Bodenverhältnisse an. Der InSAR-Datensatz ist an diesem Standort deutlich stärker verrauscht; die Präzision des Nivellements ist um einen Faktor 5 besser.

Am Geothermie-Standort Ismaning wurden jährliche Nivellementkampagnen über den Zeitraum 2019 – 2022 durchgeführt. Die Anlage wird von der Wärmeversorgung Ismaning GmbH & Co. KG (WVI) betrieben. Die Daten wurden uns freundlicherweise von Herrn Hobmeier über das Vermessungsbüro Gütz zur Verfügung gestellt. Vorausgegangen waren Kontakte innerhalb der Geothermiebetreiberrunde. Die sehr langgestreckte Nivellementlinie entlang des Verlaufs der nach Osten und Westen abgelenkten Bohrungen zeigt keine Höhenänderungen im bebauten Bereich der Gemeinde Ismaning an (Abbildung 19). An beiden Enden jedoch, im Bereich der auf die Oberfläche projizierten Endpunkte bzw. Filterstrecken der Bohrungen werden Absenkungstendenzen von ca. -1.3 mm/Jahr im Westen und ca. -2.0 mm/Jahr im Osten mit einem Maximalwert von -4.44 mm/Jahr beobachtet. Der rot eingefärbte Messpunkt mit der Maximalrate liegt an einer Straßenkreuzung an der Ecke eines Hofgrundstückes. Es ist zu vermuten, dass es sich hierbei um eine lokale Punktinstabilität handelt.

Es ist auffällig, dass an beiden Enden der Nivellementlinie jeweils fünf Messpunkte gerade im Bereich der Bohrungsendpunkte ziemlich unvermittelt Absenkungstendenzen zeigen, während im Zentrum der Linie keine Höhenänderungen beobachtet werden. Aufgrund der Bohrungstiefen von 2396 m im Westen und 2685 m im Osten ist ein Zusammenhang mit der Förderung und Verpressung der Thermalwässer nicht zu erwarten (siehe dazu Diskussion zu AP 5.2). Die Nivellementpunkte am westlichen Ende liegen im Bereich der Isarauen, es ist zu vermuten, dass sie durch das Grundwasserregime beeinflusst und die beobachteten Höhenänderungen durch Porendruckvariationen oder durch Kompaktion nicht konsolidierter Flusssedimente hervorgerufen werden. Für

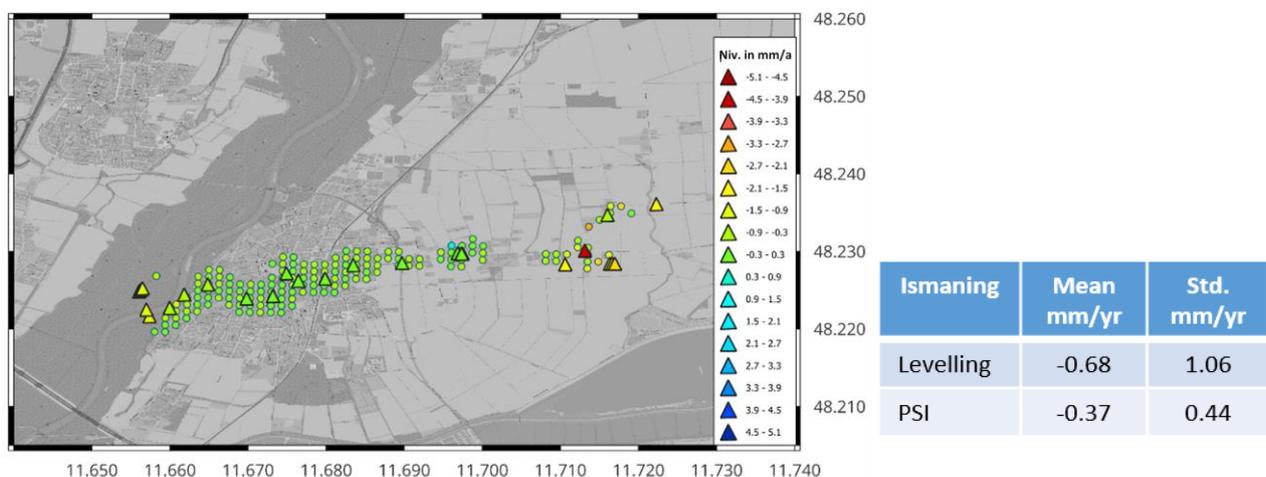


Abbildung 19: Vergleich von vertikalen Verschiebungsraten im Umfeld der Geothermieanlage Ismaning, abgeleitet aus Wiederholungsnivellements (Dreiecke) und dem vertikalen PSI-Produkt des EGMS (Kreise)

die Absenkungen am östlichen Ende lässt sich aus der Ferne keine Ursache nennen; möglicherweise würde eine Punktbegehung vor Ort Aufschluss geben. Es ist jedoch zu vermuten, dass es sich auch hier um oberflächennahe Konsolidierungseffekte des Erdbodens handelt.

Die PSI Analysen bestätigen den Befund. Auch in diesem Datensatz treten keine signifikanten Raten in den bebauten Bereichen der Gemeinde auf. Am östlichen Ende werden ebenfalls einige Punkte mit negativen Raten bis zu -3.2 mm/Jahr beobachtet. Damit werden die Ergebnisse des Nivellements tendenziell bestätigt, sodass davon auszugehen ist, dass die Senkungstendenzen nicht messtechnisch bedingt sind, sondern einen realen Prozess widerspiegeln. In den Isarauen werden keine PS-Punkte detektiert, sodass hier keine Vergleiche zum Nivellement gezogen werden können. Die Mittelwerte beider Datensätze zeigen nicht-signifikante negative Raten von -0.37 mm/Jahr (PSI) und -0.68 mm/Jahr (Niv.) an. Die Standardabweichung im Nivellement ist deutlich größer als an den anderen Standorten, was durch die besprochenen Signale an den Enden der Linie zu erklären ist. Sie spiegelt daher nicht nur das statistische Rauschen des Messverfahrens, sondern auch äußere Einflüsse wider. Zu erwähnen ist, dass der langgestreckte Nivellementzug in Ismaning keine vorteilhafte Messkonfiguration darstellt und sich prinzipiell negativ auf die Messgenauigkeit auswirkt. Bei der gegebenen Konfiguration ist die Anknüpfung an mehr als einen Referenzpunkt dringend zu empfehlen.

An den Standorten Pullach und Kirchstockach liegen nur zwei auswertbare Nivellementskampagnen vor (Abbildung 20 a) und b)). Daher werden keine Höhenänderungsraten verglichen, sondern Differenzen der Messwerte an den beiden Messepochen in der Einheit mm . Da die Bestimmung von linearen Raten aus den Messwerten eine glättende Wirkung hat, sind die Standardabweichungen der beiden differentiellen Datensätze höher und liegen im Nivellement bei 0.69 mm (Pullach) und 0.59 mm (Kirchstockach). Diese Werte liegen im Bereich des für das Präzisionsnivellement über kurze Linien erwartbaren Rauschanteils. Das Rauschen der PSI-Ergebnisse ist etwas höher mit 0.74 mm (Pullach) und 1.57 mm (Kirchstockach). Diese Werte sind vergleichsweise niedrig und bestätigen die gute Qualität der EGMS PSI-Produkte. Signifikante Bodenbewegungen werden an keinem der beiden Standorte beobachtet. In Kirchstockach ist hervorragend zu sehen, dass Verkehrsadern häufig gut durch PS-Punkte erfasst werden und geeignete Objekte für ein Monitoring mittels SAR-Interferometrie darstellen.

