



INSIDE

Stadtwerke München GmbH
Innovative Energie Pullach
Karlsruher Institut für Technologie

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

NUMERISCHE VORHERSAGE BETRIEBSBEDINGTER RESERVOIR- UND OBERFLÄCHENVERÄNDERUNGEN AM STANDORT PULLACH

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Grant agreement number

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

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

Titel:	Numerische Vorhersage betriebsbedingter Reservoir- und Oberflächenveränderungen am Standort Pullach
Arbeitspaket:	AP4: Reservoirmodellierung
Meilenstein:	M4.4.1
Fälligkeitsdatum:	08.2021
Tatsächliches Datum:	07.03.2023
Partner:	Zuständig: KIT beteiligte Partner: IEP, SWM
Ansprechpartner:	Robert Egert Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Institut für Angewandte Geowissenschaften Abteilung Geothermie und Reservoirtechnologie Adenauerring 20b, Geb. 50.40 76131 Karlsruhe, Germany Email: robert.egert@kit.edu Phone: +49 721 608 45289
Autoren:	KIT : R. Egert
Version:	1.0

Version	Datum	Beschreibung der Ergänzungen, Änderungen, Überprüfungen
1.0	07.03.2023	Erste geteilte Version

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	5
2	METHODIK	5
2.1	Allgemeine Beschreibung	5
2.2	Numerische Implementierung	6
3	ERGEBNISSE	8
3.1	Thermo-hydraulische Veränderungen des Reservoirs	8
3.2	Mechanische Veränderungen durch Kaltwasserinjektion	11
3.2.1	Alterationen im Reservoir	11
3.2.2	Oberflächendeformation	14
4	MÖGLICHE ERWEITERUNGEN	15
4.1	Hydraulische Sensitivität	17
4.2	Thermische Veränderungen	18
4.3	Mechanische Veränderungen	18
5	ZUSAMMENFASSUNG	19
6	LITERATURVERZEICHNIS	20

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: FE-Mesh des Pullach Geothermiereservoirs. Zu sehen ist die Oberkante des Malm Epsilon (grün) und im Hintergrund die Ränder bis an die Geländeoberkante (lila). Darüber hinaus die explizite Darstellung der Bohrungen als Linien und der Riffstruktur innerhalb des Malm Zeta im Bereich von Pullach Th3 (rot).....	7
Abbildung 2: Porendruckänderungen über 50 Jahre kontinuierlicher Betrieb. Porendruckanstieg um die Bohrung Pullach Th3 und Porendruckabnahme um die Bohrungen Pullach Th1a und Th2.	9
Abbildung 3: Temperaturänderungen über 50 Jahre kontinuierlicher Betrieb. Ausbreitung der Abkühlungsfront um die Bohrung Pullach Th3.....	10
Abbildung 4: Effektive Spannungen und Porendruck im Bereich der Bohrung Pullach Th3 als Funktion der Tiefe zwischen 500 m und 3750 m unter GOK. Dargestellt sind der initiale Spannungszustand sowie nach 50 Betriebsjahren. Dargestellt sind zudem die lithofaziellen Einheiten des mesozoischen Malm Reservoirs.....	11
Abbildung 5: Effektive Spannungen im mesozoischen Malm Reservoir als Funktion der Tiefe (Ausschnitt aus Abbildung 4). Dargestellt sind die initialen Spannungen sowie nach 1, 10 und 50 Jahre um einen Vergleich mit der Ausbreitung der Temperaturfront (u.a. auch vertikal) zu ermöglichen. ...	12
Abbildung 6: Porosität und Permeabilität im Malm Zeta Reservoir im Bereich der Bohrung Pullach Th3 nach 50 Jahren kontinuierlichen Betriebs.	14
Abbildung 7: Oberflächendeformation oberhalb der Bohrung Pullach Th3 mit kontinuierlichem Betrieb.....	15
Abbildung 8: Ausschnitt des Elementgitters mit einer möglichen weiteren Dublette zur Erhöhung der Gesamtförderraten. Mögliche neue Bohrpfade sind in rot dargestellt, bisherige Bohrungen in blau. Für eine Legende der Lithostratigrafie sei auf Abbildung 1 verwiesen.	16
Abbildung 9: Druckveränderungen der Bohrung Pullach Th3 mit zunehmender Betriebsdauer.	17
Abbildung 10: Druckveränderungen der Bohrung Pullach Th2 mit zunehmender Betriebsdauer.	17
Abbildung 11: Abkühlungsfronten nach 50 Betriebsjahren für die kritischen Fälle a) 2 und b) 4.	18
Abbildung 12: Deformation an der Geländeoberkante über der Bohrung Pullach Th3.	19

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Materialparametrisierung innerhalb der Modellierungen, verwendete Quellen: ^a Pei et al. (2020), ^b Lafogler et al. (2016), ^c Potten (2020), ^d Bohnsack et al. (2021). Porosität sowie Permeabilität stellen deren initialen Wert dar.....	6
Tabelle 2: Für eine potentielle Erweiterung untersuchte Varianten. Negative Fließraten entsprechen auch gleichzeitig einer Reinjektion mit 62 °C, positive Fließraten einer Produktion. Th4 entspricht einer Erweiterung im Osten, Th5 im Westen.....	16

1 EINLEITUNG

Dieses Dokument ist Teil des “Arbeitspakets 4: Reservoirmodellierung – Thermo-hydraulisch-mechanische (THM) Modellierungen (AP 4.4)” des INSIDE Projekts und beinhaltet den “Meilenstein 4.4.1” mit dem Inhalt „Deterministische THM-Modellierungen und Vorabsimulation zu möglichen geomechanischen Auswirkungen“. Es wird eine numerische Simulation des derzeitigen Betriebszenarios des Geothermiestandortes Pullach mit der open-source Finite Element (FE) Anwendung MOOSE/TIGER (THMC simulator for GEoscience Research) vorgestellt. Hierzu wurde basierend auf dem im Meilenstein 4.3.1 Teil 2 beschriebenen Strukturmodell ein neues numerisches Modell größerer Extension und unter Einbeziehung der Geländeoberkante entwickelt. Aufbauend auf der initialen thermo-hydraulischen Kalibration, wurde die Materialparametrisierung vom Kristallin bis in die tertiären Schichten unter Nutzung vorhandener Literatur weiter diversifiziert und optimiert. Ziel ist es, thermo-hydraulisch-induzierte Spannungsänderungen und -umlagerungen im Reservoir vorherzusagen und so bereits im Vorherein kritische Spannungszustände die zu (Mikro-)seismischer Aktivität führen können, auszuschließen. Darüber hinaus ermöglicht die explizite Darstellung der Geländeoberkante die Quantifizierung von induzierten Deformationen (Hebungen/Senkungen), die zu Schäden an der Infrastruktur führen können, und den Vergleich mit Messungen aus anderen Arbeitspaketen sowie die Kalibrierung der numerischen Modelle anhand dieser Messungen.

Aufbauend auf dem im Meilenstein 4.3.1 Teil 2 bereits ausführlich beschriebenen numerischen Modell wurde das dort kalibrierte TIGER-Modell unter Nutzung von aktuellen Literaturwerten weiterentwickelt. Anhand der gemittelten Betriebsdaten aus dem Jahr 2020 werden die langfristigen Veränderungen in den kritischen Variablen Porendruck, Temperatur und Versatz (in x, y, z) sowie den damit verbundenen effektiven Spannungsänderungen bei einem kontinuierlichen Betrieb von 50 Jahren betrachtet.

2 METHODIK

Der Simulation des kontinuierlichen Kraftwerksbetriebs wird anhand des Geothermiereservoirs Pullach durchgeführt. Auf eine Beschreibung der thermo-hydro-mechanischen Grundlagen wird verzichtet. Die physikalischen Prozesse sind zusammen mit einer ausführlichen thermo-hydraulischen Validierung der TIGER Anwendung in Gholami Korzani et al. (2020), Egert et al. (2021) sowie im Meilenstein 4.3.1 Teil 2 dargestellt. Darüber hinausführende Gleichungen für die Porositäts- und Permeabilitäts-veränderungen folgen den Gleichungen nach Chen et al. (2009) bzw. Carman (1956).

