



LUDWIG-
MAXIMILIANS-
UNIVERSITÄT
MÜNCHEN

GEOPHYSIKALISCHES OBSERVATORIUM
DEPARTMENT FÜR GEO- UND UMWELTWISSENSCHAFTEN



Geothermieprojekt “Gauting-West” Kategorisierung und Empfehlungen nach “GRID”

Dipl.-Geophys. T. Megies
Dr. J. Wassermann

Geophysikalisches Observatorium der Ludwig-Maximilians-Universität München
09.11.2023

Inhalt

| | |
|--|-----------|
| Inhalt | 1 |
| Überblick Geothermieprojekt “Gauting-West” | 2 |
| Natürliche Seismizität in Bayern | 2 |
| Induzierte Seismizität in Bayern | 4 |
| Zusammenfassung bekannter induzierter Seismizität | 4 |
| Mögliche Auslösemechanismen im Fall von Tiefengeothermie | 8 |
| Hauptinflussfaktoren bei Tiefengeothermieprojekten bezüglich induzierter Seismizität | 9 |
| Kategorisierung nach GRID | 11 |
| A) Seismische Gefährdung | 11 |
| B) Sekundäre Gefährdung, Exposition und Vulnerabilität (im Umkreis von 5km) | 12 |
| C) Soziale/öffentliche Bedenken | 13 |
| Empfehlungen | 16 |
| Referenzen | 19 |

Überblick Geothermieprojekt “Gauting-West”

Der folgende Überblick fasst die wichtigsten Rahmendaten des Tiefengeothermieprojektes “Gauting-West” zusammen (pers. Komm. Erdwerk GmbH, September 2023).

Das Projekt “Gauting-West”, Bewilligungsfeld “Gauting-West”, liegt im Norden des Landkreises Starnberg. Vom geplanten Bohrplatz aus sind zwei Bohrungen zur Erschließung des oberen Jura bis in Endteufen von bis zu etwa 2700-2800 m TVD geplant. Das Strukturmodell des Reservoirs beruht auf der Auswertung von 2D Seismiklinien. Die Bohrpfade sind entlang einer ungefähr Nord-Süd verlaufenden Seismiklinie (Linie 7601) geplant. Die erwartete Temperatur im Bereich der Bohrungen beträgt etwa 95-105 °C. Nach Abkühlung ist eine Reinjektion mit einer Temperatur von ca. 40°C geplant. Die geplante Volumenrate beträgt ca. 100-120 l/s. Für die Reinjektion ist ein Kopfdruck von 2,2 bar geplant, wobei im worst case eine Erhöhung auf bis zu 30 bar geplant ist. Die Abschätzung des zu erwartenden Spannungsfeldes basiert vornehmlich auf Informationen der World Stress Map, wobei auch die Daten der nahe gelegenen Bohrung “Unterbrunn 3” hinzugezogen wurden.

Natürliche Seismizität in Bayern

Nach Leydecker (2011) kann Bayern in grob sieben seismo-tektonische Einheiten unterteilt werden (Abb. 1). Diese Einheiten werden so gewählt, dass sie verschiedene tektonisch-geologische Einheiten mit unterschiedlicher natürlicher Seismizität unterteilen. Das Aufsuchungsgebiet des vorliegenden Geothermieprojektes liegt in der zweitgrößten Region “Bayerisches Molassebecken”, welche sich durch bis zu 5 km mächtige Sedimentpakete auszeichnet. Sie setzt sich durch das Fehlen natürlicher Seismizität im zentralen Teil von der im Süden anschließenden Einheit der nördlichen Überschiebungsfront der “Bayerischen Alpen” und der seismisch aktiven Zone “Fränkische Alb” im Norden deutlich ab (Leydecker, 2011). In der Molasse selbst gab es in der Vergangenheit einige ungewöhnlich tiefe Beben im Großraum Augsburg ($h \gg 10\text{km}$, Schmedes, 1984; EDB, 2003; 2008). Das völlige Fehlen von natürlicher Seismizität im zentralen Teil der bayerischen Molasse läßt auf eine insgesamt nur moderate Deformation des tieferen Untergrundes schließen.



Abbildung 1: Seismo-Tektonische Einheiten in Deutschland und der unmittelbaren Nachbarschaft (Leydecker, 2011).

Induzierte Seismizität in Bayern

Im Folgenden wird ein Überblick über sämtliche mutmaßlich induzierte Erdbebentätigkeit in Bayern gegeben. Dabei ist festzustellen, dass die hier beschriebene Seismizität im Folgenden als "induziert" bezeichnet wird, obwohl ein zweifelsfreier Nachweis, dass diese Erdbeben durch bergmännische Eingriffe ausgelöst wurden, nicht erbracht werden kann. Insbesondere aufgrund des engen räumlichen und zeitlichen Zusammenhangs, sowie der Feststellung, dass in den betroffenen Gegenden in historischen Zeiträumen keine natürliche Seismizität bekannt ist, herrscht unter Seismologen jedoch weitgehende Einigkeit, dass diese Bebenentätigkeit in der Tat mit dem Betrieb von Kohleabbau vor allem in den 1960er Jahren und heute mit der Tiefengeothermie in Verbindung steht.

Des Weiteren ist anzumerken, dass der Begriff "induziert" als Oberbegriff für vom Menschen ausgelöste Erdbeben verwendet wird, obwohl es sich fachlich streng genommen aller Wahrscheinlichkeit nach um "getriggerte" Erdbeben handelt.

Anschließend werden mögliche Auslösemechanismen induzierter Seismizität an Tiefengeothermieprojekten zusammengefasst sowie daraus resultierend die vermuteten Haupteinflussfaktoren im Kontext von Tiefengeothermie diskutiert.

Zusammenfassung bekannter induzierter Seismizität

Bergbau-induzierte Seismizität

Die bayerische Molasse lässt sich im Süd-Westen Bayerns in die Vorland- und die Faltenmolasse untergliedern. Diese letztere tektonische Einheit ist durch die alpine Faltung und Deckentransport zum Teil tektonisch beansprucht worden. Am Ostrand der bayerischen Faltenmolasse fand in den Jahren 1962 bis 1971 eine Reihe zum Teil starker Beben statt (MSK Intensität I=5-6), die zu Schäden an Wohnhäusern nahe des Epizentralgebiets führten. Nach Koschyk (1973) können diese Erdbeben dem damals noch aktiven Kohlebergbau zugeordnet werden. Bei den Beben handelte es sich nicht um Gebirgsschläge im klassischen Sinne, sondern vielmehr um getriggerte Ereignisse nahe der sogenannten "Sulzer Querstörung" (Koschyk, 1973). Als wahrscheinlichste Ursache gilt dabei eine Spannungsumlagerung durch den Kohleabbau auf das benachbarte (tiefer reichende) Störungssystem. Nach Beendigung des Kohlebergbaus im Jahr 1971 fand auch die Erdbebenserie ihr Ende. Diese dem Bergbau am Hohenpeißenberg zugeschriebene Erdbebentätigkeit zeigt deutlich, dass auf Störungen im alpinen Vorland bei entsprechender Orientierung und zusätzlicher Beanspruchung spürbare Erdbeben stattfinden können. Einschränkend muss an dieser Stelle vermerkt werden, dass das Erlaubnisfeld des vorliegenden Geothermieprojektes in beträchtlicher Entfernung zu der Region der Faltenmolasse liegt und damit ein deutlich weniger stark gestörtes Spannungsfeld anzunehmen ist.

