

Neue Erkenntnisse zum Malm-Tiefengrundwasserleiter in der Westmolasse aus der Tiefbohrung Bad Wörishofen GT2 und ihre Bedeutung für die Geothermie

René Stoyke¹, Achim Schubert¹, Helmut Vater², Franz Böhm¹, Klaus Dorsch¹, Knut Hanke

Vorwort:

Preissteigerungen bei den Primärenergien haben die Nachfrage nach regenerativer Energie (Wärme und Strom) drastisch gesteigert. Neben den bislang etablierten umweltfreundlichen Energien aus Windkraft, Wasserkraft, Photovoltaik etc. wächst die Rolle der tiefen Geothermie zunehmend. Sie soll in der Zukunft nicht nur in Deutschland einen wesentlichen Beitrag zur Energiegewinnung stellen. Wärmeversorgung im Grundlastbetrieb aber auch Stromgenerierung - die Erwartungshaltungen sind sehr hoch.

Die Geothermie als vergleichbar junge Disziplin besitzt ein noch sehr hohes Entwicklungspotenzial. Zahlreiche Forschungsvorhaben zum Ausbau der Nutzung von Erdwärme wurden bislang initiiert und müssen auch in Zukunft dazu ihren Beitrag leisten.

1. GEOTHERMIEVORHABEN UND IHRE GEOLOGISCHEN PLANUNGSGRUNDLAGEN

Geothermieprojekte werden gegenwärtig vor allem in den drei geothermischen Vorzugsgebieten Norddeutsches Becken, Rheintalgraben und Süddeutsches Molassebecken geplant. Das bedeutendste hydrothermale Potenzial in Deutschland besitzt das süddeutsche Molassebecken mit seinem Malm-Tiefengrundwasserleiter. Je nach Standort variieren dennoch Nutzungspotenzial und die Anforderungen an die Geothermie und deren Gewinnung.

Während bis zum Jahr 2002 im Großraum München lediglich 4 Geothermiefelder des Status der Aufsuchungserlaubnis besaßen, gibt es in Bayern gegenwärtig ca. 80 Erlaubnisfelder zur Aufsuchung von Erdwärme, Tendenz steigend. Davon fallen >40 in den Großraum München. Somit befinden sich schätzungsweise 100 hydrothermale Geothermieprojekte allein im süddeutschen Molassebecken in Vorbereitung.

Repräsentative und planungssichere Daten für eine geothermische Malm-Erschließung lassen sich erfahrungsgemäß nur aus Tiefbohrungen, die den Malm nicht nur erbohrt, sondern auch getestet haben, sowie aus seismischen Untersuchungen gewinnen:

In der südlichen Molasse gibt es eine große Anzahl an Bohrungen, die den jurassischen Malm erreicht haben, aber nur ein Bruchteil dieser Bohrungen hat den Malm auch hydraulisch getestet - der Malm war in der Vergangenheit nur selten primäres Explorationsziel für KW-Bohrungen und wurde folglich nicht oder nur marginal untersucht. Daher begrenzen sich detaillierte hydraulische Kenntnisse aus dem Malm überwiegend auf Geothermie- bzw. Balneologiebohrungen. Hydraulische Kenngrößen und Prognosen werden mangels Datendichte vielfach aus faziellen Gesichtspunkten oder

¹ Erdwerk GmbH, ² Stadtwerke Bad Wörishofen

auftretenden Spülungsverlusten im Zuge von Bohrungen (z.B. totale Spülungsverluste) abgeleitet.

Die Teufenlagen Top Malm sind i.d.R. relativ gut zu prognostizieren. Ausgangsdaten sind Schichtenverzeichnisse von KW-Bohrungen (zunehmend auch Geothermiebohrungen) und seismische Profile. Abhängig von der relativen Lage zu bestehenden Bohrungen und deren Informationsgehalt lassen sich hier z.T. sehr gute Prognosen erzielen.