2.1 ALLGEMEINE BESCHREIBUNG

Zur Vorhersagemodellierung wird das numerische Modell des geothermischen Reservoirs von Pullach genutzt und ein kontinuierliches Produktionsszenario über 50 Jahre hinweg simuliert. Angenommen werden hierbei konstante Fließraten und Reinjektionstemperaturen, die dem Jahresmittel des Jahres 2020 entsprechen. Die Fließraten betragen in der Produktion 24 L/s (Th2) bzw. 26,5 L/s (Th1a) und in der Reinjektion 50,5 L/s (Th3) bei einer Injektionstemperatur von 62°C (bzw. 335,15 K). Als Produktionstemperatur wird die jeweilige lokale Temperatur (>100°C) angenommen. Das Modellgebiet wurde gegenüber vorherigen Simulationen erweitert. Es besitzt einen quadratischen Aufbau mit der Ausdehnung 12,6 x 12,6 x 4,39 km und reicht von der Geländeoberkante bei 590 m ü. NN. bis in eine Tiefe von 3,9 km. Das Modell ist in Richtung des lokalen Spannungsfeldes um 1,7° gegen den

Uhrzeigersinn rotiert (Ziegler und Heidbach 2020). Der Ursprung des Modells liegt im Bereich der Bohrung Pullach Th2 bei Rechts: 4464773,890914 und Hoch: 5325797,890914 im GK4-Bezugssystem, identisch mit den weiteren Projektberichten bezüglich Modellierung. Enthalten sind die stratigraphischen Einheiten zwischen dem oberen Kristallin (Modelunterkante) und der Geländeoberkante. Es erfolgt keine weitere Unterteilung des Tertiärs, da der Fokus auf den mesozoischen Malmschichten liegt. Die Schichten des Malms sind unter Berücksichtigung bekannter Fazies- und Permeabilitätsunterschiede in den unteren (Alpha, Beta und Gamma), mittleren (Delta und Epsilon) und oberen Malm (Zeta) unterteilt. Der untere Malm entspricht im Modellgebiet dabei vornehmlich der undurchlässigen Schichtfazies, während der mittlere Malm dagegen als homogene, großflächige und moderat-permeable Massenfazies ausgebildet ist, welche sich lediglich in deren Mächtigkeit unterscheidet (Dussel et al. 2016). Der Malm Zeta weist im Modellgebiet eine stark heterogene interne Struktur mit beiden Faziestypen und dem auftreten lokaler Riffstrukturen auf. Im Übergangsbereich beider Faziestypen konnte darüber hinaus oftmals starke Verkarstung nachgewiesen werden (Fadel et al. 2022). In weiterführenden 3D seismischen Untersuchungen sowie Zirkulationsexperimenten wurde eine hochpermeable Riffstruktur im Bereich der Bohrung Pullach Th3 identifiziert, welche im numerischen Modell daher explizit berücksichtigt ist (rote Box in Abbildung 1). Eine künstliche Schichtgrenze knapp 200 m unter GOK auf Höhe des erwarteten Grundwasserspiegels ermöglicht Porendruckeffekte zu berücksichtigen. Im Modell werden tiefenabhängige Temperatur-, Porendruck sowie Spannungsbedingungen als Initial- (IC) und Randbedingungen (BC) berücksichtigt, welche das Resultat verschiedener experimenteller Messungen und Kalibrationschritte sind. Die initialen tektonischen Spannungen wurden dabei gegenüber Seithel et al. (2015) um die tatsächliche höhere Gesteinsdichte der einzelnen Lithologien korrigiert und kann dadurch höhere Werte sowie Gradienten aufweisen. Für die Parametrisierung des Reservoirfluids sei auf die Veröffentlichung von Egert et al. (2022) verwiesen. Die Materialparametrisierung der lithofaziellen Einheiten ist, soweit veröffentlichter Literatur entnommen, in Tabelle 2 dargestellt und fokussiert sich auf die Reservoirseinheiten.

Tabelle 1: Materialparametrisierung innerhalb der Modellierungen, verwendete Quellen: ^aPei et al. (2020), ^bLafogler et al. (2016), ^cPotten (2020), ^dBohnsack et al. (2021). Porosität sowie Permeabilität stellen deren initialen Wert dar.

	Einheit	GOK	Tertiär	Liegende Mergel	Litho-tamnienkalk	Malm zeta	Malm epsilon	Malm alpha	Kristallin
Thermische Expansion^a	$\times 10^{-6} 1/K$	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	6,3
Initiale Permeabilität^b	m^2	10^{-20}	10^{-17}	10^{-17}	10^{-17}	Kali.	Kali.	Kali.	10^{-18}
Initiale Porosität^b	%	1	0,1	0,1	0,1	2/0,1	1/2	0,1	0,1
Kompressibilität^{c,d}	1/GPa	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,4
Wärmekapazität^b	J/(kg.K)	750	750	750	750	800	800	800	750
Wärmeleitfähigkeit^b	W/(m.K)	2,75	2,75	2,75	2,75	3,4	3,4	3,4	3,2

2.2 NUMERISCHE IMPLEMENTIERUNG

Das numerische FE-Modell wurde mittels der Software MeshIt erzeugt (Cacace und Blöcher 2015). Diese Software ermöglicht die Erstellung komplexer unstrukturierter Elementgitter in Form von Tetraedern ausgehend von einzelnen stratigraphischen Horizonten aufgelöst als x,y,z-Punktwolken. Darüber hinaus können Störungszonen sowie Bohrungen als niedrigdimensionale Elemente in die

Modelle integriert werden. Das hieraus resultierende Elementgitter besteht final aus ca. 290'000 Knoten und 1'115'000 Elementen (Abbildung 1). Das Elementgitter weist einen feinen Gitterabstand im Nahbereich der Bohrungen sowie im Malmreservoir von mindestens 5 m auf, welcher zu den Außenrändern hin auf bis zu 400 m (im Tertiär und Kristallin) zunimmt. Die Schichtdicke der einzelnen lithologischen Einheiten sind stark variierend und direkt aus den seismischen Daten überführt. Lateral und initial sind Temperatur- und Porendruckgradienten als tiefenabhängige Dirichlet-Randbedingung angelegt. Der lokale Spannungsvektor mit den relativen Verhältnissen nach Seithel et al. (2015) und tatsächlicher lithofazieller Gesteinsdichte wird initial in das Modell und als Neumann-Randbedingung lateral als tiefenabhängige Funktion der Dichte für jede Lithologie unabhängig in das Modell integriert sowie die Unterseite im Raum fixiert. Die Schwerkraft wirkt innerhalb des gesamten Modells hydrostatisch und lithostatisch. Die Bohrungen sind jeweils über ihre offene Filterstrecke in das Elementgitter als 1D Linienelemente integriert. Extraktion und Injektion werden als Massenfluss am Kopf der offenen Filterstrecke angelegt.

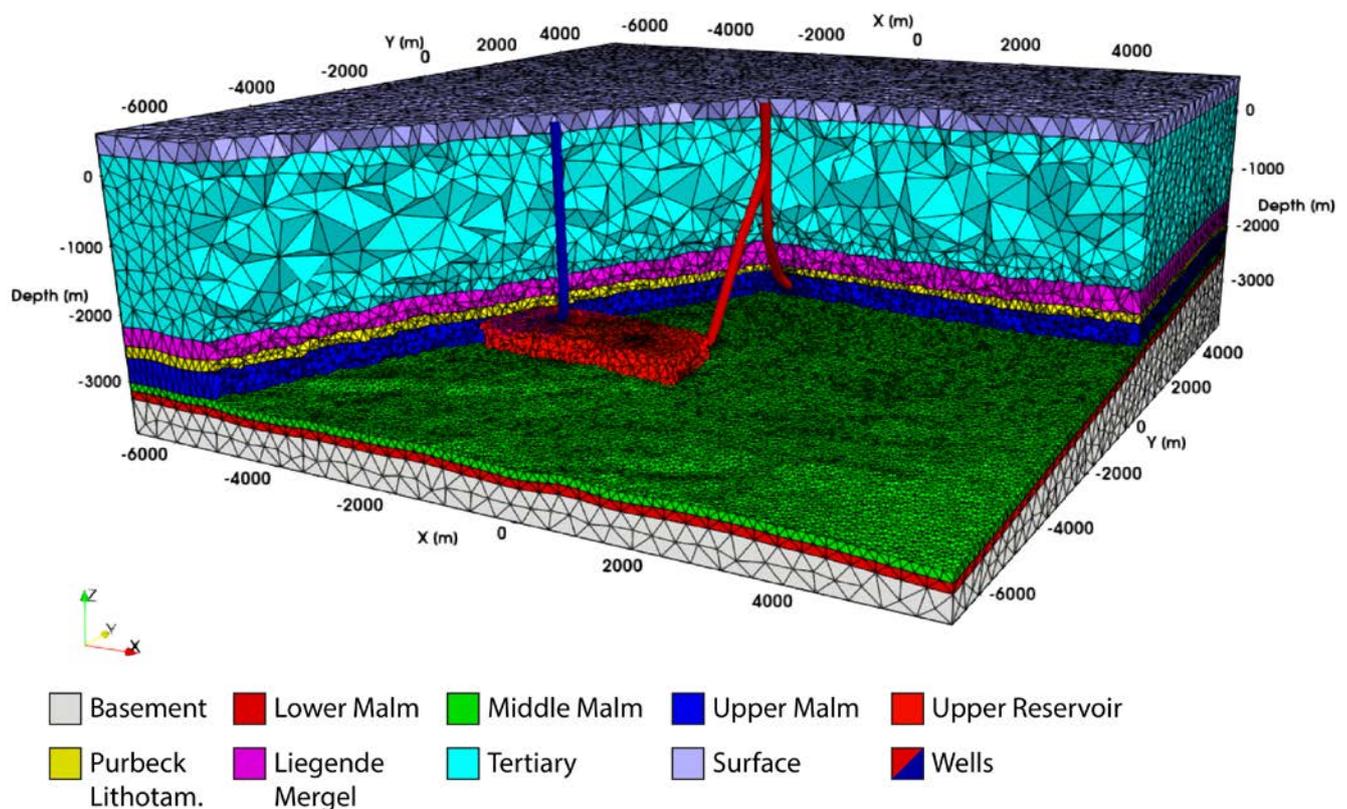


Abbildung 1: FE-Mesh des Pullach Geothermiereservoirs. Zu sehen ist die Oberkante des Malm Epsilon (grün) und im Hintergrund die Ränder bis an die Geländeoberkante (lila). Darüber hinaus die explizite Darstellung der Bohrungen als Linien und der Riffstruktur innerhalb des Malm Zeta im Bereich von Pullach Th3 (rot).