Fluid-induzierte Seismizität

Die im vergangenen Jahrzehnt aufkommende Seismizität im Umfeld von Tiefengeothermieprojekten in Bayern wurde in erster Linie im Rahmen der folgenden Forschungsprojekte untersucht:

- Geothermische Charakterisierung von karstig-klüftigen Aquiferen im Großraum München (Megies und Wassermann, 2012)
- Verbundprojekt MAGS -- Konzepte zur Begrenzung der mikroseismischen Aktivität bei der energetischen Nutzung geothermischer Systeme im tiefen Untergrund Einzelprojekt 2: Untersuchung von Mikro-Beben in der bayerischen Molasse im Umfeld von geothermischen Reservoirs (Megies und Wassermann, 2014a/b)
- Mikroseismische Aktivität geothermischer Systeme 2 - Vom Einzelsystem zur großräumigen Nutzung: Einzelprojekt 2 - Untersuchungen zur optimierten seismischen Überwachung hydrogeothermaler Systeme bei dichter räumlicher Lage der Bohrerlaubnisfelder am Beispiel der Situation im Süden Münchens (Megies und Wassermann, 2017)

An aktuellen Forschungsvorhaben, die sich mit der Thematik befassen bzw. befassten, sind unter anderem die Projekte SEIGER, INSIDE und das GAB Teilprojekt 3 zu nennen. Außerdem konnte im Laufe der Jahre 2020/2021 im Großraum München ein standortübergreifendes Monitoringkonzept umgesetzt werden an dem etwa 20 Projektstandorte beteiligt sind. Die Daten von betreiberseitigen Messstationen werden dabei kontinuierlich aufgezeichnet und zentral gespeichert, was zusammen mit weiteren Stationen des Erdbebendienst Bayern seitdem eine deutliche Verbesserung der Detektionsfähigkeit und Auswertemöglichkeiten bedeutet.

Seit den ersten bekannten Erdbeben im Umfeld von Tiefengeothermieprojekten im Jahre 2008 konnte im Rahmen der vorgenannten Forschungsprojekte und der im Weiteren fortgeführten Beobachtung durch den Erdbebendienst Bayern an mindestens zehn Tiefengeothermiestandorten Seismizität nachgewiesen werden. Sieben dieser Standorte liegen im südlichen Landkreis München, zwei weitere Standorte im Nordosten und Süden Münchens in den Gemeinden Poing und Holzkirchen (siehe Tabelle 1 und Abb. 2). Dabei ist festzuhalten, dass der Kenntnisstand bezüglich der einzelnen Standorte sehr stark variiert, was mit der Fokussierung der einzelnen Forschungsprojekte und der darin durchgeführten Monitoringmaßnahmen begründet ist. So wurde zum Beispiel am Standort Unterhaching das detaillierteste Monitoring über viele Jahre hinweg durchgeführt, wohingegen etwa am Standort Sauerlach nur einige wenige Beben bekannt sind, welche mit einem wissenschaftlichen Monitoringnetzwerk detektiert wurden, das nicht für die Überwachung des Standortes Sauerlach ausgelegt war. Zudem liegen zu vielen Tiefengeothermiestandorten in Bayern, die mit niedrigeren Förderraten betrieben werden, keinerlei seismologische Monitoringdaten vor. Somit besteht zumindest theoretisch die Möglichkeit, dass schwache Mikrobeben an weiteren Standorten unbemerkt aufgetreten sind. Aufgrund der Detektionsfähigkeiten der regionalen und überregionalen Messnetze des Erdbebendienst Bayern und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe kann jedoch ausgeschlossen werden, dass weitere

signifikante Beben mit Lokalmagnituden $M_L \geq 2,0$ an anderen Standorten unbemerkt aufgetreten sind.

| Standort | Anzahl Detektionen | Stärkstes Beben (M_L) | Erste Detektion |
|------------------|--------------------|---------------------------|-----------------|
| Unterhaching | 801 | 2,4 † | Februar 2008 |
| Taufkirchen | 15 | 0,3 | Juli 2012 |
| Kirchstockach | 88 | 0,8 | August 2013 |
| Sauerlach | 6 | 1,2 | Juni 2014 |
| Pullach | 4 | 0,9 | März 2015 |
| Oberhaching | 64 | 1,0 | Februar 2016 |
| Dürrnhaar | 185 | 2,0 † | Juli 2016 |
| Poing | 23 | 2,1 † | November 2016 |
| Riem | 6 | 0,8 | Dezember 2016 |
| Holzkirchen | 45 | 1,2 | September 2019 |
| Schäftlarnstraße | 2 | -- * | April 2022 |
| N.N. | 444 | < 0 | -- |

Tabelle 1: Rahmendaten der bekannten Seismizität im Umfeld von Tiefengeothermieranlagen in Bayern, chronologisch nach erster bekannter Detektion (Stand September 2023). Unter "N.N." sind detektierte Mikrobeben zusammengefasst, die nicht mit hinreichender Sicherheit einem bestimmten Standort zugewiesen werden können. (vgl. Megies und Wassermann, 2017)

† Verspürte Beben zu denen dem Erdbebendienst Bayern Wahrnehmungsberichte vorliegen.

* Bisherige Detektion schwer lokalisierbar und damit Magnitude nicht direkt bestimmbar, aber nach erster Einschätzung mit sehr niedriger Magnitude, vermutlich < 0

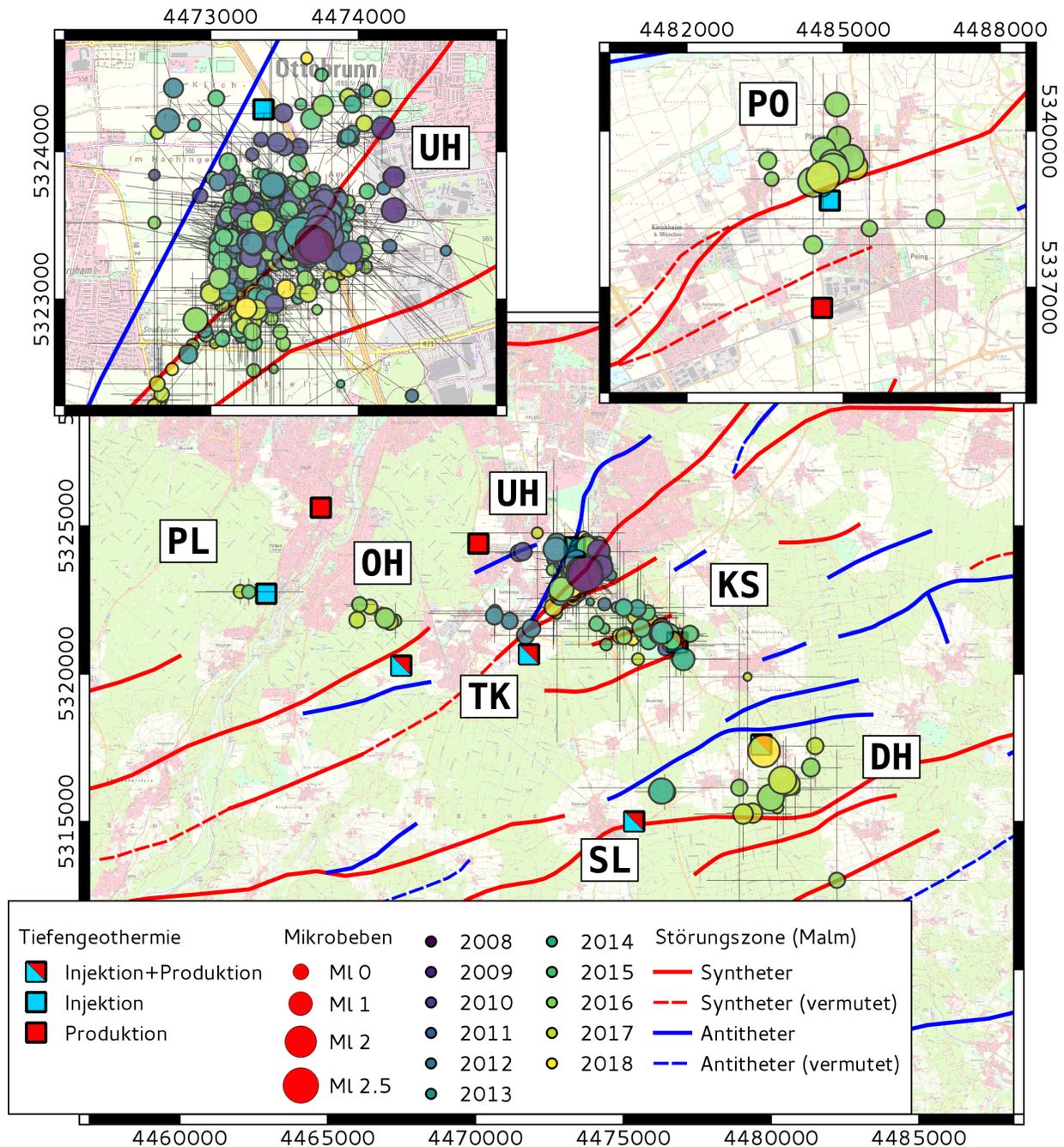


Abbildung 2: Bekannte induzierte Seismizität im Umfeld von Tiefengeothermie in Bayern nach Magnitude größenskaliert und nach Herdzeit farblich gekennzeichnet. Unsicherheiten in der Lokalisierung sind als schwarze Haarlinien dargestellt. Störungszone im Malm nach Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie (2010) und pers. comm. T. Fritzer (2010). Vgl. auch Megies und Wassermann (2017). Abkürzungen der Tiefengeothermiestandorte: UH (Unterhaching), PO (Poing), PL (Pullach), OH (Oberhaching/Grünwald), TK (Taufkirchen), KS (Kirchstockach), SL (Sauerlach), DH (Dürrnhaar). Koordinaten: Gauß-Krüger.