Die Temperaturprognosen für Geothermiestandorte orientieren sich an Messungen aus umliegenden Tiefbohrungen, meist KW-Bohrungen. Da diese Temperaturmessungen überwiegend gestörte Temperaturfelder widerspiegeln, dürfen diese Messwerte nicht unkorrigiert angewendet werden. Je nach Datenbasis ergeben sich Temperaturwerte, die mit einem gewissen Fehler behaftet sind. Für die Temperaturprognose können im Bedarfsfall aber auch für die Region generalisierte Temperaturgradienten angesetzt werden.

Zur Erhöhung der Planungssicherheit im Rahmen von hydrothermalen Geothermieprojekten sind neue Erkenntnisse aus der jeweiligen hydrothermalen Lagerstätte von immenser Bedeutung. Die Veröffentlichung von Ergebnissen sollte im Interesse der Geothermie erfolgen.

Bei der Beurteilung von Standorten hinsichtlich hydrothormaler Erdwärmenutzung sind neben den Parametern Wasserdargebot und Temperatur v.a. die standortspezifischen hydraulischen Kennwerte, die sich in der Absenkung während der Förderung widerspiegeln, die entscheidenden Kenngrößen.

2. DIE BOHRUNG BAD WÖRISHOFEN WÖR GT2

Um den Thermalwasserbedarf der Therme in Bad Wörishofen langfristig zu decken, war die Niederbringung einer neuen Thermalbohrung erforderlich. Die Bohrung Wör GT2 sollte den Malm-Tiefengrundwasserleiter erschließen und zur Förderbohrung ausgebaut werden. Die Fündigkeit wurde auf 5 l/s festgelegt. Mit dieser Menge kann langfristig der Bedarf der Therme und ggf. weiterer Kleinabnehmer in Bad Wörishofen gedeckt werden.

Bei der rein balneologischen Nutzung von Tiefenwässern orientiert sich die maximale Entnahmemenge an der Badgröße und Nutzerzahlen, sie wird durch wasserrechtliche Bestimmungen geregelt. Da keine Rückführung von abgenutztem Wasser in den Entnahmehorizont vorgesehen ist, ist die Entnahmemenge generell auf wenige l/s begrenzt.

Entsprechend der Ergebnisse aus anderen tiefen Malmbohrungen im süddeutschen Molassebecken sind die Anforderungen an die hydraulischen Eigenschaften des Grundwasserleiters am Standort Bad Wörishofen entsprechend der geringen Bedarfsmenge als relativ gering zu bewerten. Demzufolge wurde auf eine Optimierung der Bohrplanung auf Basis seismischer Untersuchungen (Reprozessing) verzichtet. Zur Minimierung der Investitionskosten (Bohrung, Anschluss Thermalbad) hat sich die Stadt Bad Wörishofen für ein Bohrkonzep mit einer vertikalen Bohrung bis auf eine Endteufe von ca. 2.600 m direkt neben der bestehenden Therme entschieden. Eine geothermische Nutzung des Malm-Tiefengrundwasserleiters war nicht primäres Ziel der Bohrung.

Die Bohrung Wör GT2 wurde von Juni - Oktober 2005 mit einem Standardbohrprogramm abgeteuft (vgl. Tabelle 1). Der Endbohrdurchmesser wurde vor

Beginn mit 6.1/8" festgelegt. Die oberen Bohrstrecken ergaben sich entsprechend mit 13.3/8" (für Standrohr), 12.1/4" (für Liner 1) bzw. 8.1/2" (Liner 2). Der Malm wurde insgesamt auf einer Strecke von ca. 280 m aufgeschlossen.

Tabelle 1: Bohrschema

bis Teufe [m MD]	Bohr-Ø [inch]
20,7	13.3/8
856,0	12.1/4"
2.327,0	8.1/2"
2.603,5	6.1/8"

Bis Top Malm erfolgte die Zementierung einer 7"-Linerverrohrung. Die Erschließung des Malms konnte aufgrund gegebener Standfestigkeit des Gebirges als open hole vorgenommen werden. Tabelle 2 zeigt eine Zusammenstellung der Rohrtour-Absetzteufen. In Abbildung 1 ist das Bohr- und Ausbauschema graphisch dargestellt.

