



INSIDE

Stadtwerke München GmbH
Innovative Energie Pullach
Karlsruher Institut für Technologie

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

KONZEPT FÜR EIN INTEGRIERTES GEODÄTISCHES BEOBACHTUNGSSYSTEM ZUR ÜBERWACHUNG DES ERWEITERTEN EINWIRKUNGSBEREICHES IM RAUM MÜNCHEN

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:	Konzept für ein Integriertes Geodätisches Beobachtungssystem zur Überwachung des Erweiterten Einwirkungsbereiches im Raum München
Arbeitspaket:	AP5.2: Integration Deformationsdaten und Kosten/Nutzenanalyse
Meilenstein:	Schlussbericht
Fälligkeitsdatum:	30.11.2024
Tatsächliches Datum:	04.10.2024
Partner:	Zuständig: KIT Beteiligt: SWM, IEP, ERDWERK
Ansprechpartner:	Malte Westerhaus Hansjörg Kutterer Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Geodätisches Institut Teilinstitut Geodätische Erdsystemwissenschaft Leitung: Prof. Dr Hansjörg Kutterer Englerstr. 7 76131 Karlsruhe E-mail: malte.westerhaus@kit.edu , hansjoerg.kutterer@kit.edu
Autoren:	Malte Westerhaus, Hansjörg Kutterer, Bence Ambros
Version:	1.1

Version	Datum	Beschreibung der Ergänzungen, Änderungen, Überprüfungen
1.0	29.07.24	Internes Review durch Projektpartner, Layoutanpassung
1.1	04.10.24	

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINFÜHRUNG	5
2	VORGABEN	5
	2.1 Einwirkungsbereichs-Bergverordnung	5
	2.2 Markscheider-Bergverordnung	6
3	MODELLÜBERLEGUNGEN	7
4	PROBLEME DER BISHERIGEN VORGEHENSWEISE, STAND UND ZUKUNFT	9
	4.1 Fall 1: Schäftlarnstraße	9
	4.2 Fall 2: Pullach	12
	4.3 all 3: Überlagerung mehrerer existierender und geplanter Geothermieanlagen	13
5	FAZIT	15
6	GRUNDZÜGE EINES INTEGRIERTEN GEODÄTISCHEN BEOBACHTUNGSSYSTEMS	16
	6.1 Festlegung des Einwirkungsbereiches	16
	6.2 Stabilitätsüberwachung von Referenzpunkten	18
	6.3 Langzeit-Validierung	20
	6.4 Neufassung der Aufgaben des Markscheiders	20
7	ANHANG	21
	7.1 Alternativer Modellansatz	21
8	REFERENZEN	22

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Modellvergleich für Baierbrunn. Links: numerisches Modell von Gaucher et al. [4]. Rechts: vereinfachtes analoges Modell auf Basis sphärischer Quellen im homogenen Halbraum. Der Durchmesser der 1 cm-Linie beträgt in beiden Modellen 9 km. In Nordsüd-Richtung unterschätzt das vereinfachte Modell den numerischen Ansatz um ca. 18 %. Die rote Linie im Bild links markiert das in Abb. 3 gezeigte Profil.8

Abbildung 2: Modellvergleich für Pullach. Links: numerisches Modell von Gaucher und Egert [5]. Rechts: vereinfachtes analoges Modell auf Basis sphärischer Quellen im homogenen Halbraum. Die Dimensionen des Absenkungstrichters stimmen gut überein, die Ausdehnung des Hebungs buckels im Südwesten wird vom analytischen Modell etwas unterschätzt.8

Abbildung 3: Profilschnitte bestätigen, dass das analoge Modell wesentliche Eigenschaften der numerischen Modellergebnisse wiedergibt. Im Südwesten wird die räumliche Ausdehnung der Oberflächenverschiebungen in beiden Fällen vom analogen Modell tendenziell unterschätzt. Rechts: NNE-SSW-Profil in Baierbrunn (siehe rote Linie in Abb. 1 rechts). Links: NE-SW-Profil in Pullach.9

Abbildung 4: Prognostizierte Senkungsmulde für den Standort Schäftlarnstraße nach einer Laufzeit von 50 Jahren. Der Nullrand des Einwirkungsbereiches (6 mm-Linie nach Markscheider) hat einen Durchmesser von ca. 12 km. Der Durchmesser als 1 mm-Linie als Genauigkeitsgrenze des Nivellements beträgt 22 km. Ein für die Genauigkeit des Nivellements angemessener Referenzpunkt sollte außerhalb dieser Linie liegen. 10

Abbildung 5: Der Referenzpunkt des derzeit ausgeführten Nivellements Schäftlarnstraße liegt auf der -28 mm-Linie des Senkungstrog, er senkt sich damit ab. Infolgedessen wird das Nivellement eine Absenkung von lediglich -8 mm detektieren und damit die tatsächliche Maximalabsenkung von -36 mm um ca. 80 % unterschätzen. Für die weiter außen liegenden Bereiche der Re-Injektionsbohrungen TH3 und TH5 wird stattdessen eine Hebung von knapp 10 mm gemessen, was insbesondere im Sinne des Reservoir-Managements zu falschen Schlussfolgerungen führen kann. 10

Abbildung 6: Links: Prognostiziertes Hebungsbild aufgrund eines durch einen technischen Schaden hervorgerufenen Druckwasseraustritts in 500 m Tiefe. Der Referenzpunkt liegt in diesem Fall außerhalb der Einwirkungsbereiches. Rechts: Analytisches Modell für eine Porendruckerhöhung im Bereich der Austrittsöffnungen an den Bohrungen TH3 und TH5 in einer Tiefe von ca. 2700 m. Aufgrund der Bewegung des Referenzpunktes wird das Hebungssignal im Nivellement um ca. 18 % unterschätzt. Der Effekt liegt für die beobachtete Hebungsamplitude allerdings unterhalb der Messgenauigkeit. 11

Abbildung 7: Überlagerung der prognostizierten Deformationsfelder Schäftlarnstraße und Baierbrunn. Die Einwirkungsbereiche verschmelzen miteinander. Der Geothermiestandort Pullach wird von beiden SWM-Standorten beeinflusst. 12

Abbildung 8: Beeinflussung des Standortes Pullach durch die Einwirkungsbereiche Schäftlarnstraße und Baierbrunn. Der Fußpunkt der Produktionsbohrung Th1a liegt innerhalb der -10-mm-Linie des Absenkungstroges Schäftlarnstraße, der Fußpunkt der Injektionsbohrung Th3 liegt innerhalb der entsprechenden Linie des Absenkungstroges Baierbrunn. Das derzeitige Nivellementsnetz zur Überwachung der Bohrungen in Pullach kann die Einflüsse nicht erkennen oder trennen und wird gegebenenfalls zu falschen Schlussfolgerungen bzgl. der Senkungsursachen in Pullach führen. 13

Abbildung 9: Prognostizierter gemeinsamer Einwirkungsbereich der Standort Schäftlarnstraße, Pullach und Baierbrunn. 14

Abbildung 10: Prognostizierter gemeinsamer Einwirkungsbereich der Standorte aller im Projekt INSIDE betrachtete Standorte von SWM und IEP. Der Nullrand des gemeinsamen Einwirkungsbereiches hat eine Maximalausdehnung von 37 km, die 1 mm-Linie hat einen Durchmesser von 44 km. Der Referenzpunkt des Nivellements sollte außerhalb dieser Linie liegen. 14

Abbildung 11: Karte der Vertikalverschiebungen, abgeleitet aus einer Persistent-Scatterer-Analyse von 291 Szenen der Satelliten Sentinel-1a und -1b für auf- und absteigende Orbits für den Zeitraum März 2021 bis März 2023. Erkennbar sind alternierende Hebungs- und Senkungsgebiete im Stadtgebiet München mit Amplituden von ca. +3 mm bis -6 mm [14]. 17

Abbildung 12: Standorte der SAPOS-Station München sowie der 4 permanenten GNSS-Referenzstationen, die im Rahmen von INSIDE installiert wurden (rote Symbole). 19

Abbildung 13: Muster der Oberflächenverschiebungen nach Übertragung der Mogi-Modell-Parameter für das Modell von Gaucher & Egert [5] auf die Standorte von SWM. 21

Quellenangaben:

Abbildungen 1 (rechts), 2 (rechts), 3 wurden mit MATLAB Version: 9.14.0.2239454 (R2023a) Update 1 erstellt.

Abbildungen 4 – 13 wurden mit QGIS erstellt.

1 EINFÜHRUNG

Wichtige Fragestellungen im Gemeinschaftsprojekt INSIDE waren die Untersuchung induzierter Seismizität und Bodenbewegungen in Verbindung mit der Gewinnung geothermischer Energie im Großraum München, die Untersuchung innovativer Beobachtungstechniken sowie die Einrichtung eines Prototyps für ein Reservoir-Management-System. Zu den Tätigkeiten gehörten unter anderem die Akquisition und Analyse von Messdaten und die Durchführung thermisch-hydraulisch-mechanischer Modellierungen. Die Ergebnisse wurden auf dem Abschlusstreffen zum INSIDE-Projekt am 07. Mai 2024 in Pullach dem Fachpublikum vorgestellt und werden zum Jahresende im Abschlussbericht veröffentlicht.

In der vorliegenden Konzeptstudie werden die aus den Ergebnissen folgenden Konsequenzen für die Bestimmung des Einwirkungsbereichs und seiner zeitlich veränderlichen Grenzen diskutiert. Es wird aufgezeigt, dass die derzeitige Vorgehensweise nicht geeignet ist, die Vorgaben der Einwirkungsbereichs-Bergverordnung zu erfüllen und dass das für diese Aufgabe notwendige Messkonzept grundsätzlich neu gedacht werden muss. Dabei beschränkt sich diese Studie auf die Benennung der derzeitigen Unzulänglichkeiten sowie auf die Formulierung der Grundzüge für ein überarbeitetes geodätisches Messkonzept. Die konkrete und detaillierte Ausgestaltung des Konzeptes kann im Rahmen dieser Studie nicht erfolgen. Dies muss im Rahmen eines Folgeprojektes oder Auftrages unter Beteiligung aller relevanten Gruppen erfolgen (Anlagenbetreiber, Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landentwicklung und Energie (StMWi), Bayerisches Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung (LDBV), Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Technische Universität München (TUM), Karlsruher Institut für Technologie (KIT)).

Eine Vorbemerkung zu den nachfolgenden Abbildungen: für den Modellvergleich wurde eine Farbskala entsprechend der numerischen Modelle von Gaucher et al. [4] und Gaucher und Egert [5] verwendet (Absenkung in blauen Farben). Die Abbildungen zu den Szenarien (Abb. 4 – 13) orientieren sich an der von den Produkten der Bodenbewegungsdienste verwendeten Farbskala (Absenkung in roten Farben). Dies wäre in einer späteren Fassung ggf. noch anzugleichen.

2 VORGABEN

2.1 EINWIRKUNGSBEREICHS-BERGVERORDNUNG

Die Einwirkungsbereichs-Bergverordnung (EinwirkungsBergV) dient zur Festlegung des Einwirkungsbereichs von untertägigen Bergbaubetrieben, von Bergbaubetrieben mit Hilfe von Bohrungen und von Untergrundspeichern mit künstlich geschaffenem Hohlraum [1]. Der Einwirkungsbereich wird festgelegt mittels des Einwirkungswinkels, einer Modellgröße, die aus bodenmechanischen Modellierungen abgeleitet und für jedes Bergbaugebiet festgelegt ist oder vom Unternehmer nach dem Stand der Technik festgelegt werden muss. Als gesetzliche Vorgabe für den Einwirkungsbereich gilt derjenige Winkel, der den 10 cm-Rand eines Senkungs- oder Hebungsgebietes einschließt.

Innerhalb des 10 cm-Hebungs- oder Senkungsbereiches gilt die Bergschadensvermutung, d. h. nach dem Beweis des ersten Anscheins wird generell vermutet, dass auftretende Schäden vom Bergbaubetrieb verursacht wurden. Sofern Anlagen oder Infrastruktureinrichtungen durch Bodenbewegungen von weniger als 10 Zentimeter beeinträchtigt werden können, so hat der Unternehmer die Grenze des erweiterten Einwirkungsbereichs, bis zu der Einwirkungen zu berücksichtigen sind, mit Hilfe des Nullrandes der Bodensenkung oder -hebung festzulegen. Dazu können geeignete Grenzwinkel herangezogen werden [1, 2].

Für Bohrungen gelten die Vorgaben der EinwirkungsBergV zum Betrag der Bodensenkung oder Bodenhebung, es ist jedoch kein Einwirkungswinkel vorgesehen. Die Festlegung des (erweiterten) Einwirkungsbereiches hat daher über Messungen zu erfolgen, die von einem anerkannten Markscheider mittels eines geeigneten Verfahrens durchzuführen sind.