Die größte Bedeutung haben dabei die stärksten aufgetretenen Beben im Bereich Lokalmagnitude $M_L \geq 2,0$. An drei Standorten (Unterhaching, Poing, Dürrnhaar) sind Beben aufgetreten, die von Anwohnern verspürt wurden und zu denen dem Erdbebendienst Bayern schriftliche Wahrnehmungsberichte vorliegen.

Hervorzuheben ist ein Beben der Lokalmagnitude $M_L 2,1$, welches sich am 09.09.2017 nahe der Reinjektionsbohrung des Tiefengeothermieprojektes Poing in einer Tiefe von 3 km (± 1 km) ereignet hat. Das Beben wurde im Umkreis von einigen Kilometern von weiten Teilen der Bevölkerung wahrgenommen. Binnen 48 Stunden nach Auftreten des Bebens lagen dem Erdbebendienst Bayern circa 150 schriftliche Meldungen aus der Bevölkerung vor. In einigen wenigen Fällen wurde dabei von Rissen in Außen- und/oder Innenputz berichtet. Instrumentell wurde durch eine Monitoringstation des Betreibers im unmittelbaren Epizentralbereich (Epizentraldistanz < 1 km) eine maximale Bodenschwinggeschwindigkeit ("peak ground velocity", PGV) von 2,0 mm/s gemessen. Numerische Modellrechnungen, die auf einer Herdflächenlösung für ein früheres Beben im Jahr 2016 beruhen, sowie der Vergleich mit PGV Messungen für dieses frühere Beben an anderen Stationsstandorten deuten an, dass bedingt durch die Abstrahlcharakteristik des Herdes in manchen Teilen der Gemeinden Poing und Pliening möglicherweise noch leicht höhere PGV Werte aufgetreten sein könnten als im Epizentralbereich gemessen. Die stärksten aufgetretenen Erschütterungen liegen somit mutmaßlich nur knapp unterhalb des Fundament-Anhaltswertes für Wohngebäude von 5,0 mm/s nach DIN 4150-3 (siehe auch Keil et al., 2022).

Für einige wenige Beben an den Standorten Unterhaching und Poing konnten Herdflächenlösungen bestimmt werden (Megies und Wassermann, 2014a und 2016). Wie auch relative Relokalisierungen einiger Bebenschwärme am Standort Unterhaching (Megies und Wassermann, 2014a) deuten diese klar auf eine Reaktivierung bestehender Störungszonen im Reservoir hin. Diese sind entweder von den betreffenden Reinjektionsbohrung direkt durchteuft bzw. es wurden beigeordnete Störungssysteme in geringem Abstand von einigen Zehner bis Hundertermetern erbohrt.

Mögliche Auslösemechanismen im Fall von Tiefengeothermie

Ein eindeutiger Nachweis, welcher Mechanismus der für die Auslösung der beobachteten Seismizität konnte bisher von physikalischen Modellierungsstudien noch nicht erbracht werden. Die in Frage kommenden Möglichkeiten sind aber weitestgehend bekannt und wurden unter anderem von Majer et al. (2007) und Wiemer et al. (2017) zusammengefasst.

Im Kontext von hydrothermalen Tiefengeothermie, wie sie im vorliegenden Projekt angestrebt wird, sind dabei vor allem die folgenden drei Punkte zu nennen:

- Erhöhung des Porendrucks im Reservoir
- Thermische Spannungen durch die Auskühlung des Reservoirs
- chemische Alteration in Störungszonen

In den meisten Studien zu fluid-induzierter Seismizität wird von der Porendruckerhöhung als wichtigstem Einflussfaktor ausgegangen. Dabei wird durch die Erhöhung des Porendrucks im Reservoir (zusätzliche Wassersäule in Reinjektionsbohrung, erhöhte Dichte der Wassersäule bei Reinjektion von abgekühltem Fluid und eventueller zusätzlicher Druck zur Verpressung des Fluids) die auf Störungszonen wirkende effektive Normalspannung herabgesetzt, sodass die anliegende Scherspannung das Bruchkriterium übersteigt und somit ein Erdbeben ausgelöst wird. Allerdings bleibt hierbei festzuhalten, dass sich der Großteil der wissenschaftlichen Studien zu Seismizität bei Tiefengeothermie auf druckstimulierte Projekte bezieht, was zum Teil diesen scheinbar vermutete Dominanz des Einflusses der Porendruckerhöhung erklärt.

Es gibt jedoch im Kontext der hydrothermalen Tiefengeothermie auch Aspekte, die für einen Einfluss von thermischen Spannungen sprechen. Durch die Auskühlung des Reservoirs an der Reinjektion kann dabei im Bereich der Auskühlungsfront eine Rotation der Hauptspannungsrichtungen und auch eine Veränderung der Hauptspannungsmagnituden erfolgen. Auf diese Weise kann in gewissen Bereichen der Abkühlungsfront bei "passender" Orientierung von existierenden Störungszonen auch hier das Verhältnis von Scher- und Normalspannung dahingehend beeinflusst werden, dass das Bruchkriterium überschritten wird. Insbesondere da bisher keine zeitliche Korrelation zwischen Bohrlochkopfdrücken und Auftreten von Seismizität nachgewiesen werden konnte, wie sie bei druckstimulierten Projekten üblicherweise zu beobachten ist (Megies und Wassermann, 2012 und 2014b), sowie der Beobachtung, dass signifikante Seismizität in einigen Fällen erst Monate bis mehrere Jahre nach der Inbetriebnahme der Reinjektion aufgetreten ist (vgl. insbesondere Poing und Unterhaching) erscheint ein Einfluss von thermischen Spannungen als ein durchaus mögliches Szenario.

Ein signifikanter Einfluss von chemischen Alterationen auf das Auftreten von Seismizität wurde mehrfach theoretisch diskutiert, ist aber in der Praxis bisher nicht überzeugend belegt. Die mit der Laufzeit an einigen Projekten zunehmende Injektivität könnte durch Lösungsprozesse begründet sein und damit darauf hindeuten, dass chemische Alteration auch in Hinblick auf Seismizität eine Rolle spielen kann. Moeck et al. (2017) schätzen beispielsweise das jährliche Lösungspotential an der Reinjektion des Projektes Poing auf 1-35 t Kalzit.

In jedem Fall bleibt festzuhalten, dass signifikante und gesellschaftlich relevante Beben, die unter Umständen an der Oberfläche verspürt werden können und relevante Erschütterungen an Gebäuden verursachen können ($M_L \gg 1$; PGV $\gg 0,1$ mm/s), in jedem Fall an bereits bestehenden Störungszonen im Untergrund ausgelöst werden. Es bleibt zudem festzuhalten, dass In Bayern kein Fall bekannt ist, in dem im Umfeld einer Produktionsbohrung Seismizität aufgetreten ist.