Tabelle 2: Verrohrungsschema

Teufe (m MD)		Verrohrung
0	20,5	Standrohr 13.3/8"
0	854,4	Ankerrohrtour 9.5/8"
747,85	2.325,0	Liner 7"

Ab ca. 2.500 m wurden während der Bohrarbeiten schleichende Spülungsverluste festgestellt. Während der Bohrstrecke 2.550 - 2.600 m betrugen die Spülungsverluste zwischen ca. 6 und 10 m³/h (gesamt ca. 82,5 m³).

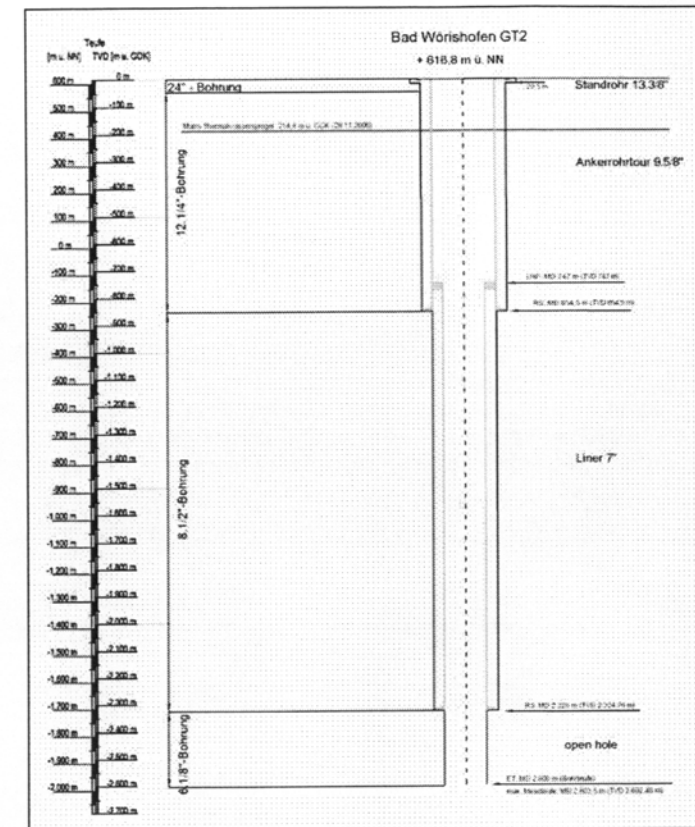


Abbildung 1: Bohr- und Ausbauschema Wör GT2

3. GEOLOGISCH-HYDROGEOLOGISCHE ERGEBNISSE

3.1. Geologie - Lithologie

Die Gesteine des Malms wurden nach Durchörterung der tertiären Gesteinsabfolge in einer Bohrteufe von 2.324 m u. GOK angefahren und bis zu einer Teufe von 2.603,5 m aufgeschlossen. Im oberen Abschnitt (bis 2.385 m) tritt der Malm als dicht-mikrokristalliner Kalk mit weiß-hellgrauer bis Eierschalen-Farbe in Erscheinung. Akzessorisch tritt Dolomit auf. Im mittleren Abschnitt (bis 2.445 m) wurde dicht-mikrokristalliner bis massiger weiß-hellgrauer Kalkstein aufgeschlossen. Klüftflächen sind z.T. mit Eisenhydroxid

belegt. Im tieferen Teufenbereich (bis 2.515 m) zeigt der Kalk eine zunehmend dunklere Farbe (dunkelgrau, braungrau, z.T. grünlich). Untergeordnet treten hier dunkler Tonstein und grünlicher Kalkmergel sowie Pyrit in auf. Bis zur Endteufe von 2.603,5 m ist der obere Jura überwiegend als hellbraun-grauer, z.T. dolomitierter Kalkstein ausgebildet. Aus der Dolomitisierung und Rekristallisierung ergibt sich die z.T. körnig-dicht-mikrokristalline Struktur des Malms. Der aufgeschlossene Bereich ist dem Malm Zeta zuzuordnen.

