

Abb. 1: Übersicht der verwendeten Bohrdaten aus dem Großraum München (markiert sind die Zielpunkte der Bohrungen).

## Drei Jahre F&E zur Reservoircharakterisierung des Malm – Ein Überblick

TEXT: U. Steiner<sup>1</sup> / 2, F. Böhm<sup>1</sup>, A. Savvati<sup>1</sup>s, A. Schubert<sup>1</sup> & M. Schneider<sup>2</sup>

Ende 2007 begann ein regelrechter „Bohrboom“ im süddeutschen Molassebecken und die über 42.000 Bohrmeter, die allein im Jahr 2008 abgeteuft wurden, übertrafen die bis dahin vorhandenen Gesamtbohrmeter. Fast alle Bohrungen wurden im Großraum München niedergebracht, so dass endlich ausreichend „harte“ Bohrdaten zur besseren hydrogeologischen Charakterisierung des Malmaquifers vorlagen. Ein idealer Zeitpunkt für ein vom Bundesministerium für Umwelt gefördertes Forschungsvorhaben!

### Einleitung

Ziel des Vorhabens war es, aus den Disziplinen Strukturgeologie, Lithofazies, Grundwasserhydraulik und Hydrochemie einerseits eine verbesserte hydrogeologische Modellvorstellung und risikominimierte Explorationsstrategie zu entwickeln und andererseits Methoden zu einer nachhaltigeren und effizienteren Erschließung der Wärme im Malm zu erarbeiten und diese zu testen. Die Partner in diesem Verbundvorhaben (FKZ: 0327671A/B) waren die Arbeitsgruppe Hydrogeologie der FU Berlin zusammen mit dem Institut für Wasserchemie der TU München und der Fachgruppe Paläoumwelt des Geozentrums Erlangen im Unterauftrag sowie die Fa. Erdwerk GmbH aus München als Planungsbüro für tiefengeothermische Projekte. Zeitgleich wurde in einem parallelen Forschungsvorhaben des Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik, Hannover, zusammen mit dem bayerischen Landesamt für Umwelt, München, und der Fa. Hydroconsult GmbH, Augsburg, ein auf Seismik basierendes hydrogeologisches Modell für den Großraum München erstellt. Zwischen beiden Vorhaben

fanden im halbjährlichen Turnus Arbeitstreffen statt, in denen neue Erkenntnisse ausgetauscht und zeitnah in das großräumige Modell integriert werden konnten.

### Reservoircharakterisierung aus Bohrungen

Im Projekt galt es zunächst, die verschiedenen, teils sehr heterogenen Datensätze aus 16 verfügbaren Bohrungen im Großraum München (Abb. 1) aufzuarbeiten und in die Software Petrel™ zu integrieren. Diese wurde von der Fa. Schlumberger dankenswerterweise als Forschungslizenz bereitgestellt.

Von Beginn an war die Auswertung so genannter elektrischer Imagemlogs zentraler Bestandteil der Untersuchungen. Bei Imagemlogs handelt es sich um ein bildgebendes bohrlochgeophysikalisches Verfahren, das dem Geologen ermöglicht, anhand von Farbe, Struktur und Textur Analogieschlüsse zu Kernbohrungen oder Aufschlüssen herzustellen.

Im Arbeitspaket Strukturgeologie sollte zunächst eine Methode entwickelt werden, mit der sich das



**Ulrich Steiner**  
(Diplom-Geologe)

ist im Rahmen des Projektes als Mitarbeiter der AG Hydrogeologie der FU Berlin für Strukturgeologie und den Aufbau der geologischen Modelle mit der Software Petrel™ zuständig. Heute arbeitet er im Bereich F&E bei der Erdwerk GmbH.