Haupteinflussfaktoren bei Tiefengeothermieprojekten bezüglich induzierter Seismizität

Wie oben diskutiert, liegt das Hauptaugenmerk bei der Bewertung des Risikos induzierter Seismizität bei Tiefengeothermieprojekten auf der Beurteilung von bestehenden Störungszonen im nahen Umfeld der Re-Injektionsstrecke(n). Weitere Faktoren sind die Stärke der

Beeinflussung des Reservoirs (Volumenraten, Abkühlung, Druckerhöhung), sowie die Magnitude und Orientierung des lokal vorherrschenden tektonischen Spannungsfeldes. Mit Bezug auf die Stärke der Erschütterungen an der Oberfläche ist zudem die Herdtiefe ein wichtiger Aspekt. Die zu erwartenden Herdmechanismen bestimmen außerdem die räumliche Verteilung der PGV an der Oberfläche, da die Abstrahlung der seismischen Energie richtungsabhängig ist.

In Hinblick auf eine mögliche Bruchauslösung durch eine Porendruckerhöhung muss das direkte Erbohren von prominenten Störungszonen (große Erstreckung und Versätze), insbesondere bei entsprechender Orientierung im lokalen Spannungsfeld, oder beigeordneter Störungssysteme als besonders kritisch gesehen werden. In Hinblick auf eine mögliche Auslösung durch thermische Spannungen ist auch ohne direkte hydraulische Verbindung zu einer Störungszone eine Auslösung von Seismizität denkbar, falls der Abstand zur Störung gering ist (etwa < 500m-1km).

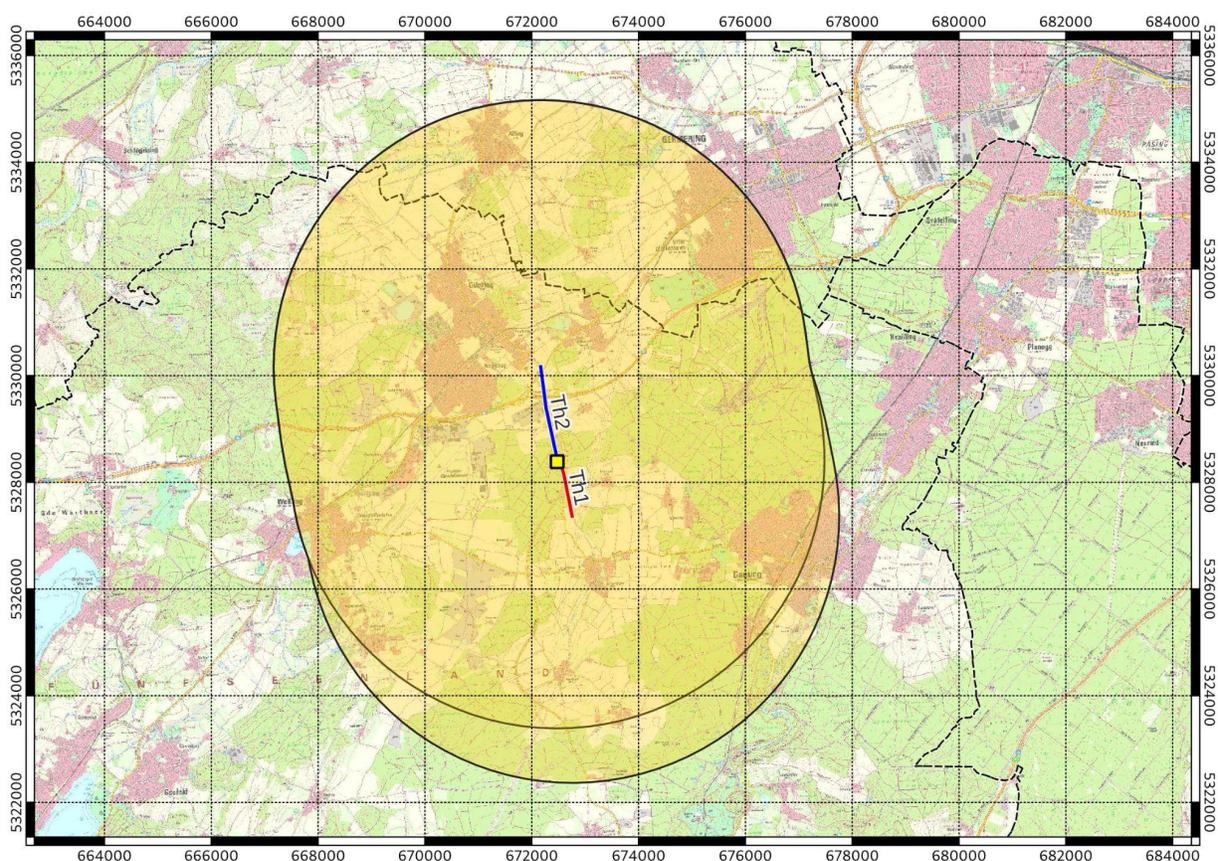


Abbildung 3: Lageplan des Bohrplatzes (gelbes Quadrat) und der geplanten Bohrpfade der Bohrungen Th1 (geplante Produktion, in rot) und Th2 (geplante Injektion, in blau) sowie 5 km Umkreis um Bohrpfade der geplanten Bohrungen (innerer Kreis: Umkreis nur um geplante Injektionsbohrung). (geplante Bohrpfade: pers. Komm. Erdwerk GmbH, September 2023; Geobasisdaten: © Bayerische Vermessungsverwaltung; Koordinaten UTM, EPSG 25832)

Kategorisierung nach GRID

Nachfolgend erfolgt eine Einschätzung des Vorhabens nach einer modifizierten Version des "Geothermal Risk of Induced seismicity Diagnosis" Schema Version 2 ("GRID", Trutnevyte et al., 2017; Wiemer et al., 2017; Kraft et al., 2020). Dabei wird aus der Kombination verschiedener Gefährdungsaspekte, sowie gesellschaftlichen Komponenten eine einfache Kategorisierung abgeleitet, aus der gefolgert werden kann, welche vorbeugenden bzw. begleitenden Maßnahmen zu empfehlen sind.

Die Modifizierung besteht in der Anpassung des GRID Schemas auf deutsche Normen (DIN, 2021):

- Unterscheidung Hintergrundseismizität / induzierte Seismizität anhand der Einteilung nach Erdbebenzonen SIA (2020) Zone 1a/b (GRID Wertung 0), Zone 2 (Wertung 1) und Zone 3a/b (Wertung 2) wird ersetzt durch deren entsprechende in SIA (2020) definierten maximalen Bodenbeschleunigungswerte für eine Wiederkehrperiode von 475 Jahren von $<0,8 \text{ m/s}^2$ (Wertung 0), $0,8-1,0 \text{ m/s}^2$ (Wertung 1), $>1,0 \text{ m/s}^2$ (Wertung 2)
- Die Klassifizierung "soft soil" (SIA Untergrundklassen D, E, F) nach GRID wird entsprechend DIN (2021) als "nicht den Baugrundklassen A-C zugehörig" ersetzt
- Die Bedeutungskategorien für Bauwerke II bzw. III nach SIA (2020) werden entsprechend durch die äquivalenten Kategorien III und IV der DIN (2021) ersetzt

A) Seismische Gefährdung

- Tiefe des Reservoirs
2,7-2,8 km TVD \Rightarrow 1
- Gesamtvolumen der Injektion während der Stimulationsphase
keine Druckstimulation \Rightarrow 0
- Tägliches Injektionsvolumen in Betriebsphase
ca. 100-120 l/s \approx 8.700-10.400 m³/d
im Grenzbereich zwischen 1 und 2 \Rightarrow 1,5
- Gesteinsart
Landepunkte geplant in ca. 150-200 m Abstand zu Top Kristallin
<500m Abstand von kristallinem Grundgestein \Rightarrow 1
- Unterscheidung Hintergrundseismizität / induzierte Seismizität
 $0,1-0,3 \text{ m/s}^2$ (Grünthal et al., 2018)
 $\leq 0,8 \text{ m/s}^2 \Rightarrow$ 0
- Druck der Fluidinjektion / Bohrlochkopfdruck
Erwarteter Kopfdruck 2,2 bar; Worst case ca. 30 bar; Technisch maximal möglicher Druck am Bohrlochkopf 45 bar
Im Grenzbereich $<0,3 \text{ MPa} / 0,3-10 \text{ MPa} \Rightarrow$ 0,5
- Distanz zu bekannten und potenziell aktiven Störungszonen mit mehr als 3km Länge

Laut Strukturmodell (s. Abb. 4) liegt die geplante Injektionssektion der geplanten Injektionsbohrung Th2 in etwa 400-500m Abstand einer Störungszone die von der verrohrten Sektion durchteuft wird. Die laterale Ausdehnung der Störungszone geht aus den vorliegenden Auswertungen der 2D Seismiklinien nicht hervor. Der vertikale Versatz an dieser Störungszone ist sehr gering.