2.2 MARKSCHEIDER-BERGVERORDNUNG

Zu den Aufgaben des Markscheiders gehören nach der Markscheider-Bergverordnung (MarkschBergV) Messungen zur Erfassung von bergbaubedingten Bodenbewegungen, deren Dokumentation sowie die Anlage und Weiterführung eines Risswerkes [3]. Messungen müssen mit geeigneten Geräten und nach geeigneten Verfahren durchgeführt und an amtliche Netze angeschlossen werden. Die zu erreichende Messgenauigkeit gliedert sich in drei Klassen. In der höchsten Klasse I ist für die unmittelbare Bestimmung von Lage- und Höhenänderungen eine innere Genauigkeit von 3 mm bei einem Vertrauensbereich von 2 Sigma, dem formalen Fehler der Ausgleichung, vorgeschrieben. Bei der gängigen Annahme einer Normalverteilung der Messfehler entspricht diese Vorgabe einer minimalen nachweisbaren Höhen- oder Lageänderung von 6 mm. Die Linie mit einem Absolutbetrag von 6 mm wird in folgenden Abbildungen als effektiver Nullrand des Einwirkungsbereiches gesondert markiert.

Weder die EinwirkBergV noch die MarkschBergV schreiben die genaue Vorgehensweise vor, erlaubt sind alle geeigneten Mess- und Auswerteverfahren. Für die Höhenmessung wird standardmäßig das Präzisionsnivellement verwendet, da es einige für wesentlich erachtete Vorteile bietet:

- (1) Es besitzt eine außerordentlich gute Messgenauigkeit ($\sigma < 0.5 \text{ mm}$) und übertrifft die Vorgaben erheblich;
- (2) Die Messwerte werden ohne weitere Prozessierungsschritte in ein standardisiertes Ausgleichungsmodell eingeführt;
- (3) Die Messpunkte werden auf der Basis bergmännischer und vermessungstechnischer Expertise angelegt und fest vermarktet;
- (4) Die Lage der Messpunkte ist mit hoher Genauigkeit bekannt und kann Objekten eindeutig zugeordnet werden.

Satellitengestützte Messverfahren wie Globale Positionierungsdienste (GNSS) oder Radar-Interferometrie (InSAR) erfüllen die Vorgaben zur Messgenauigkeit, verstoßen aber gegen die Punkte 2 (GNSS) bzw. 2 bis 4 (InSAR).

Es ist jedoch festzuhalten, dass das Präzisionsnivellement auch einige Nachteile besitzt. Die Messungen müssen mit hohem Personalaufwand durchgeführt werden; sie sind deshalb teuer, und die zeitliche Auflösung ist auf Grund ein- bis mehrjähriger Wiederholraten gering. Zur Reduzierung von Umwelteinflüssen werden Wiederholungsnivellements nach Möglichkeit zur gleichen Jahreszeit durchgeführt, was bei großen Anlagen oder mehreren Objekten zu zeitlichen/logistischen Problemen führen kann. Abseits der vermessenen Linien ist keine Information über Bodenbewegungen vorhanden, sie muss über A-priori-Annahmen bezüglich der räumlichen Ausdehnung der Bodenbewegungsereignisse oder amtliche Entscheidungen auf diese Gebiete übertragen werden. Satellitengestützte Messverfahren bieten im Hinblick auf die räumliche und zeitliche Messpunktdichte erhebliche Vorteile.

Ein weiterer Punkt wird im Folgenden ausführlich diskutiert: das Nivellement ist als relatives Messverfahren auf den direkten Anschluss an einen Referenzpunkt angewiesen, der außerhalb des Nullrandes des Einwirkungsbereiches liegen muss. Im Hinblick auf die Genauigkeit des Nivellements sollte der Referenzpunkt außerhalb der 1 mm-Linie liegen, um als stabil zu gelten. Bei großräumigen Bewegungsgebieten können dadurch sehr lange Messzüge notwendig werden, die sich negativ auf die erreichbaren absoluten Höhengenaugkeiten im Zielgebiet auswirken. Satellitengestützte Messverfahren und Produkte der Bodenbewegungsdienste sind hier im Vorteil, da sie an ein globales Referenzsystem gekoppelt sind.

3 MODELLÜBERLEGUNGEN

Bei der Gewinnung von Erdwärme mittels Bohrungen werden keine Hohlräume im Untergrund erzeugt. Die Verwendung eines Einwirkungswinkels zur Festlegung von obertägigen Einwirkungsbereichen ist daher nicht zielführend [vgl. 3]. Allerdings kommt es auch bei diesen Tätigkeiten zu Verformungen der Erdoberfläche, da dem Untergrund durch die Förderung/Re-Injektion von Thermalwässern Wärme entzogen und das Porendruckregime verändert wird. Sowohl die thermischen als auch die hydraulischen Effekte führen zu Verformungen des Gesteinskörpers, die sich bis zur Oberfläche durchpausen und dort zu Hebungen oder Senkungen führen. Gekoppelte thermo-hydro-mechanische Modellrechnungen (THM), die im Rahmen des INSDIE-Projektes durchgeführt wurden, belegen diesen Effekt [4, 5].

Die im Folgenden vorgestellten Szenarien zur messtechnischen Erfassung Geothermie-bedingter Einwirkungsbereiche im Großraum München gehen von einigen vereinfachenden, grundlegenden Überlegungen aus. Unter der Annahme, dass die Filterstrecke am unteren Ende der Bohrungen klein ist im Vergleich zur Bohrlochtiefe kann die thermische/hydraulische Quelle im Untergrund als punktförmig bzw. als sphärisch mit einem geringen, von Null verschiedenen Volumen angesehen werden. Für eine solche Punktquelle besteht ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Tiefe der Quelle und der Ausdehnung des Hebungs-/Senkungsgebietes an der Oberfläche. Für die Halbwertsbreite, den Durchmesser der 50%-Linie des Einwirkungsbereiches, liegt das Verhältnis zur Quellentiefe bei 1,5. Da die Tiefen der existierenden und geplanten Geothermiebohrungen im Großraum München bei 2500 m – 4000 m liegen (TVD), beträgt der Durchmesser der 50%-Linie des Einwirkungsbereiches einer einzelnen Bohrung bereits 3750 m – 6000 m, der Durchmesser des messbaren Nullrandes kann, abhängig vom Absolutwert der Hebung oder Senkung, noch deutlich größer sein.

Zur Diskussion der Konsequenzen einer Überlagerung der Einwirkungsbereiche zahlreicher Geothermie-Bohrungen im Großraum München für ein geodätisches Monitoringkonzept wird ein einfaches analytisches Modell zur Berechnung von Oberflächenverschiebungen aufgrund einer sphärischen Deformationsquelle im Untergrund verwendet [6]. Dieses sog. Mogi-Modell ist ein im geodynamischen Kontext gängiger Ansatz zur einfachen Beschreibung von Deformationsereignissen:

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = a^3 \cdot \Delta P \cdot \frac{(1 - \nu)}{Gr^3} \begin{pmatrix} x \\ y \\ d \end{pmatrix} \quad (1)$$

mit: u, v, w = beobachtete Verschiebungskomponenten, a = Radius der Quelle ($a \ll d$), ΔP = Druckänderung, $r = \sqrt{x^2 + y^2 + d^2}$, G = Schermodul, ν = Poissonzahl, x, y = Lage der Quelle bzgl. des Beobachtungspunktes, d = Tiefe des Mittelpunkts der Quelle.

Der Ansatz ist naturgemäß stark vereinfachend; er setzt Isotropie voraus und vernachlässigt die genaue Geometrie im Untergrund, geologische Strukturen, Fließrichtungen oder unterschiedliche Förderraten. Das ändert jedoch nichts an den grundsätzlichen Zusammenhängen; entscheidend ist, dass die räumliche Ausdehnung der Deformationen an der Oberfläche in der Größenordnung richtig wiedergegeben wird.

Für die nachfolgenden Szenarien werden Lage und Tiefe der Endpunkte der Bohrungen der INSDIE-Projektpartner Stadtwerke München (SWM) und Innovative Energie Pullach (IEP) als sphärische Quellen im homogenen Untergrund angesetzt. Das Modell wurde kalibriert mittels des „Worst-Case-Szenarios“ für den Standort Baierbrunn [4], indem der Druckparameter in Gl. 1 so angesetzt wird, dass eine vergleichbare Amplitude der Oberflächenverschiebung erreicht wird. Abb. 1 zeigt, dass das einfache Mogi-Modell die erwartete Ausdehnung der Oberflächeneffekte in Ostwest-Richtung richtig wiedergibt, in Nord-Süd-Richtung jedoch auf Grund vernachlässigter Inhomogenitäten im Untergrund um ca. 20 % unterschätzt. Es ist daher mit Blick auf die folgende Diskussion ein konservatives Modell, das die Ausdehnung der Einwirkungsbereiche nicht überschätzt.

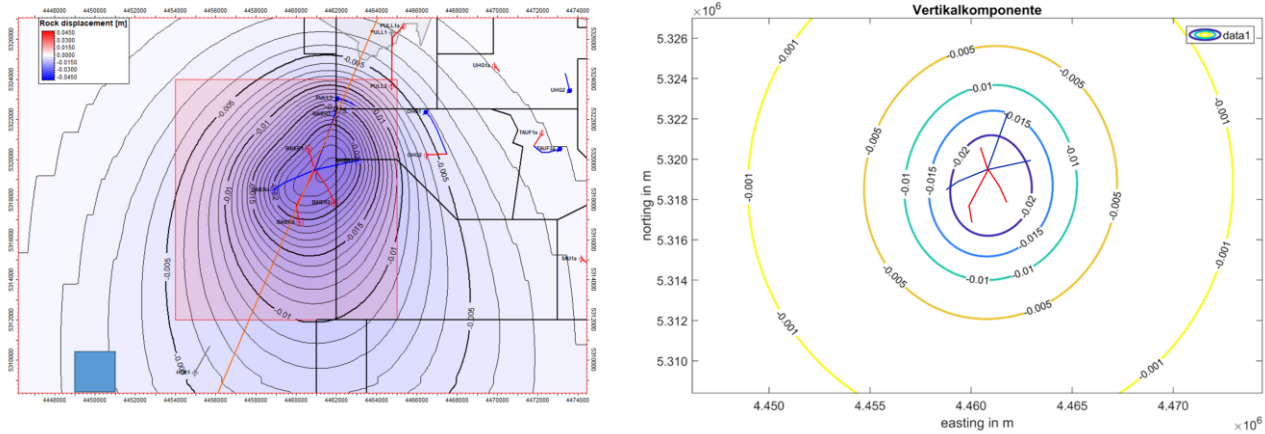


Abbildung 1: Modellvergleich für Baierbrunn. Links: numerisches Modell von Gaucher et al. [4]. Rechts: vereinfachtes analoges Modell auf Basis sphärischer Quellen im homogenen Halbraum. Der Durchmesser der 1 cm-Linie beträgt in beiden Modellen 9 km. In Nordsüd-Richtung unterschätzt das vereinfachte Modell den numerischen Ansatz um ca. 18 %. Die rote Linie im Bild links markiert das in Abb. 3 gezeigte Profil.

Im Modell für Baierbrunn überwiegt nach einer Laufzeit von 50 Jahren die thermische Abkühlung sowohl für die Produktions- als auch die Re-Injektionsbohrungen, was zu einem einheitlichen Senkungstrog an der Oberfläche führt [4]. Gaucher & Egert [5] gehen bei ihren Modellrechnungen von anderen Eingangsparametern aus. Danach überwiegt im langfristigen Betriebszustand im Bereich der Re-Injektionsbohrung der hydraulische Effekt, so dass sowohl Hebungen als auch Senkungen auftreten. Auch in diesem Fall kann der hier gewählte analytische Ansatz die Ausdehnung des Einwirkungsbereiches hinreichend gut beschreiben, wobei die Dimension des Hebungsgebietes im Südwesten etwas unterschätzt wird (Abb. 2). Die Schlussfolgerungen bzgl. der räumlichen Ausdehnung der Oberflächendeformation werden durch Profilschnitte bestätigt (Abb. 3).