3.2. Hydrogeologie

Nach initialem Reinigungs- und Säurestimulation erfolgte zum Nachweis der Fündigkeit zunächst ein Kurzzeittest. In einem nachfolgenden Schritt wurde zur Betriebssimulation ein hydraulischer Langzeittest durchgeführt.

Die Förderraten wurden in Stufen von 3,0 l/s, 5,0 l/s und 5,8 l/s gewählt. Diese Werte beziehen sich jedoch auf ein Gas-Wasser-Gemisch und wurden nach Quantifizierung der Gasmengen korrigiert (die erhöhten Gasgehalte bei der Förderung haben zu einer Verfälschung resp. Erhöhung der Momentanschüttungen geführt). Die entsprechenden Absenkungsbeträge wurden mit 260 m, 304 m und 326 m ermittelt (im Zuge der Tests konnten jedoch noch keine vollstationären Zustände erreicht werden). Unter Zugrundelegung eines Ruhewasserspiegels von ca. 215 m u. GOK errechnet sich Δs am Ende der entsprechenden Förderstufe mit ca. 45 m, 89 m bzw. 111 m.

Tabelle 3: Langzeitpumpversuch

	Fördermenge Q [l/s]	Absenkung s max. [m u. GOK]	Temperatur T max. [°C]
Stufe 1	3,0	ca. 260	67,6
Stufe 2	5,0	ca. 304	77,1
Stufe 3	5,8	ca. 326	80,5

Die hydraulischen Auswertungen der Ergebnisse von Absenkungs- und Aufspiegelungsphase nach Theis (instationär) ergaben Transmissivitäten von $4,2 \times 10^{-5}$ und $3,5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ (vgl. Abbildung 2).

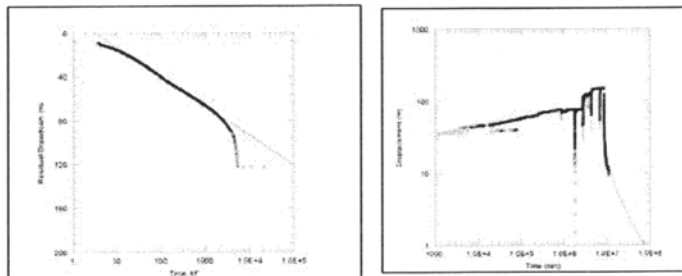


Abbildung 2: Auswertung der Pumpversuche nach Theis (links: Förderphase, rechts: Wiederanstieg)

Mit einer erzielten Temperatur von $>80^\circ\text{C}$ bei einer Fördermenge von ca. 5 l/s wurden die thermischen Erwartungen deutlich übertroffen.

3.3. Geophysik

Zusätzlich zu den Standardmessungen GR, SP und DLL wurde im Teufenbereich Malm eine Mikrowiderstandsmessung mittels FormationMicrolmager durchgeführt. Die FMI-Messung ermöglicht genaue Aussagen zum strukturellen Aufbau und weiteren lithologischen Eigenschaften, die aus den Spülproben und dem Bohrprozess nicht abzuleiten sind. Dieses betrifft v.a. die Punkte Lagerungsverhältnisse (ggf. Schichteinfallen), Störungen und Klüftungen (Kluftöffnungsweiten und Orientierung).

Eine lokale Haupteinfallrichtung der Schichtung konnte mit ca. 12° nach SSW bestimmt werden. Die für die hydraulische Leitfähigkeit entscheidenden Strukturen (offene Brüche oder Klüfte) treten hier vor allem zwischen 2.331 und 2.444,7 m sowie 2.530 m und 2.601 m mit NW-SE-, NE-SW- und N-S-streichender Richtung in Erscheinung. Die Öffnungsweiten liegen zwischen 0,054 bis 1,85 mm, bei einem statistischen Mittel von 0,07 mm. Zu diesen „geöffneten“ Strukturen treten untergeordnet hydraulisch inaktive (verheilte) Klüfte auf.

