

Produktivitätsprognosen geothermischer Aquifere in Deutschland

¹Markus Wolfgramm, ²Karsten Obst, ³Kilian Beichel, ²Juliane Brandes, ³Roman Koch, ¹Kerstin Rauppach, ¹Kirsten Thorwart

¹Geothermie Neubrandenburg GmbH, ²LUNG Mecklenburg-Vorpommern, ³Universität Erlangen

Keywords: Fazies, Geothermie, Karbonat, Produktivität, Sandstein

Zusammenfassung

In einem vom BMU geförderten Forschungsprojekt „Technologieentwicklung von Grundstrom aus Erdwärme – Planungswerkzeuge für die Stromerzeugung aus Geothermie“ wurden die wichtigsten geothermisch nutzbaren Aquifere Deutschlands hinsichtlich ihrer Lithologie und Fazies sowie ihrer mineralogischen und geochemischen Zusammensetzung untersucht. Ziel war es, gebietspezifische Parameter zur Abschätzung der Ergiebigkeit der potenziellen Nutzhorizonte zu ermitteln. Parallel dazu wurden für Forschungsprojekt „Aufbau eines Geothermischen Informationssystem für Deutschland (GeotIS)“ die verfügbaren Daten zur Verbreitung, Tiefenlage und Mächtigkeit mesozoischer Sandsteinhorizonte in Nordost-Deutschland digital aufbereitet. Durch die Verknüpfung der Ergebnisse beider Vorhaben konnten erstmals für die Rhät-Sandsteine des Norddeutschen Beckens Produktivitätskarten erstellt werden, welche zusammen mit Temperaturkarten das wichtigste Planungswerkzeug für geothermische Projekte darstellen. Auch für geothermische Anlagen, die in der Umgebung von München geplant und realisiert werden, ist neben der Temperaturprognose besonders die Vorhersage der Produktivität der abzuteufenden Bohrungen von großem Interesse. Zuflussprofilierungen und Temperaturverlaufsmessungen konnten bei den bisher fertiggestellten Projekten zur Identifikation und Charakterisierung der Hauptzuflusszonen genutzt werden. Lithologisch-fazielle Untersuchungen von Spülproben der Malm-Karbonate verschiedener, südlich von München befindlicher Bohrungen führten zu einer Korrelation von Zuflusszonen und Lithotypen. Zuflüsse setzen demnach mit den ersten beobachteten idiomorphen, zuckerkörnigen Dolomiten ein. Dabei korrelieren Fazies (genetisch, diagenetisch), Kristallitgröße, Porosität und Zuflussraten miteinander. Hinweise auf Verkarstung des Malm konnten nur sehr untergeordnet nachgewiesen werden, da diese von Nord nach Süd abnimmt. Im Vergleich mit den Lithotypen anderer Bohrungen sind jedoch Ergiebigkeitsprognosen möglich. Zusätzlich können für hohe Produktivitäten auch tektonisch-strukturelle Gegebenheiten von großer Bedeutung sein. Insbesondere Hauptabbruchstörungen, wie z.B. bei Unterhaching, und deren antithetische Begleitstörungen, als auch die zu beobachtenden „strike-slip“-Störungen sind im Bereich der Tiefscholle für eine starke Auflockerung des Gebirges und hohe Zuflüsse verantwortlich.

1. Einleitung

Die Hauptgeothermieregionen in Deutschland sind das Norddeutsche Becken (NDB), der Oberrheingraben (ORG) und das Molassebecken (MB). Tiefengeothermische Projekte lassen sich vorwiegend in diesen Abfolgen realisieren:

- NDB: Sandsteine des Rotliegenden (1), des Mittleren Buntsandstein (2), des **Rhät/Lias** (3), des Doggers (4) und der Unterkreide (5).
- ORG: Sandsteine des **Rotliegenden und Buntsandstein** zusammen mit den **Graniten** des Grundgebirges (1), Kalksteine des Oberen Muschelkalk (2), Kalksteine des Hauptrogenstein (3), tertiäre Sandsteine (4), z.B. Pechelbronner Schichten, Hydrobienschichten etc.
- MB: Karbonate des **Malm**.

In einem von 2005 bis 2008 durchgeführten Forschungsprojekt „Technologieentwicklung von Grundstrom aus Erdwärme – Planungswerkzeuge für die Stromerzeugung aus Geothermie“ (BMU, FKZ: 0329951E), welches von der Geothermie Neubrandenburg GmbH (GTN) in Kooperation mit dem GeoForschungsZentrum Potsdam realisiert wurde, konnten unter anderem folgende Fragestellungen untersucht werden: (1) Charakterisierung und Klassifikation relevanter Speichergesteine in den wichtigsten Geothermieregionen Deutschlands, (2) Bestimmung des Einflusses von Lithofazies und Klüftigkeit auf die Ergiebigkeit geothermaler Speicher, (4) Ermittlung von gebietsspezifischen Parametern zur Abschätzung der jeweiligen Ergiebigkeit der Zielhorizonte sowie (5) Prognosen zur Höflichkeit von Geothermiebohrungen. Nahezu gleichzeitig wurden in einem weiteren Forschungsprojekt „Aufbau eines geothermischen Informationssystems für Deutschland (GeotIS)“ (BMU, FKZ 0327542), das im Zeitraum 2005 bis 2009 unter Federführung des LIAG Hannover stattfand, Karten zur Verbreitung und Mächtigkeit geothermischer Aquifere in NE-Deutschland erarbeitet sowie Datenbanken ihrer hydrogeothermisch relevanten Parameter aufgebaut. Auf den Ergebnissen dieser Projekte basierend konnten Abschätzungen der Produktivität bedeutender Aquifere – die Rhät-Sandsteine im NDB und die Malm-Karbonate im MB, insbesondere südlich München – vorgenommen werden, die in diesem Beitrag vorgestellt werden.

2. Methoden zur Berechnung von Produktivitäten

Die Prognose von Produktivitäten (Quotient aus Förderrate und Druckabsenkung während des Testes) geothermischer Bohrungen basiert auf einer guten Kenntnis verschiedener Parameter. Grundlage für homogene Aquifere (z.B. poröse Sandsteine) ist die auf dem DARCY-Gesetz aufgebaute DARCY-DUPUITsche Brunnengleichung:

$$Q = 2 * \pi * kf * M * \frac{s}{\ln \frac{R}{r}} \quad (1)$$

wobei Q die Förderrate, kf der Durchlässigkeitsbeiwert, M die effektive Sandsteinmächtigkeit, s die Spiegelabsenkung, R die Reichweite (Bestimmung nach SICHARDT) und r der Bohrlochhalbdurchmesser sind. Variablen sind in dieser Gleichung die Mächtigkeit der Sandsteine und der entsprechende kf -Wert, wobei sich letzterer nach:

$$kf = \frac{k * \xi * g}{\mu} \quad (2)$$

berechnen lässt. Unter Verwendung der Formeln (1) und (2) lässt sich die Produktivität von Bohrungen mit einem typischen Durchmesser von 8 1/2“ auf Basis von Mächtigkeitskarten und Permeabilitätsabschätzungen (vgl. WOLFGRAFF et al. 2008) bestimmen und flächenhaft darstellen. Da Permeabilitäten der verschiedenen Lithotypen des Malm nicht bekannt sind, kann für diesen Fall eine Produktivitätsprognose nur empirisch erfolgen, wobei jeweils ein Anteil des Zuflusses aus der Matrixporosität geeigneter Lithotypen und ein Anteil der jeweiligen Störungszone zugeordnet werden.