3 ERGEBNISSE

Die dargestellten Ergebnisse fokussieren sich auf die Veränderungen in den Reservoirparametern Temperatur, Porendruck, Spannungen (x , y , z) sowie Deformation mit zunehmender Dauer an kontinuierlichem Betrieb. Für die statischen Bedingungen zu Beginn der Simulationen sei auf entsprechende Veröffentlichung zur thermo-hydraulischen Kalibration von Egert et al. (2022) verwiesen, weshalb diese nicht mehr dargestellt werden.

3.1 THERMO-HYDRAULISCHE VERÄNDERUNGEN DES RESERVOIRS

Die Abbildung 2 zeigt die Ausbreitung der Porendruckveränderung vom initialen hydrostatischen Modell mit zunehmender Betriebsdauer nach 0, 1, 10 und 50 Jahren. Im Bereich der Bohrung Pullach Th3 ist dabei eine maximale Zunahme des Porendrucks um ca. 0,8 MPa zu beobachten, die sich frühzeitig im Riffkörper des Malm Zeta ausbreitet und erst nach einigen Jahren auch in den weniger durchlässigen Malm Delta-Epsilon propagiert. Insgesamt wird nach 50 Jahren ein Bereich von ca. 4 km positiv beaufschlagt. Um die Bohrungen Pullach Th1a und Th2 findet durch die Produktion mit ca. 50 L/s eine Abnahme des Porendrucks um maximal 2 MPa nahe den beiden Bohrungen statt. Diese Magnitude verändert sich mit zunehmender Produktionszeit nur geringfügig, allerdings vergrößert sich das beeinflusste Reservoirvolumen. Auf Grund der in diesem Bereich schlechten Durchlässigkeit des Malm Zeta propagiert die Abnahme vornehmlich im Malm Delta-Epsilon und wirklich sich erst nach einigen Betriebsjahren auf den darüberliegenden Malm Zeta aus. Durch die geringe Mächtigkeit des mittleren Malms wird ein lateral deutlich größerer Bereich von über 4,5 km radial um beide Bohrungen negativ beeinflusst.

Abbildung 3 zeigt analog die Veränderungen der Reservoirtemperaturen durch konduktive und advective Prozesse. Durch die Kaltwasserinjektion wird das Reservoir im Bereich der Bohrung Pullach Th3 um ca. 60°C abgekühlt. Nach 10 Jahren erreicht die Abkühlungsfront eine maximale Ausdehnung von ca. 500 m, nach 50 Betriebsjahren von 1 km, jeweils im Bereich des durchlässigen Malm Zeta Reservoirs. Die Produktionsbohrungen sind dagegen nur geringfügig beeinflusst, indem wärmeres Wasser aus den tieferen Bereichen des Reservoirs in flachere Bereiche gezogen wird und sich die Produktionstemperatur aus dem Reservoir um ca. 4-5°C erhöht. Ein thermischer Durchbruch zwischen den beiden nächstgelegenen Bohrungen (Pullach Th3 zu Th2) ist daher unter den derzeitigen operativen Bedingungen unter Berücksichtigung des hydraulisch kalibrierten Modells nicht zu erwarten.

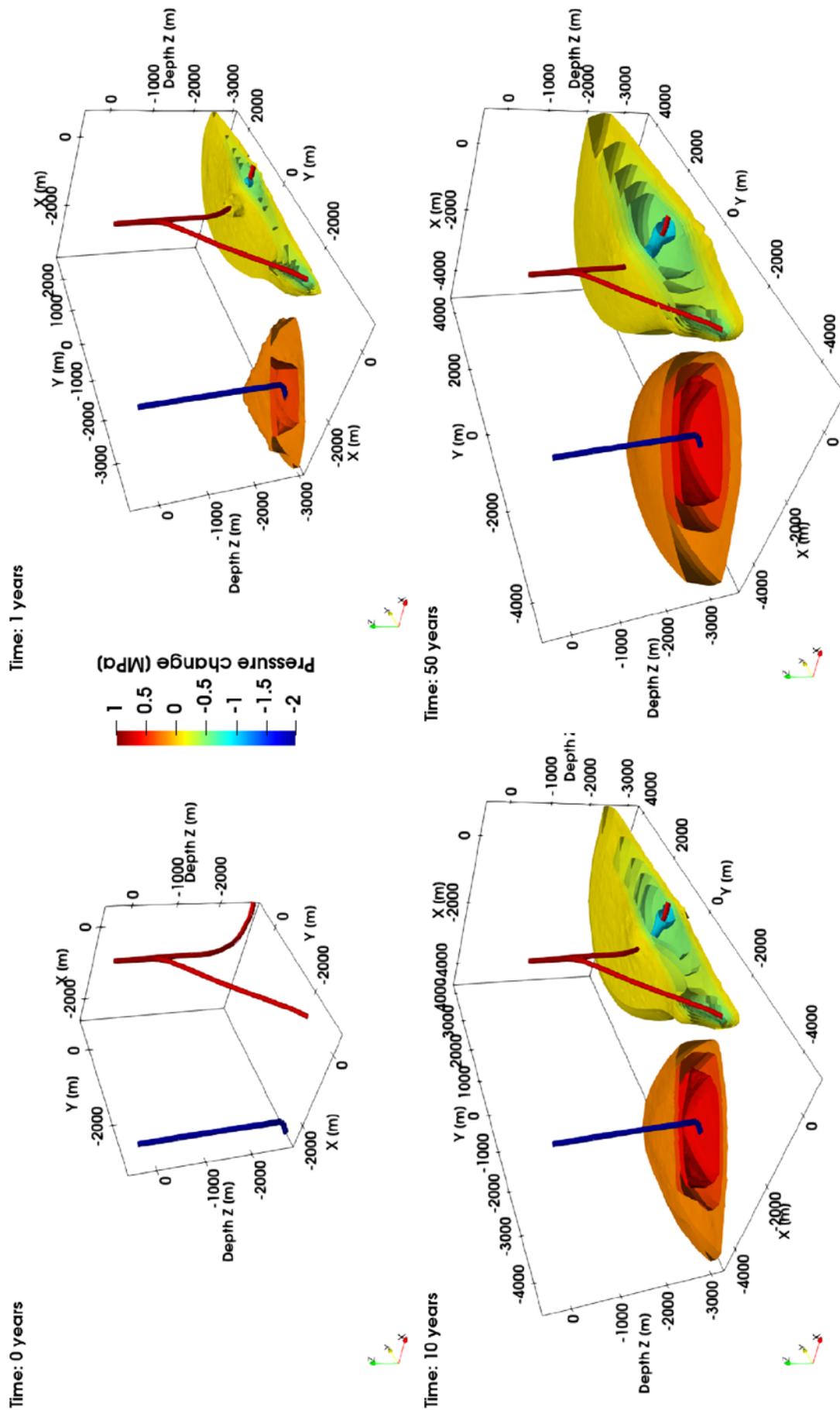


Abbildung 2: Porendruckänderungen über 50 Jahre kontinuierlicher Betrieb. Porendruckanstieg um die Bohrung Pullach Th3 und Porendruckabnahme um die Bohrungen Pullach Th1a und Th2.