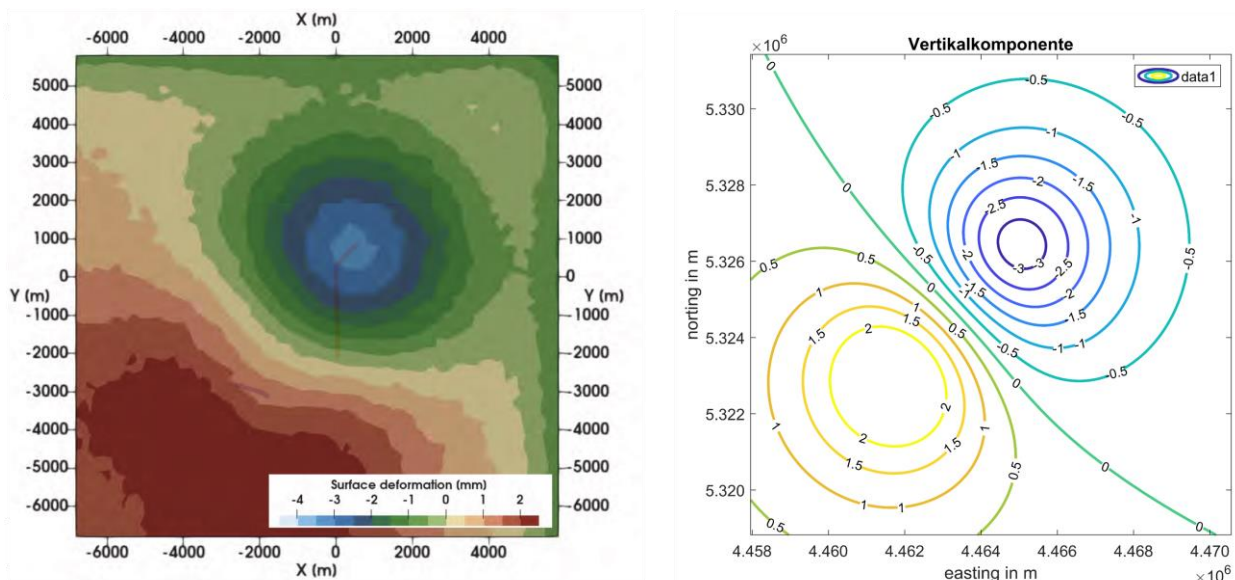


Abbildung 2: Modellvergleich für Pullach. Links: numerisches Modell von Gaucher und Egert [5]. Rechts: vereinfachtes analoges Modell auf Basis sphärischer Quellen im homogenen Halbraum. Die Dimensionen des Absenkungstrichters stimmen gut überein, die Ausdehnung des Hebungsbeckens im Südwesten wird vom analytischen Modell etwas unterschätzt.

Im Folgenden werden die für Baierbrunn abgeleiteten Modellparameter auf alle Bohrungen der Projektpartner SWM und IEP übertragen und der resultierende, aus der Superposition aller Bohrungen hervorgehende Einwirkungsbereich eingehend diskutiert. Die Übertragung der Ergebnisse für das alternative Modell „Pullach“ auf alle anderen Bohrungen von SWM und IEP wird zum Vergleich im Anhang gezeigt. Aufgrund der unterschiedlichen Modellannahmen variieren die Ergebnisse, was jedoch die Schlussfolgerungen in Bezug auf die geodätische Vermessung des Einwirkungsbereiches nicht tangiert.

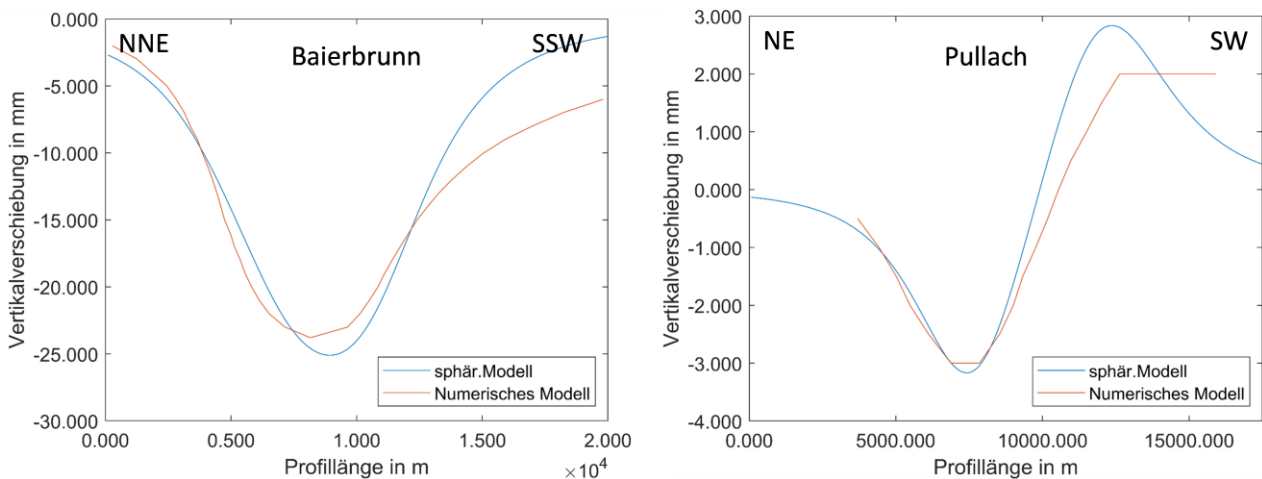


Abbildung 3: Profilschnitte bestätigen, dass das analoge Modell wesentliche Eigenschaften der numerischen Modellergebnisse wiedergibt. Im Südwesten wird die räumliche Ausdehnung der Oberflächenverschiebungen in beiden Fällen vom analogen Modell tendenziell unterschätzt. Rechts: NNE-SSW-Profil in Baierbrunn (siehe rote Linie in Abb. 1 rechts). Links: NE-SW-Profil in Pullach.

4 PROBLEME DER BISHERIGEN VORGEHENSWEISE, STAND UND ZUKUNFT

4.1 FALL 1: SCHÄFTLARNSTRASSE

Abb. 4 zeigt die prognostizierte Ausdehnung des Einwirkungsbereiches am Standort Schäftlarnstraße mit 3 Produktions- und 3 Re-Injektionsbohrungen nach Übertragung der Parameter für Baierbrunn. Aufgrund der geringeren Bohrlochtiefe ergeben sich größere Absenkungsamplituden an der Oberfläche. Es wird deutlich, dass sich die bisher festgelegten Nivellementsstrecken vollständig im zentralen Bereich des Senkungstroges befinden. Das gilt insbesondere auch für den Referenzpunkt, der im Bereich der -28 mm-Linie liegt (Abb. 5 links). Die Bewegung des Referenzpunktes wird im angeschlossenen Nivellementsnetz nicht wahrgenommen, daher werden die Messungen einen maximalen Absenkungsbetrag von lediglich – 8 mm detektieren und die wirkliche Bewegung um 80 % unterschätzen (Abb. 5 rechts). Stattdessen wird an den weiter entfernt liegenden Messpunkten im Bereich der Fußpunkte der Bohrungen TH3 und TH5 eine scheinbare Hebung gemessen, was der Wirklichkeit nicht entspricht und zu Fehlinterpretationen führen kann. Das derzeitig verwendete lokal konzipierte Nivellementsnetz im Bereich Schäftlarnstraße ist damit nicht geeignet, den Einwirkungsbereich zuverlässig zu bestimmen.

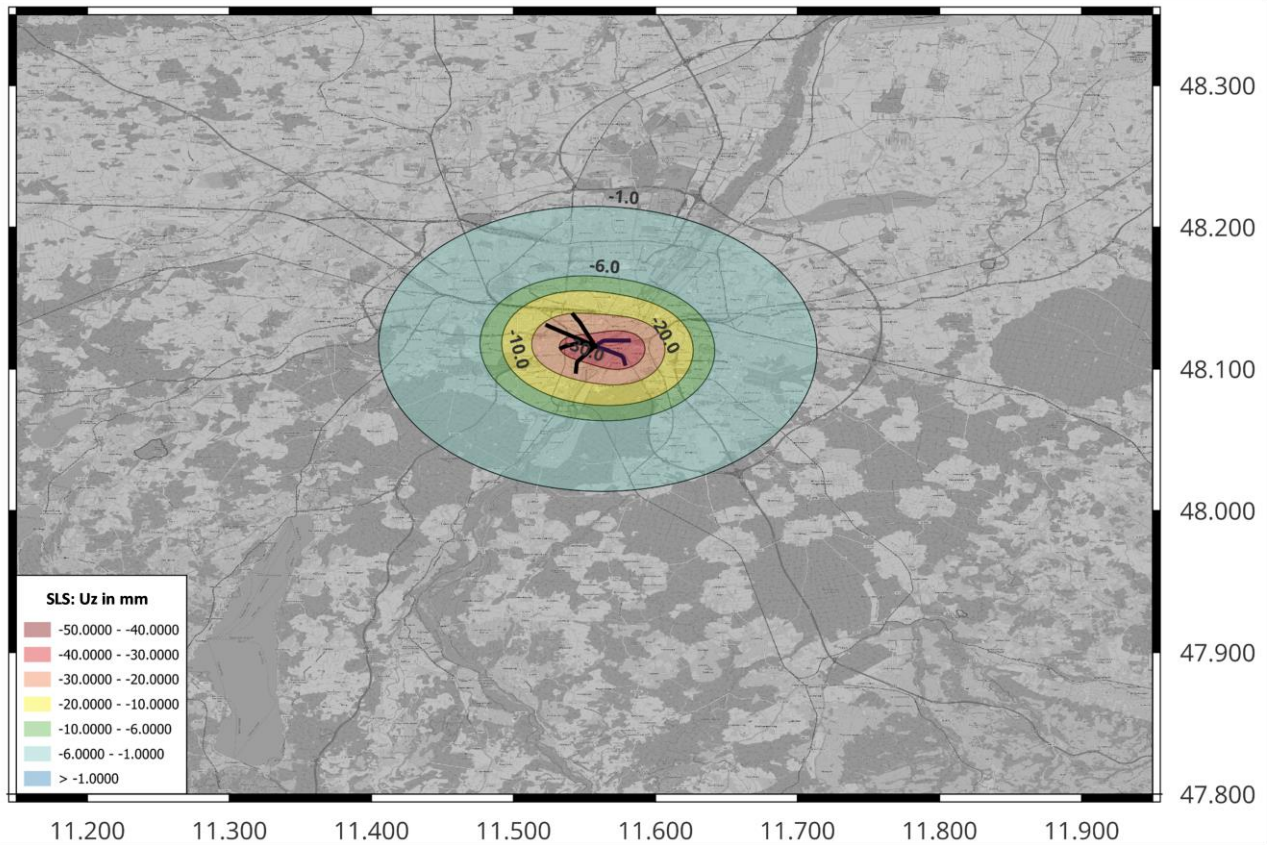


Abbildung 4: Prognostizierte Senkungsmulde für den Standort Schäftlarnstraße nach einer Laufzeit von 50 Jahren. Der Nullrand des Einwirkungsbereiches (6 mm-Linie nach MarkschBergV) hat einen Durchmesser von ca. 12 km. Der Durchmesser als 1 mm-Linie als Genauigkeitsgrenze des Nivellements beträgt 22 km. Ein für die Genauigkeit des Nivellements angemessener Referenzpunkt sollte außerhalb dieser Linie liegen.

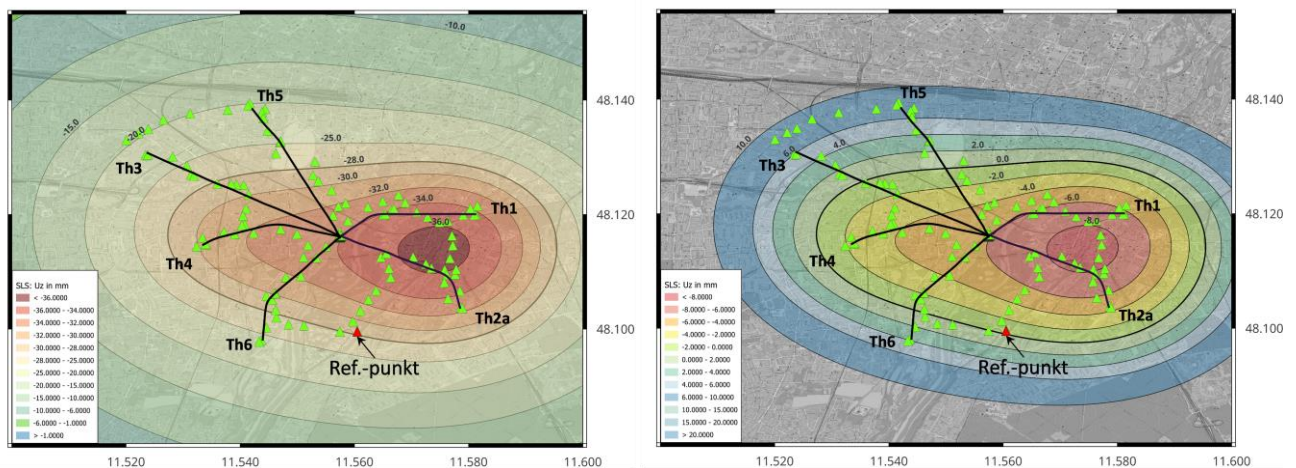


Abbildung 5: Der Referenzpunkt des derzeit ausgeführten Nivellements Schäftlarnstraße liegt auf der -28 mm-Linie des Senkungstroges, er senkt sich damit ab. Infolgedessen wird das Nivellement eine Absenkung von lediglich -8 mm detektieren und damit die tatsächliche Maximalabsenkung von -36 mm um ca. 80 % unterschätzen. Für die weiter außen liegenden Bereiche der Re-Injektionsbohrungen TH3 und TH5 wird stattdessen eine Hebung von knapp 10 mm gemessen, was insbesondere im Sinne des Reservoir-Managements zu falschen Schlussfolgerungen führen kann.