3. Die Rhät-Sandsteine im Norddeutschen Becken

Für das NDB sind poröse Sandsteine des Mesozoikums die wichtigsten geothermisch nutzbaren Grundwasserleiter (vgl. FELDRAPPE et al. 2008). Ursprünglich wurden sie als Sande in unterschiedlichen Ablagerungsräumen akkumuliert. Dazu gehören fluviatile Sande und Kiessande, limnisch-brackische Sande eines Deltas, Strandsande und äolische Dünen-sande. Die Sedimente der verschiedenen Bildungsräume weisen ganz unterschiedliche Eigenschaften auf. So sind fluviatile Sande schlecht sortiert und klassiert, häufig schlecht gerundet und entsprechend durch relativ geringe primäre Durchlässigkeiten charakterisiert. Anders verhält es sich mit einem äolischen Sand, welcher fast ausschließlich aus gut gerundeten, gleichgroßen Quarzkörnern zusammengesetzt ist und der primär hohe Durchlässigkeiten aufweist. Delta-Sande sind besonders

im Bereich der sogenannten Verteilerrinnen durch hohe Mächtigkeiten und Durchlässigkeiten charakterisiert. Die Sedimente außerhalb der Rinnen weisen dagegen bereits primär schlechte hydraulische Eigenschaften auf. Im Zuge der Beckenentwicklung und Subsidenz gelangen die verschiedenen Sande in immer größere Tiefen mit höheren Temperaturen. Neben der Kompaktion der Gesteine ist mit zunehmender Tiefe die chemische Diagenese relevant. Es kommt zur Auflösung von Mineralbestandteilen bzw. zur Ausfällung von Porenraumzementen (WOLFGRAMM & SCHMIDT MUMM 2001). Primäre Porositäten werden verringert und teilweise sekundäre Porositäten gebildet. Der jeweilige Diageneseverlauf bedingt die hydraulischen Eigenschaften der Sandsteine.

Die Sandsteine des Rhät (Exter-Formation) sind in NE-Deutschland fast flächendeckend vorhanden. Sie wurden während verschiedener Meeresvorstöße aus Westen gebildet. Zu bemerken ist, dass die marinen Sedimente nach Osten in brackische Ablagerungen übergehen. Fluviale Sedimente wurden zwischenzeitlich von dem im Norden gelegenen Fennoskandischen Festland geliefert.

3.1 Lithologie und Fazies

Das in drei Einheiten untergliederte Rhät besteht aus bunten und grauschwarzen Tonsteinen sowie hellen bis bräunlichen reifen Sandsteinen. Die Sandsteine treten in den Postera-Schichten (Unter-Rhät), in den Contorta-Schichten (Mittel-Rhät) und lokal auch in den Triletes-Schichten (Ober-Rhät) auf. Deltaartige Schüttungen umflossen die Rügen-Schwelle und stießen über die Oder-Bucht bzw. die Mecklenburger Bucht nach Südwesten vor. Der Postera-Sandstein zeichnet sich deshalb durch tief einschneidende, schmale Rinnen-Körper aus, die randlich rasch in tonig-dolomitische Faziesbereiche einer Überflutungsebene übergehen. Infolge einer flachmarinen Ingression führten die fortgesetzten sandigen Schüttungen zur Ausbildung deltaischer Verteilerrinnen, in denen der Contorta-Sandstein abgelagert wurde, der sich mit dunklen Tonsteinen der Deltaebene verzahnt. Die geringmächtigen Triletes-Sandsteine sind nur lokal in eine von Tonsteinen dominierte Abfolge eingeschaltet. Die verschiedenen Faziesbereiche der Rhät-Sandsteine im östlichen Teil des NDB wurden detailliert von FRANZ & WOLFGRAMM (2008) untersucht. Geologisch-hydrogeologische Parameter sind in den Arbeiten von WOLFGRAMM et al. (2008) und RAUPPACH et al. (2008) zusammengestellt.

3.2 Geothermisch relevante Parameter

Die Sandsteine des Rhät sind meistens gut (1,2-1,4 nach TRASK 1932) bis mäßig gut (1,4-1,7) sortiert. Ihre kantengerundeten bis gerundeten Bestandteile lassen auf eine nordische Herkunft schließen. Sie enthalten durchschnittlich 80-90 % Quarz, bis 10 % Kalifeldspat und Plagioklas, 3 % Gesteinsbruchstücke und ca. 7 % Tonminerale. Die Korngröße der Postera-Sandsteine im Bereich der Verteilerrinnen beträgt durchschnittlich 0,1-0,15 mm (Feinsandstein). Die Contorta-Sandsteine sind generell gröber (im Mittel 0,22-0,25 mm). Ihre Porenradien sind im Mittel 11-13 µm groß.

