



Bayerisches Landesamt für  
Umwelt



**Forschungsvorhaben:**

# **Geothermische Charakterisierung von Karst-Kluft-Aquiferen im Großraum München**

**Endbericht**







Bayerisches Landesamt für  
Umwelt



**Forschungsvorhaben:**

**Geothermische Charakterisierung  
von Karst-Kluft-Aquiferen  
im Großraum München**

**Endbericht**

## Impressum

Geothermische Charakterisierung von Karst-Kluft-Aquiferen im Großraum München

### Projektleiter

Dr. Thomas Fritzer

### Projektbearbeiter

Dipl.-Geol. Robert Pamer; Dipl.-Geol. Uta Schulz, Dipl.-Geol. Stephan Sieblitz

### Zuwendungsgeber

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit  
Projektträger Jülich (PtJ-EEN)

### Förderkennzeichen

0325013B

### Laufzeit des Vorhabens

01.04.2008 – 31.12.2011

### Berichtsdatum

15.06.2012

### Herausgeber:

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)  
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160  
86179 Augsburg  
Tel.: 0821 9071-0  
Fax: 0821 9071-5556  
E-Mail: [poststelle@lfu.bayern.de](mailto:poststelle@lfu.bayern.de)  
Internet: [www.lfu.bayern.de](http://www.lfu.bayern.de)

### Redaktion:

LfU, Referat 107, Dr. Thomas Fritzer

### Bildnachweis:

Bayerisches Landesamt für Umwelt

### Druck:

Eigendruck der Druckerei Bayerisches Landesamt für Umwelt  
Gedruckt auf Papier aus 100 % Altpapier.

Diese Druckschrift wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden. Sofern in dieser Druckschrift auf Internetangebote Dritter hingewiesen wird, sind wir für deren Inhalte nicht verantwortlich.

**Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit unter dem Förderkennzeichen 0325013B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.**

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>5</b>
1.1	Aufgabenstellung und Zielsetzung	5
1.2	Projekttablauf	5
1.3	Rechtliche Vorgaben	7
1.4	Unterlagen	8
<b>2</b>	<b>Untersuchungsraum und geologischer Rahmen</b>	<b>10</b>
2.1	Untersuchungsraum	10
2.2	Geologischer Rahmen	10
2.2.1	Geologischer Überblick	10
2.2.2	Tektonik	13
<b>3</b>	<b>Strukturmodell</b>	<b>15</b>
3.1	Datengrundlage und -aufbereitung	15
3.2	Auswertung und Interpretation	16
3.3	Ergebnisse	19
3.3.1	3D-Strukturmodell	19
3.3.2	2,5D-Strukturmodell	20
3.3.3	Vereinfachtes 2,5D-Strukturmodell	21
<b>4</b>	<b>Faziesmodell</b>	<b>22</b>
4.1	Datengrundlage und -aufbereitung	23
4.2	Auswertung und Interpretation	23
4.3	Ergebnisse	25
<b>5</b>	<b>Ausblick</b>	<b>27</b>
<b>6</b>	<b>Publikationen</b>	<b>28</b>
6.1	Abschlussberichte	28
6.2	Vorträge und Poster	28
6.2.1	Vortragsveröffentlichungen (Proceedings)	28
6.2.2	Vorträge	29
6.2.3	Poster	29
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>30</b>

## Anlagenverzeichnis

- Anlage 1:     Bearbeitungsschema Strukturmodelle
- Anlage 2:     Strukturkarte Top Lithothamnienkalk
- Anlage 3:     Strukturkarte Top Purbeck/Malm
- Anlage 4:     Strukturkarte Top Tieferer Malm (Top Malm gamma)
- Anlage 5:     Strukturkarte Top Kristallin
- Anlage 6:     Bearbeitungsschema Faziesbereiche (Teil 1)
- Anlage 7:     Bearbeitungsschema Faziesbereiche (Teil 2)

# 1 Einführung

## 1.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Der Thermalwasser führende Malm (Oberer Jura) des süddeutschen und oberösterreichischen Molassebeckens ist als Karst-Kluft-Aquifer das bedeutendste Reservoir für eine hydrothermale Geothermienutzung in Mitteleuropa. Im südlichen Teil des Beckens ist auch die Erzeugung von elektrischem Strom möglich. Voraussetzung für eine wirtschaftliche Verstromung sind Temperaturen von mindestens 100 °C und Förderraten in der Größenordnung von 100 l/s und mehr.

Im Großraum München wurden seit dem Jahr 1998 bis Ende 2011 9 Anlagen zur Wärmeerzeugung in Betrieb genommen, eine Anlage erzeugt seit dem Jahr 2008 zusätzlich Strom. Eine weitere Anlage zur Wärmeerzeugung befindet sich im Probetrieb. Bei 3 Projekten waren bis Ende 2011 die Bohrungen fertig gestellt, ein Projekt befindet sich in der Bohrphase. Bei erstgenannten Projekten liegt der Schwerpunkt auf der Stromerzeugung, bei dem letztgenannten Projekt soll zusätzlich zur Fernwärmeversorgung Strom erzeugt werden.

Die Ergebnisse dieser Projekte lieferten erstmals verlässliche Modellparameter für eine Langzeitprognose der Bewirtschaftung des Malmaquifers im regionalen Maßstab. Am Beispiel der Region München sollte daher das Gesamtnutzungspotenzial des Reservoirs und das Ausmaß einer möglichen gegenseitigen thermischen oder hydraulischen Beeinflussung mehrerer Geothermieanlagen mit Hilfe einer numerischen Simulation untersucht werden. Möglichkeiten zur Erweiterung von geothermischen Bohrungsdubletten um weitere Förder- oder Injektionsbohrungen sowie die Auswirkungen neu hinzukommender Projekte sollten mit diesem Modell simuliert und bewertet werden können.

## 1.2 Projektablauf

Das Vorhaben „Geothermische Charakterisierung von Karst-Kluft-Aquiferen im Großraum München“ wurde durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) im Zeitraum vom 01.04.2008 bis zum 31.03.2011 unter dem Förderkennzeichen 0325013B gefördert. Das Vorhaben wurde vom Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU) als Verbundprojekt gemeinsam mit dem Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG) durchgeführt; die Koordination des Verbundprojekts oblag dem LIAG.

Die Projektbearbeitung erfolgte in 4 Arbeitspaketen:

- 3D-Seismik in der Umgebung der Bohrung Unterhaching Gt 2 (LIAG)
- Regionales geologisches 3D-Strukturmodell (LfU)
- Hydrogeologisches Modell (LIAG)
- Numerisches Modell (LIAG)

Im Zuge der Projektbearbeitung ergab sich die Notwendigkeit, für das spätere Modellgebiet des numerischen Modells zusätzlich ein Faziesmodell zu erarbeiten, das die Verteilung von Becken- und Schwellenfazies im Malmaquifer beschreibt. Hierfür wurde dem LfU vom BMU eine Mittelaufstockung und eine Laufzeitverlängerung bis zum 31.12.2011 bewilligt.

Die Projektbearbeitung erfolgte am LfU durch Herrn Stephan Sieblitz (01.04.2008 – 31.03.2011 und 01.06.2011 – 31.12.2011), Herrn Robert Pamer (01.06.2008 – 28.02.2010) und Frau Uta Schulz (01.07.2010 – 31.03.2011).

Folgende weitere Partner wurden vom LIAG über Unteraufträge in das Vorhaben eingebunden:

- Ludwig-Maximilians-Universität München (LMU), geophysikalisches Observatorium, zur Untersuchung mikroseismischer Ereignisse im Umfeld der Bohrung Unterhaching Gt 2
- HydroConsult GmbH, Augsburg, für die Erstellung des hydrogeologischen Modells
- Freie Universität Berlin (FU Berlin), Arbeitsbereich Hydrogeologie, für die Bewertung von hydraulischen Pumpversuchen
- Geothermie Neubrandenburg GmbH (GTN) für fazielle Untersuchungen sowie in Zusammenarbeit mit Aquasoil GmbH für die Erstellung des numerischen Modells

Die Zusammenarbeit mit dem Verbundpartner und den anderen Partnern wurde durch Arbeitstreffen und regelmäßige Austauschgespräche (Tab. 1) unterstützt. Um den wissenschaftlichen Austausch zu fördern, fanden die Austauschgespräche grundsätzlich gemeinsam mit den Bearbeitern des Verbundprojektes „Wissenschaftliche und technische Grundlagen zur strukturgeologischen und hydrogeologischen Charakterisierung tiefer geothermisch genutzter Grundwasserleiter am Beispiel des süddeutschen Molassebeckens“ (FU Berlin, Arbeitsbereich Hydrogeologie, Technische Universität München (TUM), Institut für Wasserchemie und Chemische Balneologie, sowie Erdwerk GmbH) statt.

Tab. 1: Datum, Ort und Teilnehmer der Projekttreffen; Art: ATG – Austauschgespräch mit beiden Verbundprojekten, WS – Arbeitstreffen, Workshop

Datum	Ort	Art	Teilnehmer
03.06.2008	München	ATG	LIAG, LfU, FU Berlin, TUM, Erdwerk
09.-10.07.2008	Hannover	WS	LIAG, LfU
21.11.2008	München	ATG	LIAG, LfU, FU Berlin, TUM, Erdwerk, PtJ
08.-09.04.2009	Augsburg	WS	LIAG, LfU, Hydroconsult
19.06.2009	München	ATG	LIAG, LfU, Hydroconsult, FU Berlin, TUM, Erdwerk



Datum	Ort	Art	Teilnehmer
30.08./02.09.2009	München	WS	LIAG, LfU, Hydroconsult
15.10.2009	Berlin	WS	LIAG, LfU, Hydroconsult, FU Berlin, Erdwerk
13.-14.01.2010	München	ATG	LIAG, LfU, LMU, Hydroconsult, FU Berlin, TUM, Erdwerk
28.-29.04.2010	München	WS	LIAG, LfU, Hydroconsult
23.-24.06.2010	München	ATG	LIAG, LfU, LMU, Hydroconsult, FU Berlin, TUM, Erdwerk
25.10.2010	München	WS	LIAG, LfU, Hydroconsult
11.11.2010	Hannover	WS	LIAG, GTN, Aquasoil
12.-13.01.2011	München	ATG	LIAG, LfU, LMU, Hydroconsult, GTN, Aquasoil, FU Berlin, TUM, Erdwerk
04.-05.07.2011	München	ATG	LIAG, LfU, LMU, Hydroconsult, GTN, Aquasoil, FU Berlin, TUM, Erdwerk, PtJ
10.-11.09.2011	München	WS	LIAG, LfU, Hydroconsult, GTN, Aquasoil, Erdwerk
14.-15.12.2011	München	ATG	LIAG, LfU, LMU, Hydroconsult, GTN, Aquasoil, FU Berlin, TUM, Erdwerk, PtJ

Am 24.06.2008 wurde das Verbundvorhaben im Bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie (StMWIVT) Vertretern der Bergbehörde und der Wasserwirtschaftsverwaltung sowie den Inhabern der im Untersuchungsraum gelegenen Erdwärme-Aufsuchungs- bzw. Bewilligungsfelder vorgestellt. Die Ergebnisse der 3D-Seismik wurden den Feldesinhabern am 09.12.2009 im StMWIVT präsentiert. Die Vorstellung der Entwicklung des numerischen Modells und dessen Ergebnisse erfolgte am 22.03.2012 am StMWIVT.

### 1.3 Rechtliche Vorgaben

Grundlage für die Erstellung des struktureologischen Modells sind Seismik- und Bohrungsdaten, die im Wesentlichen im Rahmen der Kohlenwasserstoffexploration seit den 50er-Jahren und in den letzten Jahren auch im Rahmen der Exploration auf Tiefengeothermie gewonnen wurden. Hinsichtlich dieser Daten besteht gemäß dem Gesetz über die Durchforschung des Reichgebiets nach nutzbaren Lagerstätten („Lagerstättengesetz“, 1934, zuletzt geändert 2001) gegenüber den Geologischen Anstalten der Länder (zuständige Anstalt im Sinne des Lagerstättengesetzes in Bayern: LfU) eine Berichtspflicht bzw. eine Pflicht zur Datenabgabe. Ziel dieses Gesetzes war und ist, den zuständigen Geologischen Landesbehörden Informationen über den tieferen Untergrund zur Verfügung zu stellen. Diese Daten kön-

nen daher von den Geologischen Diensten der Länder für eigene Auswertungen verwendet werden, eine Weitergabe an Dritte ist aber nur mit Zustimmung der Dateneigentümer oder deren Rechtsnachfolger möglich, da diese Daten i. d. R. als vertrauliche Betriebs- und Geschäftsgeheimnisse einzustufen sind (siehe hierzu DAMMERT 2007 und ALTROCK et al. 2009). Eine Weitergabe durch den Geologischen Dienst im Zuge einer Auftragsvergabe zur Auswertung – wie z. B. auch in der E&P-Industrie insbesondere bei Seismikdaten üblich – stellt keine Weitergabe an Dritte dar, da der Auftragnehmer verpflichtet wird, die Daten vertraulich zu behandeln und nicht für eigene Zwecke zu nutzen.

Aus diesen Vorgaben ergibt sich jedoch, dass auch Auswertungen, die Dritten zugänglich gemacht werden, nur einen Detaillierungsgrad aufweisen dürfen, der die Rechte der Dateneigentümer nicht verletzt. Um diesen Vorgaben gerecht zu werden, wurde daher zunächst ein detailliertes 3D- bzw. 2,5D-Strukturmodell entwickelt, das jedoch dem internen Gebrauch vorbehalten ist. Aus diesem Modell wurde ein vereinfachtes 2,5D-Modell abgeleitet, das den Bearbeitern des hydrogeologischen und numerischen Modells zur Verfügung gestellt wurde. Im Zentralbereich des Aussagegebiets des numerischen Modells konnte ein höherer Detaillierungsgrad beibehalten werden, da hier die im Rahmen des gegenständlichen Vorhabens im Auftrag des LIAG durchgeführte 3D-Seismik die wesentliche Datengrundlage darstellt.