Die Produktionsbohrung Th1 durchteuft im Reservoir die Hauptstörung "Unterbrunner Hauptversatz" die sich lateral über 4-6km durch das gesamte Strukturmodell zieht. Die Injektionssektion der geplanten Bohrung Th2 liegt in ca. 1,5km Entfernung des Unterbrunner Hauptversatzes.

<2km ⇒ 2

GRID Rechtswert: 6

B) Sekundäre Gefährdung, Exposition und Vulnerabilität (im Umkreis von 5km)

- Lokale Standortbedingungen im Umkreis von 5km
Quartäre Schotter, vornehmlich Baugrundklasse C
<10% Gebäude auf Baugrund der nicht den Klassen A-C entspricht ⇒ 1
- Exponierte Bevölkerung im Umkreis von 5km
Das betroffene Gebiet umfasst u.A. den Großteil der Gemeinde Gilching (ca. 18-19t Einwohner), sowie etwa zur Hälfte die Siedlungsgebiete der Gemeinden Weßling (insgesamt ca. 5-6t), Gauting (insg. ca. 20-21t) und Germering (insg. ca. 40t).
> 20t ⇒ 2
- Industrielle / kommerzielle Aktivitäten im Umkreis von 5km
Im 5km Umkreis liegen u.a. der Sonderflughafen Oberpfaffenhofen, die Kraillinger Innovationsmeile, sowie die Gewerbeparks Gilching-Süd, Gilching-Nord und Gilching-West mit zahlreichen kleinen und mittleren Unternehmen.
Hohe Aktivität ⇒ 2
- Gebäude / Infrastruktur im Umkreis von 5km
Im 5km Umkreis ist kritische Infrastruktur der Kategorie IV (DIN, 2021) eher nicht zu erkennen. Es sind Bauwerke der Kategorie III vorhanden (z.B. diverse Schulen in Gilching, Germering und Gauting)
⇒ 1
- Infrastruktur mit erheblichem Umweltrisiko im Umkreis von 5km
nicht vorhanden ⇒ 0
- Unbewehrtes kulturelles Erbe / Denkmäler im Umkreis von 5km
Im betroffenen Gebiet ist nur ein sehr geringer Anteil der Bauwerke als Baudenkmal ausgewiesen.
⇒ 0
- Suszeptibilität für sekundäre Gefahren im Umkreis von 5km
sehr gering ⇒ 0

GRID Hochwert: 6

C) Soziale/öffentliche Bedenken

- Bedenken in der allgemeinen Bevölkerung
generell besteht an jedem bayerischen Standort das Potential zu Bedenken in der Öffentlichkeit, basierend auf Berichterstattung in der Presse zum Beispiel zum Fall Poing mit einigen verspürten Beben oder wiederkehrenden in der Lokalpresse erscheinenden negativen Schlagzeilen in Bezug auf Rechtsstreitigkeiten beim Betrieb der Geothermie Kirchweidach im Landkreis Altötting (was aber überregional kaum wahrgenommen wird). Abgesehen von einem Geothermieprojekt in Puchheim, das letztlich an einem Bürgerbegehren gegen das Vorhaben gescheitert ist, war aber im Großraum München in den letzten Jahren keine nennenswerte Opposition aus der Bevölkerung festzustellen. Im Gegenteil wird insbesondere in der aktuellen Energieproblematik in letzter Zeit vermehrt über steigende Anfragen an Fernwärmeversorgung aus Geothermie (z.B. in Poing) berichtet, als Ersatz aktuell stark verteuerter fossiler Energieträger. Auch die bisherige Entwicklung des Standortes Schäftlarnstraße im Kerngebiet der Stadt München durch SWM hat Stand jetzt nicht zu erkennbaren Bedenken in der Bevölkerung geführt.
Starke Bedenken der allgemeinen Bevölkerung sind damit aktuell nicht als sehr wahrscheinlich einzuschätzen $\Rightarrow 0$
- starke gegnerische Interessensvertreter
Aktive Bürgerinitiativen gegen Geothermie sind im Raum München derzeit nicht bekannt. Im betroffenen Gebiet sind kleine und mittlere Unternehmen angesiedelt, eine Opposition des Vorhabens ist derzeit nicht erkennbar.
starke gegnerische Interessensvertreter derzeit kaum erkennbar $\Rightarrow 0$
- Negative Erfahrungen mit ähnlichen Projekten, siehe oben, Hinweis auf Berichterstattung im Fall Poing, negative Berichterstattung im Fall Kirchweidach bezogen auf Rechtsstreitigkeiten der Betreiber. Insbesondere letzteres erscheint aber wenig relevant am vorliegenden Standort und dem stehen positive Erfahrungen und Berichterstattung zur Nutzung der Geothermie für Fernwärme als Alternative zu fossilen Energieträgern im Großraum München entgegen, insbesondere seit Beginn der Energiekrise im Zuge des Kriegs in der Ukraine.
eher zu vernachlässigen $\Rightarrow 0$
- Mangelndes Vertrauen in die Projektleiter / Behörden
Die projektbeteiligten Firmen haben Erfahrung mit Betrieb und Entwicklung von Geothermieprojekten im Raum München.
nicht vorhanden $\Rightarrow 0$
- Vorteile für die örtliche Bevölkerung / Gemeinde
Das Projekt soll an bestehende bzw. in Ausbau befindliche und geplante Fernwärmenetze der Gemeinden Gauting und Gilching sowie der umliegenden Gewerbegebiete angebunden werden, die auch zukünftig weiter erweitert werden sollen. Insofern ist mittel- bis langfristig das Potenzial für einen direkten Nutzen für die lokale

Bevölkerung erkennbar.
 Direkter Nutzen bzw. monetäre Vorteile potentiell in Aussicht \Rightarrow 0,5
 Zwischensumme: 0,5