Ferner wurden insgesamt fünf Kleinstörungen mit NNW-SSE-verlaufender Streichrichtung, jedoch ohne hydraulisch wirksame Öffnung, nachgewiesen.

Die ab 2.530 m auftretenden Öffnungen korrelieren sehr gut mit den festgestellten Spülungsverlusten während der Bohrarbeiten sowie mit dem mineralogischen Befund.

3.4. Hydrochemie

Das Thermalwasser weist den Untersuchungsergebnissen zufolge eine für Malm-Tiefengrundwässer außergewöhnlich hohe Gesamtmineralisation von über 5.000 mg/l auf. Der für die Begriffsbestimmung von Heilwässern geforderte Mindestwert von 1.000 mg/l ist damit deutlich überschritten. Gemäß der hydrochemischen Beschaffenheit kann die Bohrung als iodid- und fluoridhaltige Na-Cl-SO₄-HCO₃-Therme bezeichnet werden. Die nachstehende Abbildung 3 zeigt die Verhältnisse der maßgeblichen Anionen und Kationen im Pie-Cart.

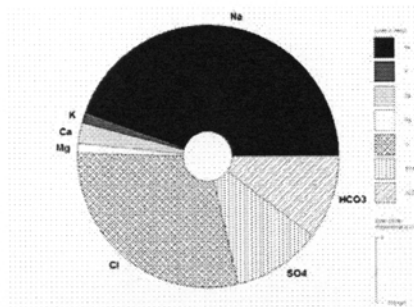


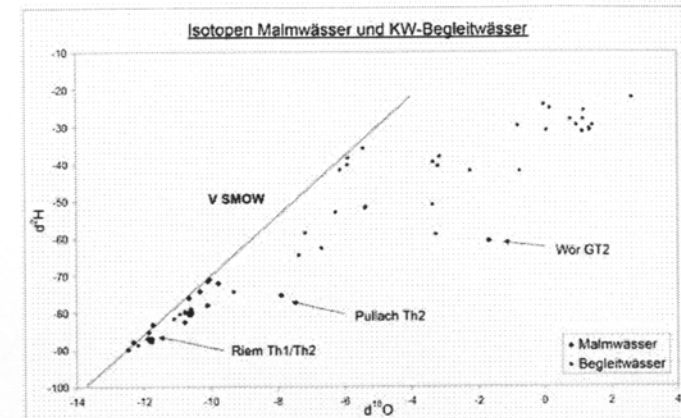
Abbildung 3: Hydrochemischer Charakter (Pie-Chart)

Während der analytisch begleiteten hydraulischen Tests zeigten sich zudem erhöhte Gehalte an organischen Parametern, deren Ursprung jedoch geogener Art ist. Ferner wurden erhebliche Mengen an CH_4 mitgefördert (s.o.).

3.5. Isotopenchemie

Die Ableitung der Genese von Tiefenwässern alleine aus den Haupt- und Spurenelementen erweist sich als sehr schwierig und z.T. ungenau. Zur Klärung und Bewertung der lokal- bzw. regionalhydraulischen Situation müssen dazu hydroisotopische Daten herangezogen werden. Der folgende Lösungsansatz berücksichtigt die Deuterium- und Sauerstoff-18-Gehalte.

Massenspektrometrische Untersuchungen an Wasserproben aus dem Langzeitpumptest ergaben einen $\delta^2\text{H}$ -Wert von $-60,8 \text{ ‰}$ SMOW (Vienna) bzw. $\delta^{18}\text{O}$ von $-1,69$. Im Vergleich mit anderen Malmwässern aus der Molasse fallen die beiden Werte sehr hoch aus, sie sind daher als verhältnismäßig stark isotopisch angereichert zu bezeichnen. Abbildung 4 zeigt den isotopischen Charakter der Wörishofener Bohrung basierend auf den $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Werten im Vergleich. Mit Ausnahme der Geothermiebohrung Pullach Th2 und Wör GT2 plotten sämtliche Wässer (u.a. Riem) im Umgriff der meteorischen Linie (SMOW – Standard Mean Ocean Water). Aus diesem Zusammenhang ist generell eine unterschiedliche Genese anzunehmen. Aufgrund der erhöhten KW-Gehalte wurde die Abbildung 4 exemplarisch durch Begleitwässer bzw. Ölfeldwässer aus Kohlenwasserstofflagerstätten v.a. des Tertiärs ergänzt. Diese Wässer zeigen z.T. ähnlich hohe $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte.