## 1.4 Unterlagen

- ALTROCK, M., GROßE, A. & LEHNERT, W. (2009): Gutachterliche Äußerung im Auftrag des BMU „Rechtshemmnisse für die Genehmigung tiefegeothermischer Anlagen“ – Becker-Büttner-Held, München
- BACHMANN, G.H., DOHR, G. & MÜLLER, M. (1982): Exploration in a classic thrust belt and its foreland: Bavarian Alps, Germany. – *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.*, 66: 2529–2542.
- BACHMANN, G.H., MÜLLER, M. & WEGGEN, K. (1987): Evolution of the Molasse Basin. – *Tectonophysics*, 137: 77–92.
- BACHMANN, G.H. & MÜLLER, M. (1992): Sedimentary and structural evolution of the German Molasse Basin. – *Eclogae geol. Helv.*, 85/3: 519–530.
- BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, INFRASTRUKTUR, VERKEHR UND TECHNOLOGIE [Hrsg.] (2010): Bayerischer Geothermieatlas. – 93 S., München (Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie).
- DAMMERT, B. (2007): Rechtsgutachten im Auftrag des Sächsischen Staatsministeriums für Wirtschaft und Arbeit „Zu Inhalt und Reichweite der Erhebung und Nutzung von Lagerstättendaten durch Staatliche Geologische Dienste – Dr. Dammert & Steinforth, Leipzig
- LEMCKE, K. (1981): Erdgeschichtlicher Rahmen und Tektonik. – In: ANDRES, G. & WIRTH, H. [HRSG.]: Die Thermal- und Schwefelwasser-Vorkommen von Bad Gögging, Schriftenr. Bayer. L.-Amt Wasserwirtsch., 15: 55–63, München.
- MEYER, R.K.F. & SCHMIDT-KALER, H. (1996): Jura. – In: BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT [Hrsg.]: Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:500 000 (4. Aufl.): 90–111, München.

- KNOBLOCH, J. (1978): Erdöl und Erdgas. – In: UNGER, H. J.: Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:50 000, Blatt Nr. L 7740 Mühldorf am Inn: 154–165, München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- KOSCHEL, G. (1991): Geologischer Überblick - Hydrogeologische Rahmenbedingungen. – In: BAYER. LFW & LGRB [Hrsg.]: Hydrogeothermische Energiebilanz und Grundwasserhaushalt des Malmkarstes im süddeutschen Molassebecken. – Schlussbericht zum Forschungsvorhaben 03E-6240 A/B (im Auftrag des Bundesministerium für Forschung und Technologie), 12 S., München, Freiburg.
- LANGE, H. (1983): Tektonik. – In: GANSS, O.: Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:25 000, Blatt Nr. 8040 Eggstätt: 106–107, München (Bayer. Geol. L.-Amt).
- LEMCKE, K. (1976): Übertiefe Grundwässer im süddeutschen Alpenvorland. – Bull. Ver. Schweiz. Petroleum-Geol. u. -Ing., 42/103: 9–18, Basel.
- LEMCKE, K. (1988): Das bayerische Alpenvorland vor der Eiszeit. – Geologie von Bayern I, 115 S., Stuttgart (Schweizerbart).
- LEMCKE, K. & TUNN, W. (1956): Tiefenwasser in der süddeutschen Molasse und in ihrer verkarsteten Malmunterlage. – Bull. Ver. Schweiz. Petrol.-Geol. u. -Ing., 23/64: 35–56, Basel.
- STIER, P. & PRESTEL, R. (1991): Der Malmkarst im süddeutschen Molassebecken – Ein hydrogeologischer Überblick. – In: BAYER. LFW & LGRB [Hrsg.]: Hydrogeothermische Energiebilanz und Grundwasserhaushalt des Malmkarstes im süddeutschen Molassebecken. - Schlussbericht zum Forschungsvorhaben 03E-6240 A/B (im Auftrag des Bundesministerium für Forschung und Technologie), 12 S., München, Freiburg.
- UNGER, H.J. (1996b): Tektonik. Molassebecken. – In: BAYERISCHES GEOLOGISCHES LANDESAMT [Hrsg.]: Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:500 000 (4. Aufl.): 265–266, München.
- ZWEIGEL, J. (1998): Eustatic versus tectonic control on foreland basin fill (Sequence stratigraphy, subsidence analysis, stratigraphic modelling and reservoir modelling applied to the German Molasse basin). – Contributions to Sedimentary Geology, 20, Stuttgart.

## 2 Untersuchungsraum und geologischer Rahmen

### 2.1 Untersuchungsraum

Der Untersuchungsraum wurde bei Antragstellung anhand der Erdöl-Erdgas-Explorationsbohrungen Hebertshausen 1, Haimhausen 1, Haimhausen 2, Erding 1, Anzing 3, Hofolding 3 Endlhausen 1, Unterbrunn 3 und Maisach 1 abgegrenzt, da diese Bohrungen alle Purbeck bzw. Malm (Zielhorizont der geothermischen Exploration) erreicht haben. Hieraus ergab sich ein annähernd kreisrunder Untersuchungsraum mit einem Radius von ca. 30 km um das Stadtzentrum von München.

Aus modelltechnischen Gründen wurde dieser Untersuchungsraum im Zuge der Projektbearbeitung auf ein rechteckiges Arbeitsgebiet mit folgenden Eckkoordinaten und einer Fläche von knapp 3.500 km<sup>2</sup> erweitert:

RW	HW
4443369	5362790
4498120	5362789
4443367	5307638
4498120	5307637

Tab. 2:  
Eckkoordinaten des Arbeitsgebietes (Gauß-Krüger, 4. Meridianstreifen)

Das Modellgebiet für das numerische Model entspricht mit Ausnahme eines schmalen Streifens im Westen diesem Untersuchungsraum.

### 2.2 Geologischer Rahmen

#### 2.2.1 Geologischer Überblick

Die geologischen Verhältnisse im Umfeld des Untersuchungsraums stellen sich wie folgt dar (BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, INFRASTRUKTUR, VERKEHR UND TECHNOLOGIE [Hrsg.] 2010):

Der sedimentäre Aufbau des süddeutschen Molassebeckens beginnt mit Ablagerungen des Oberkarbon und Perm, die in mehreren Trögen in den paläozoischen kristallinen Untergrund eingesenkt und dadurch der vormesozoischen Abtragung entgangen sind. Über die eingerpumpte nachpermische Landoberfläche, das „Vindelizische Land“ zwischen Böhmen und dem Schwarzwald, transgrediert von Westen und Norden her sukzessive mit immer jüngeren Stufen das Mesozoikum, das mit seinen Sedimenten nach und nach das alte Festland völlig eindeckt. Dieser Prozess begann im Alpenvorland mit der Ablagerung des terrestrischen Buntsandstein am westlichen Bodensee und endete nach einem fast vollständigen Absinken des Vindelizischen Landes mit dem weit nach Oberösterreich hineinreichenden marinen Malm (LEMCKE 1981). Während dieser Absenkung bildete sich vermutlich bereits im Jura ei-

ne nordwest-südost-streichende kristalline Schwellenregion, das sogenannte „Landshut-Neuöttinger-Hoch“ (LNH), heraus. Am Ende des Malm zog sich das Meer aus dem Alpenvorland nach Süden und Südwesten in Richtung Tethys, dem Vorläufer des Mittelmeeres, zurück.

In der Unterkreide stieß das Meer kurzzeitig wieder in ein begrenztes Absenkungsgebiet östlich von München („Wasserburger Senke“) vor. Nach einer erneuten Regressionsphase erfolgte ab Ende der Unterkreide von Süden her eine langsam nach Norden und Nordosten fortschreitende Transgression, von der zunächst die Wasserburger Senke und ab dem oberen Cenoman auch der sogenannte Braunauer Trog jenseits des Landshut-Neuöttinger-Hochs betroffen wurde. Mit dem Rückzug des Meeres gegen Ende der Oberkreide setzte erneut eine flächenhafte Abtragung ein. Während der folgenden knapp 30 Mio. Jahren wurden die Kreidesedimente zum Teil wieder erodiert. Die freigelegten Malmkarbonate wurden erneut den Verkarstungsprozessen ausgesetzt, die in den seit Ende des Malm landfest gebliebenen Gebieten bereits seit fast 100 Mio. Jahren wirksam waren.

Ab dem späten Obereozän (Priabon) bildete sich im Vorland der aufsteigenden Alpen ein absinkendes Becken, das deren Abtragungsschutt aufnahm. Ein erneuter Meeresvorstoß aus Süden überflutete dieses süddeutsche Molassebecken, so dass auf der im Westen nur aus Malm, in Ostbayern auch aus Kreide und etwas Paläozoikum bestehenden ehemaligen Landoberfläche marin-brackische Sedimente der Unteren Meeresmolasse (UMM) abgelagert wurden. Im wieder aktivierten Senkungsgebiet östlich von München reichen diese bis ins unterste Miozän (Ober-Eger, früher „Aquitän“). Im Westteil des Molassebeckens entwickelte sich ab dem Oberoligozän (Unter-Eger bzw. „Chatt“) ein großes, nach Osten abfließendes Flusssystem, das die fluvioterrestrischen Ablagerungen der Unteren Süßwassermolasse (USM) hinterließ. In der brackischen Übergangszone zwischen USM und UMM, etwa im Bereich des Meridians von München, entstanden die Sedimente der Unteren Brackwassermolasse (UBM). Nach einem kurzen Meeresrückzug am Ende des Aquitan drang das Meer im oberen Untermiozän (Eggenburg bzw. „Burdigal“ und Ottnang bzw. „Helvet“) zunächst von Osten und später auch von Westen erneut in das bayerische Molassebecken vor (Obere Meeresmolasse, OMM). Nach dem endgültigen Rückzug des Meeres folgte vom oberen Untermiozän bis zum Ende der Molassesedimentation im Obermiozän nach süßbrackischen Sedimentationsbedingungen (Süß-Brackwassermolasse, SBM und Obere Brackwassermolasse, OBM) bei fortdauernder Absenkung des Beckens die fluvioterrestrische Schüttung der Oberen Süßwassermolasse (OSM), die heute den Großteil der Landoberfläche im süddeutschen Molassebecken formt.

Im Untersuchungsgebiet selbst wurden über dem kristallinen Grundgebirge Kalk-, Kalkmergel- und Kalksandsteine des Dogger erbohrt. Ablagerungen des Lias sind allenfalls im äußersten Nordwesten des Untersuchungsgebiets und nur in sehr geringer Mächtigkeit zu erwarten. Die fazielle Ausbildung des hangenden Malm im Untersuchungsraum ist nur durch Bohrungen bekannt und wird in Analogie zu Aufschlüssen in der schwäbischen und fränkischen Alb interpretiert:

Die sogenannte „Schichtfazies“ oder „Beckenfazies“ bildete sich auf einem höher gelegenen Schelfbereich. Das kalkreiche Tiefenwasser der Thetys förderte bei zunehmender Erwärmung die reichliche Bildung heller Kalke und Mergel. Diese Kalkbildung erfolgte rhythmisch und wurde von Bakterien, Blaugrünalgen und Kalkflagellaten (Coccolithen) gesteuert. Der Tonanteil der Mergel wurde von Norden her durch bodennahe Trübestrome in das Sedimentationsgebiet antransportiert (MEYER & SCHMIDT-KALER 1996). Die sogenannte „Massen-“ bzw. „Riff-Fazies“ oder „Schwellenfazies“ ist durch Schwammriffe gekennzeichnet, die sich kuppelförmig über dem Meeresboden erhoben. Sie erstreckten sich im Malm Alpha und Beta zunächst entlang submariner Schwellenzonen. Im Malm Gamma und vor allem im tieferen Malm Delta erweiterten sich diese Riffgürtel, bis im höheren Malm Delta die Schwammfazies den ganzen süddeutschen Schelf eroberte. Die Gesteine der Riff-Fazies bestehen vorwiegend aus massigen Kieselschwamm- bzw. Algenriffkalken und -dolomiten sowie aus Korallenriffschuttkalken (MEYER & SCHMIDT-KALER 1996).

Mit Beginn des Malm Epsilon verflachte das Meer und die zusammenhängende Riffplattform zerfiel in kleinere Einheiten. Zwischen den Riffen bildeten sich Wannens, in denen es zur Ablagerung von hellen Bank- und Plattenkalken kam. Südlich der Donau wuchsen die Kieselschwämme weiter und bildeten eine ausgedehnte, nur durch wenige Wannenzüge unterbrochene Ooid-Plattform. Das vermehrte Auftreten von Korallen, von Schuttkalken im Riff und von Schillbänken in der Schichtfazies belegt eine weitere Verflachung des Meeres. Das Meer zog sich schließlich im Purbeck bis in die Wasserburger Senke zurück, wo es bei zunächst noch trockenheißem Klima zu Dolomit-, Anhydrit- und Salzausscheidungen kam; später süßte das Meer auch dort aus (MEYER & SCHMIDT-KALER 1996).

Die fazielle und diagenetische Ausbildung und die daraus resultierende Verkarstungsanfälligkeit sind mit ausschlaggebend für die hydraulischen Eigenschaften des Malm. Infolge der allmählichen Hebung und der langsam fortschreitenden Kippung der Malm-Plattform nach Süden kam es nach dem Rückzug des Meeres zu einer von Süden nach Norden stratigrafisch immer tiefgreifenderen Abtragung des Malm und einer weitflächigen und tiefgründigen Verkarstung (LEMCKE 1988).

Diese Verkarstung begann im Westteil des Molassebeckens im Oberen Tithon und hielt dort über 100 Mio Jahre bis zur Transgression der Unteren Meeresmolasse im Oligozän an. Im Ostmolassebereich, vor allem im Zentrum der Wasserburger Senke, wurde die Oberflächenexposition des Malm dagegen bereits während der Unterkreide durch mehrere Meerestransgressionen unterbrochen. Eine zweite Verkarstungsphase stellte sich in dem von Kreidesedimenten überdeckten Malm erst wieder während des Alttertiärs ein. Die Massenkalken des Malm waren im südbayerischen Bereich aufgrund ihres insgesamt niedrigeren Mergelanteils besonders gut verkarstungsfähig. Daher ist dort auch die größte Verkarstungsintensität mit Verkarstungstiefen von 200 bis 300 m unter Malmoberkante zu beobachten (KOSCHEL 1991).



Mit Heraushebung des Alpenvorlandes schnitten sich die das Gebiet entwässernden Flüsse immer tiefer in die Sedimentabfolgen ein. Nachdem die Eintiefung der „Ur-Donau“ auch den Malm erreichte und deren Hauptvorflutfunktion ab dem Ende des Miozän zu unterhydrostatischen Drücken im Malm führte, konnte durch nachströmendes CO<sub>2</sub>-reiches Wassers auch im tieferen, überdeckten Malm die Verkarstung wieder einsetzen (LEMCKE & TUNN 1956, LEMCKE 1976, STIER & PRESTEL 1991).