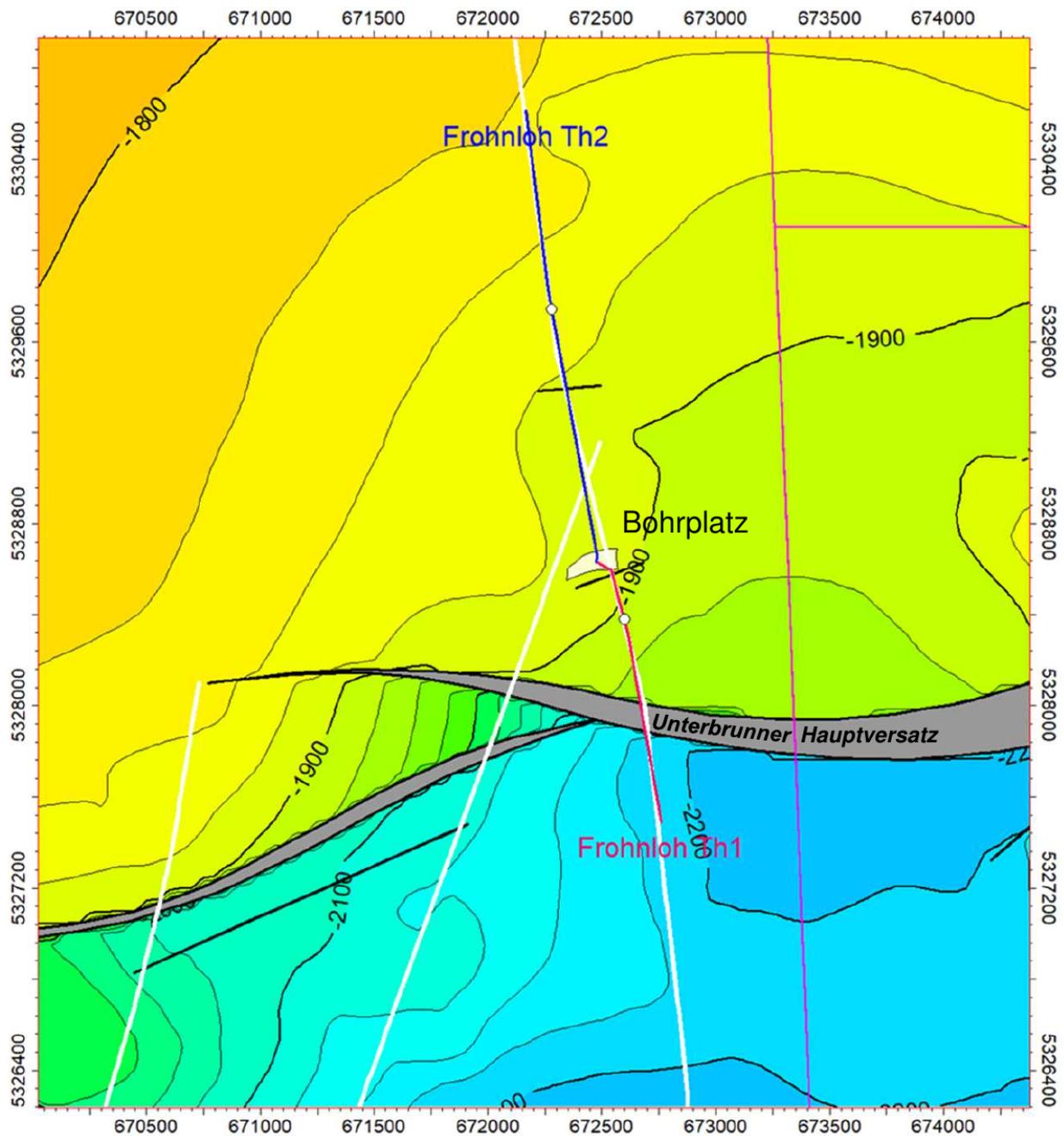


Abbildung 4: Targetkarte mit Teufe Top Malm und geplanten Bohrpfeifen Frohnloh Th1 und Th2 (Durchstoßpunkte Top Malm in weiß) sowie interpretierten 2D Seismiklinien (weiß) und einigen relevanten Störungszonen (insb. durchteuften) im Reservoir (schwarz). Geplante

Förderbohrung Th1 in rot, Injektionsbohrung Th2 in blau. (Abbildung: pers. Komm. Erdwerk, September 2023)

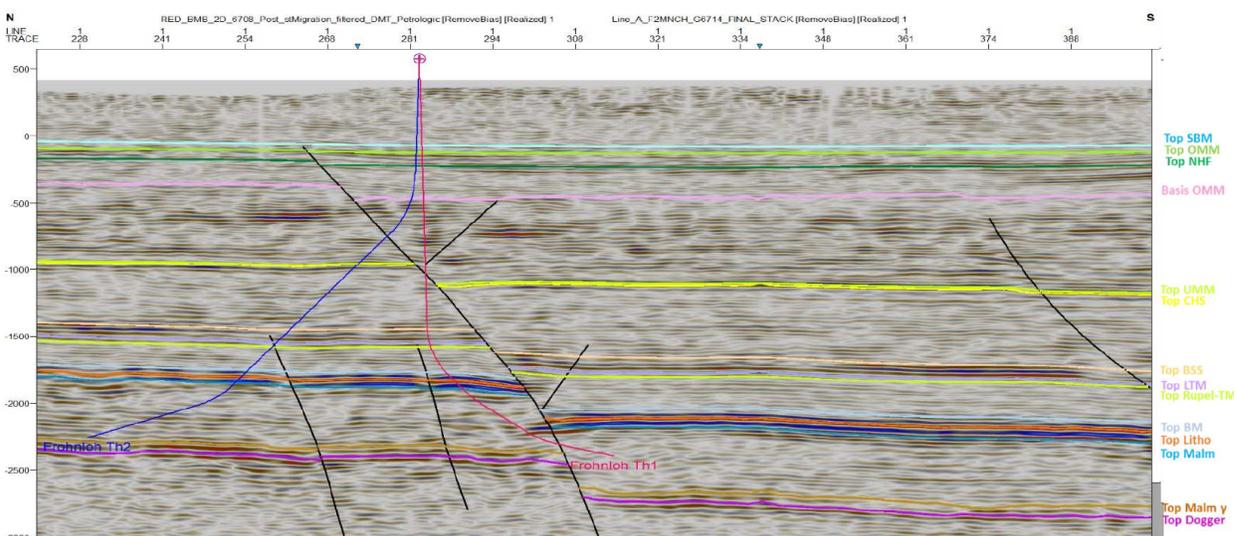


Abbildung 5: Verlauf der Bohrpfade projiziert auf die tiefenkonvertierte seismische Linie 7601 (in TVD, mNN) sowie Interpretation von Störungszonen (schwarze Linien). (Abbildung: pers. Komm. Erdwerk, September 2023)

Aufgrund der vorliegenden Daten ergibt sich für die GRID Kategorisierung ein Rechtswert von 6 und ein Hochwert von 6, sowie eine Zwischensumme der sozialen/öffentlichen Bedenken von 0,5. Damit ergibt sich für das Projekt "Gauting-West" nach GRID eine Einstufung im Grenzbereich von Kategorie I und II (Abb. 6).

Trutnevte et al. (2017) und Kraft et al. (2020) empfehlen als durchzuführende Begleitmaßnahmen nach Kategorie II unter anderem:

- Empirische, Szenarien-basierte seismische Gefährdungs- und Risikoeinschätzung
- Information der Öffentlichkeit bezüglich möglicher und eventuell tatsächlich auftretender Seismizität vorab und im laufenden Betrieb
- öffentliche und offene Diskussion des Kenntnisstandes zur seismischen Gefährdung und möglicher Auswirkungen bzw. des Reaktionsschemas im Falle auftretender Seismizität
- Dokumentation des aktuellen Zustandes besonders empfindlicher bzw. historischer Gebäude und im Laufe des Projektes bei Auftreten von relevanten Beben
- Betrieb eines seismischen Monitoringnetzwerks mit mindestens 3-4 Stationen. Auswertung hinsichtlich aller Mikrobeben mit Magnituden $M_L > 1,0$
- Definition eines konventionellen Magnituden- und PGV-basierten Ampelsystems, sowie Definition eines klaren Reaktionsschemas für alle Ampelphasen

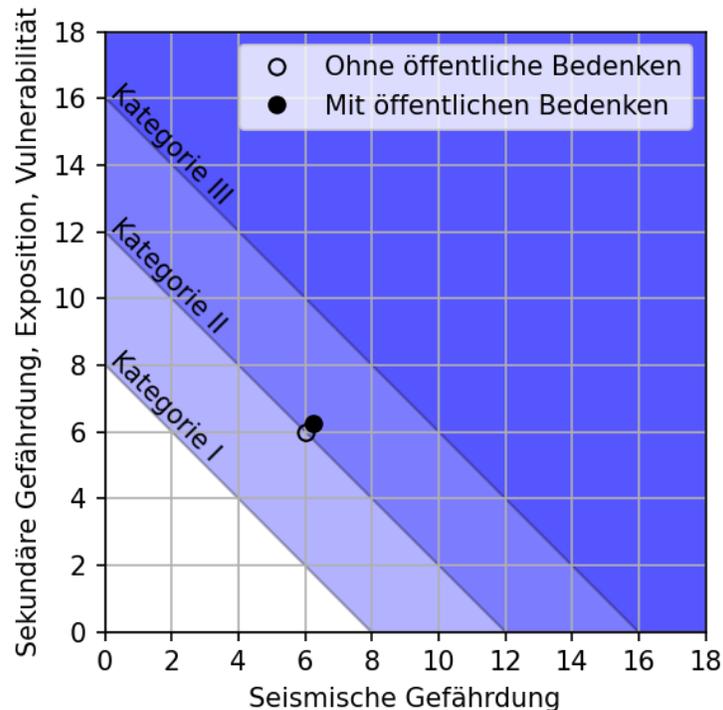


Abbildung 6: Ergebnis der Kategorisierung nach GRID. Das Projekt "Gauting-West" liegt nach GRID im Grenzbereich von Kategorie I und II.