Anders sieht es aus bei einem hypothetischen Schadensfall in einer der Re-Injektionsbohrungen, wie etwa im Fall der Geothermieanlage Landau. Dort trat im Juli 2013 in ca. 450 m Tiefe ein Leck in der Bohrwand auf, wodurch Wasser unter hohem Druck in flache Bodenschichten gepresst wurde und der Boden in einem Radius von 800 m – 1000 m um das Kraftwerk herum um ca. 4 cm angehoben wurde. Die Hebungsfigur konnte mit Hilfe von Druckquellen einfacher Geometrie modelliert werden [7]. Obwohl die in Landau aufgetretenen Bodenbewegungen betragsmäßig eine ähnliche Größe wie die prognostizierten Absenkungen in Baierbrunn oder Schäftlarnstraße haben, ist die Schadenswirkung erheblich größer, da aufgrund der Kleinräumigkeit des Bewegungsgebietes höhere räumliche Gradienten (Scherungen, Verzerrungen) auftreten.

Ein vergleichbares Modell für die Schäftlarnstraße (punktförmige Quelle in 500 m Tiefe, max. Hebung 4.3 cm) zeigt, dass sich der Referenzpunkt des Nivellements in diesem Fall außerhalb der 1 mm-Linie befinden würde und damit eine korrekte Bestimmung der Hebungsamplituden ermöglicht (Abb. 6 links). Der Durchmesser der 6 mm-Linie als effektive Nulllinie des Einwirkungsbereiches nach den Vorgaben der MarksbergV hat einen Durchmesser von ca. 1700 m, der Einwirkungsbereich konzentriert sich daher auf eine enge Umgebung des Kraftwerks Schäftlarnstraße. Dies gilt für alle Bohrungen, da die Ablenkung des Bohrpfad es erst in größeren Tiefen stattfindet. Ein Nivellement, das die Aufgabe hätte, mögliche technische Defekte im oberen Bereich der Bohrungen zu dokumentieren, würde daher mit deutlich weniger Messpunkten auskommen. Die weiter außen liegenden Messpunkte entlang der Bohrpfade (z.B TH3, TH5) leisten zu dieser Aufgabe keinen Beitrag.

Sobald die Quelle im Tiefenbereich der Filterstrecke einzelner Bohrungen liegt, rückt der derzeit festgelegte Referenzpunkt in den Bereich des erweiterten Einwirkungsbereiches. Ein beispielhaftes Ereignis könnte im Juli des Jahres 2021 eingetreten sein, als die Produktion im Kraftwerk Schäftlarnstraße und damit auch die Wiederverpressung des Wassers an den Bohrungen TH3 und TH5 aufgenommen wurde. Die Wiederholungsnivellements März 2021 und März 2022 zeigen eine Hebung von max. 3.4 mm im Umfeld der beiden Re-Injektionsbohrungen an, was durch eine Auswertung einer auf Radarmessungen beruhenden Karte des Europäischen Ground Motion Service (EGMS) bestätigt wird [14]. Die beobachteten Hebungsmuster stimmen gut mit einem einfachen analytischen Modell überein (Abb. 6 rechts). Ursache für die Hebung könnte ein Druckanstieg im Untergrund sein, der zu einer schnellen Bodenhebung führt und erst im Laufe der Zeit vom Abkühlungseffekt überlagert wird. Aus Abb. 6 wird ersichtlich, dass sich der Referenzpunkt innerhalb des Nullrandes in der Nähe der 0.55-mm-Linie befindet, damit wird das Hebungseignis um ca. 18 % unterschätzt.

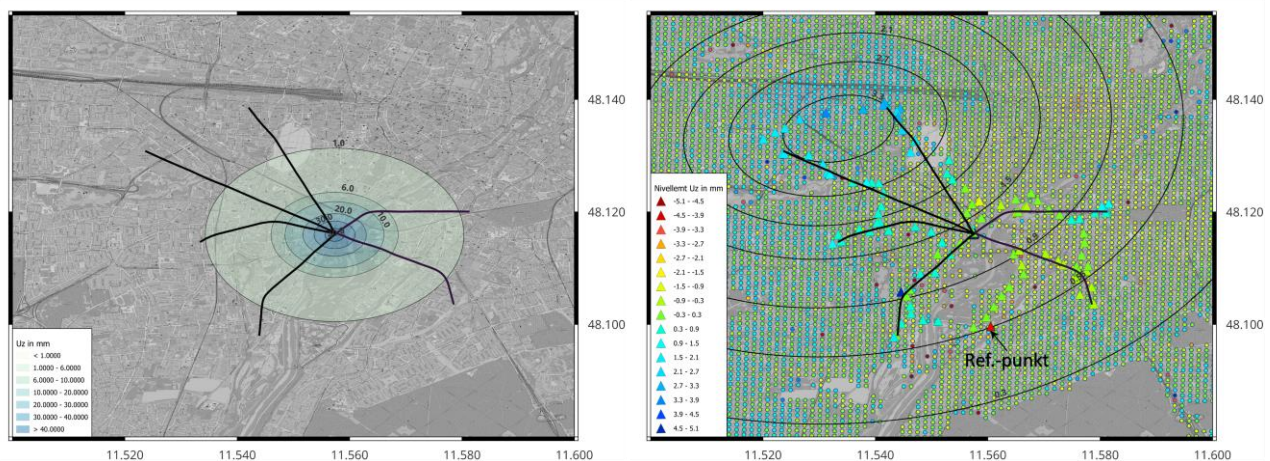


Abbildung 6: Links: Prognostiziertes Hebungsbild aufgrund eines durch einen technischen Schaden hervorgerufenen Druckwasseraustritts in 500 m Tiefe. Der Referenzpunkt liegt in diesem Fall außerhalb der Einwirkungsbereiches. Rechts: Analytisches Modell für eine Porendruckerhöhung im Bereich der Austrittsöffnungen an den Bohrungen TH3 und TH5 in einer Tiefe von ca. 2700 m. Aufgrund der Bewegung des Referenzpunktes wird das Hebungssignal im Nivellement um ca. 18 % unterschätzt. Der Effekt liegt für die beobachtete Hebungsamplitude allerdings unterhalb der Messgenauigkeit.

Aufgrund der geringen Hebungsamplitude liegt der Effekt in diesem Beispiel unterhalb der Messgenauigkeit, würde bei größeren Ereignissen aber zu Tragen kommen können. Bei der Interpretation dieses Ereignisses ist allerdings zu beachten, dass ähnlich große Bodenverschiebungen mit positivem oder negativem Vorzeichen an weiteren, nicht vom Nivellement erfassten Stellen im Stadtgebiet auftreten [14].

4.2 FALL 2: PULLACH

Nimmt man das Deformationsmodell für Baierbrunn hinzu, so wird deutlich, dass sich die Einwirkungsbereiche aufgrund ihrer Großräumigkeit überlagern (Abb. 7). Die auf die jeweiligen Bohrplätze zentrierten Absenkungströge sind noch getrennt wahrnehmbar, die 6 mm-Linie verschmilzt allerdings zu einer gemeinsamen (effektiven) Nulllinie beider Einwirkungsbereiche. Dies gilt insbesondere für die 1 mm-Linie, die mit einem Durchmesser von 29 km in Ostwest- und 36 km in Nordsüdrichtung weit nach außen rückt.

Die Überlagerung der Einwirkungsbereiche führt zu einer interessanten Situation am Geothermie-Standort Pullach. Die Produktionsbohrung TH1 befindet sich innerhalb der -10 mm-Linie des prognostizierten Senkungstroges Schäftlarnstraße, die Injektionsbohrung TH3 befindet sich dagegen innerhalb der -10 mm-Linie des Senkungstroges für den zukünftigen Standort Baierbrunn (Abb. 8). Auf der Basis eines isoliert betrachteten lokalen Nivellementsnetzes wie in Pullach kann in solchen Fällen nicht entschieden werden, ob die Beobachtungen den Bohrungen in Pullach zugeordnet werden müssen oder von außen herangetragen werden. Damit wird das Verursacherprinzip in Frage gestellt, insbesondere da die lokalen Nivellements in Schäftlarnstraße/Baierbrunn und Pullach nach momentaner Regelung von unterschiedlichen Betreibern in Auftrag gegeben werden und es daher nicht sichergestellt ist, dass sie gemeinsam betrachtet und analysiert werden würden. Zudem würde das derzeitige Nivellement mit dem lokalen Referenzpunkt in beiden Fällen eine geringere Absenkung von nur wenigen mm liefern. Eine Situation wie in Pullach kann daher potentiell zu falschen Entscheidungen beim Betriebsmanagement führen und wirft erhebliche Probleme bei der Haftungsfrage auf.

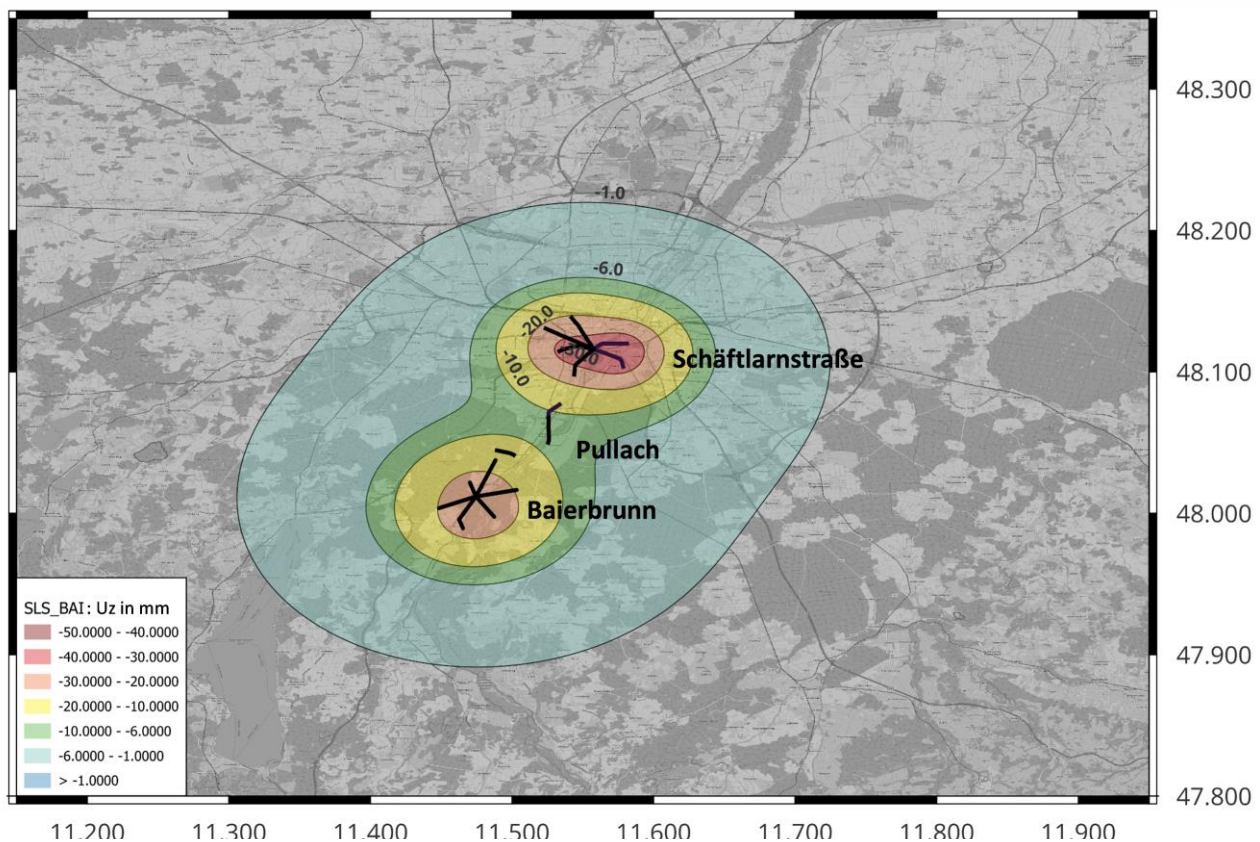


Abbildung 7: Überlagerung der prognostizierten Deformationsfelder Schäftlarnstraße und Baierbrunn. Die Einwirkungsbereiche verschmelzen miteinander. Der Geothermiestandort Pullach wird von beiden SWM-Standorten beeinflusst.