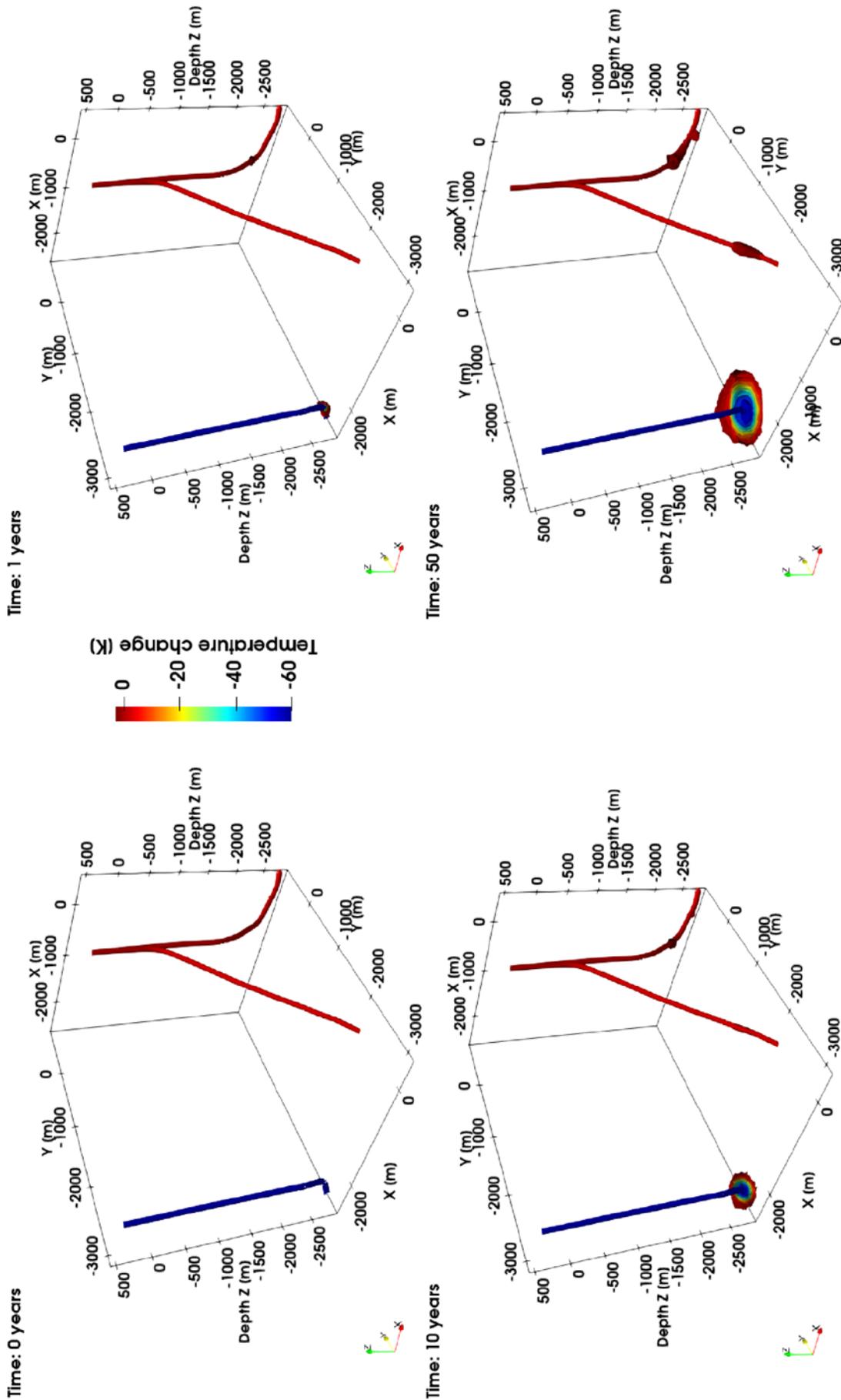


Abbildung 3: Temperaturänderungen über 50 Jahre kontinuierlicher Betrieb. Ausbreitung der Abkühlungsfront um die Bohrung Pullach Th3.

3.2 MECHANISCHE VERÄNDERUNGEN DURCH KALTWASSERINJEKTION

3.2.1 ALTERATIONEN IM RESERVOIR

Neben Druck und Temperatur (vornehmlich im Fluid) wird das Reservoir auch deformiert. Diese Deformation und abgeleitete Veränderungen der Spannungsmagnituden finden in geothermischen Reservoiren vornehmlich im Bereich der Kaltwasserinjektion auf Grund von Abkühlung und Porendruckerhöhung statt, weshalb für diese Analyse der Bereich um die Bohrung Pullach Th3 betrachtet wird. Abbildung 4 zeigt die effektiven Spannungen sowie Porendruck an der Bohrung Pullach Th3 zu Beginn des Injektionszeitraums sowie nach 50 Betriebsjahren als Folge rein thermo-poroelastischer Prozesse. Versagenkriterien (wie Mohr-Coulomb) oder Damagemodelle wurde bei dieser Analyse nicht berücksichtigt und würden die maximalen Spannungsänderungen stark limitieren.

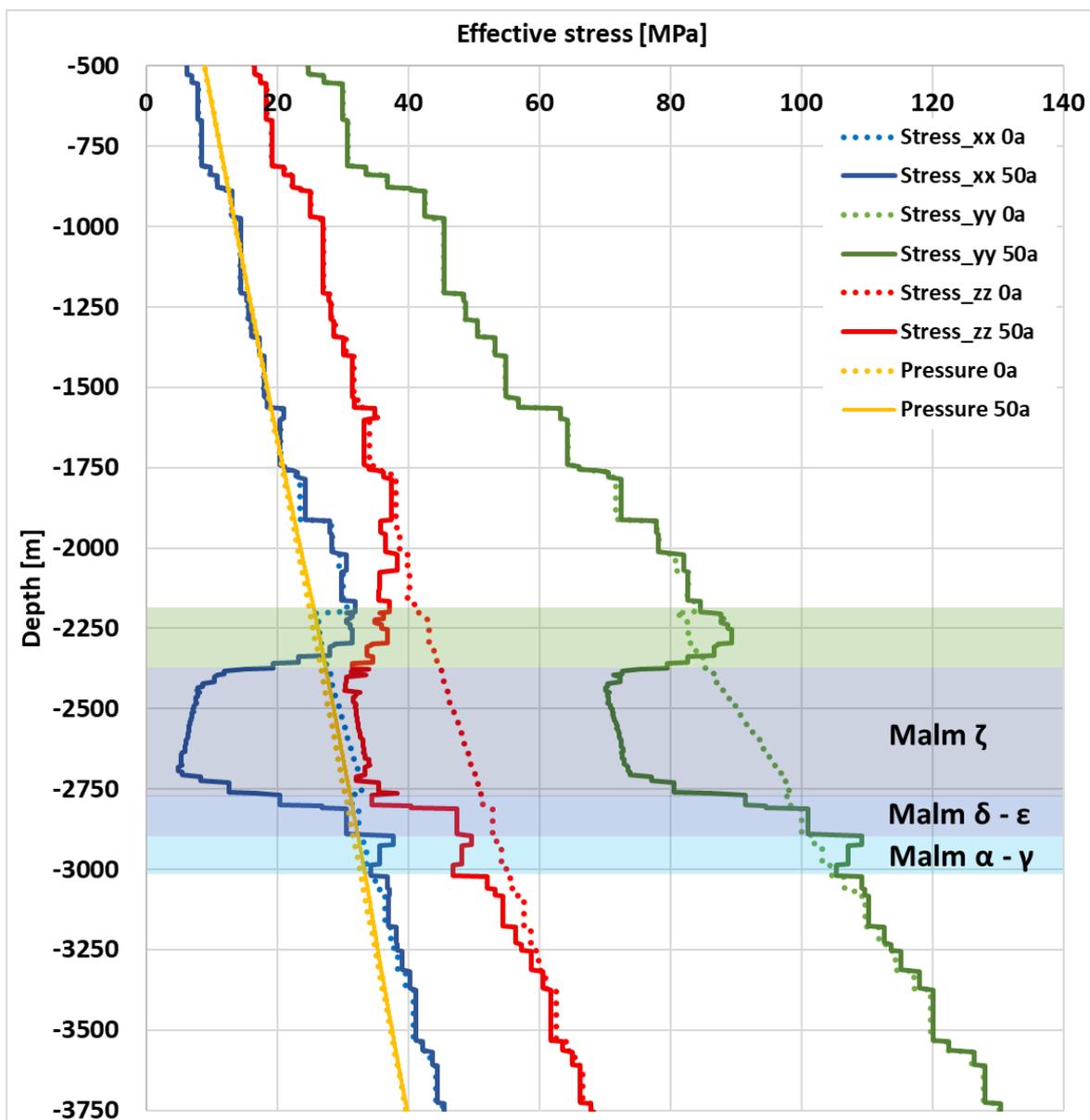


Abbildung 4: Effektive Spannungen und Porendruck im Bereich der Bohrung Pullach Th3 als Funktion der Tiefe zwischen 500 m und 3750 m unter GOK. Dargestellt sind der initiale Spannungszustand sowie nach 50 Betriebsjahren. Dargestellt sind zudem die lithofaziellen Einheiten des mesozoischen Malm Reservoirs.

Hierbei zeigen die Modelle eine Abnahme der effektiven Spannungen im Bereich des Malm Zeta Reservoirs nach 50 Betriebsjahren. Die effektive Vertikalspannung wird im Bereich des Reservoirs um ca. 12 MPa verringert. Es erfolgt eine Ausbreitung dieser thermo-poroelastisch induzierten Abnahme über das eigentliche Reservoir hinaus einige Hundertmeter bis in das kristalline Grundgebirge bzw. in die weicheren Gesteine der liegenden Mergel. Beide Horizontalspannungen (Maximal- bzw. Minimalspannungen) nehmen lediglich im Reservoir ab. Während die Maximalspannung hierbei um ca. 20 MPa in Richtung einer Extension abnimmt, verringert sich die Minimalspannung um ca. 25 MPa. Es findet somit eine Zunahme der Differentialspannungen im Malm Zeta Reservoir statt (vgl. Mohr'scher Spannungskreis). In den drüber- und darunterliegenden Formationen treten für beide Horizontalspannungen verstärkte Kompression von einigen wenigen MPa (<5 MPa) auf.