**Kontakt:**  
office@erdwerk.com

Durchteufen einer als Bohrziel anvisierten Störung eindeutiger als bisher belegen und hydraulisch bewerten ließ. Die Auswertung von mehr als 10.000 aus Imagelogs identifizierten offenen Klüften zeigt zwei Hauptstreichrichtungen: die eine orientiert sich mit ca. 80° an den bekannten alpenrandparallelen Hauptstörungen, die zweite streicht mit ca. 30°, und ist als Indikation für Blattverschiebungen zu werten. In diesem Zusammenhang hat sich gezeigt, dass auch im Malm die Zunahme der Klufthäufigkeit zusammen mit der entsprechenden -orientierung als Störungsindikation gewertet werden kann. Es konnte jedoch bisher keine Korrelation zwischen der Produktivität einer Bohrung und der erbohrten Kluftrichtung einerseits oder der Versatzhöhe einer Störung in der Seismik andererseits festgestellt werden. Auch die Auswertung von Pumpversuchen zeigte, dass in den meisten Bohrungen die Hydraulik von einem radialen Fließen dominiert wird, und dass Störungen im Gesamtsystem in der Regel nur eine untergeordnete Rolle spielen. Auswertungen der Imagelogs im Hinblick auf die potenziellen Zuflusszonen ergaben zudem, dass diese häufiger mit Verkarstungsbereichen im lithofaziellen Übergang von kalkigen zu dolomitischen Partien zu korrelieren sind und weniger an Verkarstungsbereichen auftreten, die mit Störungen in Verbindung gebracht werden können.

Im Arbeitspaket Lithofazies galt es an den neuen Daten zu prüfen, ob unter Einbeziehung des Ablagerungsraumes ein entscheidender Einfluss auf die hydraulischen Eigenschaften des Gesteins zu erkennen ist, wie in vorangegangenen Arbeiten dargestellt wurde (z.B. Stier & Prestel, 1991).

In einem ersten Schritt konnte eine Korrelation zwischen dem Gesamtdolomitgehalt, der an einzelnen Bohrungen bestimmt wurde, und der Gebirgsdurchlässigkeit, die aus dem Wiederanstieg von Pumptests ermittelt wurde, hergestellt werden: Mit steigendem Dolomitanteil steigt die Transmissibilität. Des Weiteren wurde eine Methode zur Abschätzung der Permeabilität aus Cuttings entwickelt, die sog. PAC-Analyse (Böhm et al., 2011). Darauf basierend konnten qualitative Permeabilitätsprofile der Bohrungen zur Abgrenzung potenzieller Zuflusshorizonte erarbeitet werden. Weitere Abschätzungen zur Porositäts- und Permeabilitätscharakteristik fanden auf Basis von Cuttingdünnsschliffen statt, die außerdem durch mikrofazielle Untersuchungen zur Klärung des Ablagerungsraums und der Korrelation der Bohrungen beitrugen.

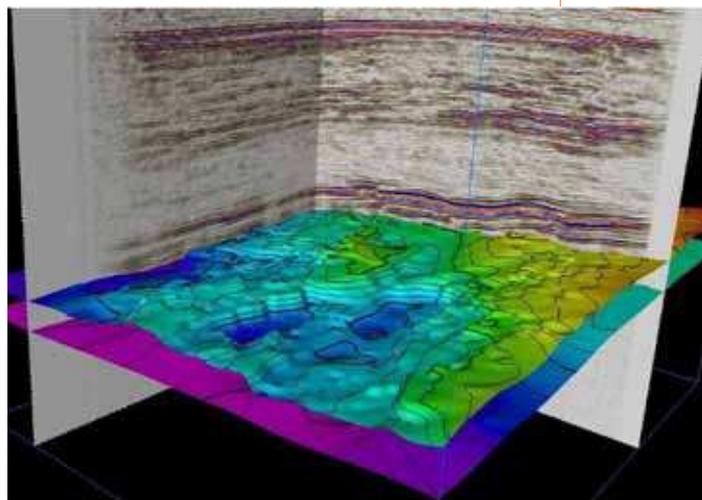
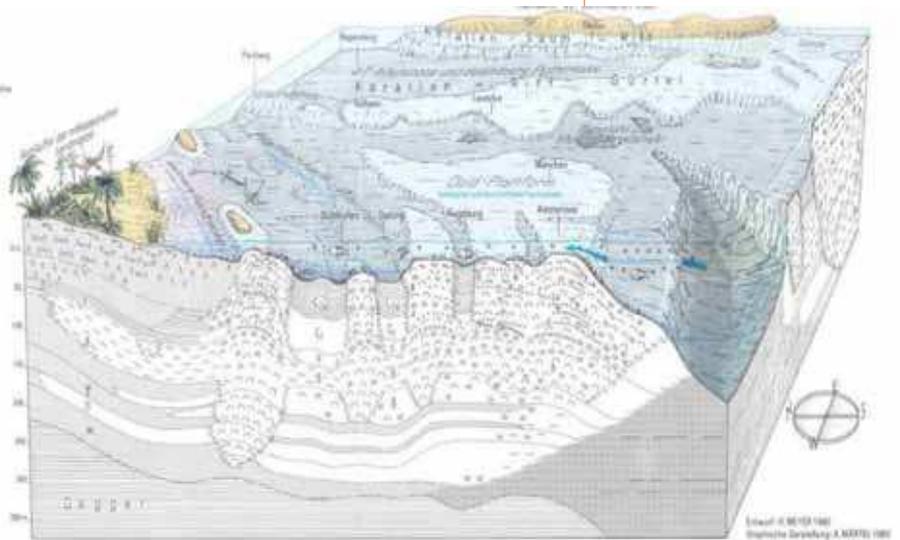
Schließlich zeigte sich auch, dass die Mächtigkeit von durchteufter Massen- bzw. Bankfazies Einfluss auf die Durchlässigkeit hat: Je höher der Anteil der Massenfazies, umso größer ist gleichzeitig die Transmissibilität. Im Hinblick auf die horizontale und laterale Faziesverbreitung erwie-