4.3 ALL 3: ÜBERLAGERUNG MEHRERER EXISTIERENDER UND GEPLANTER GEOTHERMIEANLAGEN

Das vorstehend angesprochene Problem potenziert sich bei der gemeinsamen Betrachtung weiterer Standorte. Nimmt man zunächst den Einwirkungsbereich der Bohrungen Pullach hinzu, so ergibt sich als Subsidenzfigur eine langgestreckte Rinne, die sich über 13,5 km von Baierbrunn bis Schäftlarnstraße fortsetzt (Abb. 9). Das Senkungsmuster wird sich mit dem geplanten Ausbau des Bohrplatzes TH3 in Pullach weiter verstärken. Abb. 10 zeigt schließlich die Ergebnisse für alle derzeitigen Standorte der SWM und IEP. Der Nullrand des gemeinsamen Einwirkungsbereiches (6 mm-Linie) hat nunmehr eine Maximalausdehnung von ca. 35 km in der Diagonale NW – SO, die 1 mm-Linie rückt mit einem Durchmesser von ca. 44 km weit in die Außenbezirke von München. Aufgrund der Überlagerungseffekte steigt die Absenkungsamplitude im zentralen Bereich an der Schäftlarnstraße auf -4.2 cm an. Dies ist immer noch deutlich unterhalb der 10 cm-Vorgabe der EinwirkungsbergV. Zu bedenken sind allerdings fortschreitende Überlagerungseffekte, wenn das Geothermienetz in Zukunft weiter verdichtet wird. Da auf lange Sicht das thermische Regime im Untergrund großräumig verändert wird, wäre anzuregen, THM-Modellierungen und Szenarien für eine große Anzahl von Bohrungen durchzuführen.

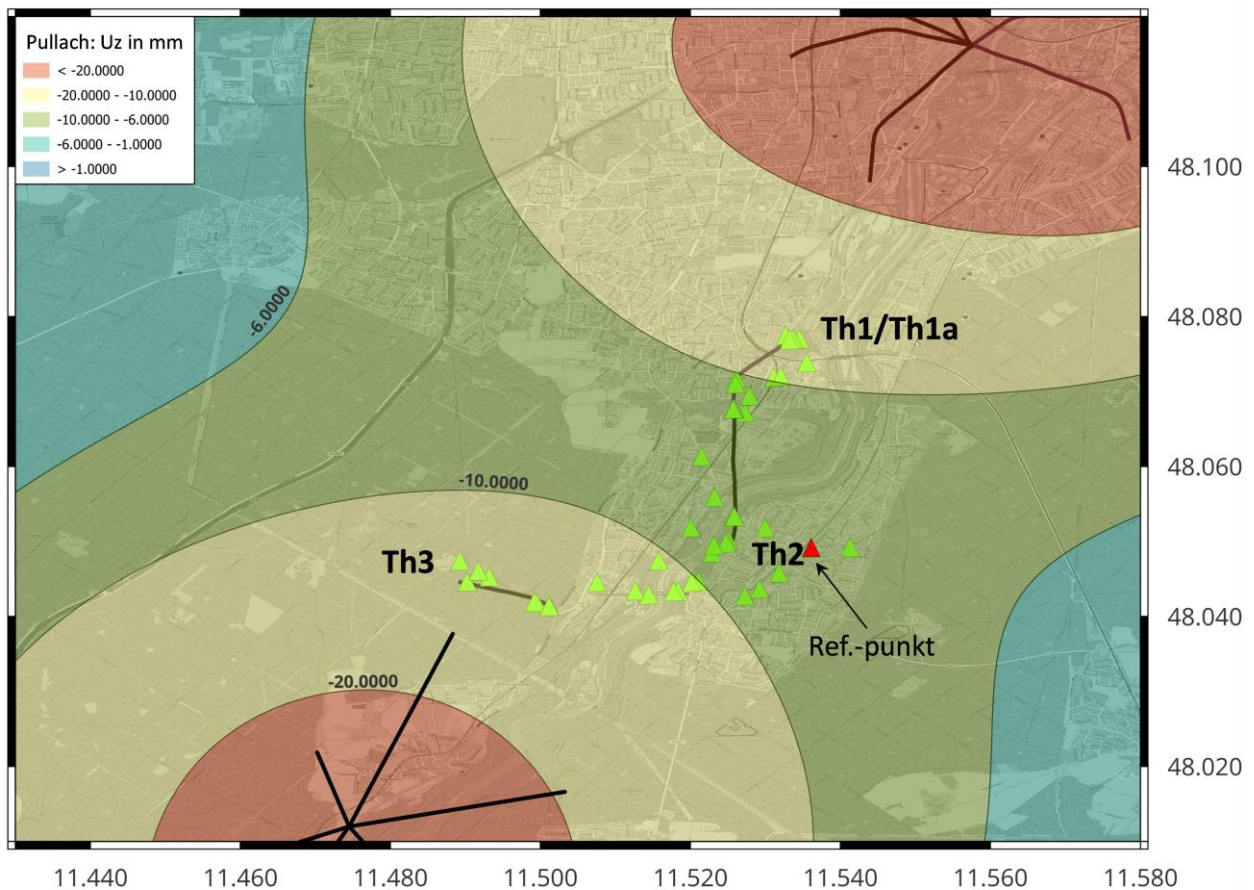


Abbildung 8: Beeinflussung des Standortes Pullach durch die Einwirkungsbereiche Schäftlarnstraße und Baierbrunn. Der Fußpunkt der Produktionsbohrung Th1a liegt innerhalb der -10-mm-Linie des Absenkungstroges Schäftlarnstraße, der Fußpunkt der Injektionsbohrung Th3 liegt innerhalb der entsprechenden Linie des Absenkungstroges Baierbrunn. Das derzeitige Nivellementsnetz zur Überwachung der Bohrungen in Pullach kann die Einflüsse nicht erkennen oder trennen und wird gegebenenfalls zu falschen Schlussfolgerungen bzgl. der Senkungsursachen in Pullach führen.

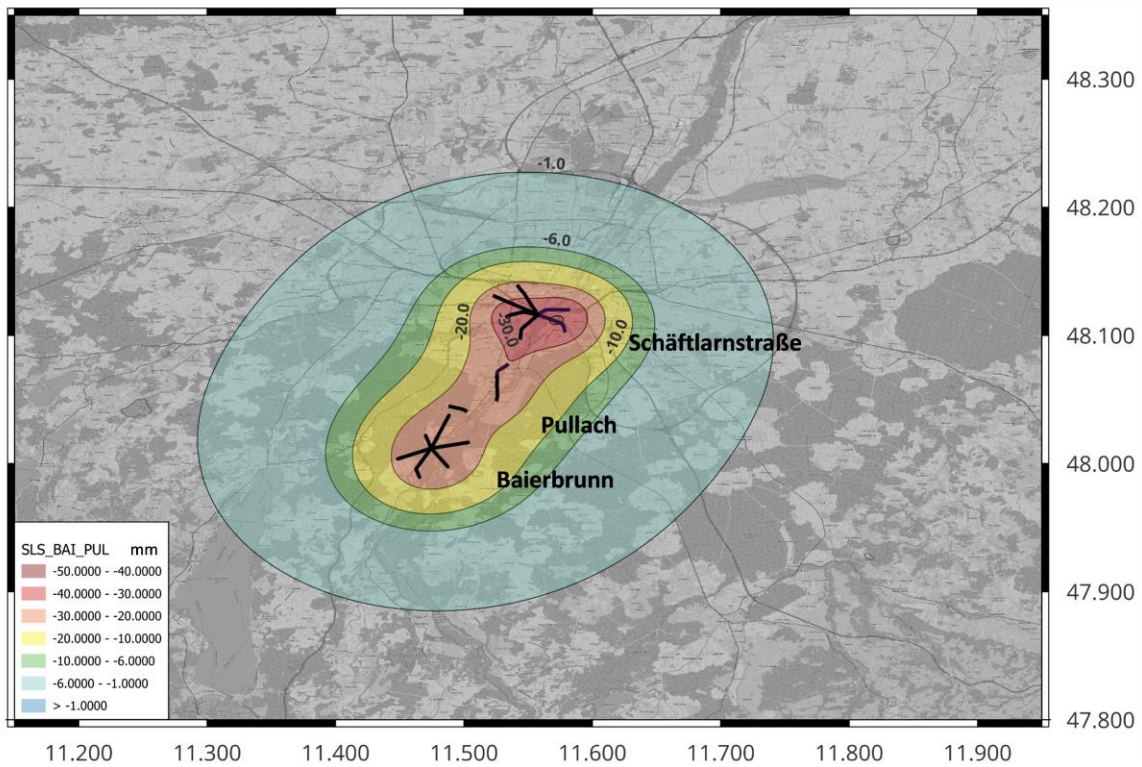


Abbildung 9: Prognostizierter gemeinsamer Einwirkungsbereich der Standorte Schäftlarnstraße, Pullach und Baierbrunn.

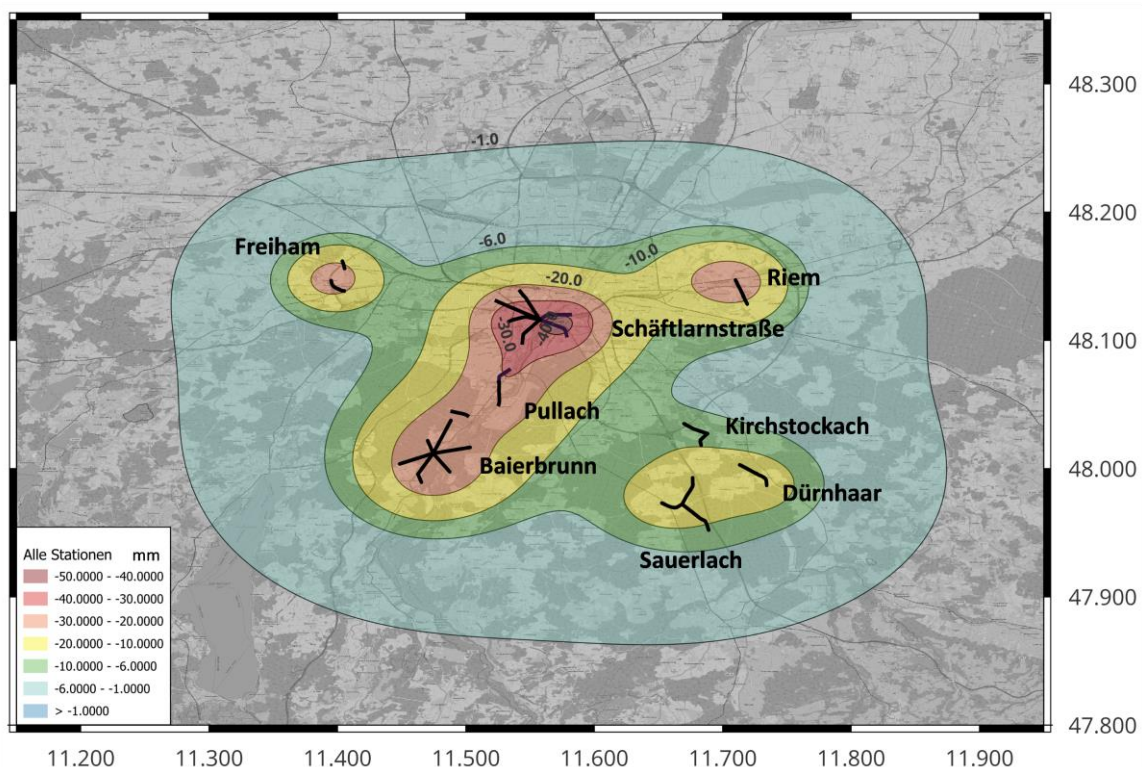


Abbildung 10: Prognostizierter gemeinsamer Einwirkungsbereich der Standorte aller im Projekt INSIDE betrachtete Standorte von SWM und IEP. Der Nullrand des gemeinsamen Einwirkungsbereiches hat eine Maximalausdehnung von 37 km, die 1 mm-Linie hat einen Durchmesser von 44 km. Der Referenzpunkt des Nivellements sollte außerhalb dieser Linie liegen

5 FAZIT

Die vorstehende Fallstudie dient dazu, prinzipielle Probleme der derzeitigen Vorgehensweise aufzudecken und zu diskutieren. Die Überlegungen basieren auf Szenarien für eine Betriebszeit von 50 Jahren, zum Teil mit Worst-Case-Annahmen [4,5]. Natürlich werden sich die Absenkungs- und Hebungfiguren bei genauerer Betrachtung und detaillierten numerischen Modellierungen für jeden Standort in Betrag und Form verändern. Das hat jedoch keinen Einfluss auf die grundsätzlichen Aussagen, da der Zusammenhang zwischen der Tiefe der Deformationsquellen im Untergrund und der Ausdehnung des Einwirkungsbereiches an der Oberfläche physikalisch vorgegeben ist. Ein leistungsstarkes geodätisches Monitoringsystem zur Feststellung und Überwachung des Einwirkungsbereiches sollte diesen Überlegungen Rechnung tragen und auch für ungünstige Fälle ausgelegt sein.