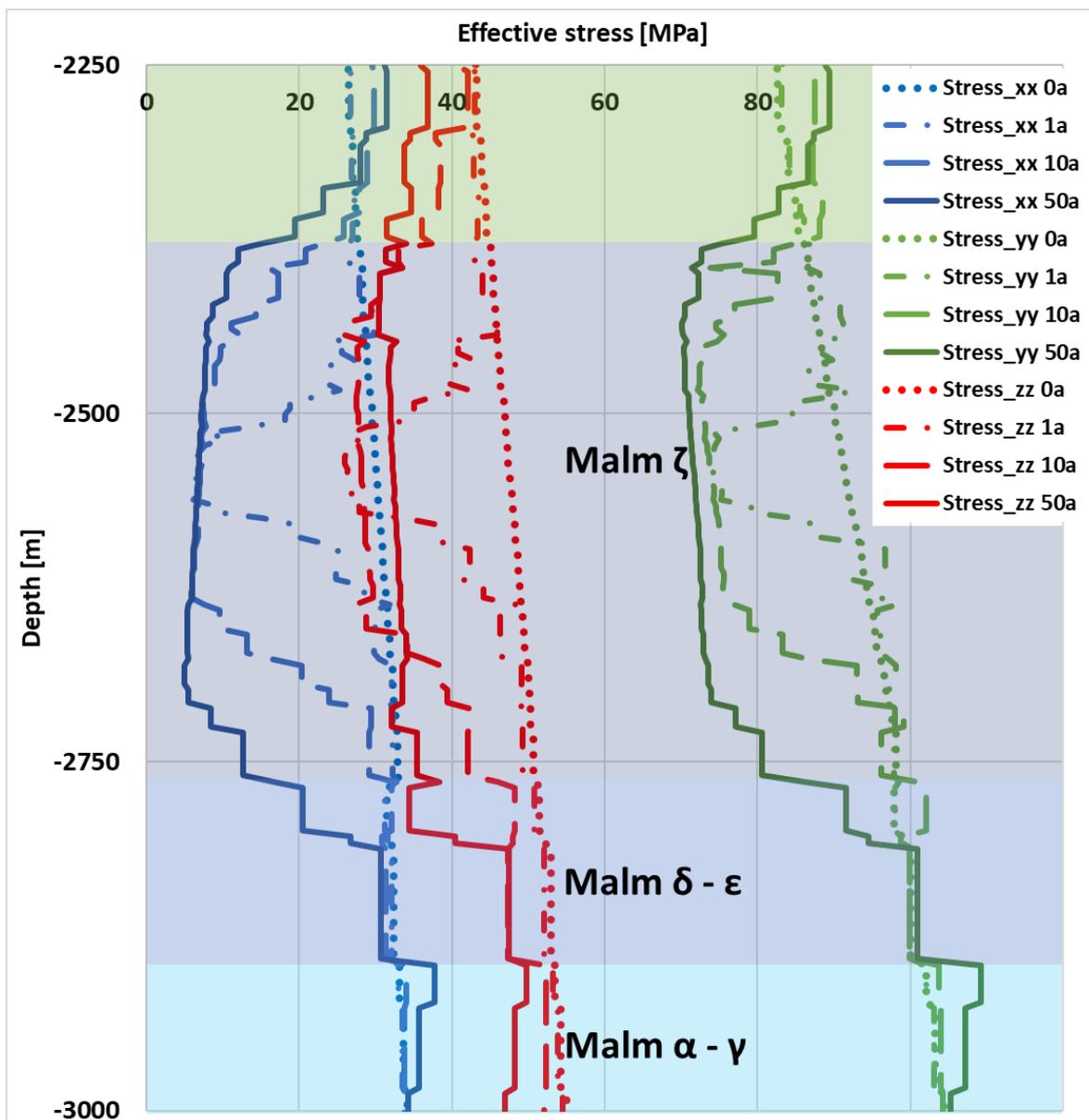


Abbildung 5: Effektive Spannungen im mesozoischen Malm Reservoir als Funktion der Tiefe (Ausschnitt aus Abbildung 4). Dargestellt sind die initialen Spannungen sowie nach 1, 10 und 50 Jahre um einen Vergleich mit der Ausbreitung der Temperaturfront (u.a. auch vertikal) zu ermöglichen.

Da die Spannungsänderungen vornehmlich im Reservoir auftreten, wird in Abbildung 5 dieser Bereich nochmals genauer betrachtet. Dabei sind die Veränderungen der effektiven Spannungen in den Malmkalken in den drei Raumrichtungen initial, nach 1, 10 sowie 50 Betriebsjahren dargestellt. Hierbei zeigt sich, dass die Spannungsänderungen vornehmlich eine Funktion der Temperaturveränderungen (Abkühlung) im Reservoir darstellen und entsprechend langsam zusammen mit der Abkühlungsfront um den Injektionspunkt propagieren (vgl. Porendruckausbreitung nach unter einem Jahr im gesamten Reservoir). Ähnliche Effekte bezüglich thermo-elastischer und poro-elastischer Deformation konnten dabei auch für geothermische Speicher im Oberrheingraben quantifiziert werden (Stricker et al. 2022). Während nach einem Jahr lediglich ein sehr kleiner Bereich des Malms beeinflusst ist, ist nach ca. 10 Jahren vertikal das gesamte Reservoir negativ beeinflusst. Die Magnituden der THM-induzierten Spannungsänderungen beider Raumrichtungen von bis zu 25 MPa sind eine direkte Folge des linearen thermischen Expansionskoeffizienten, welcher für jurassische Kalksteine und Dolomite im Münchner Bereich der Malme Werte von ca. 7.5×10^{-6} [1/K] oder höher auf weisen kann (Pei et al. 2020).

Neben einer Veränderung des Spannungszustandes erfolgt bei elastischer Deformation auch eine räumliche Verformung des Reservoirs. Dieser induzierte Strain führt dahingehend zu einer Veränderung sowohl des gesamten Gesteins als auch dessen Porenraums sowie des hydraulisch aktiven Querschnitts (Permeabilität). Unter dieser Annahme findet im ersten Jahr eine porendruckbedingte Zunahme des Reservoirgesteinsvolumens um ca. 9000 m³ statt. Nach einigen Betriebsjahren überwiegt jedoch die abkühlungsinduzierte Kontraktion, was nach 50 Jahren zu einer Verringerung des Reservoir-Gesteinsvolumens um 75.000 m³ führt. Während für die Beziehung zwischen Strain und Porosität eine Vielzahl analytischer Modelle beschrieben wurden, beschränkt sich diese Studie auf eine exponentielle Beziehung nach Chen et al. (2009) bei der auch die Expansion/Kontraktion des Porenraums berücksichtigt werden. Im Nahbereich der Bohrung Pullach Th3 findet dabei lediglich eine relative Porositätszunahme von ca. 4 % bzw. absolute von 0,1 % statt (Abbildung 6). So konnte für das gezeigte Modell eine Zunahme der Porosität von 22.500 m³ (nach einem Jahr) bzw. 119.000 m³ (nach 50 Jahren) ermittelt werden. Unter Annahme der Porositäts-Permeabilitäts-beziehung nach Carman (1956) entspricht dies für den Nahbereich der Bohrung Pullach Th3 einer thermo-poroelastischen Zunahme der Permeabilität um ca. 9 % oder um 1.5×10^{-14} m². Diese berechnete Permeabilitäts-Zunahme ist eine Magnitude kleiner, als es für vergleichbare Anlagen mit langjährigen Beobachtungen im Bereich von Kaltwasserinjektionen nachgewiesen ist. Weitere Prozesse, wie die geochemische Lösung von Karbonaten oder die Entstehung zusätzlicher Fluidwegsamkeiten durch thermisch-induzierte Spannungsrisse stellen weitere Möglichkeiten für eine Zunahme der Injektivität dar.

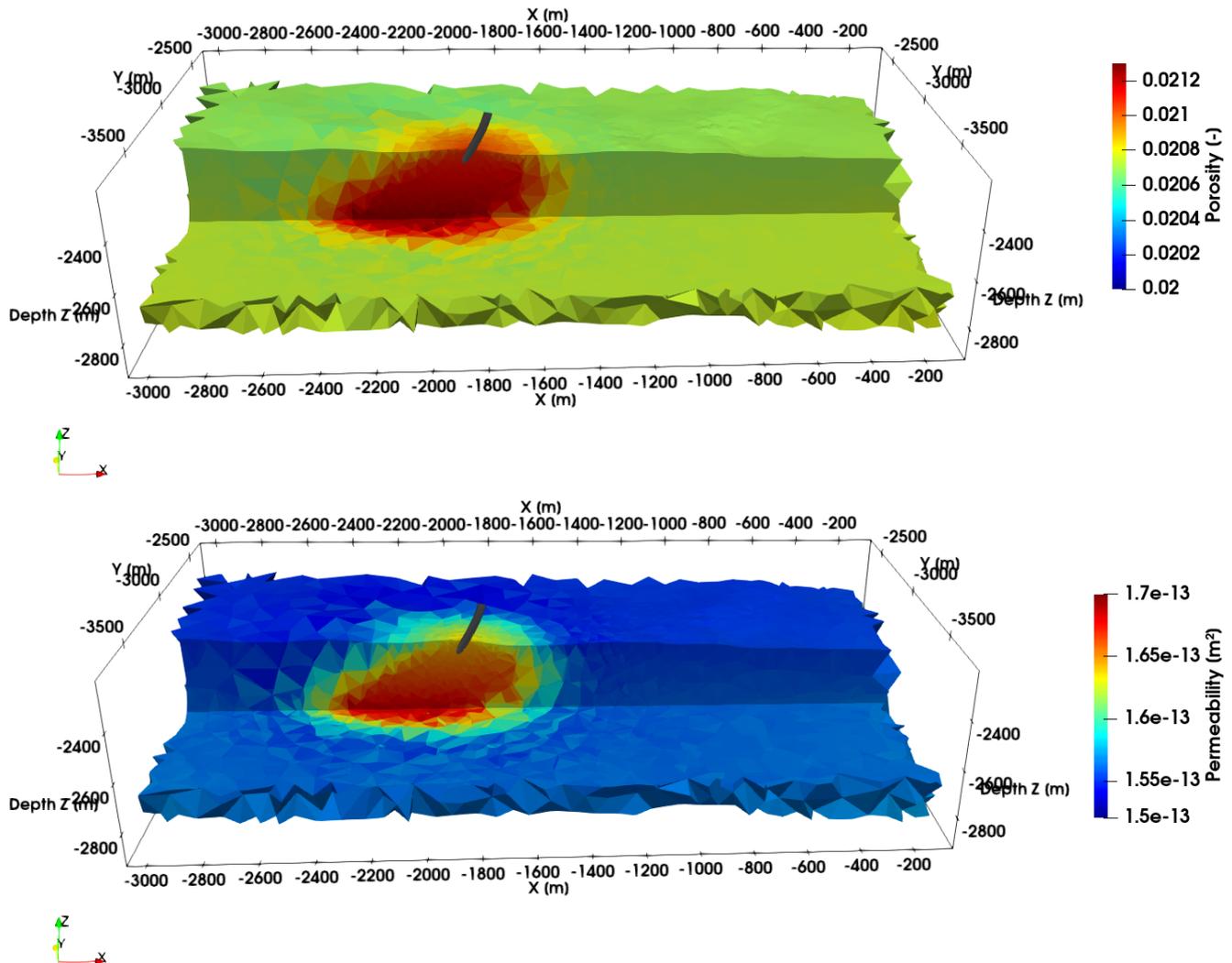


Abbildung 6: Porosität und Permeabilität im Malm Zeta Reservoir im Bereich der Bohrung Pullach Th3 nach 50 Jahren kontinuierlichen Betriebs.