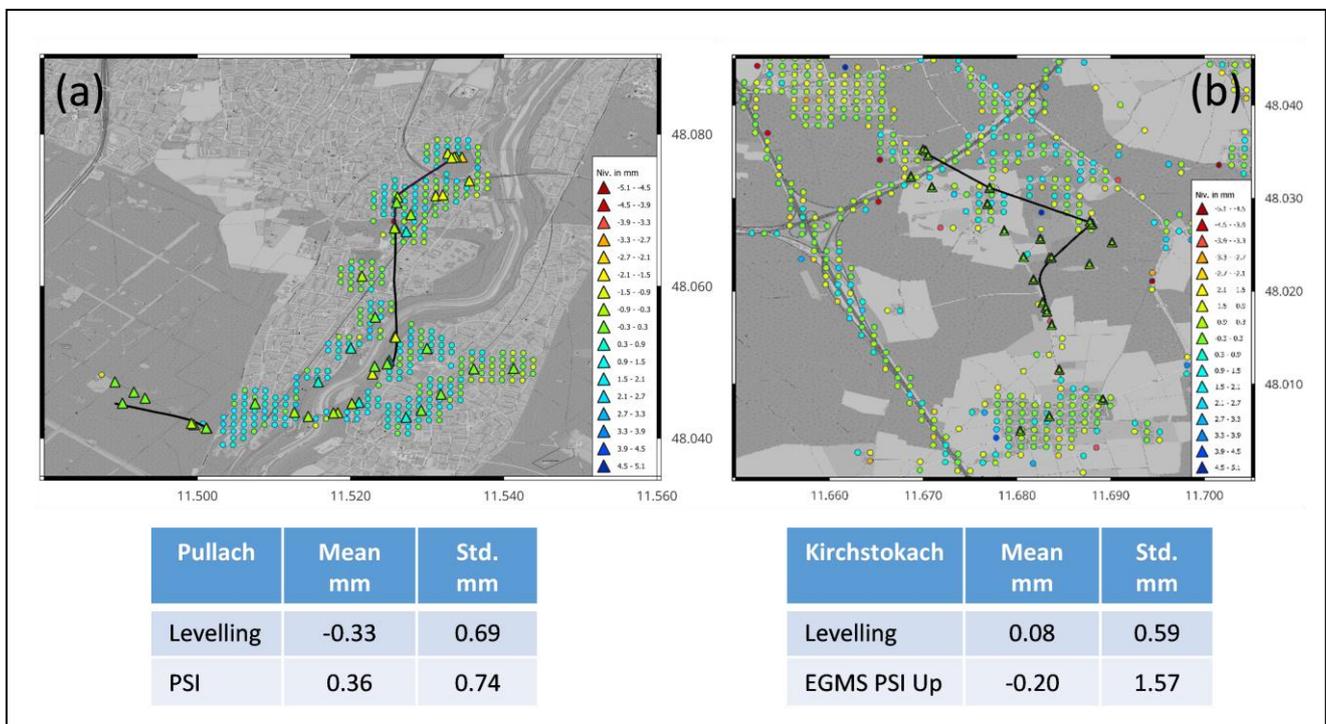


Abbildung 20: Vergleich von Höhendifferenzen Sept. 2020 – Sept. 2019 im Umfeld von Geothermieanlagen, abgeleitet aus Wiederholungsnivellements (Dreiecke) und dem vertikalen PSI-Produkt des EGMS (Kreise). (a) Pullach, (b) Kirchstockach.

München Zentrum

Die Bodenbewegungsverhältnisse im innerstädtischen Bereich unterscheiden sich deutlich von denjenigen an der Peripherie. Wiederholungsmessungen am 29.03.2021 und 09.03.2022 (siehe AP 1.4 Tab. 1) auf der um die sechs Bohrungen der Geothermieanlage des Kraftwerkes Süd in der Schäftlarnstraße angelegten Nivellementlinie ergeben signifikante Höhenänderungen nordwestlich des Kraftwerkes (Abbildung 21). Maximalwerte von bis zu 3.4 mm werden im Bereich der auf die Erdoberfläche projizierten Endpunkte der Re-Injektionsbohrungen TH3 und TH5 in der Gegend um die Schwanthaler Höhe / Westend beobachtet. Vom Kraftwerk kommend, nehmen die Höhenänderungen kontinuierlich zu, sodass der Eindruck eines flächenhaften Bodenbewegungsereignisses entsteht. Gemessen an der Größenordnung der stochastischen Fehler des Präzisionsnivellements von ca. 0.5 mm sind die beobachteten Höhenänderungen hochsignifikant. Allerdings wurde nur ein einzelner, im Südosten des Netzes gelegener Höhenanschlusspunkt als Bezugspunkt für die Höhenwerte verwendet (amtlicher Höhenfestpunkt (HFP) der Landesvermessung Nr. 7835 0351, siehe Abbildung 21). Aus der Analyse geodätischer Netze ist bekannt, dass bei ungünstiger Netzgeometrie langwellige Systematiken (sog. Schwachformen) auftreten können, die die Genauigkeit der Messungen reduzieren können (z. B. Brunckhorst, 2015). Die Wirkung einer solchen Schwachform kann im Fall des Netzes Schäftlarnstraße nicht ausgeschlossen werden, da der Anschlusspunkt dem Bereich der stärksten Höhenänderungen diametral in einem Abstand von ca. 5 km gegenüber liegt. Es ist dringend angeraten, bei Netzen dieser Größenordnung mehrere Anschlusspunkte zu verwenden, um die Redundanz zu erhöhen und den Einfluss systematischer Trends aufdecken zu können. Die Problematik des Höhenanschlusses im Einwirkungsbereich tiefliegender Deformationsquellen wird im Bericht zu AP 5.2 ausführlich diskutiert.

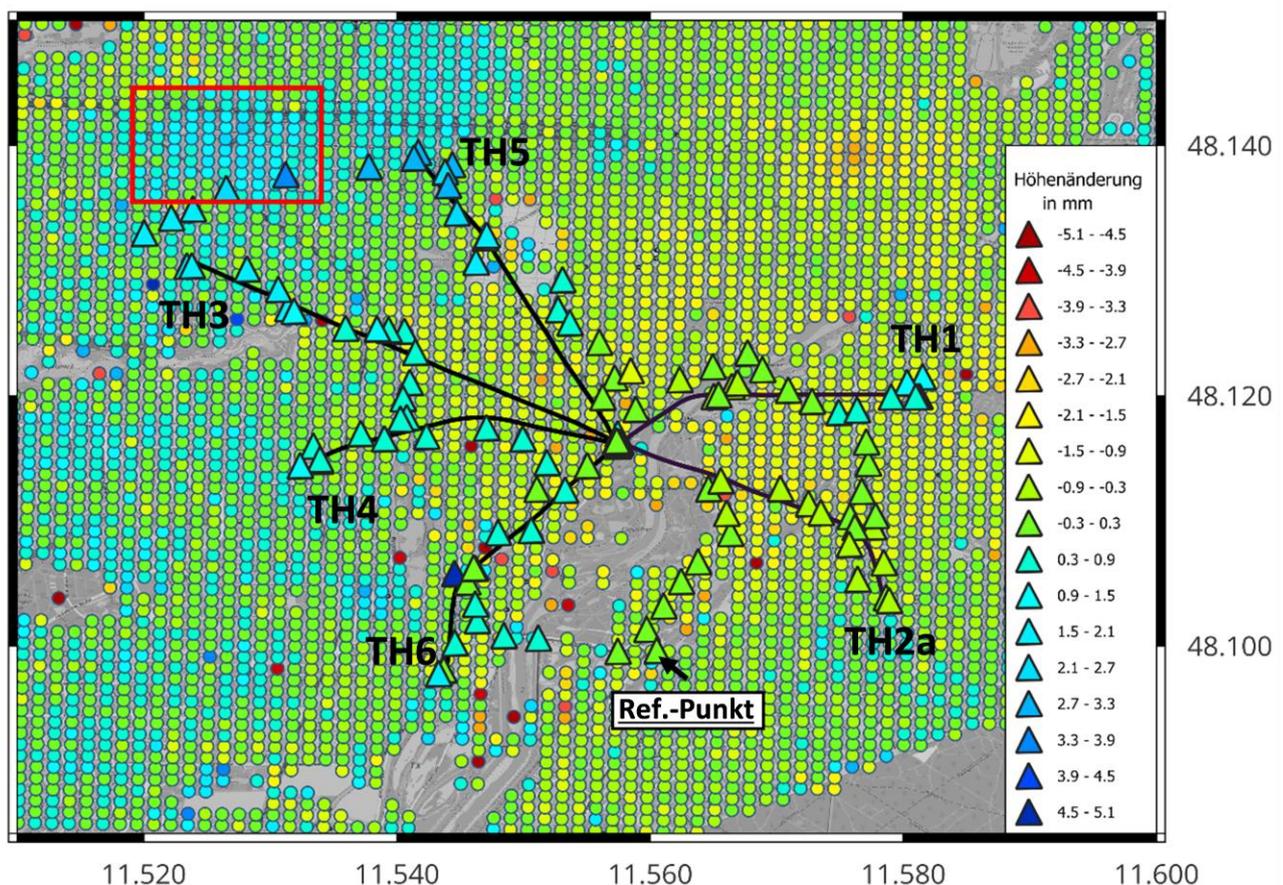


Abbildung 21: Höhendifferenzen März 2022 – März 2021 in der Umgebung der Geothermieanlage am Kraftwerk München Süd (Schäftlarnstraße), abgeleitet aus Wiederholungsnivellements (Dreiecke) und dem vertikalen PSI-Produkt des EGMS (Kreise). Das rote Rechteck markiert den Bereich, aus dem die Zeitreihen in Abbildung 24 zusammengestellt wurden. „Ref.-Punkt“ bezeichnet den Höhenanschlusspunkt des Nivellements; die EGMS-Resultate sind absolut kalibriert mit Bezug zum Europäischen Referenzrahmen ETRF2000.