Die wesentlichen Erkenntnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- Der Referenzpunkt für das Nivellement sollte außerhalb der 1 mm-Linie liegen; für den Anschluss des Nivellementnetzes Schäftlarnstraße würde somit eine zusätzliche Linie von ca. 22 km Länge benötigt, was – abgesehen von hohen Kosten – einen negativen Einfluss auf die Messgenauigkeit im Bereich des Standortes hätte. Unter diesem Aspekt ist die Beauftragung individueller Messungen durch jeden einzelnen Betreiber wirtschaftlich nicht sinnvoll und personell durch die Markscheider kaum zu stemmen. Zu beachten ist außerdem, dass sich die 1 mm-Linie mit jeder neu hinzukommenden Geothermieanlage weiter verschiebt. Zudem werden die real auftretenden Senkungs- und Hebungsmuster nicht symmetrisch sein (vgl. Abb. 1 links, [4]), sodass eine einzelne nivellitische Profilmessung nicht ausreicht und der Nullrand des Einwirkungsbereiches an verschiedenen Stellen überschritten werden muss.
- Sollen die lokalen Nivellements nach derzeitigem Muster beibehalten werden, so müssten ihre Aufgaben neu definiert werden z. B. in Richtung der Dokumentation technischer Pannen. Dies wäre mit deutlich weniger Messpunkten möglich, wobei allerdings zu beachten ist, dass die Verwendung eines einzelnen Referenzpunktes im Präzisionsnivellement grundsätzlich als kritisch anzusehen ist. Aus Zuverlässigkeitsgründen wären zwei bis drei Referenzpunkte zu empfehlen. Da wegen der bei lokalen Deformationsereignissen auftretenden starken räumlichen Gradienten Schäden an Bauwerken und Infrastruktur zu erwarten sind, wäre bei dieser Aufgabe die genaue Lage der Messpunkte und deren eindeutige Zuordnung zu einzelnen Objekten von Belang.
- Aufgrund des Zusammenhanges zwischen Tiefe der Deformationsquellen und der räumlichen Ausdehnung der Oberflächeneffekte kommt es zu einer Überlagerung der prognostizierten Einwirkungsbereiche bestehender Geothermiebohrungen im Großraum München. Dieser Effekt wird sich mit dem geplanten Ausbau der Geothermie weiter verstärken. Die Trennung der Einwirkungsbereiche und deren Zuordnung zu einzelnen Betreibern ist nicht mehr zweifelsfrei gegeben.
- Die Erfassung des großräumigen Einwirkungsbereiches, der durch die operative Wärmegewinnung der Geothermieanlagen im Großraum München hervorgerufen wird, ist eine flächenhafte Aufgabe, die nicht durch lokale Nivellementsnetze erfüllt werden kann. Aufgrund der Langwelligkeit der Deformationsmuster ist das Schadenspotential deutlich geringer als im Falle oberflächennah auftretender technischer Defekte einzelner Anlagen. Das Argument, dass auch bei dieser Aufgabe die cm-genaue Lage der Messpunkte notwendig ist, ist aus wissenschaftlich/geotechnischer Sicht nicht nachvollziehbar und bedarf einer neuen juristischen Bewertung.

6 GRUNDZÜGE EINES INTEGRIERTEN GEODÄTISCHEN BEOBACHTUNGSSYSTEMS

Im Folgenden werden die Komponenten eines integrierten geodätischen Beobachtungssystems für den Großraum München skizziert, das den wesentlichen Vorgaben der Einwirkungsbereichs- und Markscheider-Bergverordnungen entspricht und dabei einen Fokus auf Effektivität und Kosten legt. Wesentliche Punkte der folgenden Diskussion und Anregungen sind die effektive Festlegung des Einwirkungsbereiches, die Überwachung der Stabilität von Referenzpunkten sowie eine Langzeit-Validierung.

6.1 FESTLEGUNG DES EINWIRKUNGSBEREICHES

Für die Festlegung des Nullrandes des Einwirkungsbereiches werden die Produkte des Bodenbewegungsdienstes Deutschland (BBD) und des European Ground Motion Service (EGMS) empfohlen. Sie basieren auf den mit einem Zeitabstand von 6 und 12 Tagen wiederholt aufgenommenen Radarbildern der europäischen Erdbeobachtungs-Satelliten-Mission Sentinel-1. Die zugrundeliegende Auswertemethode ist die Persistent-Scatterer SAR-Interferometrie (PSI), eine Fernerkundungsmethode zur Messung von Deformationen der Erdoberfläche [8], die auf bildgebenden Radarmessungen mit synthetischer Apertur (SAR) beruht. Dabei wird die Phase des komplexen Radarsignales verwendet, um präzise Informationen über die zeitliche Änderung des Abstandes zwischen Bodenpunkt und Radarantenne zu erhalten. Durch Verwendung von großen Bildstapeln (mehrere 100 Szenen pro Messgebiet) können mittels Methoden der Signalverarbeitung und Statistik diejenigen Punkte am Boden identifiziert werden, deren Rückstreuverhalten zeitlich stabil ist. Diese sog. langzeitstabilen Rückstreuer (Persistent Scatterer oder PS-Punkte) werden für die Deformationsmessung verwendet.

Das Potential von PSI zum Erkennen und Messen von Bodenbewegungen ist in den letzten 20 Jahren durch eine Serie von Fallbeispielen nachgewiesen worden [9, 10, 11, 12]. Die Bandbreite reicht von der Beobachtung natürlicher Deformationsereignisse durch Erdbeben, Vulkanismus und Hangrutschungen bis hin zu kleinräumigen, anthropogenen Prozessen, die durch eine Bewirtschaftung des Untergrundes hervorgerufen werden (Rohstoffförderung, Geothermie, Grundwasserentnahme). Die Präzision von PSI-Zeitreihen liegt je nach Produkt, Anzahl der verwendeten Satellitenszenen und Aufnahmemodus typischerweise zwischen 1 mm – 4 mm für Punktverschiebungen und 0.2 mm/Jahr – 0.6 mm/Jahr für Bewegungsraten [9, 10, 11, 12]. Die Genauigkeiten der Produkte der Bodenbewegungsdienste wurden von Even et al. [13] mit guten Ergebnissen evaluiert.

Eine Besonderheit radarinterferometrischer Verfahren ist die Datenaufnahme in Schrägentfernung, der sog. Line-of-sight (LoS). Gemessen werden ein-dimensionale Projektionen der im Allgemeinen drei-dimensionalen Bodenverschiebungen in LoS. Durch Kombination von Aufnahmen aus Überflügen in Nord-Süd-Richtung (absteigender Satellitenorbit) und Süd-Nord-Richtung (aufsteigender Satellitenorbit) können die LoS-Messungen in Ost-West-horizontale und vertikale Verschiebungskomponenten aufgespalten werden. Die Messung von Bodenverschiebungen in Flugrichtung des Satelliten ist aufgrund des speziellen Aufnahmeverfahrens nicht möglich. Es sollte in diesem Zusammenhang explizit erwähnt werden, dass die primären LoS-Produkte nicht nur reine Zwischenprodukte sind, sondern eigenständige Informationen enthalten, die bei einer Gesamtbetrachtung herangezogen werden können.

Zur Orbitkombination werden die unregelmäßig verteilten PS-Punkte auf regelmäßige Gitter mit Punktabständen von derzeit 50 m (BBD) oder 100 m (EGMS) interpoliert (engere Gitterabstände von z. B. 25 m sind möglich [14]). Die nationalen und internationalen Bewegungsdienste bieten in ihrem Katalog sowohl die LoS-Ergebnisse als primäre Ausgangsprodukte der PSI-Prozessierung sowie die bewegungszерlegten „Ortho-Produkte“ in Ost-West-horizontaler und vertikaler Richtung an. Die Produkte bestehen aus Karten der mittleren Geschwindigkeiten an den PS-Punkten. Für jeden einzelnen Punkt ist zudem die Zeitreihe der Bodenverschiebungen kostenfrei im Download zu erhalten. Im Rahmen von INSIDE konnte im Vergleich mit

verfügbaren Nivellements gezeigt werden, dass die vertikalen Produkte Bodenbewegungen im Münchner Stadtgebiet zuverlässig mit einer Standardabweichung von ca. 1 mm dokumentieren und damit die Vorgaben der MarksbergV einhalten [14]. Abb. 11 macht deutlich, dass in großstädtischen Bereichen durch verschiedene unterirdische Baumaßnahmen ein deutliches Hintergrundrauschen vorhanden ist, das bei der Beurteilung der geothermischen Einwirkungsbereiche mit seinen zeitlichen und räumlichen Charakteristiken bekannt sein sollte.

Ein häufig vorgebrachter Einwand gegen die SAR-Interferometrie ist die Tatsache, dass es sich um abgeleitete Ergebnisse handele, während der Prozessierungsaufwand beim Nivellement deutlich geringer sei und sich die tatsächlich gemessenen Werte direkt in den Ergebnissen widerspiegeln (wobei bemerkt werden muss, dass es sich auch bei den standardmäßig verwendeten Ausgleichungsansätzen zur Schätzung von Höhen oder Höhenänderungen um statistische Verfahren handelt). Es ist jedoch richtig, dass die Ergebnisse einer PSI-Analyse von der Prozessierungsstrategie und den angesetzten Analyseparametern abhängen. Dies kann unter anderem die Auswahl und Anzahl von Punkten mit als stabil eingeschätzten Rückstreuungseigenschaften, nicht-lineare Bewegungen oder die Beseitigung der 2π -Mehrdeutigkeit der Phase betreffen. Vergleiche des EGMS-Produktes mit einer eigenständigen, am Geodätischen Institut des KIT durchgeführten PS-Prozessierung für München zeigen jedoch, dass dieses „Prozessierungsrauschen“ gering ist und Bodenbewegungsereignisse mit Amplituden ab 3 mm unabhängig von der Methode eindeutig erkannt werden. Einen großen Vorteil bieten in diesem Zusammenhang die Bodenbewegungsdienste, deren Produkte nach einheitlichen, transparenten und publizierten Strategien erarbeitet werden [15]. Beim Einsatz der Radarinterferometrie für die Bestimmung des Einwirkungsbereiches wäre man also nicht auf lokale Dienstleister mit möglicherweise individuellen Ansätzen angewiesen.

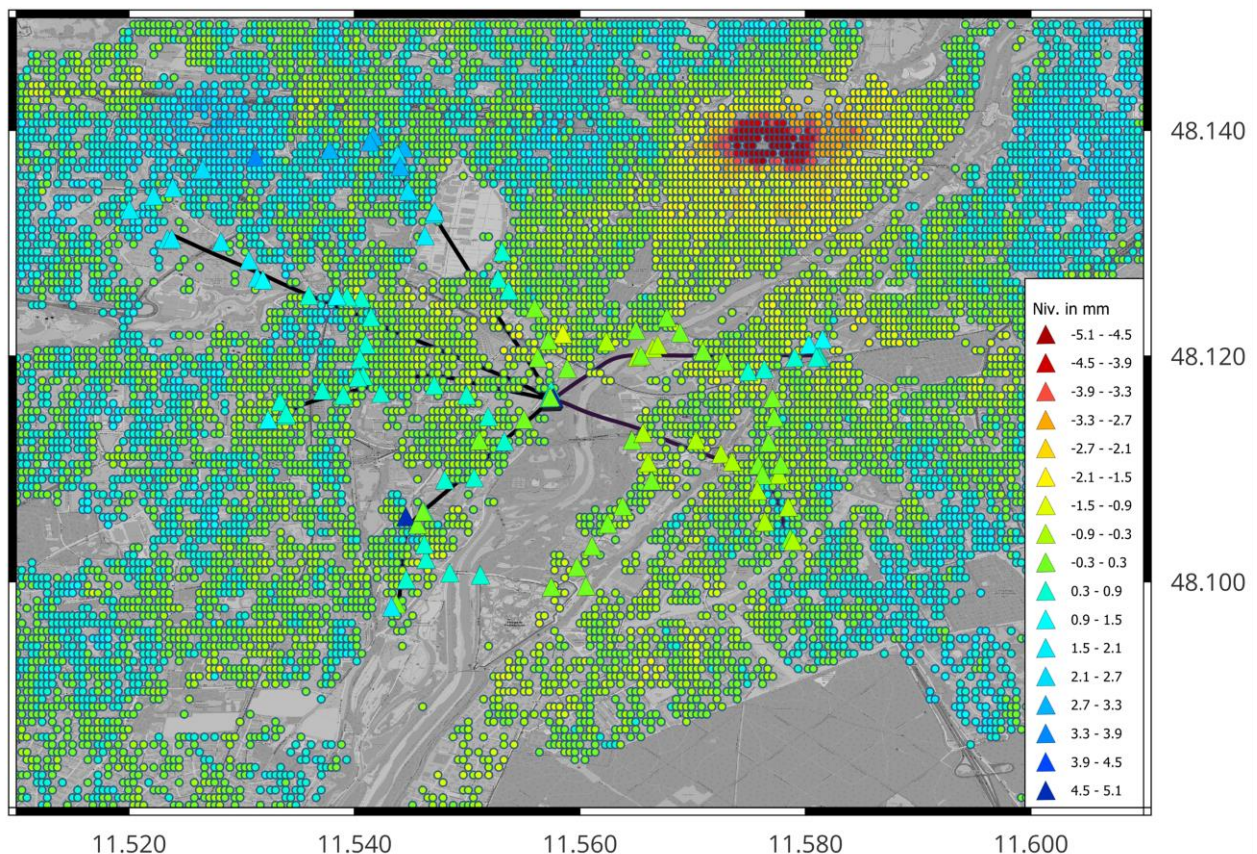


Abbildung 11: Karte der Vertikalverschiebungen, abgeleitet aus einer Persistent-Scatterer-Analyse von 291 Szenen der Satelliten Sentinel-1a und -1b für auf- und absteigende Orbits für den Zeitraum März 2021 bis März 2023. Erkennbar sind alternierende Hebungs- und Senkungsgebiete im Stadtgebiet München mit Amplituden von ca. +3 mm bis -6 mm [14].