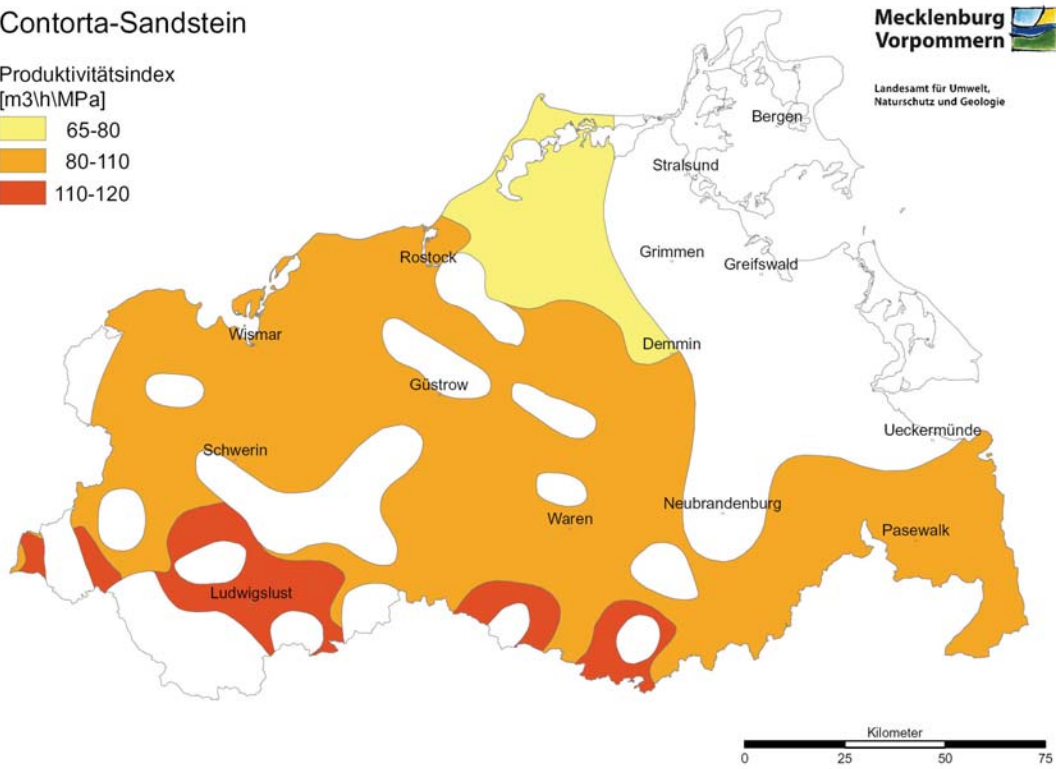
Die Porositäts- und Permeabilitätswerte der Sandsteine variieren je nach stratigraphischer Position und Fazies. In den Contorta-Schichten liegen beispielsweise die effektiven Porositäten der Rinnensande zwischen 8 und 35 %. Ihre Permeabilitäten erreichen maximal 5.800 mD. Die Schichtsandsteine der Deltaebene weisen dagegen Nutzporositäten von 17-31 % bei Permeabilitätswerten bis 190 mD auf. Die Durchlässigkeiten von Sandsteinen außerhalb der Verteilerrinnen sind häufig sehr gering (< 100 mD).

3.3 Produktivität der Rhät-Sandsteine

Ausgehend von den im Landesamt für Umwelt und Geologie Mecklenburg-Vorpommern (LUNG M-V) vorhandenen digitalen Karten zur Verbreitung, Tiefenlage, Mächtigkeit und Fazies des Rhät/Lias-Aquiferkomplexes (vgl. auch OBST et al. 2009) und Datenbankinhalten wurden erste flächenhafte Produktivitätskarten für die Postera- und Contorta-Sandsteine erarbeitet (Abb. 1).

Contorta-Sandstein

Produktivitätsindex
[m³/h/MPa]



Postera-Sandstein

Produktivitätsindex
[m³/h/MPa]

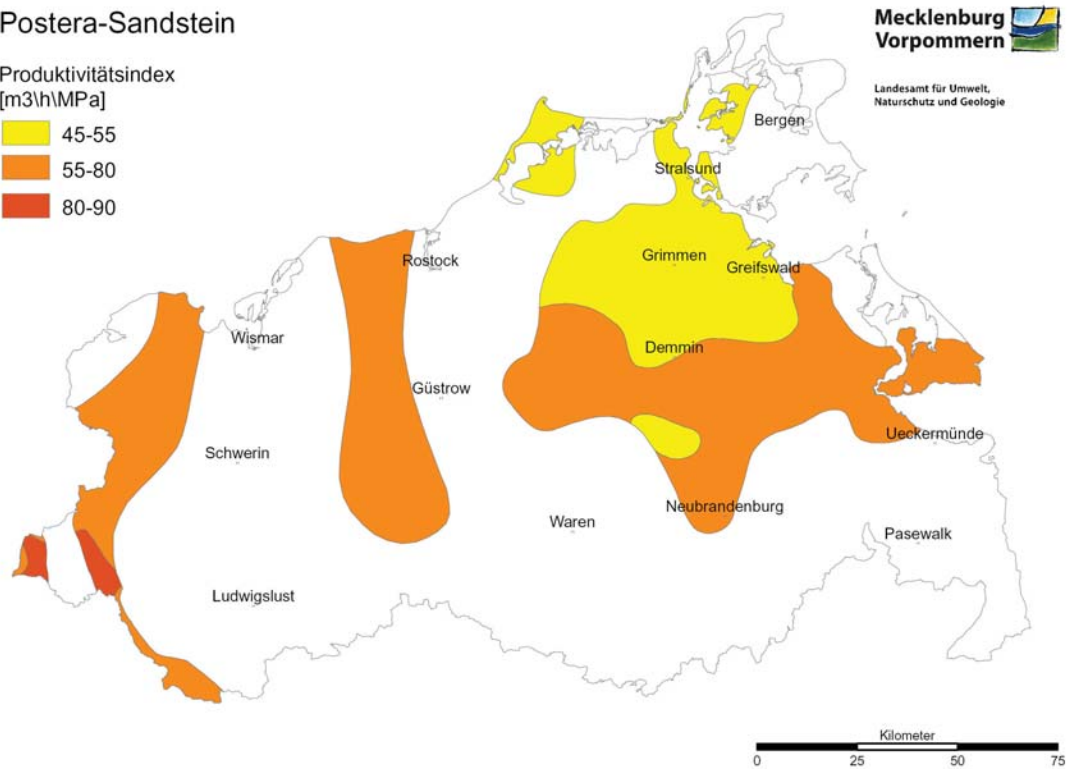


Abb. 1: Produktivitätskarten für die geothermisch nutzbaren Rhät-Sandsteine in Mecklenburg-Vorpommern.

Für die Berechnung der Produktivitäten mittels der unter Punkt 2 genannten Formeln wurden folgende Parameter berücksichtigt: (1) Tiefenlage der Sandsteinhorizonte unterhalb der Lias-Basis in 400 m Abstufungen (200, 600, 1.000 ... 2.200, 2.600 m), (2) Salinität der Tiefenwässer entsprechend der mittleren Tiefenlage einer Stufe (20, 60, 100 ... 220, 260 g/l), (3) mittlere, kumulative Sandsteinmächtigkeit von 35 m für die Postera-Schichten und 25 m für die Contorta-Schichten, (4) mittlere Durchlässigkeit von 500 mD für die Postera-Sandsteine und 1.000 mD für die generell durchlässigeren Contorta-Sandsteine. Anschließend wurden benachbarte Bereiche zusammengefasst und mit berechneten und aus Testen abgeleiteten Produktivitätswerten von Bohrungen bestehender Geothermieanlagen verglichen.