Auf das Purbeck folgen im Südostteil des Untersuchungsraums geringmächtige Ablagerungen des Hauterive und Valangin (karbonatische Sandsteine, z.T. in Wechsellagerung mit Tonmergelstein) sowie der bis zu 25 m mächtige Gault-Sandstein. Die Oberkreide (Cenoman/Turon) ist teils sandig und teils als Kalkmergel bzw. Mergel ausgebildet. Das Purbeck nimmt in seiner Mächtigkeit nach Nordwesten hin stark ab; die Kreide keilt im Untersuchungsraum nach Nordwesten hin aus, so dass dort Tertiär unmittelbar auf Purbeck bzw. Malm zu liegen kommt.

Die Molassesedimentation setzt im Untersuchungsraum mit dem Eozän-Basissandstein ein, der jedoch nicht überall entwickelt ist. Mit dem Absinken des Schelfbereiches und dem Ausbleiben stärkerer klastischer Schüttungen entwickeln sich Algenrasen zu flachen riffartigen Kalkmassen, die vielfach durch die Wellenbewegung wieder zu Kalkschutt zerschlagen wurden. Diese Sedimente liegen im südöstlichen Untersuchungsraum heute als Lithothamnienkalk vor, nach Nordwesten zu keilt der Lithothamnienkalk aus.

Die tertiären Molassesedimente im Hangenden (Wechselfolgen aus Tonmergeln, Mergeln und Sanden) erreichen im Untersuchungsraum Mächtigkeiten von ca. 1.500 bis über 3.000 m. Sie werden von bis zu 100 m mächtigen quartären Lockergesteinen überlagert.

### 2.2.2 Tektonik

Die Auflast der von Süden aufgeschobenen alpinen Decken sowie der aus dem aufsteigenden Alpenraum geschütteten Molassesedimente führte zu einer anhaltenden Absenkung des Beckenbodens, was die Entstehung alpenparalleler Abschiebungen mit Sprungbeträgen bis zu 200 m und mehr zur Folge hatte (BACHMANN et al. 1982, BACHMANN et al. 1987). Auffällig besonders im Raum östlich von München sind bis zu mehrere Zehner Kilometer lange und häufig bogenförmige, nordfallende Abschiebungen (Antitheter), die die Fallenstrukturen für die meisten Öl- und Gasfelder des Molassebeckens bilden und lange Zeit das wesentliche Explorationsziel waren.

Die für die süddeutsche Molasse charakteristischen beckenparallelen syn- und antithetischen Abschiebungen sind auf eine flexurartige Dehnung des Vorlandbeckens zurückzuführen. Durch die nordwärtige Verlagerung des Bereichs maximaler Verbiegung des Vorlandes während des alpinen Deckenschubs wird die synsedimentäre Aktivität von Süden nach Norden jünger. Während die Verwerfungen etwa 30 km nördlich der heutigen alpinen Front nicht jünger als Unter-Eger („Chatt“) sind, reichen sie etwas weiter nördlich bereits bis ins Ober-Eger („Aquitain“) und Eggenburg („Burdigal“), ohne aber die überlagernde OMM (Ottang,

„Helvet“) zu beeinflussen. In der Westmolasse waren die Störungen 40 bis 50 km nördlich der alpinen Einheiten noch bei der Ablagerung der OSM und somit bis ins Miozän wirksam (BACHMANN & MÜLLER 1992, siehe auch Abb. 1).

Die Absenkung des Molassebeckens ist nach ZWEIGEL (1998) bis in das Untermiozän durch hohe Absenkungs- und Sedimentationsraten gekennzeichnet. Im Untersuchungsraum deutet sich für das Untermiozän eine kurze Hebungsphase (Einengungsphase?) an, bevor die Absenkung mit abnehmenden Absenkungsraten wieder einsetzt. Die Absenkung dauerte nach diesen Daten bis in das Obermiozän an, anschließend beginnt sich der Molassetrog wieder herauszuheben.

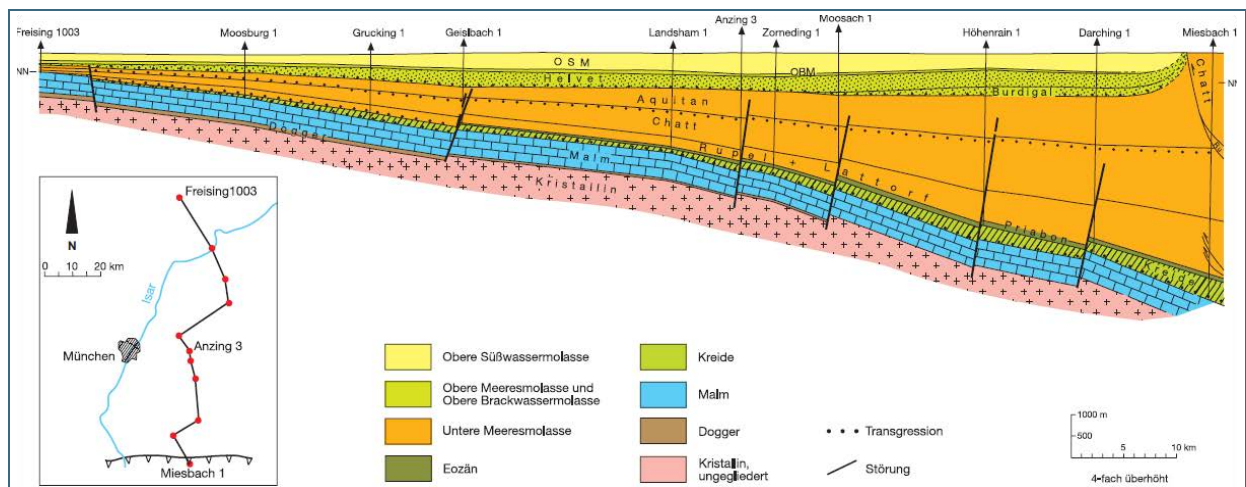


Abb. 1: Profil durch das Molassebecken zwischen Freising und Miesbach (nach LEMCKE 1988)

Der durch die Absenkung des Molassebeckens bedingten Auflockerungstektonik stehen somit die seit Beginn der alpidischen Gebirgsbildung wirksamen Einflüsse einer Einengungstektonik gegenüber. Der durch die Plattentektonik erzeugte tektonische Stress führte zu einer Bruchtektonik, die sich in parallel zu der als Widerlager wirkenden Böhmischem Masse Nordwest-Südost-streichenden Brüchen äußert. Hierbei wurden bereits im Permokarbon angelegte Lineamente reaktiviert. Wichtige Vertreter dieser meist steilstehenden Störungen sind z.B. der Donaurandbruch, der Niederbayerische Abbruch sowie der bis zumindest in das Unter-Eger wirksame Landshut-Neuöttinger Abbruch (BACHMANN et al. 1987, UNGER 1996b). Im östlichen Oberbayern überlagerte sich dieses herzynisch streichende System mit den alpenparallelen, etwa Westsüdwest-Ostnordost-streichenden Abschiebungen (KNOBLOCH 1978).

Am Südrand der Vorlandmolasse bildeten sich östlich des Inn West-Ost-streichende Falten-sättel, die auf den post-Untermiozänen Oberbau beschränkt sind (LANGE 1983). Diese Strukturen sind auf die von der alpinen Deckenstirn ausgehende Kompression des Oberbaues zurückzuführen, der im Gegensatz zum tieferen Stockwerk die Möglichkeit hatte, nach oben auszuweichen.

Als vorderste Front der alpinen Decken schließt sich im Süden an die Vorlandmolasse die von ihrem Untergrund abgescherte Faltenmolasse an.



## 3 Strukturmodell

### 3.1 Datengrundlage und -aufbereitung

Im Untersuchungsraum wurden im Rahmen der Kohlenwasserstoffexploration rund 40 Bohrungen abgeteuft, wobei allerdings nur 20 Bohrungen Purbeck oder Malm erreicht haben. Das Kristallin wurde von 4 Bohrungen erreicht. Zu allen Bohrungen liegen am LfU Schichtenverzeichnisse, Abweichdaten und oft auch Daten aus Geophonversenkmessungen (GVM) vor. Zudem wurden im Untersuchungsraum seit dem Jahr 2002 26 Geothermiebohrungen (technisch oder geologisch bedingte Ablenkungsbohrungen („sidetracks“) nicht mit eingerechnet) in den Malm niedergebracht, zu denen am LfU ebenfalls Schichtenverzeichnisse und Ablenkdaten vorliegen. Eine dieser Bohrungen hat auch das Kristallin erreicht.

Für die Ermittlung der regionalen Verteilung von Schichtmächtigkeiten wurde auf die KW-Datenbank des Landesamtes für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG) in Hannover zurückgegriffen, die im Rahmen des KW-Verbundes – soweit es Bohrungen in Bayern betrifft – auch am LfU installiert ist.

Weiterhin liegen am LfU für den Untersuchungsraum aus der Kohlenwasserstoffexploration über 300 Papierabspielungen von 2D-Seismiklinien vor, daneben sind am LfU auch einige 2D-Seismiklinien aus der Geothermie-Exploration digital (im SEG-Y-Format) verfügbar (Während der Laufzeit des Vorhabens wurden weitere Linien im Untersuchungsraum gemessen, es erfolgte jedoch zu diesen Linien bis Abschluss des Vorhabens keine Berichterstattung nach Lagerstättengesetz.). Im Osten bzw. Südosten des Untersuchungsgebiets gibt es zudem zwei 3D-Surveys aus der KW-Exploration, deren Daten am LfU ebenfalls digital vorliegen. Im zentralen Untersuchungsraum wurde im Rahmen des Verbundvorhabens im Auftrag des LIAG die 3D-Seismik Unterhaching gemessen, die vom LIAG prozessiert und interpretiert wurde (Abb. 2).

Die Papierabspielungen der Seismogramme wurden größtenteils gescannt und mittels des Programms Photoshop (Adobe) so bearbeitet, dass sie für die spätere Interpretation lagerichtig in ein 3D-Modellierungsprogramm eingelesen werden konnten. Die Datensätze der digital vorliegenden 2D- und 3D-Seismik konnten direkt eingeladen werden.

Zur Erstellung des Geschwindigkeitsmodells zur Tiefenwandlung der Seismik standen aus dem KW-Archiv des LfU für den Untersuchungsraum und dessen Umgebung 40 Berichte von Geophonversenkmessungen bzw. VSP-Messungen (VSP: *Vertical Seismic Profiling*) zur Verfügung.

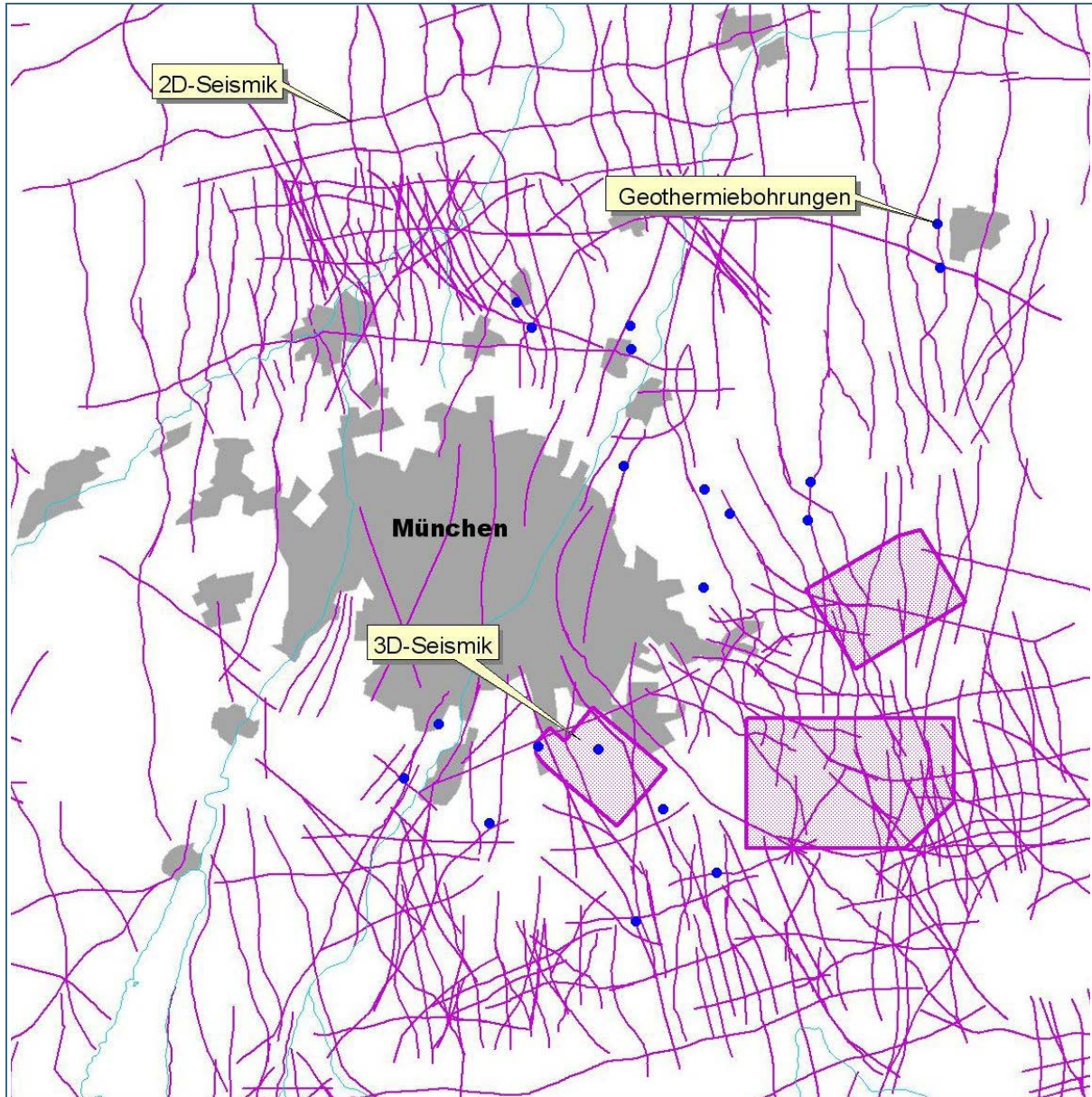


Abb. 2: Seismik und Geothermiebohrungen (Ansatzpunkte) im Untersuchungsraum

### 3.2 Auswertung und Interpretation

Die Interpretation von 2D-Seismik ist zwangsläufig mehrdeutig, da in aller Regel mehrere Freiheitsgrade für die Verbindung von auf den 2D-Linien auskartierten Strukturen bestehen. Diese Freiheitsgrade sind bei der Interpretation von 3D-Seismik wesentlich geringer, dennoch gibt es auch hier meist noch einen Interpretationsspielraum, so dass 2 Bearbeiter nicht unbedingt zu ein und demselben Ergebnis kommen müssen.