Ein zweiter Einwand ist die geringe räumliche Auflösung der SAR-Interferometrie. Die Sentinel-1 Satelliten verwenden C-Band Frequenzen mit einer Wellenlänge von 5,66 cm. In Verbindung mit der Bandbreite des SAR-Systems ergibt sich im Standard-Aufnahmemodus eine Bodenauflösung von ca. 4 m x 20 m. Die Lage des PS-Punktes innerhalb der zugehörigen Auflösungszelle am Boden ist nicht genau bekannt; der Punkt kann daher einzelnen Objekten wie Wohnhäusern i. A. nicht eindeutig zugeordnet werden (Verfahren zur Überabtastung, mit denen die Lagegenauigkeiten verbessert werden können, sind in Entwicklung). Im Gegensatz dazu werden die Bodenpunkte des Nivellements nach messtechnischen und geotechnischen Gesichtspunkten vermarktet und mit cm-Genauigkeit eingemessen. Aus diesem Grund sowie des direkten Eingangs der Messungen in die Ergebnisse gilt das Nivellement momentan noch als das einzige „gerichts-feste“ Verfahren, da angenommen wird, dass sich damit ein Schaden eindeutig dokumentieren und einem einzelnen Verursacher zuordnen lässt.

Mit Blick auf die im Rahmen dieser Studie diskutierte Großräumigkeit des überlagerten Einwirkungsbereiches verschiedener Geothermie-Betreiber wird jedoch dringend empfohlen, diese Sichtweise neu zu beurteilen. Der Nachteil beim Nivellement ist, dass Bodenbewegungsphänomene punktuell bzw. linienhaft, aber nicht flächenhaft erfasst werden. Abseits der vermessenen Linien ist keine direkte Information über Bodenbewegungen vorhanden. Sollten dort ebenfalls Schäden auftreten, so sind diese dem Verursacher nur mittels Annahmen über die räumlichen Wellenlängen des Bewegungsereignisses oder Festlegungen anderer Art zuzuordnen. Auf der anderen Seite geht ein Geschädigter unter Umständen leer aus, wenn auf den vorhandenen Nivellementslinien keine Bodenbewegung gemessen wurde. Im Gegensatz dazu ist die PS-SAR-Interferometrie in der Lage, Bodenbewegungen flächenhaft mit ausreichender Genauigkeit zu erfassen. Die Bestimmung des Einwirkungsbereiches im Großraum München, zu welchem verschiedene Betreiber beitragen, ist in unseren Augen eine solche flächenhafte Aufgabe, bei der eine Punktlage im Meterbereich vollkommen ausreicht. Zudem wird diese Information in Form aufbereiteter Karten von den Bodenbewegungsdiensten mit hoher Qualität kostenfrei angeboten. Angesichts des Standes von Wissenschaft und Technik, der Beobachtungssituation sowie der Aufgabe ist eine Nichtberücksichtigung dieser Datengrundlage nicht zu rechtfertigen und könnte als fahrlässig eingestuft werden. In diesem Zusammenhang sei angemerkt, dass einige europäische Nachbarländer (Italien, Niederlande) sowie einige Bundesländer (NRW, Saarland, Niedersachsen) die Radarinterferometrie in den Geodätischen Raumbezug bereits eingeführt haben oder dies anstreben (u. a. Baden-Württemberg).

6.2 STABILITÄTSÜBERWACHUNG VON REFERENZPUNKTEN

Im Rahmen des Konzeptes für ein integriertes Beobachtungssystem wird vorgeschlagen, die Radarinterferometrie als eine wesentliche Komponente einzuführen, vorzugsweise jedoch in Verbindung mit weiterhin durchgeführten Nivellementsmessungen. Abhängig von einer vorzunehmenden Neueinschätzung und Präzisierung der Aufgaben könnten Wiederholungsnivellements durchgeführt werden, um potentielle Gebäudeschäden durch technische Pannen im flachen Bereich der Bohrungen zu dokumentieren. Eine weitere mögliche Aufgabe wäre die Langzeit-Validierung von Bodenbewegungen zur Sicherstellung der Kontinuität bei der Nachführung der Risswerke (s. u.).

Wie gezeigt wurde, müssen stabile Referenzpunkte für das Nivellement sehr weit außerhalb des Münchner Stadtgebietes angelegt werden und stehen bei der Auffahrung zukünftiger Geothermiebohrungen in der Gefahr, wieder in Einwirkungsbereiche zu geraten. Zur Vermeidung sehr langer Nivellementslinien ist die Anlage von Referenzpunkten innerhalb des Stadtgebietes zu empfehlen, deren Stabilität von einem absoluten Messverfahren kontrolliert wird, d. h. einem Verfahren, das an eine globale Referenz anschließt. Hierzu bieten sich die Globalen Satelliten-Navigations-Verfahren an, zu denen unter anderem das amerikanische GPS-, das russische GLONASS- sowie das europäische GALILEO-System zählen. Abb. 12 zeigt die Lage von vier permanenten GNSS-Stationen, die im Rahmen des INSIDE-Projektes angelegt wurden, sowie einer Station des Satellitenpositionierungsdienstes der deutschen Landesvermessung (SAPOS®).

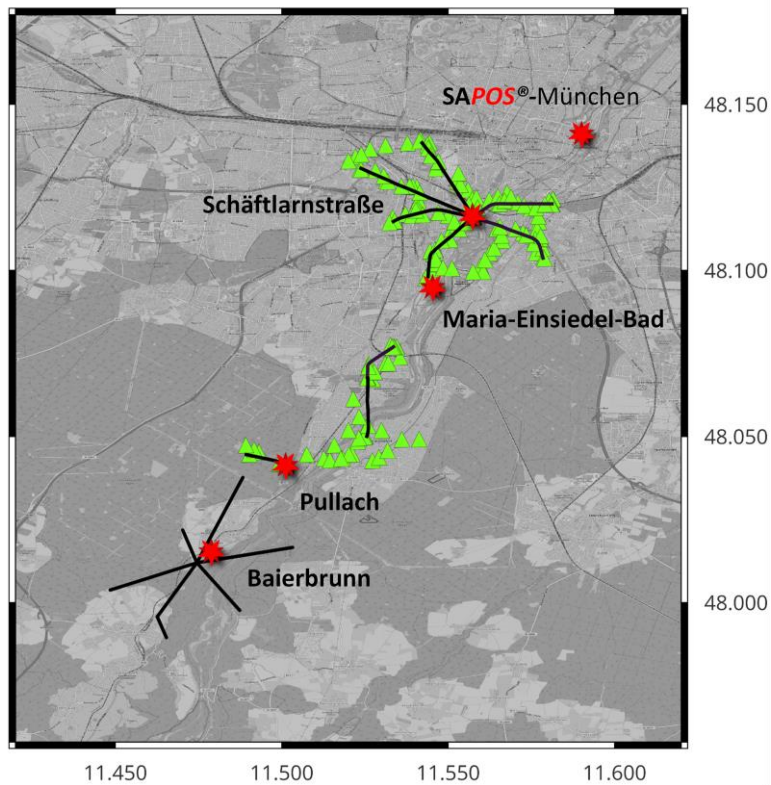


Abbildung 12: Standorte der SAPOS-Station München sowie der 4 permanenten GNSS-Referenzstationen, die im Rahmen von INSIDE installiert wurden (rote Symbole)..

Im Rahmen von INSIDE wurde die Performance von GNSS-Stationen mit unterschiedlichen technischen Ausrüstungen und Aufstellungsarten der GNSS-Antennen untersucht. Es bestätigte sich, dass die bodennahe Aufstellung der GNSS-Antenne auf tiefgegründeten Pfeilern gegenüber einer Installation an Gebäuden vorzuziehen ist. Auch für den SAPOS®-Bereich wird dies in den letzten Jahren bei Neueinrichtungen von Stationen so gehandhabt. Allerdings ist es schwierig, im städtischen Bereich Flächen mit ausreichend Horizontfreiheit zu finden. Aufgrund der für Höhenmessung ungünstigen Satellitengeometrie ist zudem das Rauschen auf der GNSS-Vertikalkomponente deutlicher ausgeprägt als auf den Horizontalkomponenten, die für die Lagebestimmung Verwendung finden. Die Standardabweichung in der Vertikalkomponente der INSIDE-Pfeilerstation Baierbrunn beträgt 8 mm [14]. Damit könnte die Station zumindest als Referenz für Nivellements der Genauigkeitsklasse III nach der MarksBergV verwendet werden, die für Messungen zum Zwecke der Anwendung

der Bergschadensvermutung bei Bewegungen im 10 cm-Bereich ausreicht. Da GNSS im Gegensatz zum Nivellement und PSI alle drei Komponenten des Verschiebungsvektors am Erdboden erfasst, liefern GNSS-Referenzstationen zusätzlich präzise Informationen über Horizontalbewegungen in Ostwest- und Nordsüdrichtung. Neben der in Abb. 12 gezeigten SAPOS®-Station kommt auch die Verwendung von Permanentstationen weiterer Korrekturdatendienste im Raum München in Betracht.

Eine Möglichkeit zur Genauigkeitssteigerung und zur gegenseitigen Kontrolle der satellitengestützten Verfahren GNSS und InSAR besteht in der zusätzlichen Installation trihedraler Corner-Reflektoren (CR). Dabei handelt es sich um einen künstlichen PS-Punkt, dessen Phasenzentrum mit hoher Genauigkeit in Relation zum benachbarten GNSS-Punkt eingemessen werden kann. Allerdings sind CR für C-Band-Messungen mit Dimensionen im Meterbereich recht groß und schwer. Alternativ besteht die Möglichkeit, elektronische CR (eCR) zu verwenden, die aufgrund ihrer deutlich kleineren Abmessungen höhere Flexibilität bei der Aufstellung bieten. Die Langzeitstabilität der eCR wurde im INSIDE-Projekt untersucht, kann aber nicht abschließend beurteilt werden [siehe Abschlussbericht]. Es wird vorgeschlagen, alle Aspekte innerstädtischer Referenzpunkte, d.h. zu Möglichkeiten der Genauigkeitssteigerung von permanenten GNSS-Stationen oder zum Einsatz elektronischer CRs in einem Folgeprojekt weiter zu untersuchen.

6.3 LANGZEIT-VALIDIERUNG

Ein Gesichtspunkt beim Einsatz von Radarsatelliten für Monitoringaufgaben ist deren beschränkte Lebensdauer. Die durch Abkühlungseffekte hervorgerufenen Absenkungströge an der Oberfläche bauen sich sehr langsam auf, die Szenarien in [4, 5] betreffen einen Zeitraum von 50 Jahren. Demgegenüber ist die Mindest-Betriebszeit eines Sentinel-1 Satelliten auf lediglich 7 Jahre ausgelegt. Jedoch ist das aus zwei zeitgleich aktiven Satelliten bestehende Sentinel-1-System trotz der beschränkten Lebenszeit eines einzelnen Satelliten explizit auf Nachhaltigkeit ausgelegt und soll insbesondere die Nutzung der Daten für dauerhafte Aufgaben der Behörden und institutioneller Einrichtungen fördern. Dieser Anspruch wird durch die Bereitstellung baugleicher Satelliten gewährleistet, die die Gesamtlaufzeit des Systems über lange Zeit sicherstellen. Außerdem können SAR-Satelliten ihre geplante Mindestbetriebszeit unter guten Bedingungen mehr als verdoppeln, wie das Beispiel des TerraSAR-X Satelliten zeigt.