Sowohl die Postera- als auch die Contorta-Sandsteine zeigen eine Zunahme der Produktivität vom nordöstlichen Beckenrand (Vorpommern, Rügen) zum Zentralteil des NDB (SW-Mecklenburg). Dies ist auf die zunehmende Tiefenlage der Schichten und damit der steigenden Salinität zurückzuführen. Besonders in den Randsenken der Salzstrukturen im Raum Ludwigslust werden die höchsten Produktivitäten in den Contorta-Sandsteinen von 110-120 m³/h/MPa prognostiziert. Diese Werte korrelieren gut mit den Produktivitäten des Geothermiestandortes Neustadt-Glewe in diesem Gebiet, die mindestens 125 m³/h/MPa betragen. Dagegen liegen die für den Geothermiestandort Waren bekannten Produktivitäten von ca. 60 m³/h/MPa etwas unterhalb der für diesen Teil des NDB prognostizierten 80-110 m³/h/MPa. Am Geothermiestandort Neubrandenburg, wo die Postera-Sandsteine genutzt werden, sind die Produktivitäten mit 100 m³/h/MPa etwas höher als die prognostizierten Produktivitäten von 80-90 m³/h/MPa.

4. Malm-Karbonate im Molassebecken

Im Zuge der alpidischen Gebirgsbildung entstand das tertiäre MB (Abb. 2). Dabei schoben sich die Alpen nach Norden auf und über die süddeutsche Großscholle, welche im Süden unter die Alpen absank und im Norden als Fränkische und Schwäbische Alb Übertage ansteht. Somit befindet sich der geothermale Hauptaquifer des Malm nördlich Ingolstadt an der Erdoberfläche und sinkt nach Süden bis in Tiefen > 4.000 m ab.

Prinzipiell können für den Malm in Süddeutschland fünf Großfaziesräume unterschieden werden (KOCH 1997). Neben der helvetischen Fazies eines Tiefseebeckens treten zwei weitere charakteristische Lithofaziestypen auf: (1) die dominierende Normalfazies (Bank- oder Lagunenfazies) und (2) die „Rifffazies“ (Massenkalk). Dabei besteht die Bankfazies aus gebankten Kalken und Mergeln und enthält die stratigraphisch wichtigen Ammoniten. Die Karbonate der Bankfazies setzen sich aus mikritischen Kalken, welche bioklastischen Detritus aus Ammoniten, Belemniten, Lamellibranchiaten, Gastropoden, Brachiopoden sowie benthischen Foraminiferen, Schwammnadeln, Calcisphären und Bryozoen enthalten, zusammen. Die „Rifffazies“ besteht aus „buildups“, die von Schwämmen, Cyanobakterienkrusten und lokal von Korallen gebildet werden. Die Hauptentwicklung und größte Ausdehnung der „Rifffazies“ trat im oberen Kimmeridge auf. Die Riffe (Massenkalk) sind häufig dolomitisiert und dedolomitisiert. Diese diagenetischen Prozesse sind z.T. mit der Bildung sekundärer Porositäten verknüpft. Umfangreiche Ausführungen zur Fazies und Diagenese der Malm-Karbonate finden sich u.a. bei KOCH (1997).

Karbonatgesteine bilden sich primär aus Korallen-, Schwamm- oder anderen Riffen, organisch und anorganisch gebildeten Kalkschlämmen etc. Primär hohe Porositäten sind dabei an Riffsysteme gebunden, die Mergel der Lagunen sind primär eher schlecht durchlässig. Mit der diagenetischen Umwandlung von Calcit zu Dolomit (Dolomitisierung) einhergehend ist häufig eine Zunahme der Porositäten zu verzeichnen. Das System der Malm-Karbonate ist jedoch deutlich komplexer zu sehen. So weist der ca. 600 m mächtige Malm fast immer Bereiche auf, die durch Zuflüsse charakterisiert sind. Im nördlichen MB wird dies durch eine teils intensive Verkarstung verstärkt. Im südlichen MB sind kaum Hinweise auf Verkarstung bekannt. Hier werden die Durchlässigkeiten

durch die Matrixporosität der Karbonate (vgl. KOCH & SOBOTT 2005) und durch Klüfte gesteuert. Die Produktivitäten der im Bereich von München realisierten Bohrungen variieren deshalb sehr stark. Nachfolgend werden jedoch Untersuchungen und Daten vorgestellt, die eine Produktivitätsprognose ermöglichen.

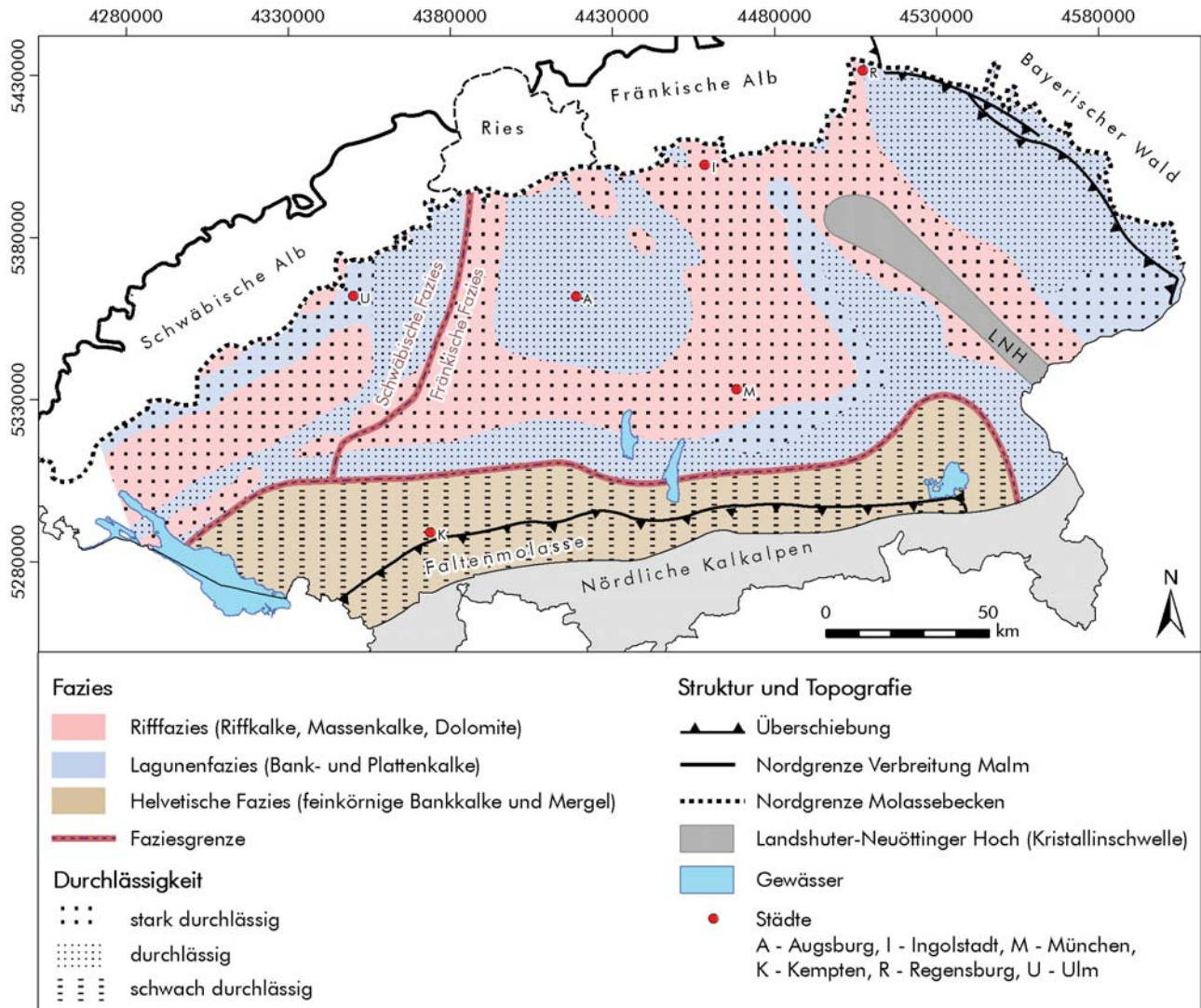


Abb. 2: Fazies und Verbreitung sowie regionale Bewertung der Durchlässigkeiten des Malm im süddeutschen Molassebecken.