3.2.2 OBERFLÄCHENDEFORMATION

Neben Alterationen der Reservoirparameter und -eigenschaften, führen diese thermoelastischen Prozesse auch zu einer Deformation bis an die Erdoberfläche oberhalb der offenen Filterstrecke der Bohrung Pullach Th3. Abbildung 7 zeigt die simulierte Oberflächendeformation mit der Betriebsdauer. Der initiale starke Anstieg (auf ca. 1,5 mm) korreliert mit dem Porendruckanstieg innerhalb der ersten Betriebsjahre. Mit zunehmender Zeitdauer nimmt der Einfluss der sich ausbreitenden Abkühlungfront, also der Kontraktion des Reservoirs zu, so dass sich die Hebung verlangsamt und ein Maximum von 2 mm erreicht. Nach ca. 30 Jahren überwiegen thermische Effekte und es kommt zu leichter Subsidenz. Während diese Ergebnisse stark von den Unsicherheiten der lithofaziellen Einheiten beeinflusst werden, kann eine Verifikation kontinuierlich mittels InSAR-Messungen erfolgen.

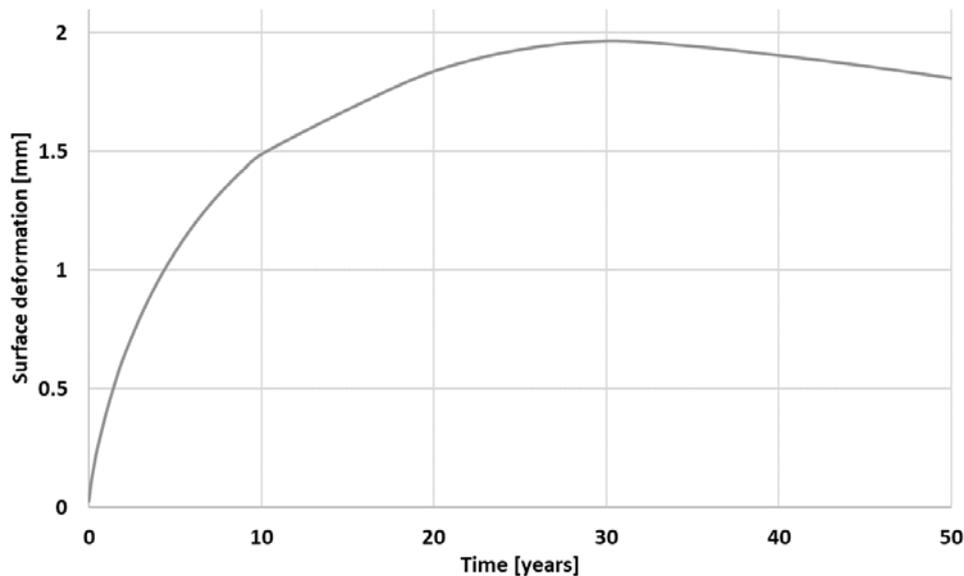


Abbildung 7: Oberflächendeformation oberhalb der Bohrung Pullach Th3 mit kontinuierlichem Betrieb.

4 MÖGLICHE ERWEITERUNGEN

In den vorherigen Kapiteln konnte gezeigt werden, dass unter derzeitigen Bedingungen auch nach 50 Betriebsjahren ein thermischer Durchbruch unter gegebenen Bedingungen nicht zu erwarten ist. Darüber hinaus liegt auch der maximale Injektionsdruck im Bereich des Riffkörpers, der Bohrung Pullach Th3, weit unter einem kritischen Porendruck. Es besteht daher die Möglichkeit die identifizierten geologisch begünstigten Strukturen des Malm Zetas für eine Erweiterung des bisherigen Kraftwerks Pullach zu nutzen und weitere Bohrungen innerhalb des Riffkörpers abzuteufen. Aufbauend auf der bisherigen Erfahrung, wurde daher das numerische Modell um die Bohrpfade bzw. offenen Bohrsektionen für zwei weitere Bohrungen erweitert (rote Bohrungen in Abbildung 8). Diese sind westlich (TH5) und östlich (TH4) der vorhandenen Bohrung Pullach Th3 lokalisiert und erschließen das Malm Zeta Reservoir in möglichst großer Entfernung zueinander. Zur existierende Bohrung Pullach Th2 wird ein minimaler Abstand von mindestens 1000 m eingehalten.

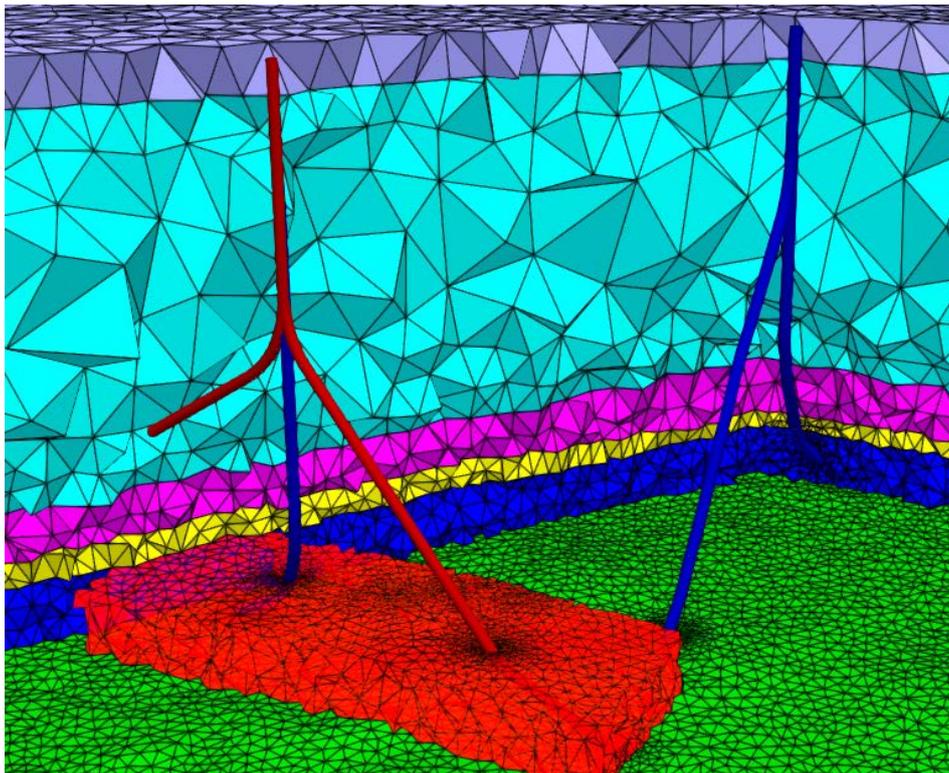


Abbildung 8: Ausschnitt des Elementgitters mit einer möglichen weiteren Dublette zur Erhöhung der Gesamtförderraten. Mögliche neue Bohrfade sind in rot dargestellt, bisherige Bohrungen in blau. Für eine Legende der Lithostratigrafie sei auf Abbildung 1 verwiesen.

Ausgehend vom in Kapitel 2.1 beschriebenen Kraftwerksszenario wurden die Produktionsraten mittels der neuen Bohrungen um 100 % angehoben, so dass eine Gesamtförder- und Injektionsrate von ca. 100 L/s angenommen wird. Da die Druckabnahmen in den Bohrungen Pullach Th1a und Th2 bereits ca. 2 MPa erreicht haben, wurden deren Fließraten nicht erhöht und stattdessen für alle Simulationen als konstant (26,5 bzw. 24 L/s) angenommen. Weitere Randbedingung ist, dass die Bohrung Pullach Th3 auf Grund der außerordentlich guten Transmissivität weiterhin als Injektionsbohrung genutzt wird. Es wird eine konstante Reinjektionstemperatur von 62°C angenommen. Variiert wurde dagegen, ob eine oder zwei neue Bohrungen zur Förderrung und Reinjektion benötigt werden und alternativ Th3 zur verstärkten Reinjektion genutzt wird (Tabelle 2).

Tabelle 2: Für eine potentielle Erweiterung untersuchte Varianten. Negative Fließraten entsprechen auch gleichzeitig einer Reinjektion mit 62 °C, positive Fließraten einer Produktion. Th4 entspricht einer Erweiterung im Osten, Th5 im Westen.