Empfehlungen

Maßgeblich für die vorliegenden Empfehlungen, welche Maßnahmen im Betrieb des Projektes getroffen werden sollten, sind in erster Linie die an vergleichbaren Projekten in der bayerischen Molasse aufgetretene (z.B. Standorte im Landkreis München, Gemeinde Poing, etc; Megies und Wassermann, 2014a, 2014b, 2016 und 2017) -- nach weitläufiger Expertenmeinung induzierte -- Seismizität, die vorliegenden Informationen zur Strukturgeologie im Reservoir (pers. Komm. Erdwerk GmbH, September 2023), sowie die obige Kategorisierung des Projektes nach dem GRID System als Kategorie I-II (Trutnevyte und Wiemer, 2017; Wiemer et al., 2017; Kraft et al., 2020) und der Vergleich mit anderen bereits (zum Teil viele Jahre) im Betrieb befindlichen weiteren Projektstandorten im Großraum München.

- Grundsätzlich ist, wenn möglich, für die Reinjektion ein fazielles Target vorzuziehen. Bei der Planung der Injektion sollten insbesondere Störungsstrukturen vermieden werden, welche eine erhöhte Scherungstendenz im zu erwartenden Spannungsfeld aufweisen, signifikante vertikale Versätze (ca. >100m) und laterale Ausdehnungen von mehreren Kilometern aufweisen. Diese Einschätzung basiert auf Erfahrungswerten u.A. der beobachteten, an der Oberfläche verspürten Beben mit Lokalmagnitude >2 an den Standorten Unterhaching und Poing und den dort vorherrschenden struktureologischen

Bedingungen, sowie den dazu im Vergleich schwächeren Mikrobeben an anderen Standorten in der Molasse.

Im Vergleich dazu sind Produktionsbohrungen bisher im Bereich der Molasse in keinem Fall mit induzierter Seismizität in Verbindung gebracht worden und damit in dieser Hinsicht als deutlich weniger problematisch zu betrachten.

Die open hole Sektion der geplanten Injektionsbohrung Th2 wurde mit faziell Target geplant und liegt in einem minimalen Abstand von etwa 400-500 m zu im Strukturmodell erkennbaren Störungszonen (s. Abb. 4 und 5).

Die geplante Produktionsbohrung durchteuft in der open hole Sektion die prominente Hauptstörung im Gebiet, den "Unterbrunner Versatz", mit langer lateraler Ausdehnung und hohem vertikalem Versatz. Basierend auf der Erfahrung mit bestehenden Anlagen in der bayerischen Molasse ist aber im Rahmen der Fördertätigkeit eher nicht mit induzierter Seismizität zu rechnen.

Die vorliegende Planung der Bohrpfade und Auslegung der Förderrichtung erscheint damit hinsichtlich der Minimierung der seismischen Gefährdung stimmig und im Vergleich zu bestehenden, älteren Projekten die zum Teil auch für Injektionsbohrungen prominente Störungszonen als Target verwendet haben als deutlich weniger problematisch.

- Das Spannungsfeld ist eine der wichtigsten Eingangsgrößen der Scherungstendenzanalyse und kann aufgrund verschiedener Einflussfaktoren vom regionalen Spannungsfeld abweichen (vgl. z.B. Seithel et al. 2019). Für den Fall, dass im späteren Verlauf des Projektes wirtschaftliche Erwägungen eine Umplanung der Förderrichtung einzelner Bohrungen nötig werden lassen, sollte um mögliche Unsicherheiten in der Bestimmung des Spannungsfeldes zu reduzieren, geprüft werden im Rahmen der Bohrarbeiten evtl. geeignete Untersuchungen zur Bestimmung des Spannungsfeldes vorzunehmen (z.B. Kaliperlog, image logs, Breakout Analyse, Formation Integrity Tests, Leak-off Tests, ...). Hierdurch können Unsicherheiten in einer eventuell später durchzuführenden Scherungstendenzanalyse reduziert werden. Im vorliegenden Fall ist aber von einer Umkehrung der Förderrichtung bei der vorliegenden Bohrplanung ohnehin abzuraten.
- Basierend auf der Einschätzung nach GRID Kategorie I-II, sowie im Vergleich mit ähnlichen Projekten im Landkreis München sowie in der Gemeinde Poing, bei denen zum Teil an der Oberfläche spürbare Beben aufgetreten sind, ist seismisches Monitoring unabdingbar. Idealerweise sollte dieses in der Lage sein, Mikrobeben im Reservoir mit Magnitude $M_L \geq 1$ sicher zu detektieren und lokalisieren. Unter Einbeziehung bestehender Stationen des Projekts Freiham (Station "FHAM1") und des Geophysikalischen Observatoriums Fürstenfeldbruck (in jeweils 5-8km Epizentralentfernung von der Injektionsstrecke) sollte dies mit 1-2 Stationen realisierbar sein. Ein Monitoring im gemeinschaftlichen Verbund des bestehenden Betreiberetzes im Großraum München zur Kostenreduktion, Effizienzsteigerung und Verbesserung der Detektionsschwelle ist in jedem Fall dringend anzuraten. Eine Netzwerkoptimierung für neue Standorte von Monitoringstationen zur Eingliederung in das bestehende Betreibernetz kann an der LMU durchgeführt werden. In jedem Fall sollte die

Standortwahl der neuen seismologischen Messstationen mit der LMU abgestimmt werden.

Eine kontinuierliche Datenaufzeichnung mit Echtzeitdatenübertragung, sowie Detektionsroutinen und Auswertung auch schwacher Mikrobeben mit Magnituden $M_L \geq 0,5$ als mögliche Vorläufer stärkerer Ereignisse (vgl. Bebenserie Poing Dezember 2016) ist anzuraten. Darüber hinaus ist ein konventionelles Magnituden- und PGV-basiertes Ampelsystem anzuraten.

- Zur Steigerung der Akzeptanz des vorliegenden Projektes und auch um die Akzeptanz zukünftiger Projekte an anderen Standorten nicht zu gefährden, wird zu einer pro-aktiven und möglichst offenen Informationspolitik insbesondere bezüglich des seismischen Monitorings geraten. Es sollte schon im Vorhinein ein Reaktionsschema erarbeitet und festgelegt werden und auch nach außen transparent kommuniziert werden, welche Reaktionen im Anlagenbetrieb bei den verschiedenen Ampelstufen (grün, gelb, rot) erfolgen sollen, wie diese Ampelstufen definiert sind und wie die sichere Überwachung der Mikroseismizität realisiert wird. Hier kann eventuell auf das bei der Entwicklung des Münchner Betreiberetzes erarbeitete Kommunikations- und Reaktionsschema aufgebaut werden, was auf die behördlichen Kommunikationswege fokussiert, aber keine konkreten Reaktionen im Anlagenbetrieb enthält. Im Falle von nötigen Abschaltungen bzw. Reduktionen des Betriebes sollte dies möglichst sanft bzw. abgestuft und ohne abrupte Änderungen der Betriebsparameter erfolgen, um potentiell starke transiente Druckgradienten im Reservoir zu vermeiden. Für den eher unwahrscheinlichen Fall, dass spürbare Beben auftreten bzw. Schäden von der Bevölkerung gemeldet werden, würde sich empfehlen, bereits im Vorfeld ein Vorgehen bezüglich der Begutachtung von etwaigen Schadensmeldungen festzulegen.
- Um einschätzen zu können, in welchen Gebieten im Falle von Beben an der Reinjektion die stärksten Erschütterungen zu erwarten wären, wäre eine numerische Modellierungen der seismischen Wellenausbreitung für hypothetische Bebenszenarien denkbar. Hierfür – und auch um die Genauigkeit der Lokalisierung von potentiell später im laufenden Betrieb auftretender Seismizität zu verbessern – wäre die Erstellung eines (idealerweise 3D) Geschwindigkeitsmodells anzuraten.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass bei dem vorliegenden Projekt grundsätzlich mit dem Auftreten schwacher Mikroseismizität gerechnet werden muss und dass entsprechende Maßnahmen diesbezüglich zu treffen sind (seismisches Monitoring, Reaktionsschema).