Neben den geschilderten flächenhaften Höhenänderungen werden lokale Höhenänderungen von Einzelpunkten und Punktgruppen beobachtet. Der am Pullacher Platz im Südwesten des Netzes gelegene Punkt Nr. 3201 ändert seine Höhe zwischen März 2022 und März 2021 um 5.7 mm . In der darauffolgenden Messkampagne am 18.03.2024 wird nur noch eine schwache Veränderung von 0.1 mm gemessen. Es ist zu vermuten, dass es sich um einen sehr lokalen Effekt, ggf. eine Punktinstabilität oder eine Fehlmessung, handelt.

Auf dem Betriebsgelände des Heizkraftwerks Süd wurden in unmittelbarer Nähe der Bohrlochköpfe und Anlagen zur Aus- und Einspeisung des Thermalwassers vom Vermessungsbüro Gütz 24 Punkte vermarktet und wiederholt nivellitisch vermessen (Abbildung 22). In diesem Bereich treten zwischen den ersten beiden Messepochen im März 2021 und März 2022 deutliche Bodenhebungen von bis zu 11.1 mm auf. Dabei kann unterschieden werden zwischen den verschiedenen Nutzungen der Bohrungen. In unmittelbarer Nähe zu den Förderbohrungsköpfe liegen die Höhenänderungen zwischen 9 und 11 mm , nahe der Re-Injektionsbohrungen werden niedrigere Werte zwischen 5 und 8 mm beobachtet. Da die Anlage im Juli 2021 ihren Betrieb aufnahm, kann vermutet werden, dass es sich bei den gemessenen Höhenänderungen um einen thermischen Einlauf-Effekt handelt. Der Temperaturunterschied zwischen dem geförderten und dem re-injizierten Wasser könnte die unterschiedlichen Raten erklären. Mit Betriebsbeginn einsetzender Druckaufbau in den Bohrungen könnte eine weitere Rolle spielen.

In den nachfolgenden Jahren reduzieren sich die Hebungsraten deutlich, da sich vermutlich ein Temperatur- und/oder Druckgleichgewicht einstellt (Abbildung 22 (b)). Zwischen den Messkampagnen im März 2024 und März 2022 werden nur noch Hebungen zwischen 1.7 mm und 7.9 mm beobachtet, wobei die geringsten Werte nahe des Kopfes der Re-Injektionsbohrung TH5 und die größten Werte nahe der Förderbohrung TH1 gemessen werden. Abschließend ist zu bemerken, dass im Austrittsbereich der Bohrungen wegen umfangreicher Bauarbeiten in den Jahren vor Betriebsbeginn keine PS-Punkte aus den bisherigen InSAR-Analysen zur Verfügung stehen. Zu diesem Zweck müsste eine neue Prozessierung erfolgen auf Basis eines Datenstapels, der vollständig nach Abschluss der Bauarbeiten erhoben wird.

Im Stadtgebiet München sind genügend PS-Punkte für den Methodenvergleich vorhanden. An insgesamt 36.693 Gitterpunkten liegen Messwerte aus dem vertikalen Orthoprodukt des EGMS vor. Für den Vergleich wurden zunächst jeweils drei Messepochen der PSI-Resultate, die den Zeitpunkt der Messkampagne im Nivellement umrahmen, gemittelt. Anschließend wurde die Differenz der Mittelwerte berechnet. Auch in den PSI Differenzen ist im fraglichen Gebiet unmittelbar nördlich der Bohrungsendpunkte TH3 und TH5 ein zusammenhängender Hebungsbereich zu erkennen (Abbildung 21). Die Höhenänderungen betragen 2.4 mm im Maximum (ca. 500 m nordwestlich des Maximums im Nivellement) und fallen damit etwas geringer aus als im Nivellement. Der Hebungsbereich hat eine Ausdehnung von ca. 1 km in Nordsüd- und 2 km in Ostwestrichtung. Es muss betont werden, dass das beobachtete Hebungereignis vor dem Hintergrund des nominellen RSME des vertikalen Orthoproduktes des EGMS von 2.1 mm nur schwach signifikant ist. Daher ist

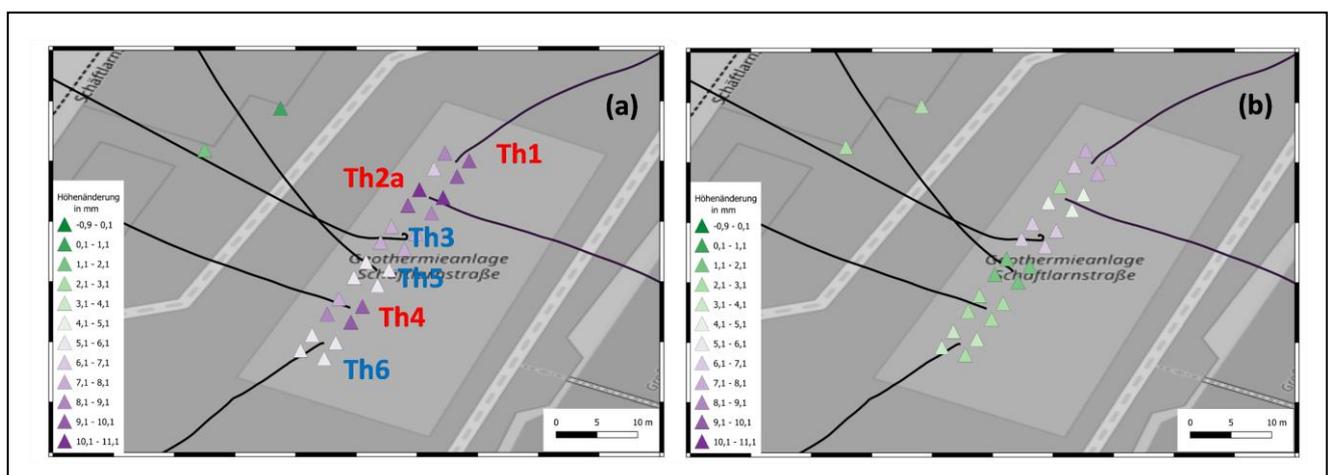


Abbildung 22: Höhenänderungen am Anschlussterminal der Bohrungen auf dem Gelände des Kraftwerks Süd in der Schäftlarnstraße. (a) März 2022 – März 2021, (b) März 2024 – März 2022.

die Verifizierung durch eine unabhängige Auswertung der C-Band Radarszenen auf Basis unterschiedlicher statistischer Vorgehensweisen zur Identifizierung von PS-Punkten bedeutsam.

In den Ergebnissen der PSI-Vergleichsanalyse am GIK fällt der Bereiche positiver Höhenänderungen um die Endpunkte der Bohrungen TH3 und TH5 etwas deutlicher ins Auge, was mit der Halbierung der Gitterweite für die Berechnung der Vertikalkomponente von 100 m auf 50 m erklärbar ist (Abbildung 23). An insgesamt 52.364 Gitterpunkten liegen Messwerte vor. Die maximale Hebungsdifferenz, ca. 450 m nordwestlich des Maximums im Nivellement gelegen, beträgt 2.8 mm. Die Übereinstimmung der PSI Analysen von GIK und EGMS ist zufriedenstellend. Das Hebungssignal zeigt sich robust und setzt sich trotz der sehr unterschiedlichen Prozessierungsansätze und Parametereinstellungen beider Institutionen durch. Das ist ein wichtiger Beleg dafür, dass zumindest in großstädtischen Bereichen das Gesamtfehlerbudget der C-Band PSI-Prozessierung ausreichend niedrig ist, um ausgedehnte Bodenbewegungsereignisse mit Beträgen von wenigen Millimetern zu detektieren. Nimmt man das Nivellement als vollständig unabhängige Technik hinzu, so kann man davon ausgehen, dass das beobachtete Signal einer realen Bodenhebung entspricht. In allen drei Ergebnissen tritt das Hebungsmaximum wenige 100 m nordwestlich der Mitte einer Verbindungslinie zwischen den Endpunkten der Bohrungen TH3 und TH5 auf. Die Ausdehnung des Hebungsgebietes von ca. 2 km in Ostwestrichtung liegt in der Größenordnung der Bohrungstiefen von 2.7 km (TH3) und 3.1 km (TH6) unter Flur und lässt die Möglichkeit einer Ursache im tieferen Untergrund zu.