sen sich hier die Imagelogs von entscheidender Bedeutung. Durch deren Gegenüberstellung mit der lithofaziellen Ansprache des Bohrkleins sowie dem Abgleich mit dem Kernmaterial der vollständig im Malm gekernten Forschungsbohrung Moosburg SC4 konnte während des Projekts eine fazielle Differenzierung der Malmkarbonate in Imagelogs erarbeitet werden.

### Aktuelle Modellvorstellung

Der Malm ist aus Aufschlüssen der fränkischen oder schwäbischen Alb durch seine kleinräumigen Fazieswechsel mit Schwellen aus massigen „Riff-“ bzw. Biohermkomplexen und Becken mit geschichteten, mergeligeren oder mikritischen Karbonaten bekannt. Dieses Bild hat sich auch weitgehend für den tiefen Malm im Großraum München bestätigt (Abb. 2). Die Interpolation der punktuellen Bohrinformationen in die Fläche erfolgt anhand der Texturanalyse und Interpretation sowohl im 2D- als auch im 3D- Seismikdatensatz.

Abb. 2: Faziesmodelle im Vergleich: Schematisiertes Blockbild aus Meyer & Schmidt-Kaler (1996) zur Paläogeographie des Malm mit einer sich über den gesamten Ablagerungsraum erstreckenden Gliederung in Schwellen und Becken (links). Schrägsicht von Top Massenfazies, abgeleitet aus 3D- Seismik mit kleinräumigen Schwellen (gelborange) und Becken (dunkelblau) (Kantenlänge des Kubus ca. 5 km, unterer Horizont = Basis Massenfazies..



Im Rahmen des Projektes ließ sich folgende, vereinfachte hydrostratigraphische Gliederung des Malm im Großraum München ableiten:

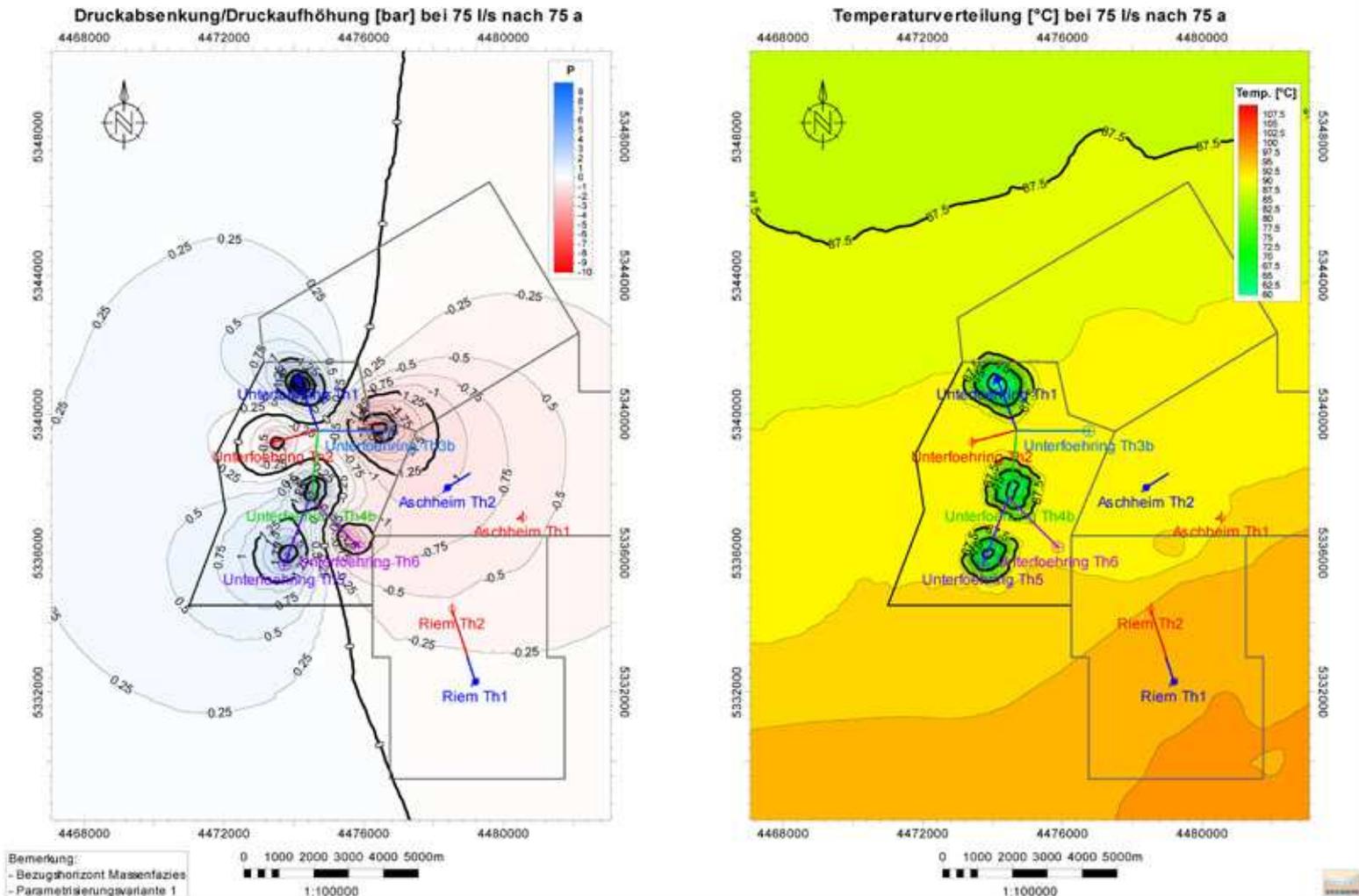
- Der liegende Malm alpha bis Malm gamma kann mit mergeligen Partien als Grundwassergeringleiter eingestuft werden.
- Der tiefere und mittlere Malm, der stratigraphisch in etwa dem Malm delta und epsilon entspricht, ist aufgrund einer homogenen, lateral aushaltenden dolomitischen Massenfazies als potentieller regionaler Grundwasserleiter anzusprechen.
- Der obere Malm zeta ist durch lateral wechselnde Schwellen oder Becken gekennzeichnet, was die lokale Ausbildung von Grundwasserleitern (Massenfazies) bzw. -geringleitern (Beckenfazies) bedingt.

Demnach nimmt die dolomitisierte Massenfazies eine Schlüsselrolle bei der geothermischen Exploration und Nutzung des Malm ein, da sie einerseits im tieferen und mittleren Malm ein feldeübergreifendes, gemeinsames Reservoir bildet, und andererseits im oberen Malm die Reservoirmächtigkeit vergrößert. Darüber hinaus steuert sie die Verkarstungsanfälligkeit und ist somit für die Gesamthydraulik des Malm ausschlaggebend.