Die Auswertung und Interpretation erfolgte daher parallel durch 2 Bearbeiter mit einem 2,5D-Ansatz auf Basis eines Geographischen Informationssystems (ESRI ArcGIS) und einem 3D-Ansatz mit Hilfe eines 3D-Modellierungsprogramms (Paradigm GOCAD).

Der wesentliche Unterschied zwischen den beiden Ansätzen besteht darin, dass in dem 2,5D-Ansatz die Schichten nur als Oberflächen („fliegende Teppiche“) und die Störungen nur als Linien (Störungsspuren) dargestellt werden können, wogegen bei dem 3D-Ansatz die Störungen als Flächen (im Raum) und die interpretierten Schichten als Körper (Volumen) modelliert werden, was zukünftig z. B. auch eine Attributierung mit Materialeigenschaften (z. B. Gebirgsdurchlässigkeiten, thermische Parameter) erlaubt.

Der prominenteste Reflektor im Südostteil des Untersuchungsraums ist der Top Lithothamnienkalk. Da der Lithothamnienkalk und die Kreide im Liegenden nach Nordwesten zu auskeilen, geht dieser Reflektor nach Nordwesten zu in Top Purbeck bzw. Top Malm über. Dieser Reflektor entspricht somit in etwa der Tertiärbasis. Weitere Horizonte im Tertiär wurden nicht auskartiert.

Unterhalb des Lithothamnienkalks bzw. der Kreide ist in dem Niveau Top Purbeck bzw. Top Malm meist kein deutlicher Reflektor zu erkennen. Ein mehr oder minder deutlich ausgebildeter Reflektorhorizont findet sich erst im Übergang vom tieferen zum höheren Malm. Er wird hier als Übergang vom Malm Gamma zum Malm Epsilon interpretiert. Im Liegenden lässt sich in Teilbereichen noch ein weiterer, meist undeutlicher Reflektor auskartieren, der der Basis Malm oder Top Kristallin entsprechen dürfte. Dieser Reflektor ist aber nur durch sehr wenige Bohrungen abgesichert.

Für die Auswertung im GIS wurden an 340 Papierabspielungen von 2D-Seismogrammen bzw. von In- und Crosslines aus 3D-Surveys knapp 7.000 Punktwerte der Zweiweglaufzeiten (TWT) der Reflektoren im Bereich der Tertiärbasis abgegriffen und auf die Linien im GIS übertragen. Zusätzlich wurden Störungsversätze (in TWT) abgegriffen und lagerichtig übertragen. Der Verlauf von Störungen wurde interpoliert und im GIS unter Berücksichtigung der Störungsverläufe aus den Punktwerten ein Rasterdatensatz (TWT bis zur Tertiärbasis) erzeugt.

Für die Auswertung in GOCAD wurden die als Scan vorliegenden 285 Papierabspielungen sowie die digital vorliegende 2D- und 3D-Seismik eingelesen und der Verlauf von 3 Reflektionshorizonten (Tertiärbasis, Grenze höherer/tieferer Malm, Top Kristallin) „gepickt“.

In einem ersten Schritt zur Tiefenwandlung wurden die Laufzeiten aus den GVM- bzw. VSP-Berichten in das Programm Grapher (Golden Software) eingelesen und die Laufzeitkurven dargestellt. Da sich hieraus für den Untersuchungsraum erhebliche Laufzeitunterschiede ablesen ließen, wurde in einem zweiten Schritt aus den Laufzeiten aus den GVM- bzw. VSP-Berichten und aus den in den Papierabspielungen angegebenen Stapelgeschwindigkeiten in GOCAD ein Geschwindigkeitsmodell für den Untersuchungsraum erstellt, wobei hierfür aus letzteren zunächst Intervallgeschwindigkeiten berechnet werden mussten. Mit diesem Geschwindigkeitsmodell wurde eine Tiefenwandlung der TWT-Rasterdaten bzw. der in GOCAD in der Zeit „gepickten“ Horizonte durchgeführt, anschließend erfolgte ein Abgleich der errechneten Tiefenlage dieses Rasterdatensatzes bzw. dieser Oberflächen mit den Teufenan-

gaben aus Schichtenverzeichnissen von Bohrungen und ggf. eine Anpassung des Geschwindigkeitsmodells.

Auf Basis der Angaben in den Schichtenverzeichnissen von Bohrungen im und um den Untersuchungsraum wurden mittels dem Programm Surfer (Golden Software) Tiefenlinienpläne (ohne Berücksichtigung der Störungsversätze) für folgende Oberflächen berechnet:

- Top Helle Mergelkalke
- Top Lithothamnienkalk (etwa Tertiärbasis)
- Top Purbeck (Kreidebasis)
- Top Malm
- Top Malm gamma
- Basis Malm
- Basis Dogger bzw. Top Kristallin

Aus dem Verschnitt der Tiefenlinienpläne Top Lithothamnienkalk mit Top Purbeck und Top Purbeck mit Top Malm wurden die Ausbisslinien für die Lithothamnienkalk- bzw. Purbeckverbreitung errechnet.

Ebenfalls auf Basis der Angaben in den Schichtenverzeichnissen von Bohrungen im und um den Untersuchungsraum wurden mittels dem Programm Surfer interpolierte Mächtigkeitsverteilungen für folgende Schichtpakete berechnet:

- Top Lithothamnienkalk bis Top Purbeck/Malm
- Top Purbeck bis Top Malm
- Top Purbeck/Malm bis Top Malm gamma
- Top Purbeck/Malm bis Basis Malm
- Top Purbeck/Malm bis Top Kristallin

Die mit dem GIS-Ansatz ermittelte Oberfläche Lithothamnienkalk/Purbeck/Malm wurde mit diesen Mächtigkeitsverteilungen verrechnet und damit im GIS – unter Berücksichtigung der hydrogeologischen Modellvorstellungen – folgende zusätzliche Oberflächen erzeugt:

- Top Purbeck/Malm
- Top Malm gamma
- Basis Dogger bzw. Top Kristallin

In dem GOCAD-Modell wurde die Oberfläche Lithothamnienkalk/Purbeck/Malm ebenfalls mit Hilfe der aus Bohrungsdaten ermittelten Mächtigkeitsverteilung in die Oberflächen Top Lithothamnienkalk, Top Purbeck und Top Malm „aufgesplittet“.

Die vom LIAG im Datenvolumen der 3D-Seismik Unterhaching interpretierten und tiefengewandelten Horizonte wurden dem LfU in Form eines txt-Files als xyz-Koordinaten in einem Raster („Bin“) von 15 m\*15 m übergeben und in das 2,5D-Modell implementiert. Die Abweichungen, die an den Rändern festzustellen waren, sind zum einen möglicherweise darauf zurückzuführen, dass von den jeweiligen Bearbeitern unterschiedliche Phasen als Lithothamnienkalk-Reflektor gepickt worden sind. Zum anderen werden diese Abweichungen auf die unterschiedlichen Geschwindigkeitsmodelle für die Tiefenwandlung (regionales bzw.



lokales Geschwindigkeitsmodell) bzw. auf Randeffekte der 3D-Seismik zurückgeführt. Die Tiefenlagen der Horizonte waren in Bohrungsnähe identisch, der Randabgleich wurde mittels eines Interpolationsverfahrens durchgeführt.

### 3.3 Ergebnisse

Während der Bearbeitung wurden die Interpretationsergebnisse des 3D-Modells und des 2,5D-Modells mehrfach miteinander abgeglichen. Die Hauptbruchstrukturen mit markanten Versätzen wurden bei beiden Bearbeitungsansätzen in ähnlicher Form auskartiert, größere Unterschiede ergaben sich bei den Bruchstrukturen mit nur geringen Versätzen. Hier wurde bei der Bearbeitung mit GOCAD eine deutlich höhere Anzahl solcher Strukturen auskartiert, was mit darauf zurückzuführen ist, dass in GOCAD auch Attributanalysen (z. B. der Kohärenz) möglich sind. Durch die Kombination von Bilddaten (Scans) und digitalen Daten (SEGY-Daten) mit der Möglichkeit zur Attributanalyse lassen sich offensichtlich mehr Brüche mit geringen Versätzen erkennen bzw. vermuten, als dies bei der Auswertung bzw. Interpretation von analogen Abspielungen möglich ist. Bei der Konvertierung der kartierten Horizonte von der Zeit in die Tiefe waren nur marginale Unterschiede festzustellen, da die zu „pickenenden“ Phasen der einzelnen Reflexionshorizonte zwischen den Bearbeitern abgestimmt wurden und der Tiefenkonvertierung ein und dasselbe Geschwindigkeitsmodell zu Grunde lag.

#### 3.3.1 3D-Strukturmodell

Das 3D-Strukturmodell beinhaltet folgende hydrostratigraphische Einheiten, die als 3D-Volumen modelliert sind (siehe Abb. 3):

- Lithothamnienkalk, Eozän im Liegenden und Kreide
- Purbeck
- Höherer Malm (Malm delta bis zeta)
- Tieferer Malm (Malm alpha bis gamma)
- Kristallin (bis 2.000 m unter Modelloberfläche)

Die Schichten fallen generell nach Südsüdosten ein, die beiden höchsten hydrostratigraphischen Einheiten des Modells (Lithothamnienkalk und Kreide sowie Purbeck) keilen nach Nordwesten zu aus.

Das Bruchmuster im Strukturmodell weist mit Ausnahme der Randbereiche einen hohen Detaillierungsgrad auf, die Störungsflächen sind mit ihrem interpretierten Einfallen implementiert. Die generelle Streichrichtung der Störungszonen ist SW-NE bis WSW-ENE. Sie sind als trogparallele, synthetische oder antithetische Dehnungsstrukturen zu interpretieren, die vermutlich später teilweise transpressiv überprägt wurden. Die Sprunghöhen betragen bis über 200 m.

Das 3D-Strukturmodell ist aufgrund des hohen Detaillierungsgrades nur für den internen Dienstgebrauch freigegeben (siehe hierzu Kap. 1.3).

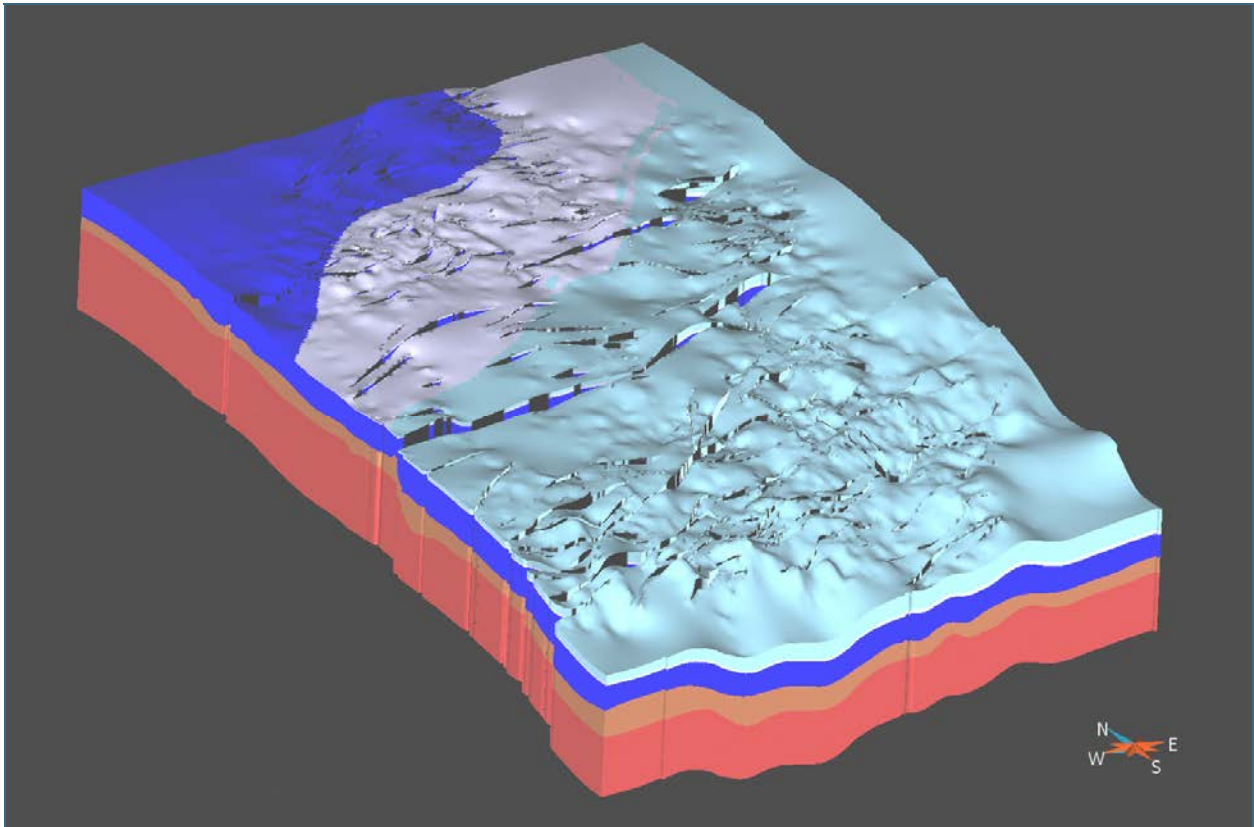


Abb. 3: Ausschnitt aus dem 3D-Strukturmodell (hydrostratigraphische Einheiten: rot: Kristallin, orange: tieferer Malm, blau: höherer Malm, weiß: Purbeck, türkis: UK Kreide bis OK Lithothamnienkalk)

### 3.3.2 2,5D-Strukturmodell

Das 2,5D-Strukturmodell beinhaltet folgende hydrostratigraphische Einheiten, deren Oberflächen als ArcGIS-Shape-files modelliert sind („fliegende Teppiche“):

- Top Lithothamnienkalk
- Top Purbeck/Malm
- Top Tieferer Malm (Top Malm gamma)
- Top Kristallin

Die Störungen wurden auf den Oberflächen Top Lithothamnienkalk (im Südosten des Arbeitsgebiets) bzw. Top Purbeck/Malm (im Nordwesten des Arbeitsgebiets) auskartiert und mit identischen Versatzbeträgen senkrecht nach unten auf die tieferliegenden Horizonte projiziert. Dieses Vorgehen erscheint nach den Ergebnissen der 3D-Seismik Unterhaching zulässig, da dort alle größeren Störungen ein steiles bis sehr steiles Einfallen zeigen und die Versätze an Top Lithothamnienkalk und an der Malmbasis in ähnlicher Größenordnung liegen.

Das 2,5D-Strukturmodell ist aufgrund seines immer noch vergleichsweise hohen Detaillierungsgrades ebenfalls nur für den internen Dienstgebrauch freigegeben (siehe hierzu Kap. 1.3).