Bei Vergleich und Beurteilung der Messergebnisse ist zu berücksichtigen, dass das GIK PSI-Ergebnis im Gegensatz zum EGMS nicht absolut kalibriert ist, sondern sich auf ein Referenzgebiet (Radius 500 m, Zentralpunkt 11.548° / 48.197°) im Norden Münchens bezieht. Der Minimalabstand des Referenzgebietes zu einer aktiven Geothermiebohrung beträgt 6.5 km.

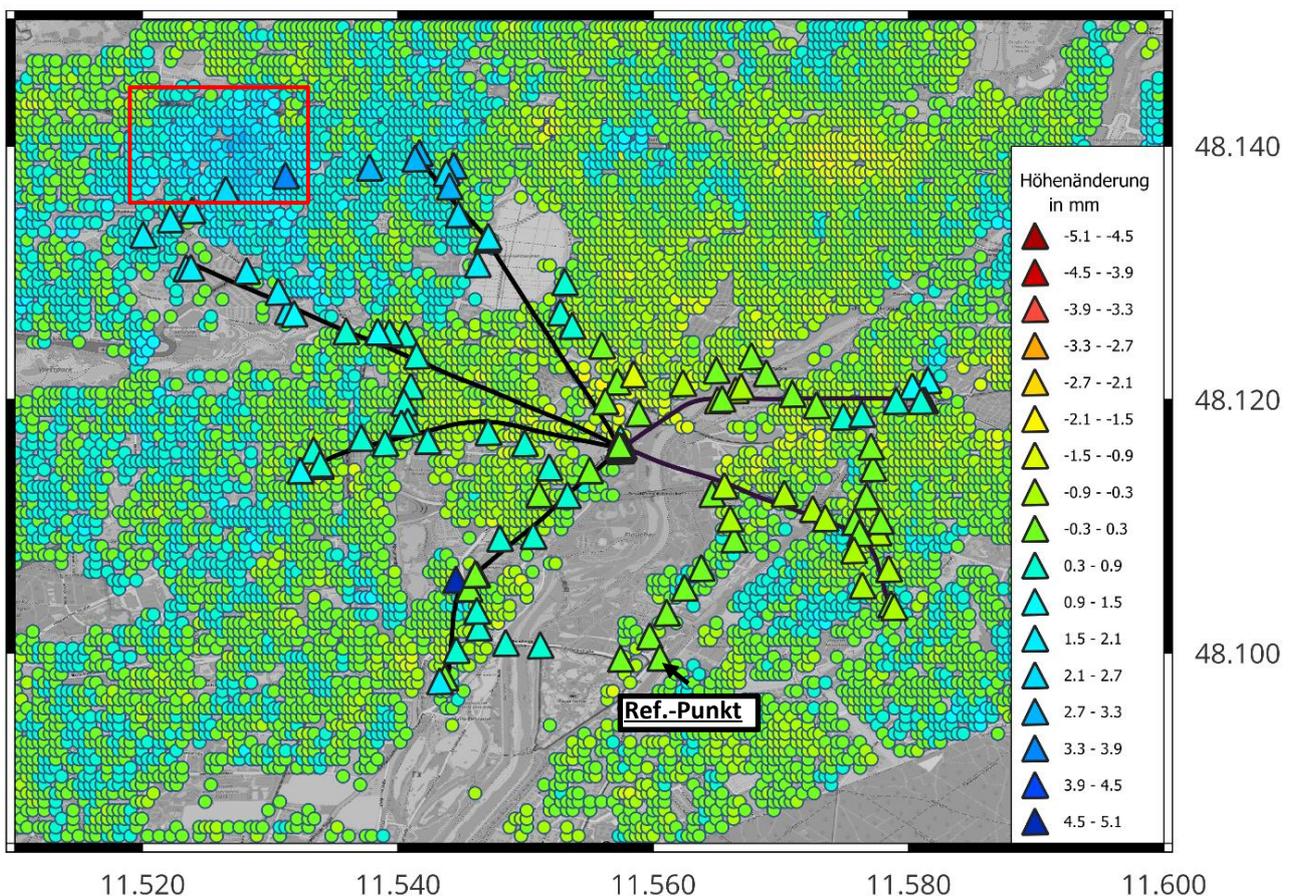


Abbildung 23: Höhendifferenzen März 2022 – März 2021 in der Umgebung der Geothermieanlage am Kraftwerk München Süd (Schäftlarnstraße), abgeleitet aus Wiederholungsnivellements (Dreiecke) und einer PSI-Analyse von 291 Sentinel-1 Szenen aus auf- und absteigenden Orbits, durchgeführt am GIK (Kreise). Das rote Rechteck markiert den Bereich, aus dem die Zeitreihen in Abbildung 24 zusammengestellt wurden. „Ref.-Punkt“ bezeichnet den Höhenanschlusspunkt des Nivellements; das Referenzgebiet der PSI-Resultate liegt außerhalb des Bildes im Norden.

Vor dem quantitativen Vergleich der Messergebnisse muss darauf geachtet werden, die Referenzrahmen anzugleichen, da sonst die Gefahr besteht, dass Niveauunterschiede in die Ergebnisse eingehen. Unter der Voraussetzung, dass die Bezugspunkte – wie vorausgesetzt – stabil sind und sich zwischen den Messepochen nicht bewegen, fällt ihr Einfluss bei der Betrachtung von Höhendifferenzen heraus, die unterschiedliche Wahl muss daher nicht weiter beachtet werden. Zumindest für den Anschlusspunkt des Nivellements ist dies jedoch fraglich. Der als Referenz verwendete Höhenfestpunkt HFP 0351 liegt im potentiellen Bewegungsgebiet, sowohl was die Überwachung des Einwirkungsbereiches der Geothermieanlage Schäftlarnstraße als auch das Hintergrundsignal in München Stadt angeht. Bewegungen des Anschlusspunktes in nicht bekannter Größe zwischen den Messepochen gehen in die Höhendifferenzen ein und könnten den direkten Vergleich der Ergebnisse erschweren. Eine Inspektion von PS-Punkten im Bereich des Höhenanschlusspunktes des Nivellements ergibt jedoch keine Hinweise auf signifikanten lokale Verschiebungstendenzen, sodass diese Gefahr für den obigen Vergleich vermutlich als gering eingeschätzt werden kann.