Abbildung 4: Isotopen $\delta^2\text{H}$ - und $\delta^{18}\text{O}$ -Werte

4. BEWERTUNG DER ERGEBNISSE

Die im Vorfeld definierte Fündigkeit von ca. 5 l/s wurde mit der Bohrung Wör GT2 erreicht; die langfristige Versorgung der Therme ist gewährleistet. Im Vergleich zu anderen Malmbohrungen des südlichen Molassebeckens ist die potenzielle Schüttung jedoch als gering einzustufen. Zahlreiche Tiefbohrungen mit Ziel Malm erreichen Entnahmemengen von deutlich über 50 l/s bei moderaten Druckabsenkungen (z.B. Riem, Unterhaching, Unterschleißheim). Die hohen Fördermengen sind jedoch i.d.R. an z.T. sehr große Störungssysteme innerhalb des Malms gebunden. Die vor Beginn der Bohrung durchgeführte Einsicht in bestehende seismische Daten ergab keine Indikation auf derartige Störungen im Umfeld zum Bohrstandort. Daher ist davon auszugehen, dass mit der Bohrung Wör GT2 keine regionalen Störungssysteme und damit etwaige in Verbindung stehende regionalhydraulische Systeme angebunden wurden.

Eine Verkarstung des Malms innerhalb der oberen 200 m, wie sie für weite Teile des Molassebeckens angenommen wird, kann für Bad Wörishofen nicht bestätigt werden. Ausgeprägte Verkarstungen hätten sich bereits während der Bohrung in Form hoher oder ggf. sogar totaler Spülungsverluste gezeigt. Eine Tiefenverkarstung bis 2.600 m kann nachweislich der geophysikalischen Bohrlochmessungen ebenfalls nicht bestätigt werden. Die starken Spülungsverluste ab ca. 2.550 m sind u.a. mit den nachgewiesenen geöffneten Klüftungen zu korrelieren. Ferner liegt die Vermutung nahe, dass das Auftreten der sehr hohen Spülungsverluste im tiefen Bereich und dem jedoch vergleichsweise geringen Thermalwasserdargebot sowie der beträchtlichen Gasführung auf das Vorhandensein von gaserfüllten Hohlräumen zurückzuführen ist.



Das im Malm des Molassebeckens zirkulierende Tiefenwasser erhält nach derzeitigem Kenntnisstand seine Neubildung einerseits aus dem Bereich des Donauoberlaufs, durch Infiltration aus hangenden Schichten (Tertiär) und im Ostbereich des Molassebeckens vermutlich auch aus dem Kristallin der Böhmisches Masse. Die Speisung des Malm-Tiefengrundwasserleiter im südlichen Molassebecken durch Sickerwässer aus dem hangenden Tertiär ist jedoch insgesamt gering aber regional sehr unterschiedlich (abhängig von den Permeabilitäten der tertiären Deckschichten). Punktuell kann die vertikale Komponente (Leakage) durchaus verstärkt sein (z.B. entlang von Störungen).

Aus den vorgenannten Ergebnissen lässt sich für Bad Wörishofen ein hydraulisches Regime mit über lange Zeit nahezu stagnierenden Strömungsverhältnissen und einer verstärkten vertikalen Komponente ableiten. Das lokale hydrothermale System ist anscheinend nicht an ein regionalhydraulisches System angekoppelt. Die hydrochemische und isotopische Signatur des Wör GT2 - Wassers enthält deutliche Komponenten eines tertiären Formationswassers, also eine vertikale Komponente. Eine quantitative Abschätzung dazu wurde jedoch nicht vorgenommen. Für den Raum Bad Wörishofen liegen die Äquipotenziallinien dicht gescharrt (Frisch und Huber 1999), was in das System langsam zirkulierender Wässer und hoher Mineralisation passt.