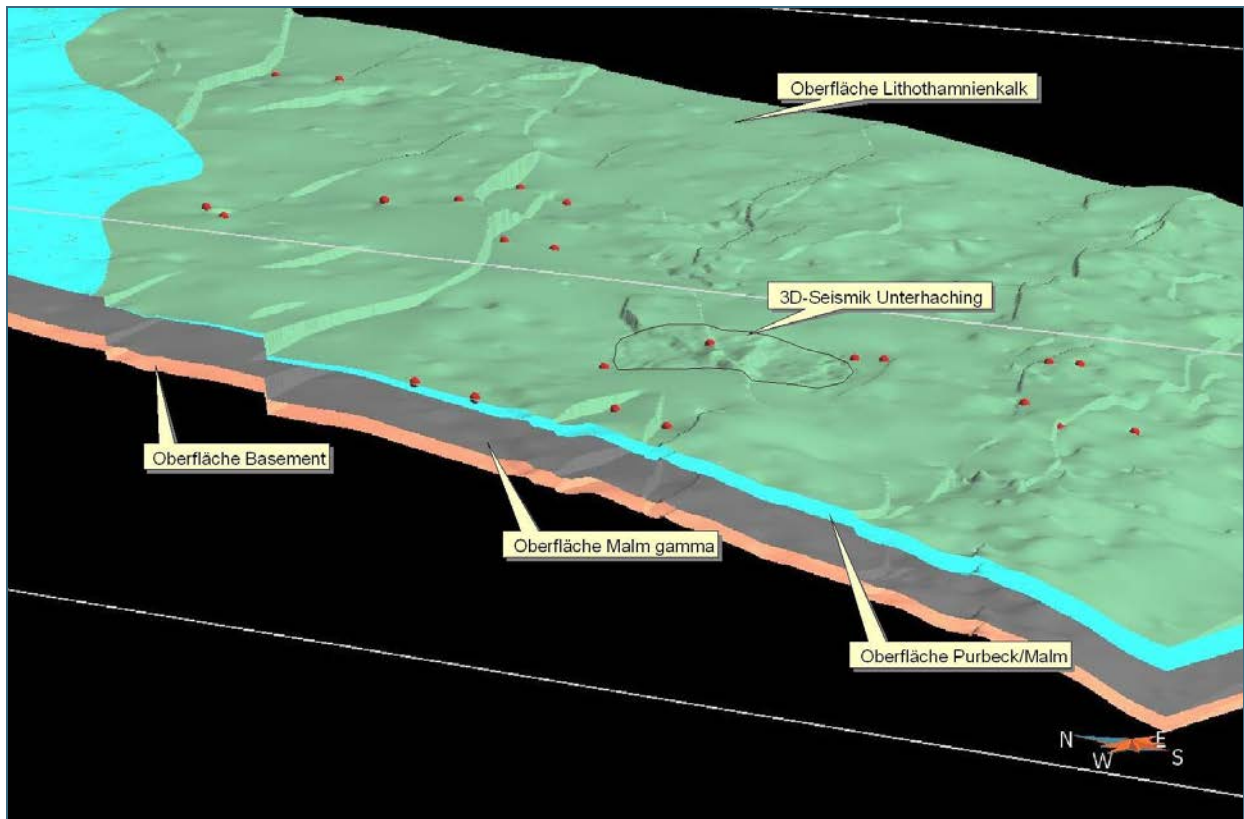


Abb. 4: Die hydrostratigraphischen Einheiten im 2,5D-Strukturmodell („fliegende Teppiche“)

### 3.3.3 Vereinfachtes 2,5D-Strukturmodell

Aus dem 2,5D-Strukturmodell wurde ein vereinfachtes 2,5D-Strukturmodell abgeleitet, das folgende hydrostratigraphische Einheiten beinhaltet, deren Oberflächen ebenfalls als ArcGIS-Shape-files modelliert sind:

- Top Lithothamnienkalk
- Top Purbeck/Malm
- Top Tieferer Malm (Top Malm gamma)
- Top Kristallin

Das Störungsinventar wurde in diesem Strukturmodell auf die wesentlichen Strukturen reduziert und deren Verlauf generalisiert. Als wesentliche Strukturelemente wurden Störungen mit höheren Versatzbeträgen bzw. mit Bohrungen angefahrte Störungen eingestuft. Dieses Strukturmodell weist somit einen Detaillierungsgrad auf, der zum einen eine Weitergabe erlaubt und der zum anderen in einem numerischen Großraummodell noch abgebildet werden kann. Die Oberflächen in Form von ArcGIS-Shape-files können zudem direkt in das für die numerische Simulation verwendete Programmpaket FEFLOW (DHI-WASY) eingeladen werden.

Dieses Strukturmodell bzw. diese Oberflächen (siehe Anlagen 3 bis 6) steht bzw. stehen auch für zukünftige numerische (Detail-)Modellierungen von einzelnen Geothermieprojekten bzw. -anlagen als Rahmen zur Verfügung, in den die jeweiligen Detail-Strukturmodelle einzupassen wären.

## 4 Faziesmodell

Bei Formulierung des Projektantrages für das Verbundvorhaben wurde davon ausgegangen, dass Strukturen wie teilweise verkarstete Störungszonen, Kluftzonen und Auflockerungsbereiche die Durchlässigkeitsverteilung bzw. die Zuflüsse im Malm entscheidend beeinflussen und daher im numerischen Modell insbesondere darauf zurückzuführende Durchlässigkeitskontraste zu berücksichtigen sind. Im Zuge der Auswertung von Pumpversuchen ergaben sich jedoch nur in einem Fall Hinweise auf ein lineares bzw. bilineares Anstromverhalten, in der Regel wurde ein radiales Anstromverhalten beobachtet. Dies bedeutet, dass kein signifikanter Permeabilitätskontrast zwischen Störung und Speicher (Reservoir) gegeben ist und die Störung lediglich zu einer verbesserten Bohrlochanbindung beiträgt. Hingegen hat sich bei dem Versuch, Zuflussbereiche in den Bohrungen abzugrenzen, gezeigt, dass höhere Zuflüsse vielfach in bestimmten Faziesbereichen (Massen- bzw. Riff- oder Schwellenfazies) – oft in Verbindung mit diagenetisch überprägten Bereichen (dolomitisierte Bereiche) – auftreten. Die Auswertung von Beobachtungsmessungen während Pump- oder Zirkulationsversuchen in Bohrungen im geplanten Aussagegebiet des numerischen Modells ergab zudem, dass sich Hin- und Rückreaktion zwischen einigen Bohrungen merklich unterscheiden. Dieses Verhalten kann nicht mit unterschiedlichen Durchlässigkeiten von Störungs- oder Kluftzonen und Matrix erklärt werden, sondern ist aller Wahrscheinlichkeit nach auf Durchlässigkeitsunterschiede in der Matrix zurückzuführen, die wiederum in faziellen und/oder diagenetischen Unterschieden begründet sein dürften.

Nachdem in der Vergangenheit den geologischen Strukturen, d. h. markanten Störungs- und Kluftzonen, eine Schlüsselrolle für die Erschließung des Malmaquifers zugeschrieben wurde, wird nun der lithofaziellen Ausprägung ein zumindest gleichwertiger, wenn nicht sogar größerer Einfluss auf die Gebirgsdurchlässigkeit zugesprochen. Die im Rahmen des Vorhabens „Wissenschaftliche und technische Grundlagen zur strukturgeologischen und hydrogeologischen Charakterisierung tiefer geothermisch genutzter Grundwasserleiter am Beispiel des süddeutschen Molassebeckens“ (FU Berlin, Arbeitsbereich Hydrogeologie, Technische Universität München (TUM), Institut für Wasserchemie und Chemische Balneologie, sowie Erdwerk GmbH) erarbeiteten Befunde stützen obige Aussagen. In diesem Projekt konnte auch gezeigt werden, dass sich anhand der „seismischen Signatur“ in 2D-Seismik-Abspielungen Bereiche abgrenzen lassen, die als Bereiche mit unterschiedlicher Fazies interpretiert werden können. In Kombination mit den Bohrungsinformationen (z.B. aus Image-Logs) und den Ergebnissen der Pumpversuchsauswertungen (z.B. hinsichtlich hydraulischer Berandungen) konnte für das Nahfeld einer Dublette ein stimmiges hydrogeologisches Modell erarbeitet werden.

Es ergab sich daher die Notwendigkeit, im Untersuchungsraum Bereiche mit „Schicht“- bzw. „Beckenfazies“-Ausprägung auszuweisen, um diese als Bereiche mit mutmaßlich geringerer Gebirgsdurchlässigkeit in das numerische Modell implementieren zu können. Für dieses zusätzliche Arbeitspaket wurden seitens des Zuwendungsgebers eine Mittelaufstockung und eine Laufzeitverlängerung des Projekts bis zum 31.12.2011 bewilligt.



#### 4.1 Datengrundlage und -aufbereitung

Datengrundlage waren die Scans der am LfU für den Untersuchungsraum vorliegenden Papierabspielungen von 2D-Seismiklinien sowie die am LfU digital vorliegende 2D- und 3D-Seismik.

#### 4.2 Auswertung und Interpretation

In einem ersten Ansatz wurde von den Projektbearbeitern/innen versucht, auf Basis der Papierabspielungen bzw. der gescannten Papierabspielungen im GIS bzw. in GOCAD unabhängig voneinander Bereiche im Malm mit deutlich erkennbaren Reflexionsbändern, „onlap“-Strukturen etc. abzugrenzen. Diese „seismische Signatur“ wird als Hinweis auf eine geschichtete Fazies gewertet, wie sie in den Becken zwischen den Riffzügen bzw. der Massenfazies zu erwarten ist. Die Ergebnisse zeigten eine vergleichsweise gute Übereinstimmung, so dass die ermittelten Flächen miteinander verschnitten und die verbleibenden Restflächen für die weitere Bearbeitung verwendet wurden.

In einem zweiten Schritt wurde die gesamte für den Untersuchungsraum am LfU digital vorliegende Seismik im Hinblick auf die oben beschriebene „seismische Signatur“ ausgewertet, wobei diese Auswertung zum einen direkt in GOCAD erfolgte.

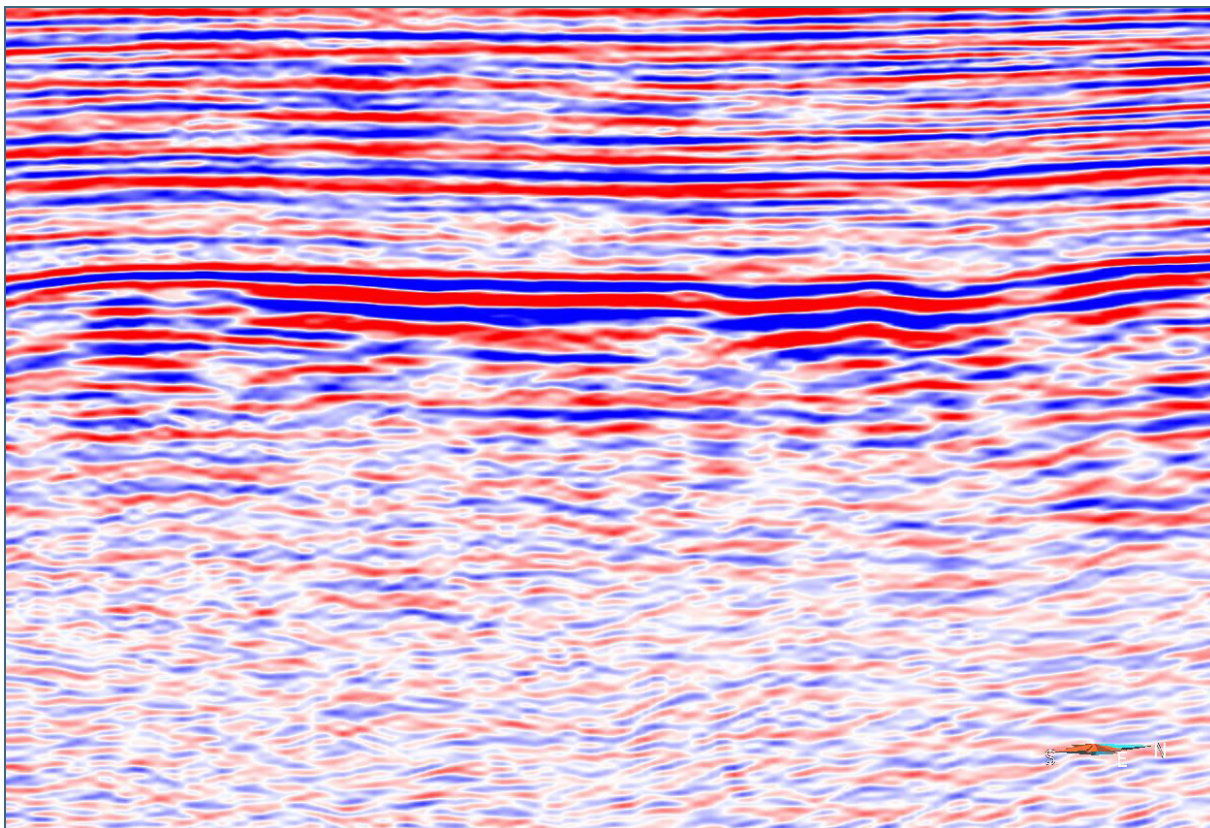


Abb. 5: Seismische Signatur, die als Beckenfazies interpretiert wird (Bildmitte, unattributierte Abspielung)