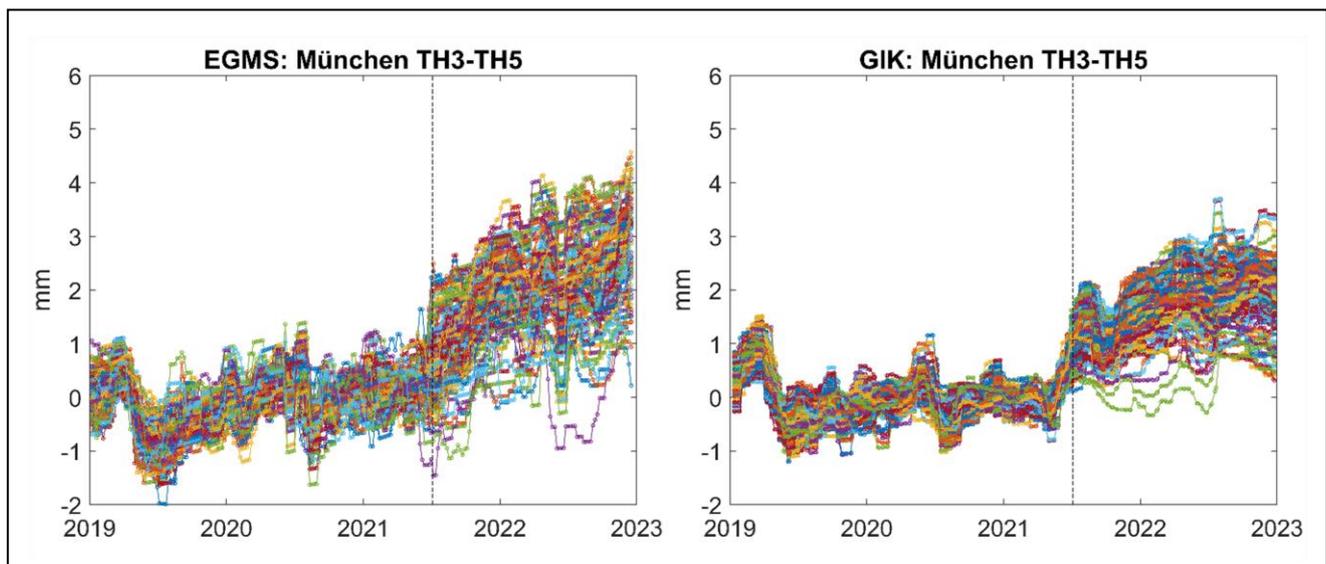


Abbildung 24: PSI-Zeitreihen aus einem ca. 1 km^2 Gebiet im Hebungsbereich nördlich der Re-Injektionsbohrungen TH3 und TH5. Die vertikale Linie markiert den Betriebsbeginn der Geothermieanlage Schäftlarnstraße.

Einer der Vorteile der multitemporalen SAR-Interferometrie ist die Möglichkeit, zeitliche Abläufe zu studieren. Abbildung 24 zeigt eine Zusammenstellung von PSI-Zeitreihen aus einem ca. 1 km^2 großen Ausschnitt aus dem Hebungsgebiet, zentriert auf das Hebungsmaximum (Abbildung 24). Um alle Datenreihen geeignet in einer Grafik zeigen zu können, wurden Offsets und lineare Trends vor Juli 2021 entfernt. Sowohl im Analyseergebnis des EGMS als auch im Ergebnis des GIK ist ein plötzlicher Einsatz der Hebungen im Juli 2021 zu erkennen. Bis zum Jahresende 2022 klingt die Hebungsrate etwas ab; der Hebungsbetrag zwischen Juli 2021 und Dezember 2022 liegt zwischen 3 und 4 mm im Maximum. Die Hebungsraten der PS-Punkte innerhalb des Ausschnittes unterscheiden sich deutlich, was für einen Hebungsbuckel, der durch eine Deformationsquelle geringer Ausdehnung im tiefen Untergrund hervorgerufen wird, physikalisch plausibel ist. Eine Mittelung aller ausgewählten Zeitreihen zur Reduzierung stochastischer Rauschanteile ist daher nicht sinnvoll. Zwischen den Analyseergebnissen des GIK und des EGMS werden Unterschiede im mm-Bereich deutlich, die auf die individuelle Prozessierungsstrategie zurückzuführen sind. Das Hebungssignal ist jedoch in beiden Fällen klar erkennbar. Korrelierte Variationen in den Zeitreihen sowohl des GIK als auch des EGMS, erkennbar im Zeitintervall vor Einsetzen des Hebungsereignisses, deuten auf einen Einfluss zeitlich und räumlich langweiliger Fehlerterme, z. B. atmosphärische Residuen. Sie gehen in das Gesamtfehlerbudget ein.

Das Einsetzen der Hebung fällt zeitlich mit dem Betriebsbeginn der Geothermieanlage im Heizkraftwerk Süd Anfang Juli 2021 zusammen. Bei TH3 und TH5 handelt es sich um Re-Injektionsbohrungen, in denen das abgekühlte Tiefenwasser unter Druck wieder in den Untergrund gepresst wird. Denkbar ist daher ein hydraulischer Effekt, der sich aus einer instantanen, elastischen Deformation der Bodenmatrix durch die rasch einsetzende Druckerhöhung an der Filterstrecke der Bohrungen sowie einer sich diffusiv, d. h. zeitversetzt

ausbreitenden Porendruckstörung zusammensetzt. Qualitativ kann ein solches Modell das zeitliche und räumliche Verhalten der PS-Zeitreihen erklären. Ob die Beobachtungen auch quantitativ erklärt werden können, müssen gekoppelte numerische THM-Modellierungen zeigen. Entsprechende Rechnungen werden derzeit durch den Projektpartner Erdwerk für die Anlage Schäftlarnstraße durchgeführt; zum Zeitpunkt der Abfassung dieses Berichtes lagen allerdings noch keine Ergebnisse vor.

Die Beschränkung der Diskussion auf das TH3-TH5-Ereignis greift allerdings zu kurz. Abbildung 25 zeigt die Verschiebungsdifferenzen zwischen März 2021 und Dezember 2023 auf Basis einer PSI-Analyse des Zeitraums Januar 2019 bis Dezember 2023, durchgeführt im März 2024 mit dem Prozessierungsansatz des GIK. Es ergibt sich ein unruhiges Bild mit verschiedenen Hebungen und Senkungen der Größenordnung $\pm 2.5 \text{ mm}$ und räumlichen Wellenlängen von $2 - 3 \text{ km}$, abgesehen von einem sehr deutlichen Absenkungsgebiet im Zentrum von München, das weiter unten diskutiert wird. Das Hebungsgebiet nördlich von TH3 und TH5 bleibt bestehen, die Hebungen nehmen weiter zu mit einer Rate von 1.0 mm/Jahr (Abbildung 26 (a)). Im Stadtteil Bogenhausen im Münchner Osten manifestiert sich allerdings ebenfalls ein Hebungsgebiet mit vergleichbarer Ausdehnung und Hebungsrate. Abbildung 26 (b) zeigt, dass das Bewegungsereignis in dieser Region gegen Ende des Jahres 2021 sehr sanft einsetzt und sich kontinuierlich mit einer Rate von ca. 1.0 mm/Jahr weiterentwickelt. Weitere derartige Gebiete sind in Abbildung 25 erkennbar; ein Zusammenhang mit geothermischer Produktion kann in diesen Fällen schwerlich hergestellt werden. Als Ursache für die zeitlich und räumlich langwellige Bodenunruhe kommen Bautätigkeiten im flachen Untergrund in Frage, die auf vielfältige Weise (z. B. Bodenkompaktion, Kanalisationsarbeiten mit vorübergehender oder dauerhafter Schaffung von Hohlräumen, Veränderungen des Grundwasserregimes) zu Verschiebungen an der Erdoberfläche führen können.