4.1 Lithologie, Fazies und Zuflüsse aus dem Malm südlich von München

Im Bereich südlich von München wurden mehrere Bohrungen lithofaziell bearbeitet. Beispielhaft sollen hier die Daten und Ergebnisse der Bohrung Gt Unterhaching 2 vorgestellt werden. Das mittels Spülproben („cuttings“) untersuchte Intervall umfasst die Kalke und Dolomite des Malm und im obersten Teil untergeordnet Karbonate (Dolomit; Nachfall) des Purbeck. Neben Fragen der stratigraphischen Stellung lag der Schwerpunkt der Untersuchungen auf der faziellen und ersten diagenetischen Analyse (Porosität, Porengeometrie) und dem Zusammenhang mit den gemessenen Zuflussraten. Hierzu wurden die in den Spülproben auftretenden Lithotypen quantitativ erfasst, das Dolomit/Calcit-Verhältnis der ausgewählten Spülproben röntgenographisch ermittelt und petrographische Dünnschliffe ausgewählter Spülproben analysiert. Die Klassifikation der

Faziestypen erfolgte nach DUNHAM (1962) und die der Porentypen nach CHOQUETTE & PRAY (1970). Die halbquantitative Auswertung der Spülproben basiert auf dem von KOCH (1991) erläuterten System der Faziesanalyse aus Spülproben. Der faziellen Ansprache der Spülproben liegen die Faziesinterpretationen zu Grunde, wie sie von KOCH et al. (1994) und KOCH (1997) dokumentiert wurden. Die Ansprache der Dolomite (Kristallitgröße, Kristallmorphologie) erfolgte nach SIBLEY (1982) und nach SIBLEY & GREGG (1987) sowie im Bezug zur diagenetischen Entwicklung der Malm-Karbonate nach KOCH & LIEDMANN (1996).

Feinkristalline, dolomitische Kalke und vollkommen dolomitisierte Peloidkalke (Ooide?) des Purbeck stehen in einer Teufe von 3.150 bis 3.185 mMD (MD = „measured depth“ = Bohrlänge) an (Taf. 1A und B). Hier treten ferner häufig Crustaceen-Kotpillen („*Favreina Salevensis*“) auf, die für das Favreinen-Purbeck charakteristisch sind. Die ausgewählte Probe bei 3.200 mMD (Taf. 1B) wurde aus dem Nachfall-Maximum des Purbeck entnommen. Der Top des Malm liegt bei 3.186 mMD und wird an einem markanten Sprung des Gamma-Logs festgemacht. Der Malm zeta 6 (?) beginnt im Hangenden mit einer Wechselfolge aus Mergeln, überwiegend dichten Mudstones, und Mud- bis Wackestones mit selten auftretenden Schwammkalken. In einer Teufe von 3.232 bis 3.262 mMD setzen Peloid-Wacke- bis Packstones ein (Taf. 1C), in denen vereinzelt idiomorphe Dolomitrhomboeder auftreten. Im Liegenden folgt ein etwa 25 m mächtiges Paket aus dunklen und hellen Kalken im Wechsel, welches am Top verstärkt dunkle Ton-Mergelsteine führt. Darunter wurde ein gering mächtiges Paket (ca. 15 m) fein- und mittelkristalliner Dolomite (Taf. 1D) beobachtet. Die Basis des im Liegenden folgenden 40 m mächtigen (3.400 bis 3.440 mMD), dichten Peloid-Kalks (Taf. 1E) wird als Grenze Malm epsilon/zeta 1 interpretiert. Am Top des Malm epsilon (Spülprobe 3.345 mMD) treten grobkristalline Dolomite (Taf. 1F) mit hoher Interkristallinporosität und sehr hohen Zuflussraten in einem 25 m mächtigen Bereich auf. Im Liegenden folgen mittel- bis grobkristalline Dolomite (Taf. 2A und B). Sie müssen aufgrund der teilweise geringeren Kristallgröße, der schlechteren Sortierung und der lokal intensiveren Verzahnung der Kristalle kleine Porenhalsdurchmesser aufweisen. Dies hat geringere Zuflussraten aus dem Gestein (Matrixporosität und Matrixpermeabilität) ab 3.365 mMD zur Folge. Die Zuflussraten sind hier über die gesamte Mächtigkeit dieser Einheit relativ konstant, was für eine homogene Ausbildung des Dolomits spricht. Ab etwa 3.460 bis 3.515 mMD treten überwiegend Peloid- und Bioklasten-reiche Kalke auf (Taf. 2C). Der im Liegenden (ca. 3.515 bis 3.560 mMD) unmittelbar folgende fein- und mittel- bis grobkristalline Dolomit (Taf. 2D) bringt vor allem in Verbindung mit einer zwischen 3.540 bis 3.558 mMD vorhandenen Störungszone starke Zuflüsse.

Aufgrund eines Versatzbetrages von etwa 238 m an dieser Störung werden dolomitische, poröse Abschnitte des oberen Malm von der Hochscholle in der Tiefscholle erneut durchfahren. Dieser unterste Teil der Bohrung besteht daher ausschließlich aus grobkristallinem Dolomit (Taf. 2E und F) und weist sehr starke Zuflussraten auf. Bis 3.700 mMD erfolgen in diesem Intervall etwa 60 % der Zuflüsse, tiefer sind keine Zuflüsse nachweisbar. Die Basis des Malm delta wurde wahrscheinlich nicht erreicht. Dies wird aus der weiterhin geringen Gamma-Strahlung und damit aus dem Fehlen von tonigen Kalken und Mergeln, wie sie für den Malm gamma charakteristisch sind, abgeleitet. In einer weiteren Bohrung südlich von München folgen im Liegenden der zonierten, mittel- bis grobkristallinen Dolomite, Mudstones der Kieselschwammfazies. Diese werden auch für die Gt Unterhaching 2 vermutet, ein Nachweis ist aufgrund der fehlenden „cuttings“ (totale Spülungsverluste) nicht möglich. Anders in der Bohrung Gt Unterhaching 1a, hier wurden die dunklen tonigen Kalke und Mergel des Malm gamma erbohrt.