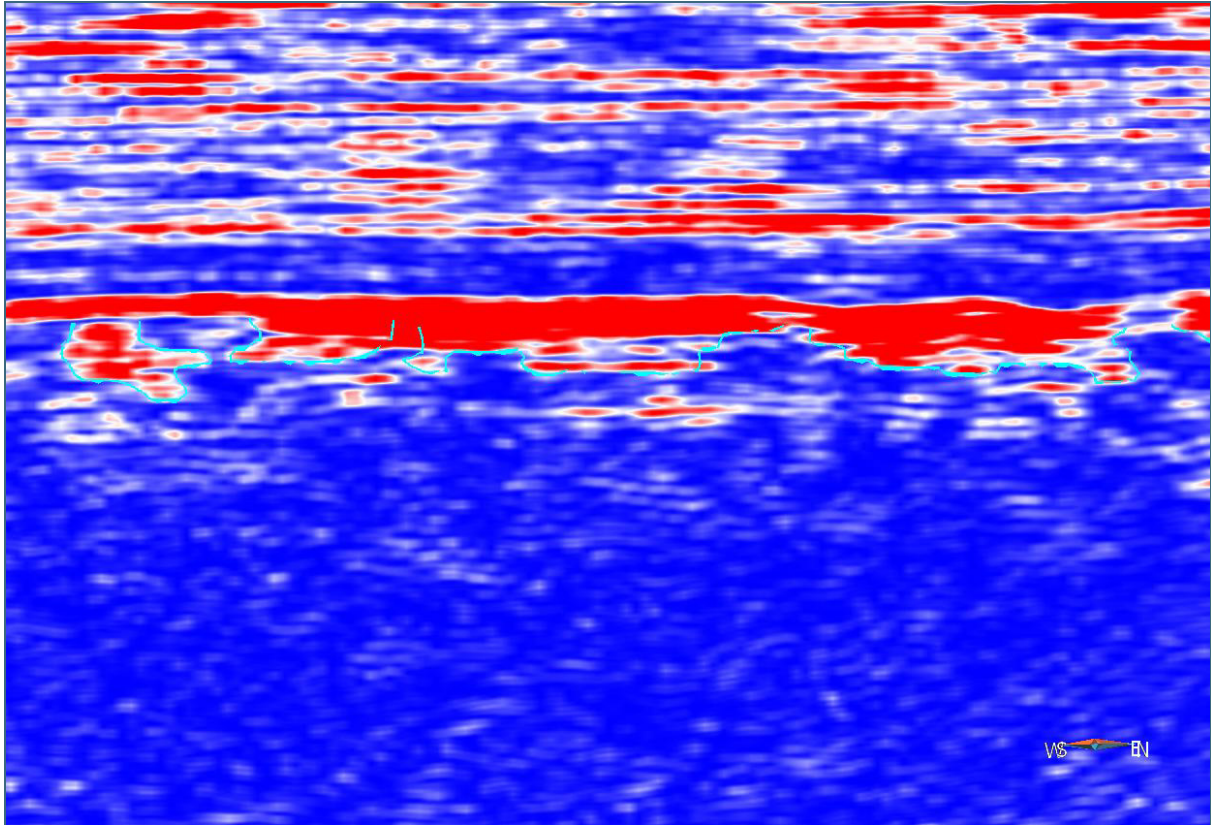


Abb. 6: „Picken“ einer mutmaßlichen Beckenfazies-Unterkante in GOCAD (attributierte 2D-Seismik)

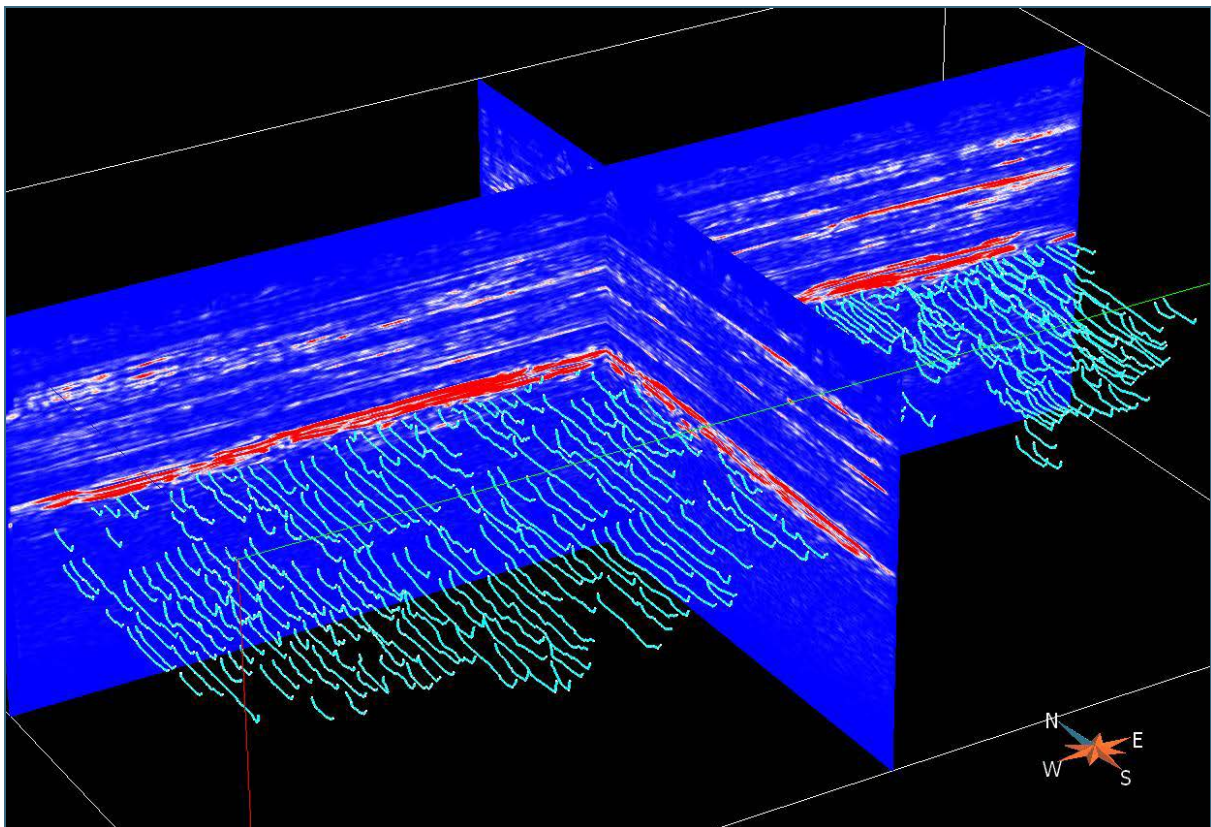


Abb. 7: „Picken“ von mutmaßlichen Beckenfazies-Unterkanten in GOCAD (attributierte 3D-Seismik)



Zum anderen wurden die Daten mittels der „Open Source“ Seismik-Interpretations-Software OpendTect attribuiert und zur Auswertung wiederum in GOCAD importiert. Es wurden verschiedene Attribute getestet, wobei es sich erwies, dass mit dem Attribut „Energy“ die auf den Testprofilen visuell abgegrenzten Bereiche mit den oben beschriebenen „seismischen Signaturen“ am besten reproduziert werden konnten (siehe Abb. 5 bis 7).

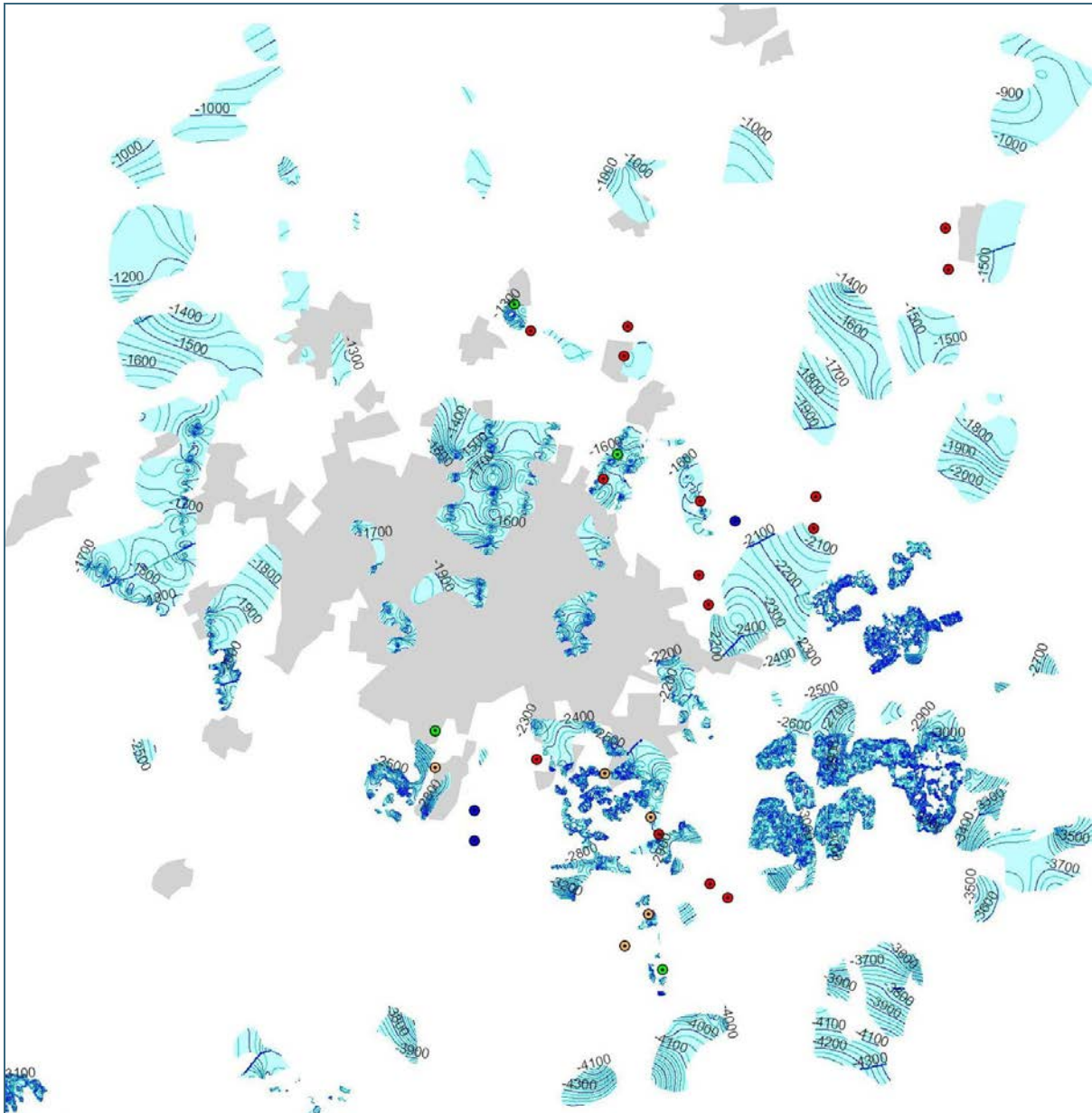


Abb. 8: Tiefenlinien der Beckenfazies-Unterkanten (in m unter NN)

Die mutmaßlichen Beckenuntergrenzen wurden gepickt und die Linien (mit Stützpunkten als xyz-Koordinaten mit z-Werten in TWT) ausgelesen. Dieser Datensatz wurde mit den im ersten Ansatz aus der analog vorliegenden Seismik ermittelten Punktdatensatz vereinigt und daraus über das Geschwindigkeitsmodell ein Datensatz mit z-Werten in m erzeugt. Der Datensatz wurde anschließend ins GIS eingelesen, in einen Rasterdatensatz umgewandelt und zwei Plausibilitätsprüfungen unterzogen. Hier wurde abgeprüft, dass die errechneten Be-

ckenunterkanten zum einen nicht über die errechnete Purbeck- bzw. Malmoberfläche hinauf reichen und zum anderen nicht unter die Oberkante des tieferen Malm hinunter reichen. In einem letzten Schritt wurde der Rasterdatensatz in ein Linien-Shapefile (Tiefenlinien der Beckenfaziesunterkanten, siehe Abb. 8) und in ein Punkt-Shapefile (Mächtigkeit der Beckenfazies) umgewandelt und in dieser Form den Bearbeitern des numerischen Modells übergeben.

### 4.3 Ergebnisse

Bei der Bewertung der Ergebnisse ist zu berücksichtigen, dass diese je nach Datengrundlage (analog oder digital, 2D- oder 3D-Seismik) in unterschiedlichem Detaillierungsgrad vorliegen. Grundsätzlich zeigen die Ergebnisse jedoch eine sehr kleinräumige Verteilung der möglichen Beckenfazies, wie sie z. B. auch aus dem nördlich der Donau aufgeschlossenen Malm bekannt ist. Der Durchmesser der mutmaßlichen Beckenstrukturen erreicht maximal einige Kilometer, allerdings scheinen einige dieser Becken über „Kanäle“ miteinander verbunden zu sein. Bezogen auf die Gesamtfläche des Untersuchungsraums dominiert jedoch die Schwellen- bzw. Massenfazies, weshalb hier auch von einem zusammenhängenden Grundwasserleiter im Malm ausgegangen werden kann. Wie aber die Ergebnisse von Pumpversuchsauswertungen oder die Ergebnisse der numerischen Modellierung belegen, können Beckenfaziesbereiche als „hydraulische Berandung“ oder als Bereiche mit abschirmender Wirkung bezüglich hydraulischer Interaktionen in Erscheinung treten.

## 5 Ausblick

Im Rahmen des Verbundvorhabens „Geothermie Großraum München“ wurde vom Bayerischen Landesamt für Umwelt als Grundlage für eine numerische thermisch-hydraulische Modellierung ein 3D- bzw. 2,5D-Strukturmodell erarbeitet. Dieses Strukturmodell steht in vereinfachter Form auch Dritten zur Verfügung und stellt damit einen Rahmen für zukünftige Detailmodellierungen dar. Des Weiteren wurde versucht, im Großraum München unterschiedliche Faziesbereiche abzugrenzen, wobei abzuwarten bleibt, inwieweit diese durch zukünftige Bohrerergebnisse bestätigt werden können.

Die Forschungsergebnisse sollen und können dazu beitragen, das Fündigkeitsrisiko (im weiteren Sinne) zu vermindern und eine nachhaltige Nutzung der tiefen Geothermie im Süddeutschen Molassebecken sicherzustellen. Neue Geothermieprojekte werden zu zunehmenden gegenseitigen Beeinflussungen der Bohrungen untereinander führen, was zukünftig eine verstärkte Kommunikation zwischen Betreibern und Planungsbüros sowohl untereinander als auch mit den Fach- und Genehmigungsbehörden erfordern wird. Betreiber und Planungsbüros sowie Fach- und Genehmigungsbehörden sind gefordert, Auswirkungen aus absehbar konkurrierenden Nutzungen möglichst gemeinsam zu analysieren, zu bewerten und einen entsprechenden Maßnahmenkatalog zu erarbeiten. Die Erstellung feldesübergreifender Gebirgsmodelle ist hierfür eine wesentliche Voraussetzung.

Um hierfür breitere geowissenschaftliche Grundlagen zu schaffen, wäre es wünschenswert, die Tradition der bisherigen Austauschgespräche fortzusetzen. Diese Gespräche mit dem vom BMU zeitgleich geförderten Verbundvorhaben „Wissenschaftliche und technische Grundlagen zur strukturgeologischen und hydrogeologischen Charakterisierung tiefer geothermisch genutzter Grundwasserleiter am Beispiel des Süddeutschen Molassebeckens“ (FU Berlin, Erdwerk, TU München) fanden während der Laufzeit des Projekts regelmäßig statt und waren äußerst fruchtbar. Sie sollten in geeigneter Weise in offener Form fortgeführt werden, um eine Plattform für die Diskussion aktueller Aspekte zu bieten und die Nutzung der tiefen Geothermie im Süddeutschen Molassebecken wissenschaftlich zu begleiten.