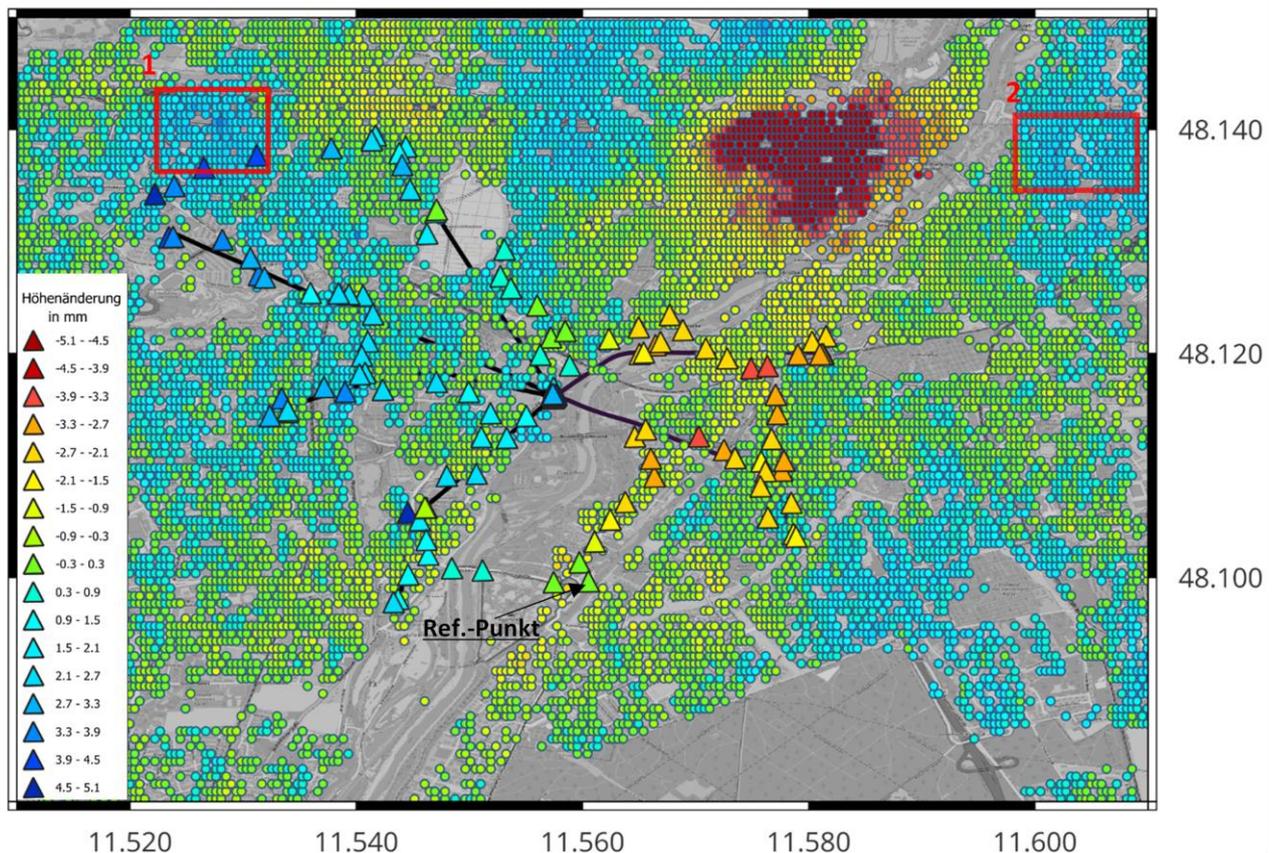


Abbildung 25: Höhendifferenzen in der Umgebung der Geothermieanlage am Kraftwerk München Süd (Schäftlarnstraße), abgeleitet aus Wiederholungsnivellements für den Zeitraum März 2024 – März 2021 (Dreiecke) und der PSI-Analyse des GIK für den Zeitraum Dezember 2023 – März 2021 (Kreise). Rote Rechtecke markieren den Bereich, aus dem die Zeitreihen in Abbildung 26 zusammengestellt wurden.

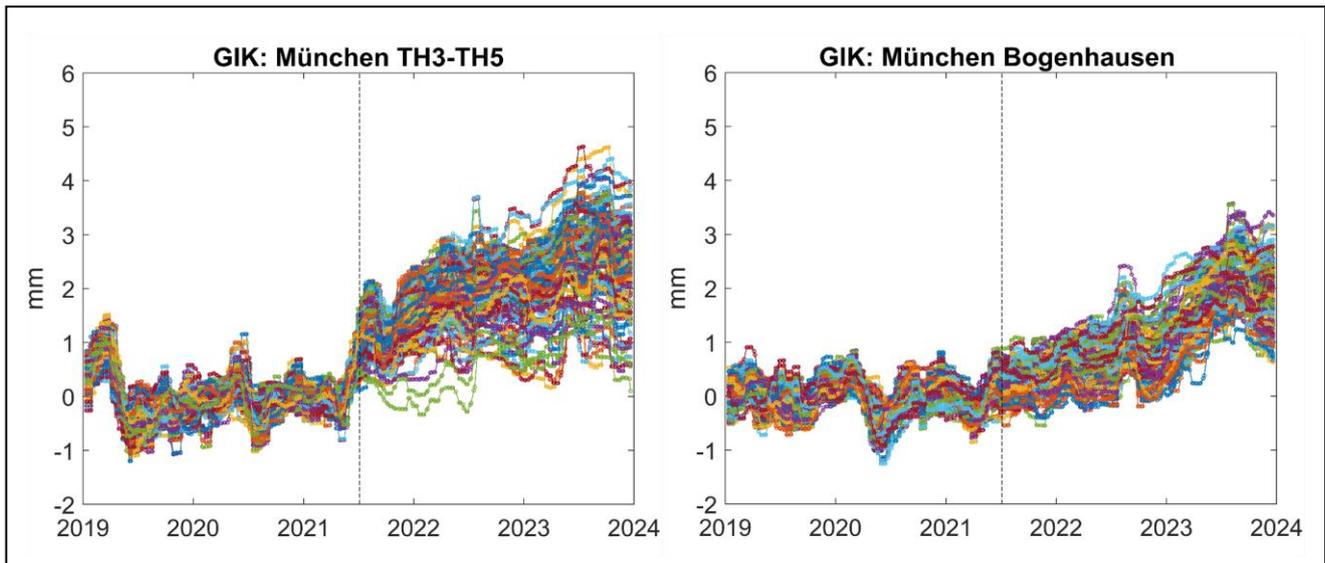


Abbildung 26: PSI-Zeitreihen aus jeweils einem ca. 1 km^2 Gebiet im Hebungsbereich nördlich der Re-Injektionsbohrungen Bohrungen TH3 und TH5 (links, Rechteck 1 in Abbildung 25) und einem Vergleichsgebiet westlich der Isar (rechts, Rechteck 2 in Abbildung 25)

Das Beispiel zeigt, dass in München offensichtlich verschiedene Untergrundprozesse aktiv sind, die zu vergleichbaren Oberflächenbewegungen führen. Das TH3-TH5-Ereignis nimmt daher keine Sonderstellung ein. Das heißt nicht, dass es nicht durch einen hydraulischen Effekt im Zusammenhang mit dem Beginn des Förder- und Verpressungsbetriebs erzeugt wird, aber es hebt sich noch nicht aus dem Hintergrundsignal im Stadtgebiet heraus, sodass ein solcher Zusammenhang beobachtungstechnisch nicht eindeutig hergestellt werden kann. Es ist bemerkenswert, dass auch im Nivellement während der dritten Messkampagne am 18.03.2024 im Vergleich zu den sehr ruhigen Verhältnissen an den anderen Geothermiestandorten überraschend große Höhenänderungen gemessen wurden (Abbildung 25). Wie in den PSI Ergebnissen stabilisiert sich das Hebungsgebiet nördlich TH3-TH5 mit nunmehr maximal $4,8 \text{ mm}$ in der Höhendifferenz März 2024 – März 2021. Im östlichen Teil des Nivellementnetzes wird nun jedoch eine Absenkungstendenz von bis zu $-4,1 \text{ mm}$ deutlich. Eine Erklärung für diese Beobachtung steht noch aus. Eine Übereinstimmung mit den PSI Ergebnissen, die in diesem Bereich geringe Absenkungstendenzen von ca. $-1,2 \text{ mm}$ zeigen, ist nur schwach gegeben. Allerdings kann der Vergleich nicht abschließend beurteilt werden, da die überdeckten Zeiträume nicht identisch sind und die PSI-Zeitreihen bereits drei Monate vor der dritten Nivellementkampagne enden. Es ist dabei zu erwähnen, dass die Absenkungstendenz in den InSAR-Ergebnissen auch im Umfeld des Höhenanschlusspunktes anhält, sodass ein Einfluss von Bewegungen des Referenzpunktes nach gegenwärtigem Stand nicht ausgeschlossen werden kann. Es wird empfohlen, diese Beobachtungen weiter zu verfolgen, das neueste Update des EGMS heranzuziehen (Daten bis Dez. 2023), und gegebenenfalls zeitnah Wiederholungsmessungen durchzuführen.

Eindeutig dominiert wird das PSI Verschiebungsfeld durch ein starkes Absenkungsgebiet im Bereich der Untergrundbaustelle München Marienhof (Abbildung 25). Es handelt sich hierbei um den Einfluss einer geplanten und öffentlich bekanntgegebenen Baumaßnahme im Zuge der Konstruktion des neuen Bahnhofs der S-Bahn-Stammstrecke Süd. Nach den auf der Webseite der Deutschen Bahn zum Bau der 2. Stammstrecke (<https://www.2.stammstrecke-muenchen.de>) abrufbaren Informationen wird am Marienhof in ca. 40 m Tiefe ein unterirdische Station in Schlitzwand-Deckelbauweise errichtet. Um während der Aushubarbeiten im Inneren den Wasserdruck auf die Schlitzwand zu reduzieren, wird der Grundwasserpegel großflächig durch Abpumpen gesenkt. Dazu wurden im Verlauf des Jahres 2021 95 Brunnen und 25 Grundwassermessstellen (Süddeutsche Zeitung, 21.06.2021) abgeteuft. Die Bauwasserhaltung begann Ende 2021 (<https://www.2.stammstrecke-muenchen.de/projekttagbuch.html?PG=160>).