Fall	Th1a	Th2	Th3	Th4	Th5
	[L/s]	[L/s]	[L/s]	[L/s]	[L/s]
Base	26,5	24	-50,5	0	0
1	26,5	24	-50,5	-50,5	50,5
2	26,5	24	-101	50,5	0
3	26,5	24	-101	0	50,5
4	26,5	24	-50,5	50,5	-50,5

4.1 HYDRAULISCHE SENSITIVITÄT

Die Ergebnisse (Abbildung 9) zeigen in allen Konfigurationen, mit Ausnahme Fall 4, gegenüber dem Basismodell einen Anstieg des Injektions- und Reservoirdrucks im Bereich des Riffkörpers, welche allerdings den Wert von 1,6 MPa nicht übersteigen. Auf Grund einer guten hydraulischen Verbindung innerhalb des Reservoirs im Fall 4 liegt hierbei der Druckanstieg im Bereich weniger als 0,3 MPa. Außerhalb des Malm Zeta Reservoirs sind die Druckveränderungen zwischen den einzelnen Modellen lediglich in geringerem Umfang nachweisbar. Abbildung 10 zeigt die Druckabnahme von Pullach Th2 mit zunehmender Betriebsdauer. Hierbei zeigt sich, dass es gegenüber dem Basisfall günstigere und ungünstigere Konfigurationen gibt. Eine gleichmäßig im Reservoir verteilte Produktion führt hierbei zu geringeren Druckdifferenzen (Fälle 1 und 3), während eine rein östliche Anordnung der drei Produktionsbohrungen zu einer verstärkten Druckabnahme auch in den bestehenden Bohrungen führt (Fall 4). Mit Th2 vergleichbare Druckabnahmen sind auch für Pullach Th1a zu erwarten.

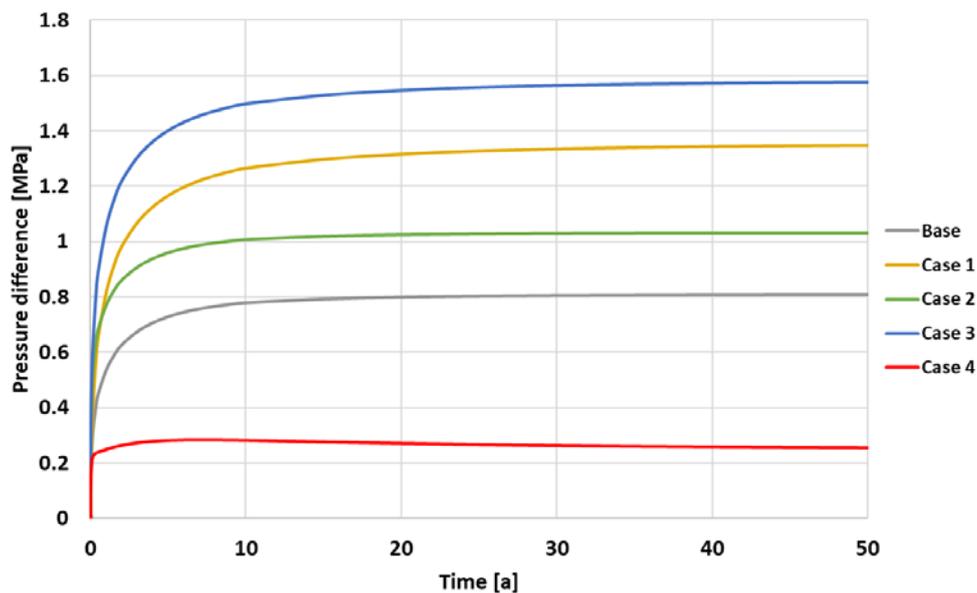


Abbildung 9: Druckveränderungen der Bohrung Pullach Th3 mit zunehmender Betriebsdauer.

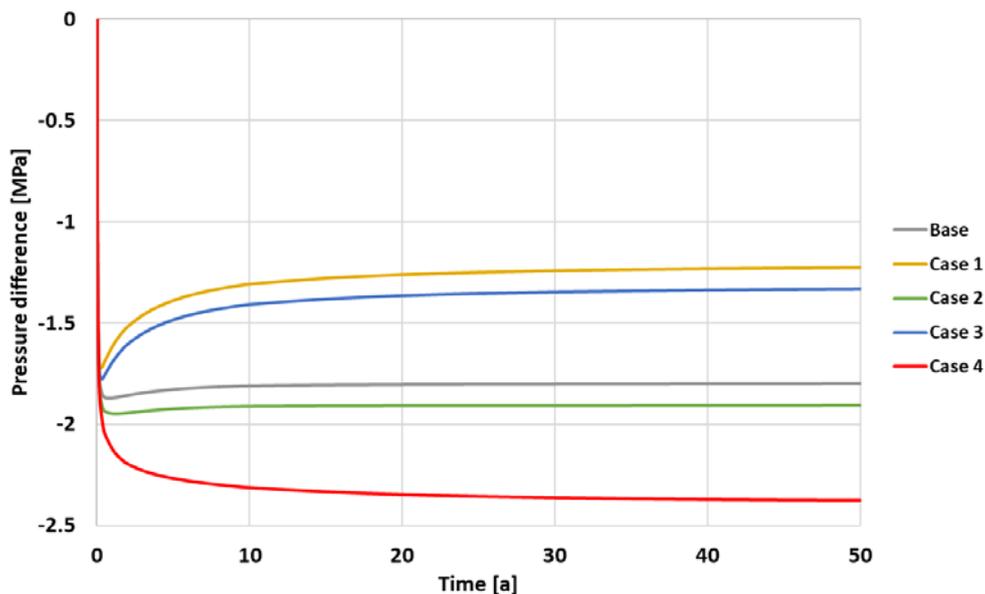


Abbildung 10: Druckveränderungen der Bohrung Pullach Th2 mit zunehmender Betriebsdauer.

4.2 THERMISCHE VERÄNDERUNGEN

Neben der hydraulischen Interaktion müssen auch gekoppelte thermische Prozesse, u.a. die Ausbreitung der Abkühlungsfront(en), berücksichtigt werden. Unter keinem der angenommenen Betriebszenarien ist ein thermischer Durchbruch innerhalb der betrachteten 50 Betriebsjahre zu erwarten. Kritisch betrachtet werden müssen allerdings die Szenarien mit einer Produktion aus der östlich gelegenen Bohrung Pullach Th4 (Fälle 2 und 4, Abbildung 11). So bildet sich im Fall 2 ein verstärkter hydraulischer Gradient zwischen den Bohrungen Th3 und Th4 und damit die am stärksten längliche Abkühlungsfront aus. Hierbei hat die Abkühlungsfront nach 50 Jahren eine Extension von ca. 1,7 km. Im Fall 4 sorgen zwei Injektionsbohrungen für eine gleichmäßigere Verteilung der Abkühlungsfront, allerdings bildet sich auch hier abgekühlter Bereich von 1,4 km Durchmesser um Th3 aus. Zu beachten ist hierbei allerdings, in den Simulationen eine homogene Permeabilitätsverteilung innerhalb des Riffkörpers angenommen wurde. Starke Verkarstung kann dagegen auch zur vermehrten Bildung präferentieller Fluidwegsamkeiten führen und dadurch einen thermischen Durchbruch begünstigen (Fadel et al. 2022).

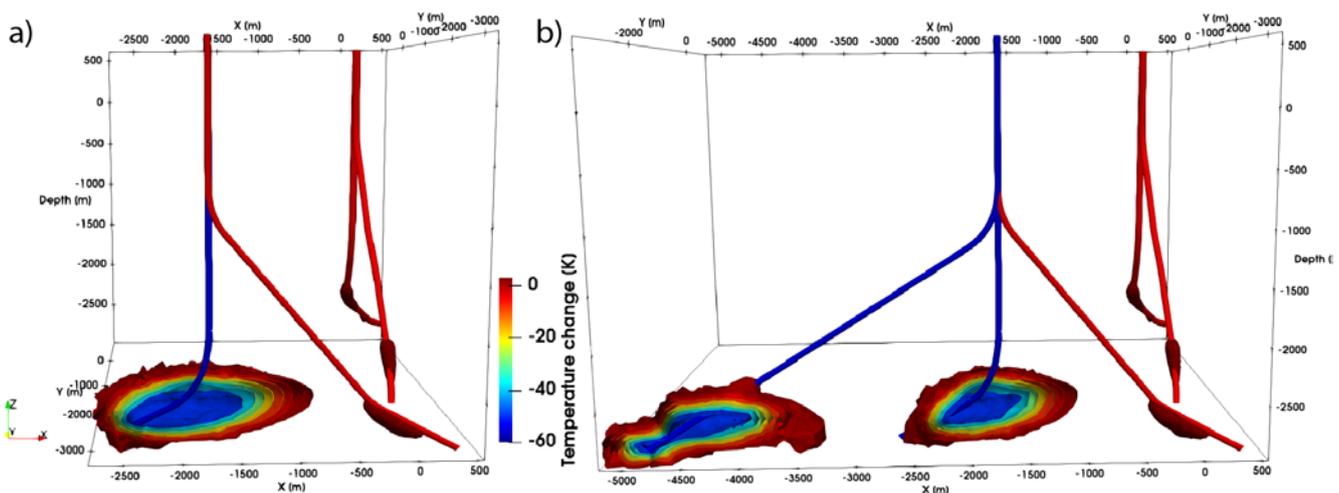


Abbildung 11: Abkühlungsfronten nach 50 Betriebsjahren für die kritischen Fälle a) 2 und b) 4.