Darüber hinaus ist angesichts möglicher zukünftiger Nutzungskonkurrenzen im tieferen Untergrund die Notwendigkeit absehbar, für das gesamte Molassebecken ein länderübergreifendes, konsistentes 3D-Strukturmodell zu entwickeln.

## 6 Publikationen

Im Folgenden werden die Abschlussberichte des Verbundpartners (LIAG) und der Auftragnehmer sowie alle im Rahmen des Projektes (meist zusammen mit den Projektpartnern) erstellten Publikationen, Vorträge und Poster aufgelistet. Die benutzte Literatur findet sich unter Kap. 1.4 Unterlagen.

### 6.1 Abschlussberichte

Die Berichte der Auftragnehmer sind als vertraulich eingestuft, da sie Betriebsdaten von Firmen bzw. nicht freigegebene Daten von Dritten beinhalten.

BARTELS, J. & WENDEROTH, F. (2011): Erstellung einer numerischen thermisch-hydraulischen 3D-Modellierung für den Großraum München. – Dokumentation, 101 S., 9 Anl., 30.11.2011; Neubrandenburg (GTN) und Berlin (Aquasoil).

BIRNER, J. & SCHNEIDER, M. (2011): Wissenschaftliche Auswertung und Interpretation hydraulischer Daten aus Tiefbohrungen im süddeutschen Molassebecken. – Abschlussbericht, 23 S., 31.10.2011; Berlin (FU).

HYDROCONSULT GMBH (2011): Geothermische Charakterisierung von karstig-klüftigen Aquiferen im Großraum München, Teil 3: Hydrogeologisches Modell, Schlussbericht. – 60 S., 6 Anl., 22.11.2011; Augsburg.

SCHULZ, R. & THOMAS, R. (HRSG.) mit Beiträgen von DUSSEL, M., LÜSCHEN, E. ET. AL. (2012): Geothermische Charakterisierung von karstig-klüftigen Aquiferen im Großraum München - Endbericht. – LIAG-Bericht, Archiv-Nr. 130 392, 98 S.; Hannover.

MEGIES, T. & WASSERMANN, J. (2011): Mikroseismizität Großraum München. – Endbericht, 47 S., 25.11. 2011; München (LMU).

WOLFGRAMM, M. (2011): Fazielle petrographische Untersuchungen an Spülproben von Bohrungen südlich von München. – Dokumentation, 126 S., 4 Anl., 26.08.2011; Neubrandenburg (GTN).

### 6.2 Vorträge und Poster

#### 6.2.1 Vortragsveröffentlichungen (Proceedings)

DUSSEL, M., LÜSCHEN, E., THOMAS, R., AGEMAR, T., FRITZER, T., SIEBLITZ, S., SCHULZ, U., HUBER, B., BARTELS, J., WOLFGRAMM, M., WENDEROTH, F. & SCHULZ, R. (2011): Entwicklung einer thermisch-hydraulischen Grundwassermodellierung des Malm im Großraum München. - Der Geothermiekongress 2011, Bochum, 15.–17. Nov. 2011, Tagungsband-CD, F9.3: 11 S.; Geothermische Vereinigung.

DUSSEL, M., LÜSCHEN, E., THOMAS, R., SCHULZ, R., FRITZER, T. & HUBER, B. (2010): 3D-seismics to detect preferential groundwater pathways and reservoirs in the deep buried geothermal carbonatic Upper Jurassic aquifer in Greater Munich (South Germany). – XXXVIII IAH Congress: Groundwater Quality Sustainability, Krakow, 12.–17. September 2010: 1687–1692; International Association of Hydrogeologists.

### 6.2.2 Vorträge

SCHULZ, R., FRITZER, T. & THOMAS, R. (2008): Geothermische Charakterisierung von karstig-klüftigen Aquiferen im Großraum München. – Informationsveranstaltung des Bay. StMWIVT, 24.07.2008; München.

PAMER, R. (2009): Combining GIS with 3D for geological subsurface modelling on the basis of sparse data sets. - 6. EUREGEO, 11.06.2009, München.

BARTELS, J., WENDEROTH, F., FRITZER, T., HUBER, B., DUSSEL, M., LÜSCHEN, E., THOMAS, R. & SCHULZ, R. (2012): A new simulation model to evaluate interaction between neighbouring hydro-geothermal installations developing the deep Malm aquifer in the Munich region. – EGU2012-9157

### 6.2.3 Poster

PAMER, R. & SIEBLITZ, S. (2009): Subsurface modelling using scanned 2D-seismics. - 6. EUREGEO, 10.06.2009, München.

DUSSEL, M., LÜSCHEN, E., THOMAS, R., AGEMAR, T., FRITZER, T., SIEBLITZ, S., SCHULZ, U., HUBER, B., BARTELS, J., WOLFGRAMM, M., WENDEROTH, F., SCHULZ, R. (2011): Entwicklung einer thermisch-hydraulischen Grundwassermodellierung des Malm im Großraum München. LIAG-Austauschsitzung, 02.–03.11.2011; Hannover.

## 7 Zusammenfassung

Der Thermalwasser führende Malm (Oberer Jura) des süddeutschen und oberösterreichischen Molassebeckens ist als Karst-Kluft-Aquifer das bedeutendste Reservoir für eine hydrothermale Geothermienutzung in Mitteleuropa. Im südlichen Teil des Beckens ist auch die Erzeugung von elektrischem Strom möglich. Vierzehn in Betrieb oder in der Bau- bzw. Bohrphase befindliche Projekte (Stand Ende 2011) belegen insbesondere für den Großraum München ein großes, für eine geothermische Wärmeengewinnung und Stromerzeugung wirtschaftlich nutzbares Potenzial.

Die Ergebnisse dieser Projekte lieferten erstmals verlässliche Modellparameter für eine Langzeitprognose der Bewirtschaftung des Malmaquifers im regionalen Maßstab. Am Beispiel der Region München sollte daher in dem Verbundvorhaben „Geothermische Charakterisierung von Karst-Kluft-Aquiferen im Großraum München“ (LIAG, Hannover und Bayerisches Landesamt für Umwelt, Augsburg) das Gesamtnutzungspotenzial des Reservoirs und das Ausmaß einer möglichen gegenseitigen thermischen oder hydraulischen Beeinflussung mehrerer Geothermieanlagen mit Hilfe einer numerischen Simulation untersucht werden. Möglichkeiten zur Erweiterung von geothermischen Bohrungsdubletten um weitere Förder- oder Injektionsbohrungen sowie die Auswirkungen neu hinzukommender Projekte sollten mit diesem Modell simuliert und bewertet werden können.

Eine wesentliche Grundlage dieses numerischen Modells stellt ein vereinfachtes 2,5D-Strukturmodell dar, das aus einem detaillierten 3D- bzw. 2,5D-Strukturmodell abgeleitet wurde. Eine Notwendigkeit zur Vereinfachung ergibt sich zum einen aus Gründen des Datenschutzes, da die vom Bayerischen Landesamt für Umwelt ausgewerteten Seismikdaten als Betriebs- und Geschäftsgeheimnisse zu bewerten sind und diese somit einem Vertrauensschutz unterliegen. Zum anderen war diese Vereinfachung erforderlich, um das Strukturmodell im numerischen Modell adäquat abbilden zu können.

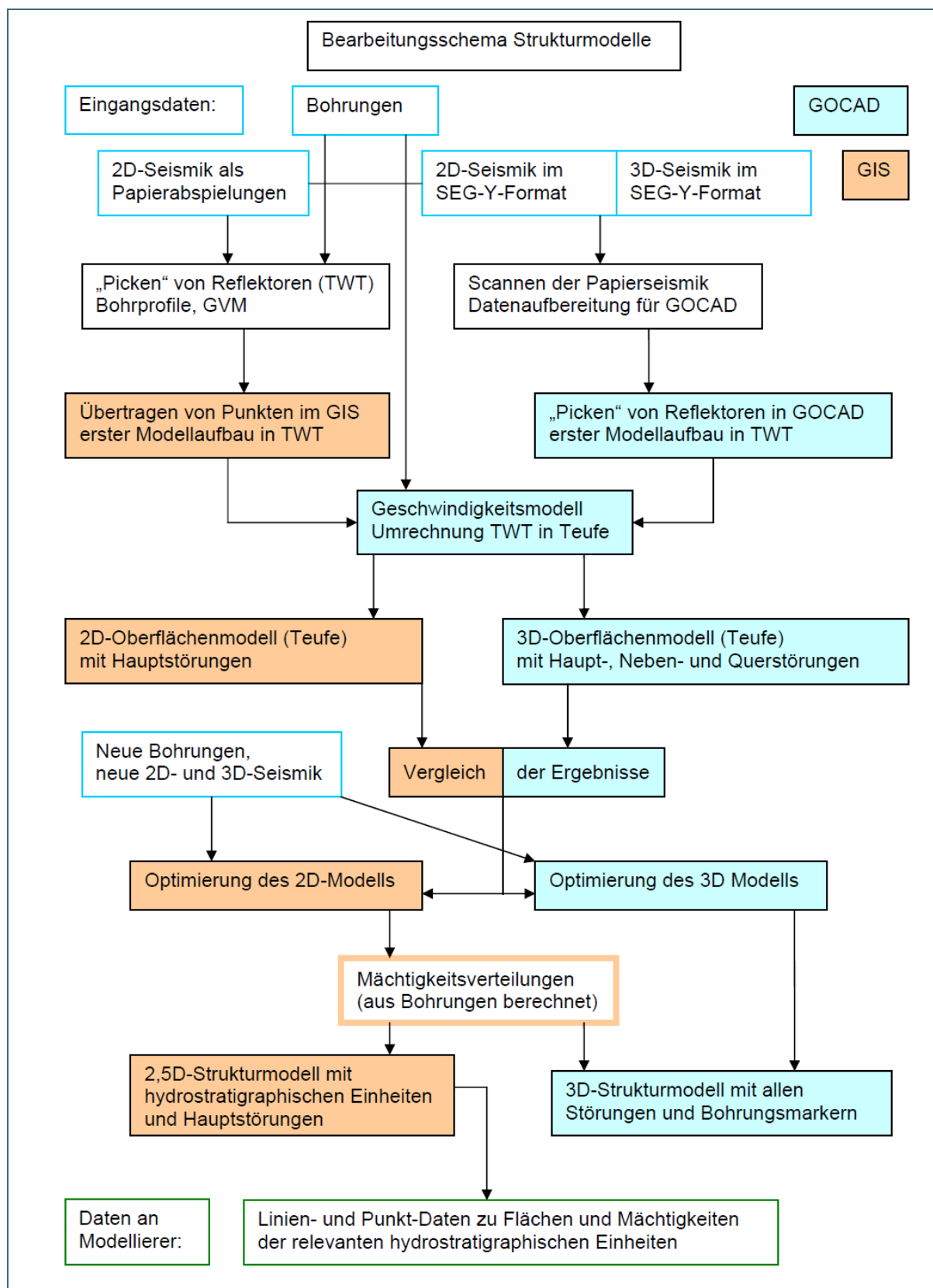
Im Laufe der Projektbearbeitung ergaben sich zudem zunehmend Hinweise, dass auch der lithofaziellen Ausbildung des Malm eine wesentliche Rolle bei der hydraulischen bzw. geothermischen Charakterisierung des Malmaquifers zuzuschreiben ist. Es wurde daher in einem weiteren Arbeitspaket der Versuch unternommen, unterschiedliche Faziesbereiche im Malm (Schicht- bzw. Beckenfazies und Massen- bzw. Schwellenfazies) anhand der „seismischen Signatur“ auszuweisen und diese ebenfalls in das numerische Modell zu implementieren.

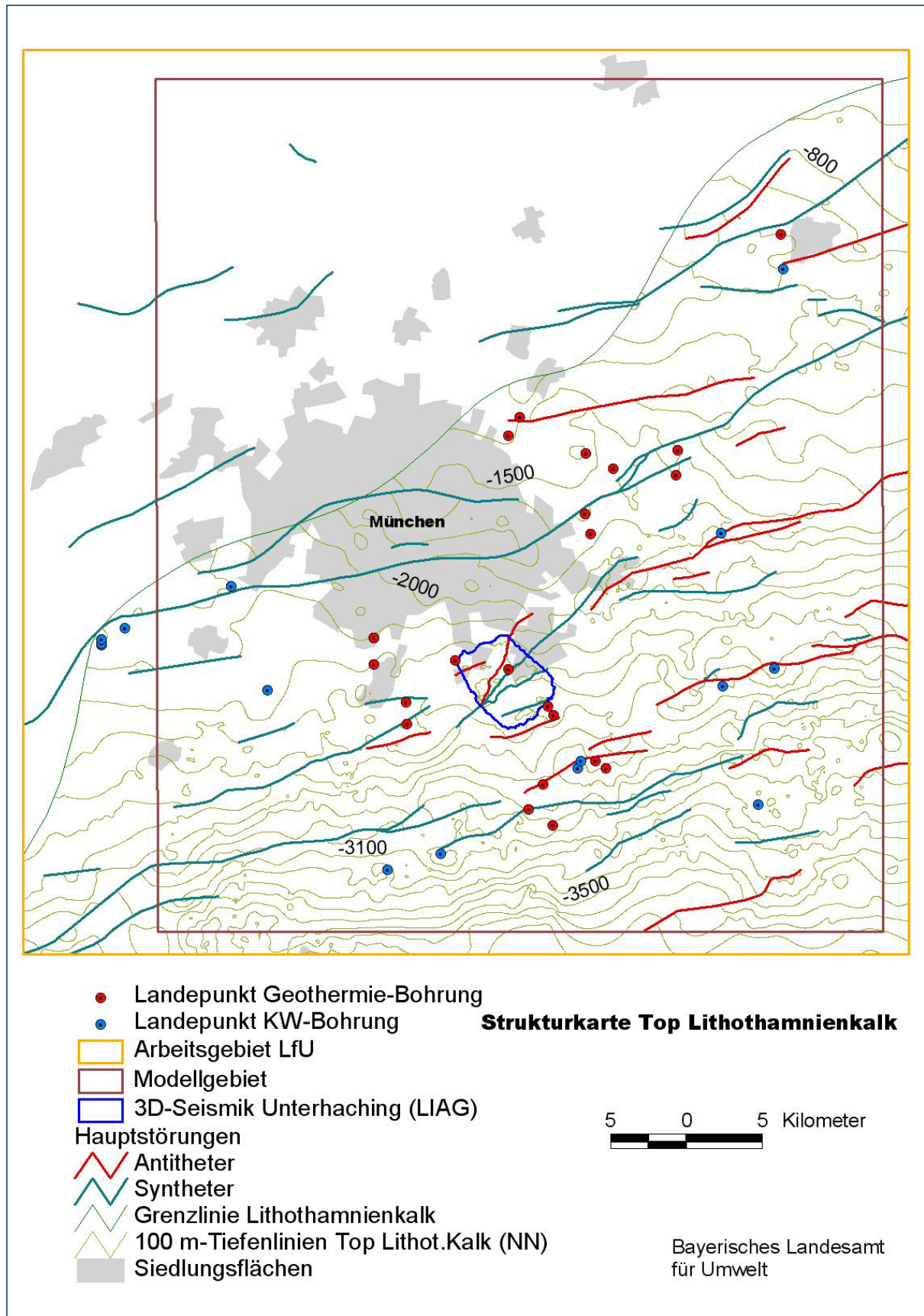
Hinsichtlich der Ergebnisse der Auswertung der 3D-Seismik Unterhaching und des auf dem Struktur- und Faziesmodell aufsetzenden hydrogeologischen und numerischen Modells wird auf den Abschlussbericht des Verbundpartners LIAG verwiesen:

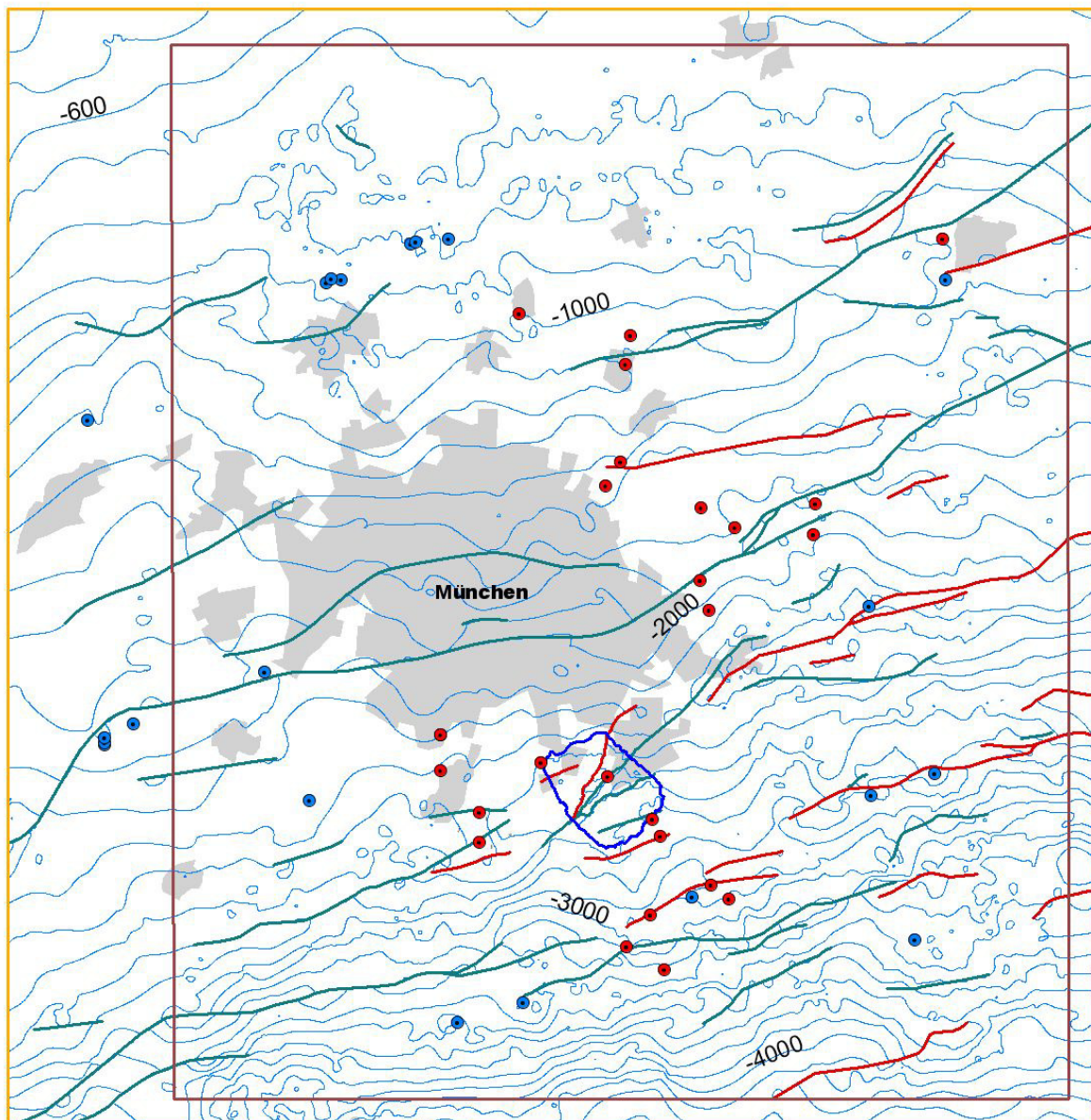
SCHULZ, R. & THOMAS, R. (HRSG.) mit Beiträgen von DUSSEL, M., LÜSCHEN, E. ET. AL. (2012): Geothermische Charakterisierung von karstig-klüftigen Aquiferen im Großraum München - Endbericht. – LIAG-Bericht, Archiv-Nr. 130 392, 98 S.; Hannover.



## Anlagen

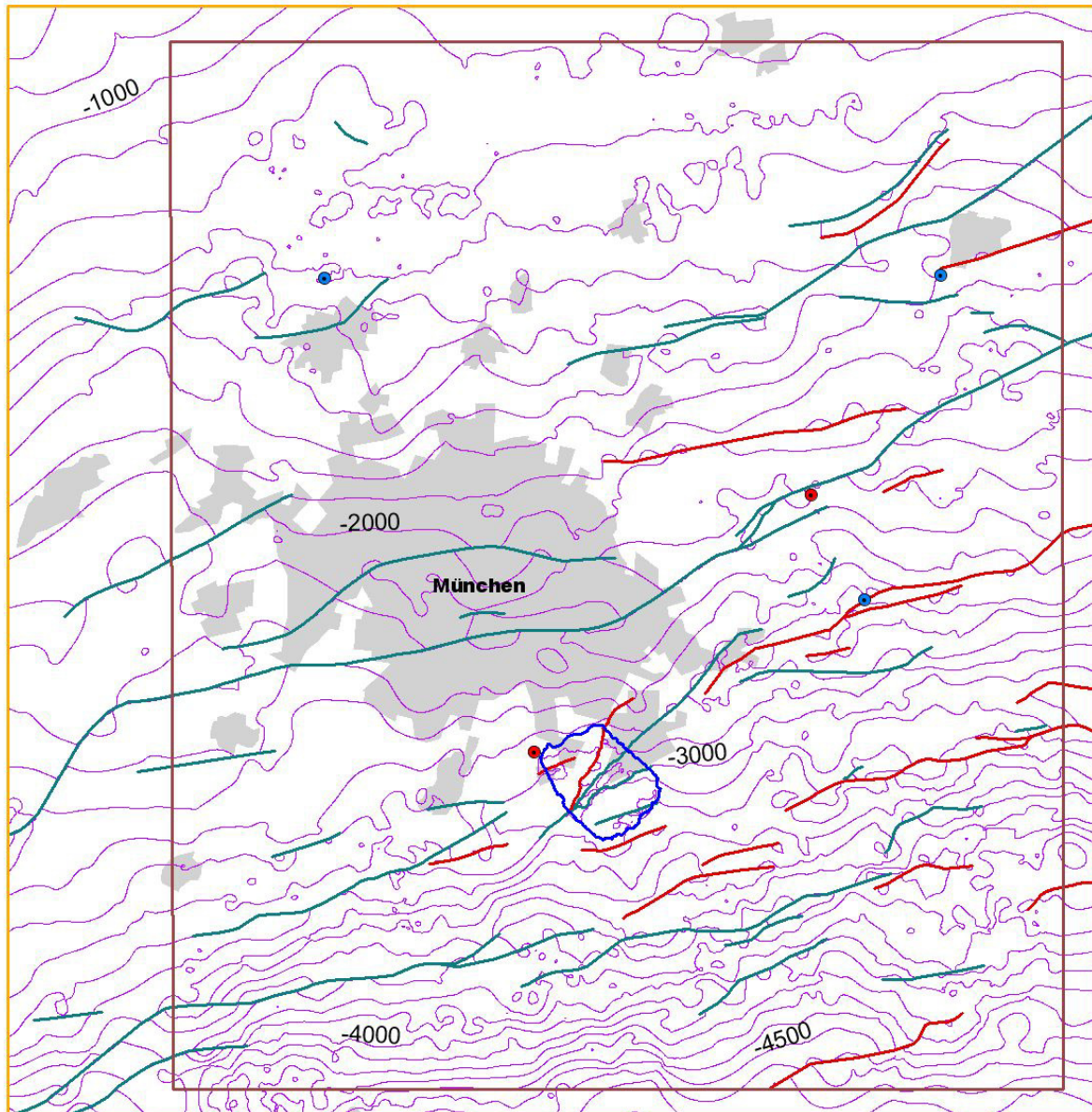




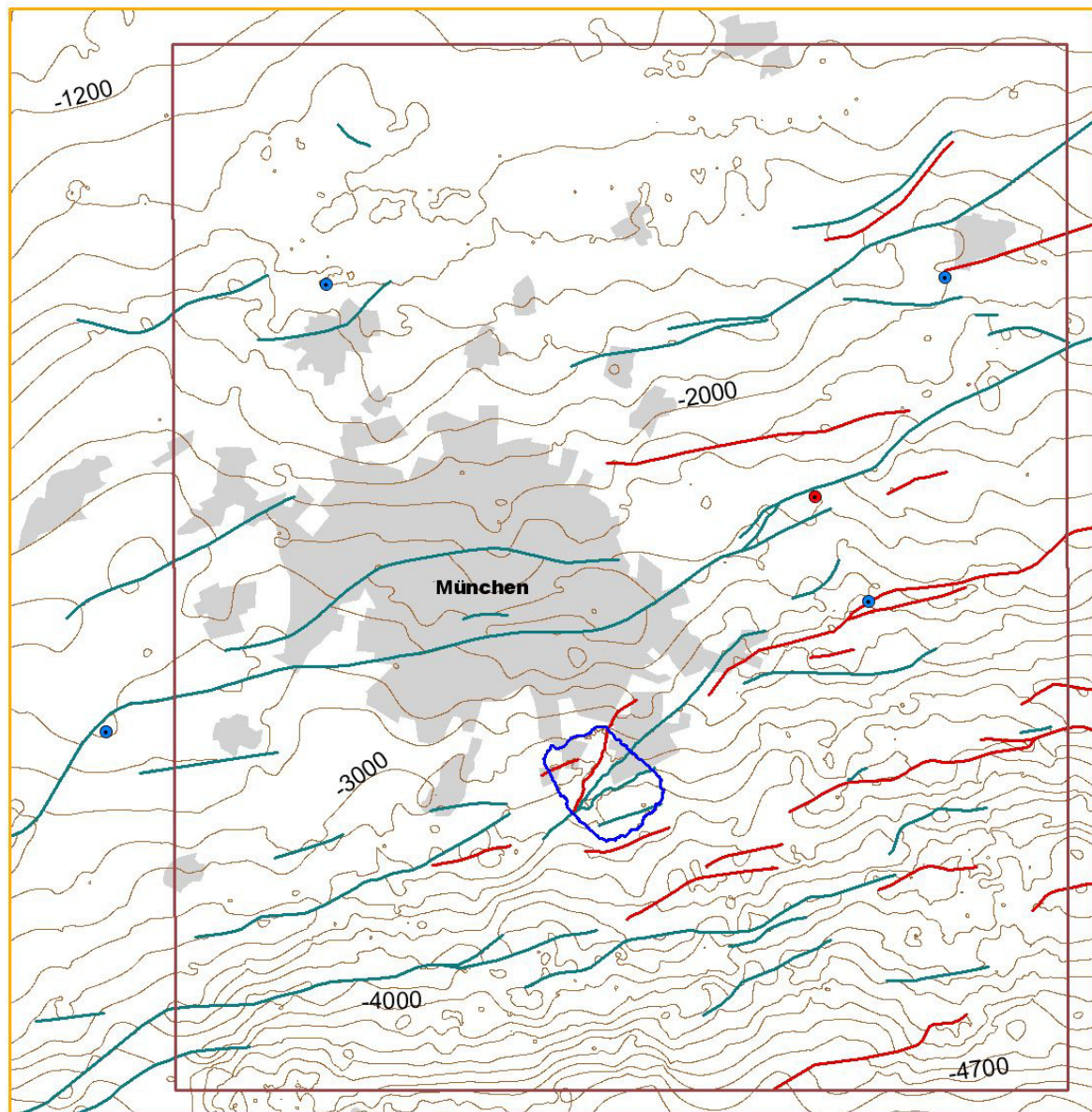


- Strukturkarte Top Purbeck/Malm**
- Landepunkt Geothermie-Bohrung
  - Landepunkt KW-Bohrung
  - ▭ Arbeitsgebiet LfU
  - ▭ Modellgebiet
  - ▭ 3D-Seismik Unterhaching (LIAG)
- Hauptstörungen
- ↗ Antitheter
  - ↘ Syntheter
  - ⋈ 100 m-Tiefenlinien Top Purbeck/Malm (NN)
  - Siedlungsflächen
- 5 0 5 Kilometer
- Bayerisches Landesamt für Umwelt





- Landepunkt Geothermie-Bohrung  
● Landepunkt KW-Bohrung  
 Arbeitsgebiet LfU  
 Modellgebiet  
 3D-Seismik Unterhaching (LIAG)
- Hauptstörungen**
- ↗↘ Antitheter  
↗↘ Syntheter  
~ 100 m-Tiefenlinien Top Malm gamma (NN)  
 Siedlungsflächen
- Strukturkarte Top Malm gamma**
- 5    0    5 Kilometer
- Bayerisches Landesamt für Umwelt



- Landepunkt Geothermie-Bohrung
- Landepunkt KW-Bohrung
- ▭ Arbeitsgebiet LfU
- ▭ Modellgebiet
- ▭ 3D-Seismik Unterhaching (LIAG)
- Hauptstörungen
- ▬ Antitheter
- ▬ Syntheter
- ▬ 100 m-Tiefenlinien Top Kristallin (NN)
- ▭ Siedlungsflächen

**Strukturkarte Top Kristallin**



Bayerisches Landesamt  
für Umwelt