Die mit der Bauwasserhaltung einhergehende Druckabnahme im Untergrund führt zu einem Einsinken der Erdoberfläche, die im PSI-Bild eindeutig sichtbar wird (Abbildung 25). Abbildung 27 zeigt einen Ausschnitt der Karte der PSI-Verschiebungsdifferenzen mit angepasster Skalierung. Im Zentrum der Absenkungsmulde wird

zwischen März 2021 und Dezember 2023 ein Absenkungsbetrag bis zu -8.6 mm beobachtet, entsprechend einer Absenkungsrate von ca. -4 mm/Jahr . Zu den Rändern hin nimmt der Absenkungsbetrag kontinuierlich ab, die Ausdehnung der Mulde beträgt ca. 2 km in Ostwest- und 1.6 km in Nordsüd-Richtung. Im Ostwest-Profil schnitt ist die etwas steiler Flanke im Westen gut zu erkennen (Abbildung 27). Das Profil führt durch das Maximum der Absenkung im Dezember 2023, das ca. 100 m östlich des Bauplatzes Marienhof erreicht wird. Die eingetragenen Fehlerbalken ($\pm 1.2\text{ mm}$) entstammen einer Analyse der räumlichen Varianz der PSI-Daten im Stadtgebiet München. Sie sind etwas kleiner als die pauschalen Angaben des EGMS, vermutlich da Verzerrungen im Zuge der GNSS-Kalibrierung im kleinräumigen Messgebiet nicht zum Tragen kommen. Ergänzend ist zu erwähnen, dass an den Flanken der Absenkungsmulde in der Ostwest-Komponente der PSI-Ergebnisse Horizontalverschiebungen bis zu 3 mm gemessen werden (nicht im Bild gezeigt), im östlichen Teil jedoch überlagert von anderen Effekten. Die Messwerte in horizontaler Richtung sind nicht wirklich signifikant, passen aber nach Größe und Richtung zu physikalischen Vorstellungen über Absenkungsprozesse. Das mit InSAR vermessene Absenkungsgebiet endet an den Isarauen (Abbildung 27). Ob sich die Absenkungsmulde in den folgenden drei Monaten bis zu den ca. 900 m weiter südlich gelegenen Messpunkten des Nivellements im Kronepark ausgedehnt hat, kann auf Basis der bis Projektende vorliegenden Daten nicht abschließend beurteilt

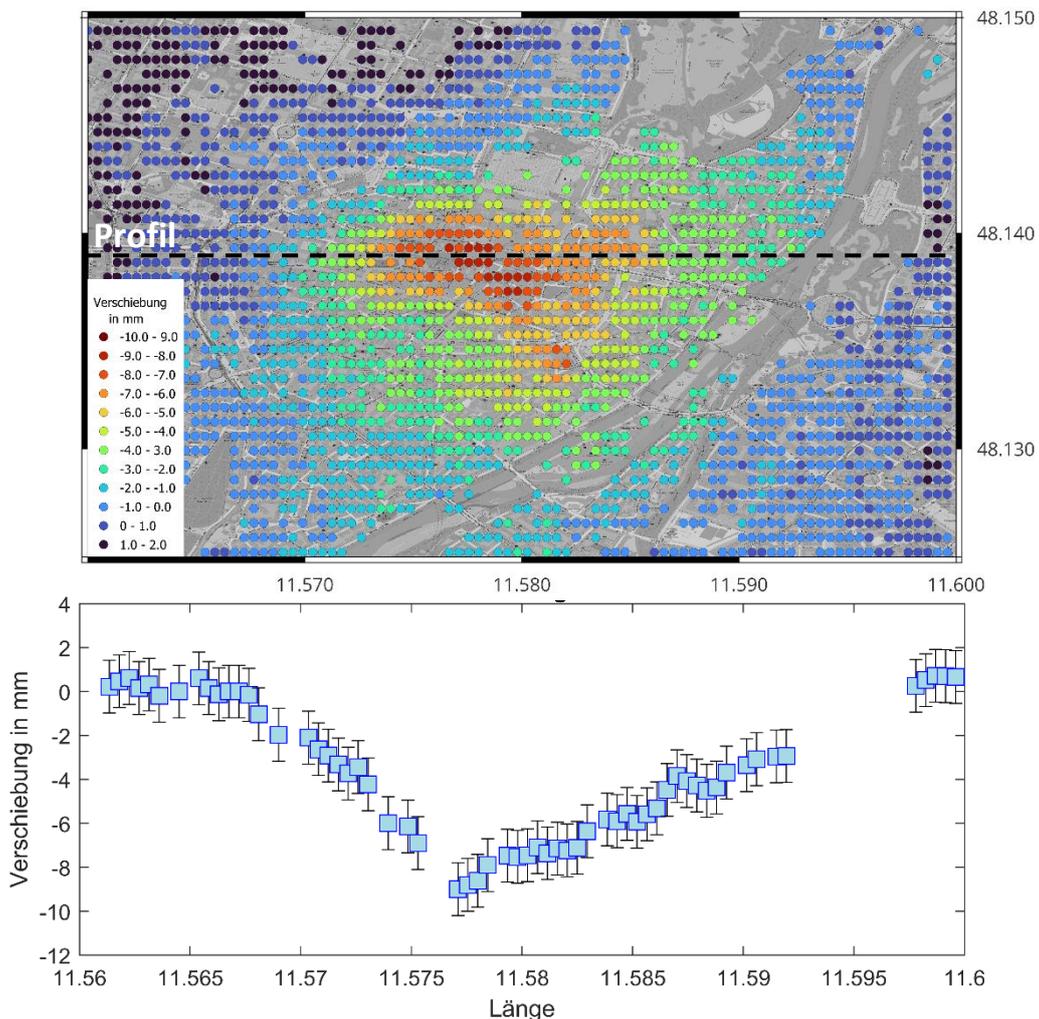


Abbildung 27: Detailkarte des Senkungsgebietes im Bereich der Bauarbeiten zur 2. Stammstrecke an der Untergrundstation Marienhof mit angepasster Farbskala (oben), Ost-West-Profil durch das Maximum der Absenkung (unten). Die Fehlerbalken wurden aus einer statistischen Analyse der räumlichen Streuung der vertikalen PSI-Komponente der GIK-Analyse bestimmt. Die beobachtete Absenkung ist hoch signifikant, die Absenkungsmulde kann mittels PSI detailliert vermessen werden.

werden. Die nivellierten Absenkungsbeträge im März 2024 scheinen aber zu hoch für das durch die Baumaßnahme am Marienhof hervorgerufen Absenkungsfeld zu sein (vergl. Abbildung 25).

Eine nähere Untersuchung dieses Bewegungsereignisses war nicht Gegenstand des vorliegenden Projektes, deshalb haben wir uns auf öffentlich zugängliche Informationen beschränkt. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Deutsche Bahn bzw. die verantwortliche Baufirma die Absenkungseffekte umfangreich vermessen und dokumentieren wird. Laut dem Projekttagbuch (<https://www.2.stammstrecke-muenchen.de/projekttagbuch.html?PG=160>) wird unter anderem ein Netzwerk von empfindlichen Schlauchwaagen mit einer Sensitivität von 0.1 mm betrieben, um durch die Grundwasserabsenkung induzierte Gebäudeneigungen zu dokumentieren. Auch dürften Modellierungen der erwarteten Oberflächendeformationen vorliegen. Es besteht damit grundsätzlich die Möglichkeit, in Kooperation mit der Deutschen Bahn eine Fallstudie für München zu erarbeiten, in der die Genauigkeit der PSI-Ergebnisse und damit die Eignung für die Bestimmung des Einwirkungsbereiches anhand dieses Materials weitergehend validiert wird. Es besteht telefonischer Kontakt zur Bahn, die einem Einsatz der Radarinterferometrie zur Baustellenüberwachung nicht abgeneigt ist (Thiemann, priv. Komm., 30. April 2024).

Auch ohne eine solche quantitative Untersuchung zeigt dieses Beispiel sehr deutlich, dass Bewegungsereignisse mit Beträgen $> 6\text{ mm}$ und Raten $> 2\text{ mm/Jahr}$ mittels multitemporaler SAR-Interferometrie auf Basis der C-Band-Daten der Satellitenmission Sentinel-1 hochsignifikant detektiert und in ihrer zeitlichen und räumlichen Entwicklung verfolgt werden können. Diese Werte sind kompatibel mit der höchsten Genauigkeitsforderung nach MarksbergV. Nach unserer Meinung ist die Methode daher für die Aufgabe der Erfassung flächenhafter Verschiebungseignisse an der Erdoberfläche mit Dimensionen von einigen 100 m bis zu mehreren Kilometern qualifiziert und sollte zur Bestimmung des Einwirkungsbereiches von Geothermieanlagen auf jeden Fall berücksichtigt werden.