4.2 Geothermie-relevante Strukturen

Großräumige Spannungsanalysen (z.B. OLAIZ et al. 2009) zeigen, dass im Bereich des MB transtensive bis „strike-slip“-Strukturen vorherrschen sollten. Aufgrund N-S gerichteter Hauptspannungsachsen und des für das MB dokumentierten Strukturbaus lassen sich häufig auch

lokal sinistrale NE–SW streichende Transformstörungen beobachten. So wird beispielsweise der Hauptabbruch im Bereich Unterhaching (WOLFGGRAMM et al. 2007) als eine derartige Störung interpretiert. Diesen Hauptabbrüchen lassen sich häufig „riedel shears“ und weitere tektonische Störungen zuordnen. Alle diese Strukturen/Störungen führen zu einer starken Auflockerung des Gebirges im Bereich der jeweiligen Hauptabbrüche, die im zentralen Teil des MB meistens E–W bzw. NE–SW streichen. Aufgrund ihrer Entstehung in einem transtensiven Regime, sollten sich Begleit- und Nebenstörungen überwiegend im Bereich der Tiefscholle bilden (Abb. 3), was sich auch bei der Bewertung seismischer Profile und entsprechender Strukturanalysen an verschiedenen Standorten im MB gezeigt hat.

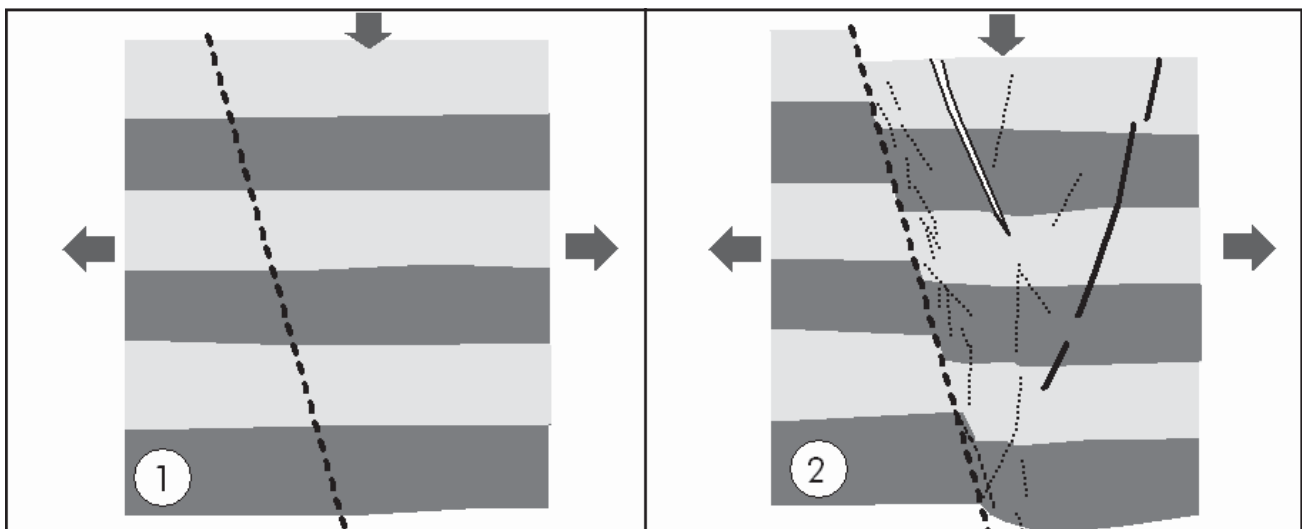


Abb. 3: Bildung von Tiefschollen im Spannungsfeld des Molassebeckens (schematisch).

4.3 Zuflusszonen im Malm

Untersuchungen der Zuflussraten im zentralen Teil des MB (z.B. Geothermiebohrungen Gt Unterhaching 1a und 2) zeigen, dass Zuflüsse aus einem Bereich von ca. 200 m erfolgen. Etwa 40 % sind dabei auf ein geringes Bohrlängenintervall beschränkt, welche Störungszonen zugeordnet werden, die übrigen 60 % aber stammen aus der „Matrix“ des Malm. Die für den Malm des MB im Bereich südlich von München typischen Zuflussprofilierungen sind bei WOLFGGRAMM et al. (2007) dokumentiert. Unter Berücksichtigung der Lithologie/Fazies zeigt sich, dass erste, wenn auch geringe Zuflüsse im Bereich des Malm zeta 6 wahrscheinlich über Kluftsysteme erfolgen müssten, da die mikritischen Kalke hydraulisch undurchlässig sind. Die oberste „echte“ Zuflusszone weist an der Basis einen fein- bis mittelkristallinen Dolomit (Taf. 1D) in einer Teufe von 3.285 bis 3.300 mMD auf, der grob in den Malm zeta 1 bis 6 eingestuft wird. Der im Liegenden folgende 40 m mächtige, dichte Peloid-Kalk (Taf. 1E) besitzt keinerlei Zuflüsse. Die guten Zuflussraten in den dolomitischen Bereichen zwischen 3.350 mMD und 3.700 mMD sind von der Ausbildung der Dolomitkristalle abhängig. Grundsätzlich gilt, dass homogene Bereiche mit fein- bis mittelkristallinem Dolomit aufgrund der relativ geringen Kristallgröße wahrscheinlich nur geringe Porenhalbdurchmesser und demgemäß geringe Permeabilitäten (Zuflussraten) aufweisen. Mittel- bis grobkristalline Dolomite mit idiomorphen Kristallen weisen große, sichtbare Interkristallinporen und damit wahrscheinlich auch große Porenhalbdurchmesser auf, was sich in den besten Zuflussraten widerspiegelt. Weiteres Wachstum von Dolomitkristallen, das zu einem Pflastergefüge aus hypidiomorphen bis xenomorphen Kristallen führt, kann allerdings wieder zu einer Verschlechterung der Permeabilität führen, wodurch geringere Zuflussraten auftreten. Generell

bleibt festzustellen, dass die Höhe der Zuflussrate von der Lithologie und Fazies des Malm abhängig ist.