**Explorationsstrategie und Reservoirmanagement**  
Beim so genannten „targeting“, also der Auswahl des Bohrziels mit einem geeigneten Bohrpfad, sollte die Ausbildung der Malm-Fazies stärker als bisher betrachtet werden. Idealerweise zielt eine Bohrung auf eine Schwelle und durchteuft anschließend die Massenfazies entlang einer möglichst langen Strecke. Zusätzlich sollten Störungen bzw. tektonisch beanspruchte Bereiche aufgrund des erhöhten Verkarstungspotenzials „aufgefädelt“ werden. Als „Negativbereiche“ sind Beckenstrukturen im oberen Malm bei der Bohrplanung unbedingt zu meiden.

Aus den aktuellen hydrogeologischen Modellvorstellungen ergeben sich nun für das nutzbare geothermische Potenzial im süddeutschen Molassebecken entscheidende Konsequenzen: So zeigt sich im Großraum München bereits der Trend zum Ausbau von bestehenden Geothermieanlagen. Als Vorreiter ist hier das kommunale Fernwärmeprojekt Pullach i. Isartal zu nennen, das nach sechs Betriebsjahren aufgrund der steigenden Nachfrage nach Geowärme im Frühjahr 2011 seine geothermische Dublette um die Bohrung Pullach Th 3 erweitert hat. Auch bei anderen kommunalen Geothermiebetreibern wird bereits über zusätzliche Bohrungen inner-

Abb. 3: Ergebnisse der Simulation für eine Erweiterung der Geothermieanlage Unterföhring nach Süden.  
Links: hydraulische Simulation mit Druckabsenkung bei Förderung (rot) und Druckaufhöhung bei Reinjektion (blau). Rechts: thermische Simulation mit Abkühlungsfront um Reinjektionsbohrungen.



halb des Bewilligungsfeldes nachgedacht. Im Geothermieprojekt Unterföhring sind diese bereits so weit fortgeschritten, dass dort durch eine hydraulisch-thermische Modellierung auf Basis eines kombinierten Reservoirmodells aus Strukturgeologie und Fazies das noch nutzbare Potenzial des Erdwärmebewilligungsfeldes ermittelt wurde. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf die Einbeziehung benachbarter Geothermiebohrungen und der Fragestellung einer potenziellen gegenseitigen Beeinflussung gelegt. Die Simulationen mit verschiedenen Bohrungsvarianten zeigten, dass weniger der thermische Durchbruch als vielmehr hydraulische Beeinflussungen die Limitierung bei der Erschließungsverdichtung darstellen können. Diese Herausforderung kann jedoch durch eine optimierte Anordnung von Förder- und Reinjektionsbohrungen gelöst werden, die so sowohl im eigenen Projekt als auch auf Nachbarbohrungen als positive Potenzialstützen wirken können (Abb.3).

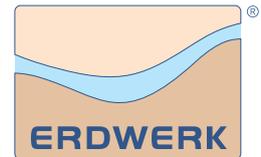
Die Simulationen auf der Basis von belastbaren hydraulischen Pumpversuchswerten und Betriebsdaten untermauern letztendlich geowissenschaftlich das noch große Erschließungspotenzial hydrothermalen Energie im Großraum München.

#### Literatur:

**BÖHM, F., SAVVATIS, A., STEINER, U., SCHNEIDER, M. & KOCH, R. (2011):** Lithofazielle Reservoircharakterisierung zur geothermischen Nutzung des Malm im Großraum München. - Grundwasser; Berlin eingereicht

**MEYER, R.K.F. & SCHMIDT-KALER, H. (1996):** Jura. - In: Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:500000: 112-125; München (GLA).

**STIER, P & PRESTEL, R. (1991):** Der Malmkarst im süddeutschen Molassebecken - Ein hydrogeologischer Überblick. Schlussbericht zum Forschungsvorhaben O3E-6240 A/B (i.A. des BMFT). 12 S.; München.



#### Wasser und Wärme aus der Erde Energie für die Zukunft

Mit der Erfahrung von über 65.000 geothermischen Bohrmeter aus 8 realisierten Tiefbohrprojekten sind wir national eines der führenden Planungsbüros im Bereich tiefe Geothermie, Explorationsgeologie und Tiefbohrplanung.

Wir planen und begleiten Ihr Projekt von den ersten Schritten des Genehmigungsverfahrens bis hin zur Inbetriebnahme und unterstützen Sie bei allen technischen, geologischen und behördlichen Fragestellungen.