2 LITERATURVERZEICHNIS

- Adam, N. (2019): Methodology of a Troposphere Effect Mitigation Processor for SAR Interferometry. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, Vol. 12, No. 12, DOI: 10.1109/JSTARS.2019.2957919.
- Bekaert, D.P.S., Walters, R.J., Wright, T.J., Hooper, A.J., and Parker, D.J. (2015a): Statistical comparison of InSAR tropospheric correction techniques, *Remote Sensing of Environment*, doi: 10.1016/j.rse.2015.08.035.
- Bekaert, D.P.S., Hooper, A.J., and Wright, T.J. (2015b): A spatially-variable power-law tropospheric correction technique for InSAR data, *JGR*, doi:10.1029/2014JB011558
- Brunckhorst, M. (2015): Ein allgemeines spektrales Konzept zur qualitativen und quantitativen Analyse der Verzerrung im 1. und 2. Moment von Parameterschätzungen infolge unterschiedlicher Fehler sowie Nichtlinearität im Beobachtungsmodell und Anwendung auf geodätische Netze, HafenCity Universität Hamburg, 270 Seiten
- [CODE] https://www.aiub.unibe.ch/research/code_analysis_center/index_eng.html
- Dach, R., S. Lutz, P. Walser, P. Fridez (Eds); 2015: Bernese GNSS Software Version 5.2. User manual, Astronomical Institute, University of Bern, Bern Open Publishing. DOI: 10.7892/boris.72297; ISBN: 978-3-906813-05-9. [DLR 2022] EOC technologies for the new European Ground Motion Service, May 25, 2022, https://www.dlr.de/eoc/en/desktopdefault.aspx/tabid-18220/29005_read-77332
- Dörr, N., Schenk, A., Hinz, S. (2022): Fully Integrated Temporary Persistent Scatterer Interferometry, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 60, pp. 1-15, Art no. 4412815, doi: 10.1109/TGRS.2022.3200155.
- [EGMS Requirements 2021] Proietti, S., Cerri, M. (2021): End User Requirements, Document Code: EGMS-D15-URD-SC1-8.0-017, 20/12/2021, <https://land.copernicus.eu/user-corner/technical-library/egms-end-user-requirements-document>
- [EGMS Theory 2021] Ferretti, A., Passera, E., Capes, R. (2021): Algorithm Theoretical Basis Document, Document Code: EGMS-D3-ALG-SC1-2.0-006, 20/12/2021, <https://land.copernicus.eu/user-corner/technical-library/egms-algorithm-theoretical-basis-document>
- [EGMS Calibration 2021] Larsen, Y., Marinkovic, P., Kenyeres, A., Tóth, S. (2021): GNSS Calibration Report, Document Code: EGMS-D19.2-GCR-SC1-3.0-031, 20/12/2021, <https://land.copernicus.eu/user-corner/technical-library/egms-gnss-calibration-report>
- [EGMS Harmonisation 2021] Kotzerke, P. (2021): Quality Assurance & Control Report – Harmonisation Tests, Document Code: EGMS-D10.1-QCR-SC1-3.0-012, 22/10/2021, <https://land.copernicus.eu/user-corner/technical-library/quality-assurance-and-control-report-2013-harmonisation-test>
- [EGMS Quality 2022] Kotzerke, P., Larsen, Y., Minati, F. (2022): Quality Assurance & Control Report, Document Code: EGMS-D10.4-QCR-SC2-3.0-042, 09/07/2022, <https://land.copernicus.eu/user-corner/technical-library/egms-quality-assurance-control-report>
- [ERA 5] <https://cds.climate.copernicus.eu/datasets/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>
- [EU 2021] <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2021/04/19/council-adopts-position-on-14-8-billion-eu-space-programme-for-2021-2027/>
- Even, M., Schulz, K. (2018): InSAR deformation analysis with distributed scatterers: A review complemented by new advances, *Remote Sensing* 10 (5), 744
- Even, M. (2019): Adapting StaMPS for Jointly Processing Distributed Scatterers and Persistent Scatterers. IGARSS 2019 - 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Proceedings. Yokohama, Japan, 28.07.2019–02.08.2019. Ed.: A. Hirose, 2046–2049, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). doi:10.1109/IGARSS.2019.8897808
- Even, M., Westerhaus, M., Kutterer, H. (2024a): German and European Ground Motion Service – a Comparison, *PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, Volume 92, pages 253–270.
- Even, M.; Westerhaus, M.; Kutterer, H.; Reubelt, T.; Wolf, C.; Uskow, J.; Wengert, M.; Bludovsky, S. (2024b). Ground Motion Services and Monitoring of Movements of the Earth’s Surface with InSAR – Present Developments and Perspectives. *ZfV*, 4, 208–2016. doi:10.12902/zfv-0481-2024.
- Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F. (2001): Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 39(1):8-20.

- Ferretti, A., Fumagalli, A., Novali, F., Prati, C., Rocca, F., Rucci, A. (2011): A New Algorithm for Processing Interferometric Data-Stacks: SqueeSAR, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 49, no. 9, pp. 3460-3470, doi: 10.1109/TGRS.2011.2124465.
- Gonzalez, F. R., Parizzi, A., Brcic, R. (2018): Evaluating the impact of geodetic corrections on interferometric deformation measurements, *EUSAR 2018; 12th European Conference on Synthetic Aperture Radar*, pp. 1-5.
- Heidbach, O., M. Rajabi, X. Cui, K. Fuchs, B. Müller, J. Reinecker, K. Reiter, M. Tingay, F. Wenzel, F. Xie, M. O. Ziegler, M.-L. Zoback, and M. D. Zoback (2018): The World Stress Map database release 2016: Crustal stress pattern across scales. *Tectonophysics*, 744, 484-498, doi:10.1016/j.tecto.2018.07.007
- Hooper A, Zebker H, Segall P, Kampes B. (2004): A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophysical Research Letters*. 31.23
- Hooper, A.J. (2006): Persistent scatterer radar interferometry for crustal deformation studies and modeling of volcanic deformation. PhD- Thesis, Stanford University, 05.2006.
- Hooper, A.; Segall, P.; Zebker, H. (2007): Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos. *J. Geophys. Res.* 2007, 112, doi:10.1029/2006JB004763.
- Hooper A. (2008): A combined multi-temporal InSAR method incorporating persistent scatterer and small baseline approaches. European Space Agency, (Special Publication) ESA SP. 649 SP
- Kalia, A.C., Frei, M., Lege, T. (2021): BodenBewegungsdienst Deutschland (BBD): Konzept, Umsetzung und Service-Plattform. *Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (zfv)*, Wißner-Verlag, 146(4), S. 273-279, DOI: 10.12902/zfv-0365-2021
- [Kalia 2022] Nutzungshinweise BBD Sentinel-1 PSI, Andre Kalia / Version: 03 / Stand: 12.04.2022, https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/GG_Fernerkundung/Downloads/Nutzungshinweise-BBD_PSI-Daten.pdf?__blob=publicationFile&v=2
- Parizzi, A., Rodriguez Gonzalez, F., Brcic, R. (2020): A Covariance-Based Approach to Merging InSAR and GNSS Displacement Rate Measurements. *Remote Sens.*, 12, 300, <https://doi.org/10.3390/rs12020300>.
- Parizzi, A., Brcic, R., De Zan, F. (2021): InSAR Performance for Large-Scale Deformation Measurement, in *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 59, no. 10, pp. 8510-8520, doi: 10.1109/TGRS.2020.3039006.
- Seidel, A.; Even, M.; Westerhaus, M.; Kutterer, H. (2024): Signal decomposition of multi-source displacement fields with component analysis methods, applied to InSAR time series of the Epe gas storage cavern field (Germany). *EGU General Assembly 2024*, Copernicus. doi:10.5194/egusphere-egu24-16740.
- Takasu, T. (2009): RTKLIB: Open Source Program Package for RTK-GPS. In *Proceedings of the FOSS4G 2009*, Tokyo, Japan, 20–23.
- [Wanninger] Wanninger, L. (2016). *WaSoft User's Guide*, Dresden; <https://www.wasoft.de/wa2/prog/index.html>