5. AUSBLICK

Der Erfolg hydrothormaler Geothermieprojekte ist in erster Linie von den geothermischen und hydraulisch-hydrogeologischen Ergebnissen abhängig. Die Anforderungen an die Bohrungen sind sehr hoch. Schüttungsmengen von z.T. über 100 l/s sind für wirtschaftliche Belange erforderlich.

Die für eine hydrothermale Erdwärmenutzung günstigen Standorte sind nach derzeitigem Kenntnisstand an geologische Bruchstrukturen gekoppelt. Ausprägung und Art der Bruchstrukturen sollten im Rahmen von Strukturanalyse in Einzelfallprüfung bewertet werden. Eine Erschließung des Malm für hydrothermale Geothermieprojekte in einem ungestörten Bereich ohne nachgewiesener großräumiger Verkarstungen kann generell nicht empfohlen werden.

Literatur / Verwendete Unterlagen

BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, INFRASTRUKTUR, VERKEHR UND TECHNOLOGIE (StMWIVT), 2004: Bayerischer Geothermieatlas – Hydrothermale Energiegewinnung, 104 S., München.

ERDWERK GMBH, 2006: Schlussbericht zur Tiefbohrung Bad Wörishofen Wör GT2, München, unveröffentlicht.

ERDWERK GMBH, 2004: Schlussbericht Geothermiebohrung Riem Thermal 1, München, unveröffentlicht.



ERDWERK GMBH, 2004: Schlussbericht Geothermiebohrung Riem Thermal 2, München, unveröffentlicht.

ERDWERK GMBH, 2006: Schlussbericht Geothermiebohrung Pullach Thermal 1/1a, München, unveröffentlicht.

ERDWERK GMBH, 2006: Schlussbericht Geothermiebohrung Pullach Thermal 2, München, unveröffentlicht.

FRISCH, H & HUBER, B., 1999: Ein Hydrogeologisches Modell und der Versuch einer Bilanzierung des Thermalwasservorkommens für den Malmkarst im Süddeutschen und im angrenzenden Oberösterreichischen Molassebecken, Hydrogeologie und Umwelt, Heft 20, S. 25-43, Würzburg.

GOLDBRUNNER, J.E. 1988: Tiefengrundwässer im Oberösterreichischen Molassebecken und im Steirischen Becken. In: Steir. Beitr. z. Hydrogeologie, Band 39, Seiten 5-94, Jahrgang 1987/88, Graz.

KOSCHEL, G., 1989: Hydrogeothermische Energiebilanz und Grundwasserhaushalt des Malmkarstes im süddeutschen Molassebecken, Abschnitt 2: Geologischer Überblick – Hydrogeologische Randbedingungen, Landesamt für Wasserwirtschaft, 12 S., München.

MEYER, R.K.F. & SCHMIDT-KALER, H., 1996: Jura. – In: Geologische Karte von Bayern 1:500.000, Erläuterungen, München, S. 90 – 111.

SCHUBERT, A., 1996: Tiefengrundwasseruntersuchungen im Molassebecken westlich von Linz, Dissertation TU Berlin, Berlin.

STIER, P., PRESTEL, R., 1989: Hydrogeothermische Energiebilanz und Grundwasserhaushalt des Malmkarstes im süddeutschen Molassebecken, Abschnitt 3: Der Malmkarst im süddeutschen Molassebecken – Ein hydrogeologischer Überblick, Landesamt für Wasserwirtschaft, 12 S., München.

WEISE, S., WOLF, M., FRITZ, P., RAUERT, W., STICHLER, W., PRESTEL, R., BERTLEFF, B. UND STUTE, M., 1989: Isotopenhydrologische Untersuchungen im Süddeutschen Molassebecken. In: Hydrogeothermische Energiebilanz und Grundwasserhaushalt des Malmkarstes im süddeutschen Molassebecken, 106 S. + Abbildungen.