Ein Charakteristikum deutschland- oder europaweiter InSAR-Karten ist deren Zusammensetzung aus vielen einzelnen Radarszenen (Mosaikierung). Dabei werden langwellige Deformationsanteile über eine Kalibrierung mittels GNSS-Stationen restauriert. Zur Aufdeckung und Vermeidung residualer Trends empfiehlt es sich, die Kalibrierung für regionale und lokale Anwendungen zu überprüfen und ggf. zu verbessern. Dazu bieten sich die oben vorgeschlagenen GNSS-Referenzstationen in Verbindung mit städtischen Wiederholungsnivellements an. Es wird daher empfohlen, nach Art der Leitnivelements in den Bergbaugebieten Nordrhein-Westfalens periodisch Wiederholungsnivellements im Stadtgebiet München und definierten Außenbereichen durchzuführen [16]. Die vermessenen Linien sollten die GNSS-Referenzstationen und die Geothermie-Bohrplätze einschließen. Neben der Aufdeckung von Trends oder Systematiken in den PSI-Karten der Bodenbewegungsdienste können solche über Dekaden durchgeführten Nivellements auch zur Sicherstellung der Kontinuität bei möglichen zukünftigen Veränderungen des Radarsatellitensystems dienen. Wegen der langsam voranschreitenden thermischen Prozesse im Untergrund und der auf Nachhaltigkeit angelegten europäischen Satellitenmission Sentinel-1 scheint ein Wiederholungsintervall von 10 Jahren angemessen.

Es wird empfohlen, bei dieser Aufgabe auf eine repräsentative Auswahl bereits existierender Messpunkte der Stadtvermessung zurückzugreifen. Wegen der großen räumlichen Ausdehnung der erwarteten Deformationserscheinungen an der Erdoberfläche sollte geprüft werden, ob – außer an neu eingerichteten Bohrplätzen – die Anlage spezieller Neupunkte notwendig ist. Infolgedessen wird empfohlen, bei dieser Aufgabe die Landes- und Stadtvermessung hinzuzuziehen. Es ist zudem zu prüfen, ob die Durchführung der Geothermie-bedingten, stadtweiten Wiederholungsnivellements in den Aufgabenbereich der Vermessungsämter zur Sicherstellung des geodätischen Raumbezugs fällt. Von der Sache her ist es nicht nachvollziehbar, dass diese Messaufgabe ausschließlich in den Kompetenzbereich der Markscheider fallen sollte. Ebenso wäre zu prüfen, ob und in welcher Form sich die Betreiber von Geothermie-Anlagen an solchen Leitnivelements beteiligen. Denkbar wäre ein Modell in Anlehnung an das seismische Betreiber Netzwerk.

6.4 NEUFASSUNG DER AUFGABEN DES MARKSCHEIDERS

Im Rahmen einer Neubewertung der Aufgaben im Zuge eines integrierten geodätischen Monitoringsystems könnte dem Markscheider-Bereich die Koordinierung der verschiedenen Messmethoden zufallen. Dazu gehört u. a. die Kommunikation mit den Bodenbewegungsdiensten, Betreibern und Behörden, der regelmäßige Download der PSI-Produkte und deren Aufarbeitung für die vorgegebenen Zwecke sowie die Verschneidung mit den kontinuierlichen GNSS-Messungen sowie den Wiederholungsnivellements. Kern der Aufgaben wäre die Gesamtbetrachtung der Situation gemeinsam für alle Betreiber. Es wird empfohlen, die konkrete Vorgehensweise über ein koordiniertes Forschungsprojekt mit allen maßgeblichen Institutionen zu entwickeln.

7 ANHANG

7.1 ALTERNATIVER MODELLANSATZ

Überträgt man die Parameter des Modells von Gaucher & Egert [5] auf alle hier betrachteten Bohrungen, so ergibt sich an der Oberfläche ein Verschiebungsmuster mit alternierenden Senkungen und Hebungen. Die Verschiebungsbeträge sind insgesamt um etwa einen Faktor 4 kleiner als nach dem Modell von Gaucher et al. [4]. Sie sind geodätisch gut messbar, fallen aber weitgehend unter die Genauigkeitsschwelle der Klasse I nach MarkschBergV. Die prinzipiellen Zusammenhänge zwischen Tiefe der Bohrungen und Ausdehnung der Einwirkungsbereiche an der Oberfläche bleiben bestehen. Es wird zudem unmittelbar deutlich, dass die Einwirkungsbereiche sehr unregelmäßig geformt sind und eine flächenhafte Erfassung zwingend notwendig ist.

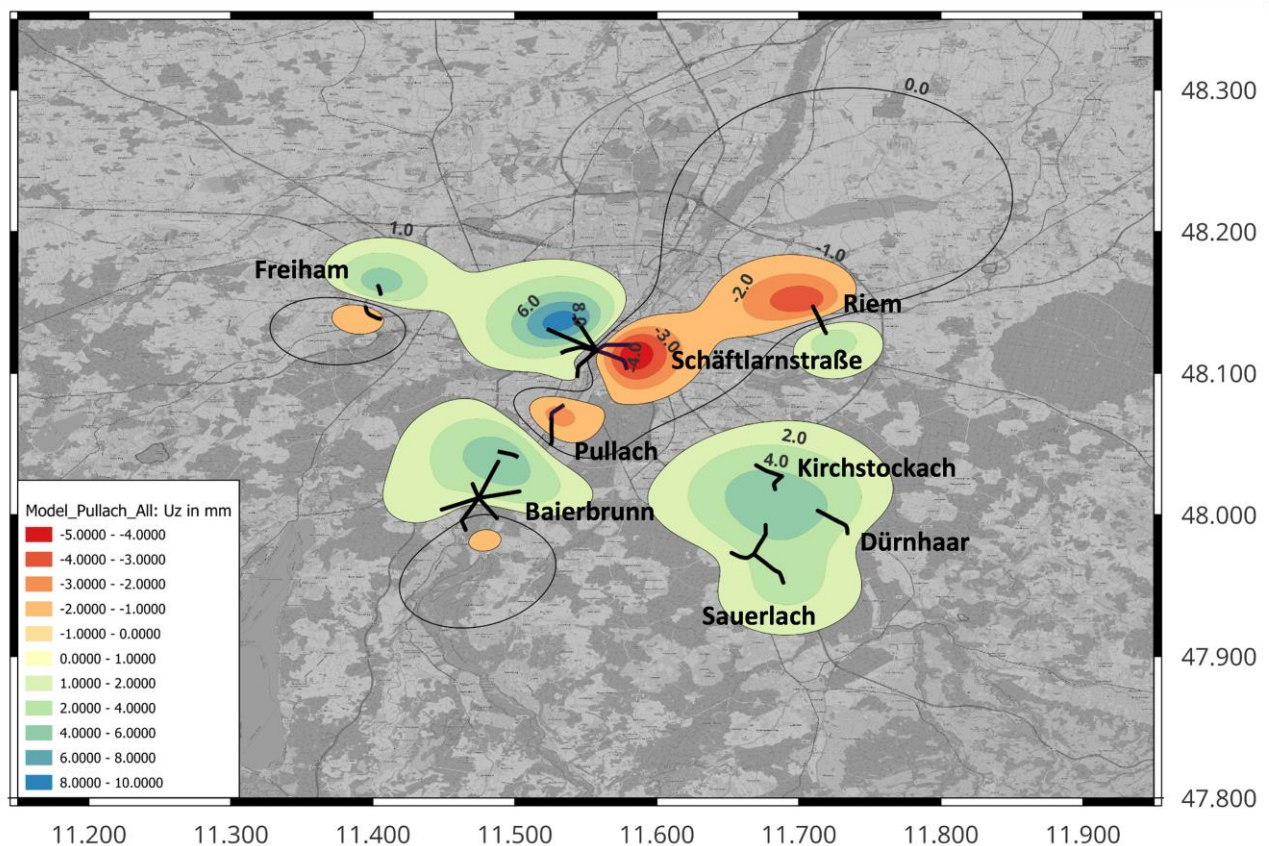


Abbildung 13: Muster der Oberflächenverschiebungen nach Übertragung der Mogi-Modell-Parameter für das Modell von Gaucher & Egert [5] auf die Standorte von SWM.

8 REFERENZEN

- [1] Bundesministerium der Justiz: Bergverordnung über Einwirkungsbereiche (Einwirkungsbereichs-Bergverordnung – EinwirkungsBergV, <https://www.gesetze-im-internet.de/einwirkungsbergv/BJNR015580982.html>), abgerufen 17.07.24
- [2] Rainer Zimmer: Geothermie in Südbayern - Rechtsrahmen zur Bergschadenshaftung bei Geothermieprojekten, Geothermie Allianz Bayern, Foliensatz zum Vortrag, Garching 22.03.2018.
- [3] Bundesministerium der Justiz: Verordnung über markscheiderische Arbeiten und Beobachtungen der Oberfläche, <https://www.gesetze-im-internet.de/marschbergv/index.html>, abgerufen 17.07.2024
- [4] Gaucher, E., Savvatis, A., Habibi, R., Egert, R. *et al.*, Geothermal Reservoir Numerical Modelling, Forschungsprojekt INSIDE – Einblicke und Ergebnisse, Foliensatz zum Abschlusstreffen, S. 85 – 113, Pullach, 07. Mai 2024, www.inside-geothermie.de/publikationen, abgerufen 17.07.2024.
- [5] Gaucher, E., Egert, R., Change of the THM Properties of a Malm Geothermal Under Present and Future Exploitation Schemes, Poster, EGU23-11877, Wien, 2023.
- [6] Mogi, K. Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surfaces around them. *Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, 36, pp. 99-134, 1958.
- [7] Heimlich, C., Gourmelen, N., Masson, F., Schmittbuhl, J., Kim, Sang-Wan, Azzola, J., Uplift around the geothermal power plant of Landau (Germany) as observed by InSAR monitoring, *Geothermal Energy*, vol 3, no. 1, 2., 10.1186/s40517-014-0024-y, Springer Open, 30.01.2015.
- [8] Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F. (2001): Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 39(1):8-20.
- [9] Bamler, R., Adam, N., Hinz, S., Eineder, M. (2008): SAR-Interferometrie für geodätische Anwendungen, *AVN 7/2008*, 243-252, 2008.
- [10] Crosetto, M., Monserrat, O., Iglesias, R., Crippa, B. (2010): Persistent Scatterer Interferometry: Potential, Limits and Initial C-and X-band Comparison. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. Vol. 76, N. 9, pp. 1061-1069, 2010.
- [11] Even, M.; Westerhaus, M.; Simon, V.: Complex Surface Displacements above the Storage Cavern Field at Epe, NW-Germany, Observed by Multi-Temporal SAR-Interferometry. *Remote sensing*, 12 (20), Art.-Nr. 3348. doi:10.3390/rs12203348, 2020.
- [12] Even, M.; Westerhaus, M.; Seidel, A.: Konvergenz- und druckabhängige Oberflächenverschiebungen über einem Kavernenspeicherfeld in NW-Deutschland, beobachtet mit Methoden der Radarinterferometrie. *DGMK/ÖGWE Frühjahrstagung 2022 – Geo-Energy-Systems and Subsurface Technologies – Key Elements towards a Low Carbon World*, Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e.V. (DGMK), 33–41, 2022
- [13] Even, M. Westerhaus, M., Kutterer, H, German and European Ground Motion Service – a Comparison, *PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, Volume 92, pages 253–270, 2024.
- [14] Westerhaus, M., Ambrus, B., Tsantopolous, E., Almassian, C., Seidel, A., Even, M., Baasch, R., Betzl, B., Potten M. *et al.*, Geodetic Monitoring, Forschungsprojekt INSIDE – Einblicke und Ergebnisse, Foliensatz zum Abschlusstreffen, S. 57 – 82, Pullach, 07. Mai 2024, www.inside-geothermie.de/publikationen, abgerufen 17.07.2024.
- [15] End-to-end implementation and operation of the European Ground Motion Service (EGMS), EGMS-D3-ALG-SC1-2.0-006, <https://land.copernicus.eu/user-corner/technical-library/egms-algorithm-theoretical-basis-document>, 2021.
- [16] Bezirksregierung Arnsberg, Richtlinien für die Ausführung des Leitnivelements im Bezirk des Landesoberbergamts Nordrhein-Westfalen, Herausgegeben vom Landesoberbergamt Nordrhein-Westfalen und vom Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen, 23. 12. 1998, <https://esb.bra.nrw.de/2-technische-richtlinien-und-rundverfuegungen/230-markscheidewesen/richtlinien-fuer-das-leitnivelement/richtlinie>, abgerufen 17.07.2024.