5. Produktivitätsprognosen

5.1 Produktivitätsprognosen für poröse Sandsteinaquifere im Norddeutschen Becken

Die Prognosen der Produktivitäten entsprechend der vorgeschlagenen Vorgehensweise sind als sehr gut zu bezeichnen, was sich durch den Vergleich mit Produktivitäten laufender Geothermieanlagen nachweisen lässt (vgl. WOLFGGRAMM et al. 2004). Trotz der relativ guten Übereinstimmung der prognostizierten mit den gemessenen Werten ist zu beachten, dass regional/lokal variable Sandsteinmächtigkeiten und Permeabilitätsschwankungen bisher nicht in den Produktivitätskarten berücksichtigt wurden. Neben einer mit der Tiefe korrelierbaren Permeabilitätsabnahme können auch weitere diagenetische Veränderungen innerhalb der Sandsteine lokal zu erheblichen Porositätsreduzierungen führen. Zu nennen sind hierbei u.a. früh- oder spätdiagenetische Anhydritzementationen, wie sie beispielsweise in der Bohrung Allermöhe zu beobachten sind, wo aufgrund zufließender Zechsteinwässer vom nahe gelegenen Salzstock der Sandstein fast vollständig zementiert wurde. Deshalb können die Produktivitätskarten nur erste Anhaltspunkte über die zu erwartenden Produktivitäten liefern, jedoch keine Machbarkeitsstudie ersetzen.

5.2 Produktivitätsprognosen für die Malm-Karbonate südlich von München

Für gute Produktivitätsprognosen im Malm ist die Datenlage noch zu gering, zumal das hydrogeologische System sehr komplex ist. Lithologische Untersuchungen zeigen, dass von den ca. 400 m des oberen Malm nur etwa die unteren 350 m hydraulisch relevant sind. Auch der Purbeck ist überwiegend mikritisch ausgebildet und nicht für größere Zuflüsse bekannt. Da die Geothermiebohrungen im MB vor allem als abgelenkte Bohrungen realisiert werden, sollte grundsätzlich pro Bohrmeter im Malm eine Produktivität von 0,01 bis 0,02 l/(s*bar) angenommen werden. Für 100 m Bohrlänge würden sich somit 1 bis 2 l/(s*bar) ergeben. Da aus Störungszonen häufig 40 bis 50 % der erzielten Zuflüsse entstammen, wären die „Matrixproduktivitäten“ noch mit einem subjektiv festzulegenden Faktor (je nach Art der Störung) von 1,5 bis 3,0 zu versehen. Für eine Bohrung im Süden von München, welche eine „effektive“ Malm-Mächtigkeit (ohne die faziell ungeeigneten Bereiche) von 200 m und eine ausgeprägten Störungzone mit hohem Versatz erschließt, wären somit Produktivitäten von 3 bis 12 l/(s*bar) anzusetzen, was entsprechend bekannter Anlagendaten als realistisch erscheint. Inwieweit die erhöhten Zuflüsse im Bereich der Störungszonen auf die tektonische Auflockerung der Karbonatgesteine selbst oder auf verstärkte diagenetische Umwandlungen infolge der dadurch erleichterten Zirkulation von Fluiden zurückzuführen sind, ist das Ziel weiterer Untersuchungen. Aber bereits jetzt ist offensichtlich, dass besonders im Bereich der Tiefschollen nahe der Hauptstörungen die höchsten Zuflüsse vorhanden sind.

Danksagung

Die Untersuchungen wurden größtenteils vom Bundesministerium für Umweltschutz und Reaktorsicherheit (BMU) gefördert (FKZ: 0329951E und 0327542).

Quellenangaben

CHOQUETTE, P.W. & PRAY, L.C. (1970): Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. - AAPG Bull., 54: 207-250.

DUNHAM, R. (1962): Classification of carbonate rocks according to depositional texture. - In: HAM, W.E. [ed.]: Classification of carbonate rocks. - AAPG Mem. 1: 108-121.

- FELDRAPPE, H., OBST, K. & WOLFGRAMM, M. (2008): Die mesozoischen Aquifere des Norddeutschen Beckens und ihr Potential für die geothermische Nutzung. - Z. geol. Wiss, 36, 4-5: 199-222.
- FRANZ, M. & WOLFGRAMM, M. (2008): Sedimentologie, Petrologie und Fazies geothermischer Reservoirs am Beispiel der Exter-Formation (Oberer Keuper, Rhaetium) NE-Deutschlands. - Z. geol. Wiss, 36, 4-5: 223-247.
- KOCH, R. (1991): Faziesanalyse aus Spülproben. - Zbl. Geol. Paläontol., I, 8: 1029-1043.
- KOCH, R. (1997): Daten zur Fazies und Diagenese von Massenkalken und ihre Extrapolation nach Süden bis unter die Nördlichen Kalkalpen. - Geol. Bl. NO-Bayern, 47: 117-150.
- KOCH, R. & LIEDMANN, W. (1996): Diagenesis and fluid inclusions of Upper Jurassic "Sponge-Algal-Reefs" in SW-Germany. - In: REITNER, J., NEUWEILER, F. & GUNKEL, F. [eds]: Global and Regional Controls on Biogenic Sedimentation. I. Reef Evolution. Research Reports. - Göttinger Arb. Geol. Paläont., Sb2: 221-225.
- KOCH, R. & SOBOTT, R. (2005): Porosität in Karbonatgesteinen – Genese, Morphologie und Einfluss auf Verwitterung und Konservierungsmaßnahmen. - Z. dt. Ges. Geowiss., 156/1: 33-50.
- KOCH, R., SENOWBARI-DARYAN, B. & STRAUSS, H. (1994): The Late Jurassic "Massenkalk Fazies" of Southern Germany: Calcareous sand piles rather than organic reefs. - Facies, 31: 179-208.
- OBST, K., BRANDES, J., FELDRAPPE, H. & IFFLAND, J. (2009): Geologische Übersichtskarte von Mecklenburg-Vorpommern 1:500.000. Die Nutzhorizonte des Rhät/Lias-Aquiferkomplexes. - LUNG M-V (Güstrow).
- OLAIZ, A.J., MUÑOZ-MARTÍN, A., DE VICENTE, G., VEGAS, R. & CLOETINGH, S. (2009): European continuous active tectonic strain–stress map. - Tectonophysics, 474, 1-2: 33-40.
- RAUPPACH, R., WOLFGRAMM, M., THORWART, K. & SEIBT, P. (2008): Hydraulic features of Geothermal aquifers in the North German Basin. - Z. geol. Wiss, 36, 4-5: 267-280.
- SIBLEY, D.F. (1982): The origin of common dolomite fabrics: Clues from the Pliocene. - J. Sed. Petrol., 52: 1087-1100.
- SIBLEY, D.F. & GREGG, J.M. (1987): Classification of dolomite rock textures. - J. Sed. Petrol., 57/5: 967-975.
- WOLFGRAMM, M. & SCHMIDT MUMM, A. (2001): Der Einfluss von Subsidenz und Diagenese auf die geochemische Zusammensetzung von Beckenfluiden am Beispiel des NO-deutschen Beckens. - Zbl. Geol. Paläont., I, 1/2: 211-231.
- WOLFGRAMM, M., BARTELS, J., HOFFMANN, F., KITTL, G., LENZ, G., SEIBT, P., SCHULZ, R., THOMAS, R. & UNGER, H.J. (2007): Unterhaching geothermal well doublet: structural and hydrodynamic reservoir characteristic; Bavaria (Germany). - Tagungsband der European Geothermal Conference vom 30.05.-01.06.2007 in Unterhaching, 47: 1-6.
- WOLFGRAMM, M., RAUPPACH, K. & SEIBT, P. (2008): Reservoir-geological characterization of Mesozoic sandstones in the North German Basin by petrophysical and petrographical data. - Z. geol. Wiss, 36, 4-5: 249-265.
- WOLFGRAMM, M., SEIBT, P. & LENZ, G. (2004): Neue Aspekte der Speicherbewertung für die geothermische Stromerzeugung. - GTV Tagung in Landau, Tagungsband: 120-130.