4.3 MECHANISCHE VERÄNDERUNGEN

Die aus dem veränderten Betriebszenario resultierenden mechanischen Veränderungen im Reservoir sind eine direkte Folge der Temperatur- und Druckveränderungen. Da allerdings eine konstante Reinjektionstemperatur betrachtet wurde, ergeben sich im Nahbereich der Bohrungen nur geringfügige Änderungen der Spannungsmagnituden (vgl. Abbildung 5). Ein vergrößerter Ausbreitungsradius (vgl. Abbildung 3 und Abbildung 11) führt allerdings lateral zu einem vergrößerten Bereich mit thermisch (und hydraulisch) induzierter Spannungsreduktion.

Die stark unterschiedliche Extension der Abkühlungsfront führt in den verschiedenen Szenarien zu unterschiedlicher Deformation bis hin zur Geländeoberkante (hauptsächlich im Bereich über der/den Injektionsbohrungen). Abbildung 12 zeigt die Deformation der Geländeoberkante über Pullach Th3 mit zunehmender Betriebszeit. Während jedes Modell nach längerer Produktionszeit einen Rückgang der Hebung zeigt, variiert der Umkehrzeitpunkt zwischen 10 und 35 Jahren. Für die Fälle 2 und 4 kann sogar eine Senkung zum Ende der Simulation beobachtet werden.

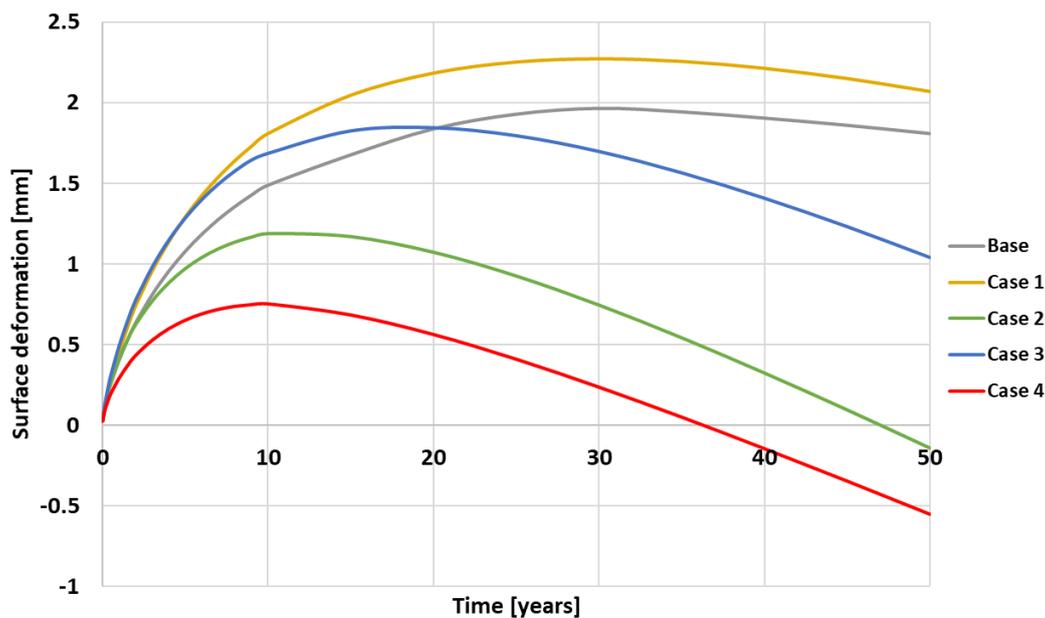


Abbildung 12: Deformation an der Geländeoberkante über der Bohrung Pullach Th3.

5 ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen des Projekts INSIDE wurde ein Finite Elemente (FE) Reservoirmodell des geothermischen Kraftwerkes in Pullach an der Isar erstellt. Mit Hilfe der TIGER Anwendung wurden Simulationen zu thermo-hydraulisch-mechanisch-induzierten Alterationen des geothermischen Reservoirs unter kontinuierlichem Betrieb durchgeführt und diese hinsichtlich Veränderungen von Druck, Temperatur und Spannungen evaluiert. Hierbei konnte gezeigt werden, dass unter bisherigen operativen Parametern kein thermischer Durchbruch innerhalb geothermie-typischer Zeiträume zu erwarten ist und Porendruckveränderungen selbst im Nahbereich der Bohrungen deutlich unter 2 MPa liegen. Auftretende Spannungsänderungen sind vornehmlich thermisch induziert und breiten sich somit nur sehr langsam und kleinräumig (<1000 m) innerhalb des Reservoirs aus. Spannungsmagnituden von deutlich über 10 MPa wurden zwar simuliert, allerdings würden kleinsträumige Versagensereignisse diese in der Realität zuvor begrenzen. Andererseits konnte gezeigt werden, dass der Standort Pullach und speziell der Malm Zeta Riffkörper im südlichen Bereich des Reservoirs geeignet ist, die Produktion des Geothermiekraftwerkes weiter zu erhöhen und zukünftig mehr Haushalte an das Fernwärmenetz anzuschließen. Hierbei kann die Massenkalkfazies des Malm Zeta weitere Injektionsbohrungen mit vergleichbaren Fließraten aufzunehmen, ohne dass ein kritischer Anstieg des Porendrucks oder ein thermischer Durchbruch zu erwarten ist. In weiterführenden Untersuchungen sollte allerdings das Risiko ungünstiger Fluidwegsamkeiten auf Grund starker Verkarstung untersucht werden. Darüber hinaus kann die Nutzung von Versagen- und Seismizitätsmodellen dabei helfen, induzierte, auch kleinsträumige seismische Ergebnisse vorherzusagen und Betriebsparameter evtl. im Vorhinein mittels eines Reservoir Management Systems zu modifizieren.

6. LITERATURVERZEICHNIS

- Bohnsack D., Potten M., Freitag S., Einsiedl F., Zosseder K. (2021): Stress sensitivity of porosity and permeability under varying hydrostatic stress conditions for different carbonate rock types of the geothermal Malm reservoir in Southern Germany. *Geotherm Energy* 9(1). doi: 10.1186/s40517-021-00197-w
- Cacace M., Blöcher G. (2015): MeshIt—a software for three dimensional volumetric meshing of complex faulted reservoirs. *Environ Earth Sci* 74(6):5191–5209. doi: 10.1007/s12665-015-4537-x
- Carman P. (1956): *Flow of gases through porous media*. Butterworths Scientific Publications, London
- Chen Y.-F., Zhou C.-B., Jing L. (2009): Modeling coupled THM processes of geological porous media with multiphase flow: Theory and validation against laboratory and field scale experiments. *Computers and Geotechnics* 36(8):1308–1329. doi: 10.1016/j.compgeo.2009.06.001
- Dussel M., Lüschen E., Thomas R., Agemar T., Fritzer T., Sieblitz S., Huber B., Birner J., Schulz R. (2016): Forecast for thermal water use from Upper Jurassic carbonates in the Munich region (South German Molasse Basin). *Geothermics* 60:13–30. doi: 10.1016/j.geothermics.2015.10.010
- Egert R., Gaucher E., Savvatis A., Goblirsch P., Kohl T. (2022): Numerical determination of long-term alterations of THM characteristics of a Malm geothermal reservoir during continuous exploitation: PROCEEDINGS European Geothermal Congress, Berlin
- Egert R., Gholami Korzani M., Held S., Kohl T. (2021): Thermo-hydraulic Modeling of an Enhanced Geothermal System in the Upper Rhine Graben using MOOSE/TIGER: PROCEEDINGS: World Geothermal Congress 2020+1, Reykjavik
- Fadel M., Reinecker J., Bruss D., Moeck I. (2022): Causes of a premature thermal breakthrough of a hydrothermal project in Germany. *Geothermics* 105:102523. doi: 10.1016/j.geothermics.2022.102523
- Gholami Korzani M., Held S., Kohl T. (2020): Numerical based filtering concept for feasibility evaluation and reservoir performance enhancement of hydrothermal doublet systems. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 190:106803. doi: 10.1016/j.petrol.2019.106803
- Lafogler M., Bartels J., Wenderoth F., Savvatis A., Steiner U., Schubert A., Nießner R., Baumann T. (2016): Quantifizierung der lokalen und Prognose der regionalen hydraulischen und hydrochemischen Reservoireigenschaften des Malmaquifers auf Basis eines Push-Pull-Tests am Standort Pullach (Puma). Endbericht
- Pei L., Blöcher G., Milsch H., Zimmermann G., Zhang H., Li X., Huenges E. (2020): Analysis of measured thermally induced rock deformation. *Measurement* 163:108004. doi: 10.1016/j.measurement.2020.108004
- Potten M. (2020): Geomechanical characterization of sedimentary and crystalline geothermal reservoirs. Dissertation
- Seithel R., Steiner U., Müller B., Hecht C., Kohl T. (2015): Local stress anomaly in the Bavarian Molasse Basin. *Geotherm Energy* 3(1):77. doi: 10.1186/s40517-014-0023-z
- Stricker K., Egert R., Grimmer J.C., Gholami Korzani M., Schill E., Kohl T. (2022): Thermal-hydraulic-mechanical (THM) modeling of high-temperature heat storage using DeepStor as a case study: PROCEEDINGS European Geothermal Congress

Ziegler M.O., Heidbach O. (2020): The 3D stress state from geomechanical–numerical modelling and its uncertainties: a case study in the Bavarian Molasse Basin. *Geotherm Energy* 8(1). doi: 10.1186/s40517-020-00162-z