Im Vergleich mit anderen, ähnlichen Projekten und insbesondere aufgrund der stimmigen Planung der Bohrpfade hinsichtlich der Strukturgeologie im Reservoir kann bei der vorliegenden Datenlage aber keine erhöhte seismische Gefährdung erkannt werden. Detaillierte wissenschaftliche Untersuchungen bis hin zu Magnitude 0 und darunter im südlichen Landkreis München konnten aber (bei vergleichbarer Tiefenlage des Reservoirs) an jedem der dort untersuchten Standorte zumindest schwache Mikrobeben nachweisen und belegen damit, dass die Möglichkeit von induzierter (Mikro)seismizität in keinem Fall auszuschließen ist.

Es kann nicht gänzlich ausgeschlossen werden, dass möglicherweise an der Oberfläche

spürbare Beben (wie an den Standorten Unterhaching und Poing) auftreten könnten. Das Auftreten von schadhaften Beben ist als eher wenig wahrscheinlich einzuschätzen.

München, den 09.11.2023

Dipl.-Geophys. T. Megies, Dr. J. Wassermann

Referenzen

Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie (2010). Bayerischer Geothermieatlas. München.

DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2021) DIN EN 1998-1/NA:2021-07, Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben – Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten, mit CD-ROM

Evans, K. F., Zappone, A., Kraft, T., Deichmann, N., & Moia, F. (2012). A survey of the induced seismic responses to fluid injection in geothermal and CO₂ reservoirs in Europe. *Geothermics*, 41, 30-54. <http://doi.org/10.1016/j.geothermics.2011.08.002>

EDB (2003), Erdbebendienst Bayern, www.erdbeben-in-bayern.de/aktuelle-beben/lokalbeben/?year=2003 (abgerufen am 18.06.2018)

EDB (2008), Erdbebendienst Bayern, www.erdbeben-in-bayern.de/aktuelle-beben/lokalbeben/?year=2008 (abgerufen am 18.06.2018)

Grigoli, F., Cesca, S., Priolo, E., Rinaldi, A. P., Clinton, J. F., Stabile, T. a., ..., Dahm, T. (2017). Current challenges in monitoring, discrimination, and management of induced seismicity related to underground industrial activities: A European perspective. *Reviews of Geophysics*. <http://doi.org/10.1002/2016RG000542>

Grünthal, G., Stromeyer, D., Bosse, C., Cotton, F., & Bindi, D. (2018). The probabilistic seismic hazard assessment of Germany—version 2016, considering the range of epistemic uncertainties and aleatory variability. *Bulletin of Earthquake Engineering*. <http://doi.org/10.1007/s10518-018-0315-y>

Heidbach, O., Tingay, M., Barth, A., Reinecker, J., Kurfeß, D., Müller, B. (2010) Global crustal stress pattern based on the World Stress Map database release 2008. *Tectonophysics*. 482(1–4), 3–15.

Heidbach, Oliver; Rajabi, Mojtaba; Reiter, Karsten; Ziegler, Moritz; WSM Team (2016): World Stress Map Database Release 2016. GFZ Data Services. <http://doi.org/10.5880/WSM.2016.001>

Keil, Sabrina; Wassermann, Joachim; Megies, Tobias (2022): Estimation of ground motion due to induced seismicity at a geothermal power plant near Munich, Germany, using numerical simulations. *Geothermics*, 106, 2022, 102577. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102577>

Koschyk, K. G. (1973). Seismische Untersuchungen der Erdstöße der Jahre 1962-1971 in Peißenberg. Ludwig-Maximilians-Universität München.

Kraft, T., Roth, P. & Wiemer, S. (2020). Good-Practice Guide for Managing Induced Seismicity in Deep Geothermal Energy Projects in Switzerland - Version 2. Zurich.

<https://doi.org/10.3929/ethz-b-000453228>

Leydecker, G. (2011). Erdbebenkatalog für Deutschland mit Randgebieten für die Jahre 800 bis 2008. Geologisches Jahrbuch, E 59, 1-198.

Majer, E., Baria, R., Stark, M., Oates, S., Bommer, J., Smith, B., & Asanuma, H. (2007). Induced seismicity associated with Enhanced Geothermal Systems. *Geothermics*, 36(3), 185-222.

<http://doi.org/10.1016/j.geothermics.2007.03.003>

Megies, T., & Wassermann, J. (2012). Mikroseismizität. In R. Schulz, R. Thomas, M. Dussel, & E. Lüschen (Eds.), *Geothermische Charakterisierung von karstig-klüftigen Aquiferen im Großraum München - Endbericht* (pp. 30-37). Hannover: Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik.

Megies, T., & Wassermann, J. (2014a). Microseismicity observed at a non-pressure-stimulated geothermal power plant. *Geothermics*, 52, 36-049.

<http://doi.org/10.1016/j.geothermics.2014.01.002>

Megies, T., & Wassermann, J. (2014b). Verbundprojekt MAGS - Konzepte zur Begrenzung der mikroseismischen Aktivität bei der energetischen Nutzung geothermischer Systeme im tiefen Untergrund - EP 2: Untersuchung von Mikro-Beben in der bayerischen Molasse im Umfeld von geothermischen Reservoiren. München. <https://doi.org/10.2314/GBV:83259170X>

Megies, T., & Wassermann, J. (2016). Erste Auswertung des Erdbebens im Raum Pliening/Poing vom 07.12.2016 mit Auswertung des Nachbebens am 20.12.2016. München. (nicht öffentlich)

Megies, T., & Wassermann, J. (2017). Mikroseismische Aktivität geothermischer Systeme 2 - Vom Einzelsystem zur großräumigen Nutzung: Einzelprojekt 2 - Untersuchungen zur optimierten seismischen Überwachung hydrogeothermaler Systeme bei dichter räumlicher Lage der Bohrerlaubnisfelder am Beispiel der Situation im Süden Münchens. München.

<https://doi.org/10.2314/GBV:101142956X>

Moeck, I., Dussel, M., & Ortiz, A. (2017). Untersuchung der Seismizität am Standort des Geothermieprojekts Poing unter Einbeziehung von Strukturgeologie, Geohydraulik, Hydrochemie, Geomechanik und Dublettenbetrieb. Hannover. Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik. (nicht öffentlich)

- Morris, A., Ferrill, D.A., Henderson, D.B. (1996) Slip-tendency analysis and fault reactivation. *Geology*. 24(3), 275-278.
- Neves, M.C., Paiva, L.T., Luis, J. (2009) Software for slip-tendency analysis in 3D: A plug-in for Coulomb. *Computers and Geosciences*. 35(12), 2345–2352.
- Neves, M.C., Cabral, J., Luttrell, K., Figueiredo, P., Rockwell, T., Sandwell, D. (2015) The effect of sea level changes on fault reactivation potential in Portugal. *Tectonophysics*. 658, 206–220.
- Reinecker, J., Tingay, M., Müller, B., & Heidbach, O. (2010). Present-day stress orientation in the Molasse Basin. *Tectonophysics*, 482(1-4), 129-138.
<http://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.07.021>
- Rutqvist, J., & Oldenburg, C. M. (2008). Analysis of Injection-Induced Micro-Earthquakes in a Geothermal Steam Reservoir, The Geysers Geothermal Field, California. In U.S. Rock Mechanics Symposium. San Francisco, CA, USA.
- Schmedes, E. (1984). 2.3 Bayerische Molasse, in: Erdbeben in der Bundesrepublik Deutschland - 1982, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover, 25-26.
- Seithel, R., Steiner, U., Müller, B., Hecht, C., Kohl, T. (2015) Local stress anomaly in the Bavarian Molasse Basin. *Geothermal Energy*. 3, 4.
- Seithel, R., Gaucher, E., Müller, B., Steiner, U., Kohl, T. (2019) Probability of fault reactivation in the Bavarian Molasse Basin, *Geothermics*, 82, 81-90.
- SIA (2020). SIA 261:2020 Einwirkung auf Bauwerke. Swiss Society of Engineers and Architects, Zurich.
- Trutnevyte, E., & Wiemer, S. (2017). Tailor-made risk governance for induced seismicity of geothermal energy projects: An application to Switzerland. *Geothermics*, 65, 295-312.
<http://doi.org/10.1016/j.geothermics.2016.10.006>
- Wiemer, S., Kraft, T., Trutnevyte, E., & Roth, P. (2017). “Good practice” guide for managing induced seismicity in deep geothermal energy projects in Switzerland. Zurich.