Geothermie Neubrandenburg GmbH, Seestr. 7A, 17033 Neubrandenburg
gtn@gtn-online.de

Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie, Goldberger Str. 12, 18237 Güstrow
karsten.obst@lung.mv-regierung.de

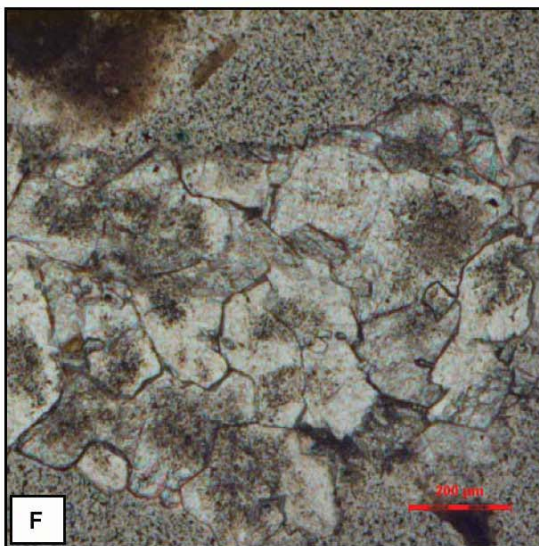
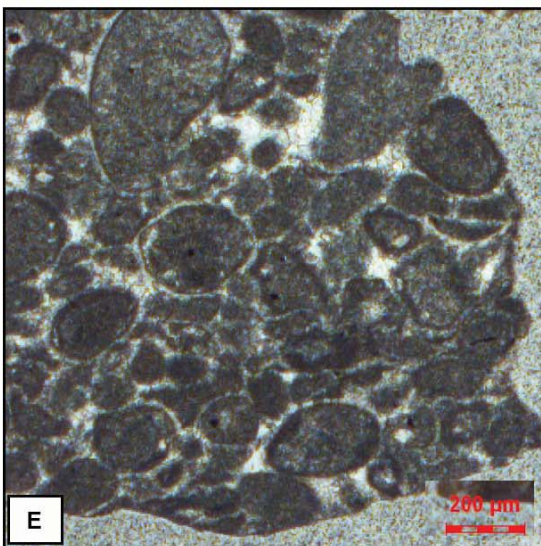
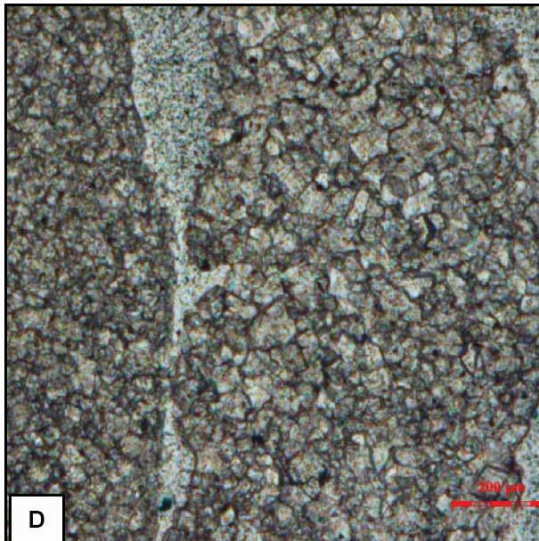
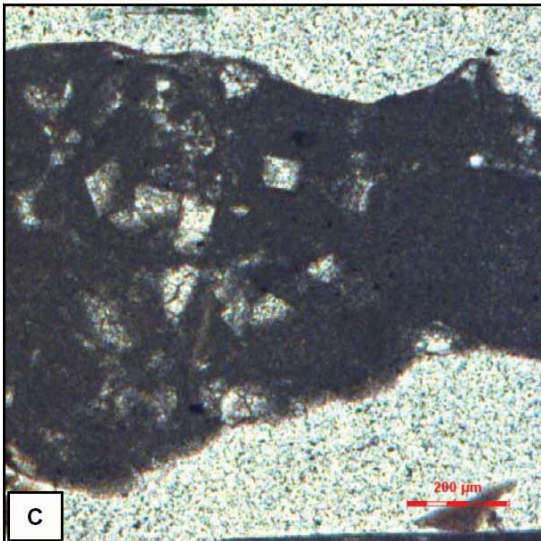
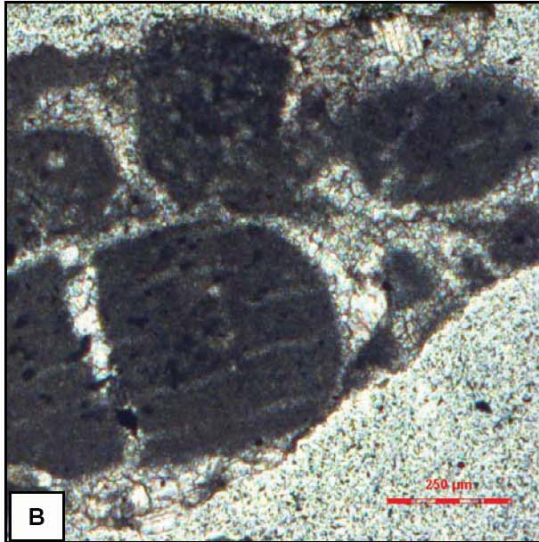
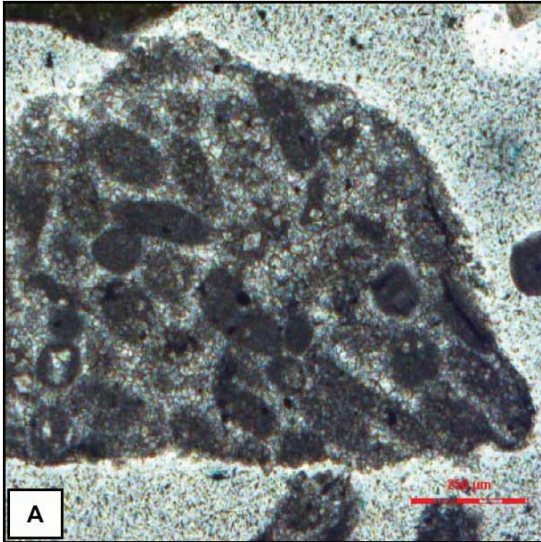
Tafel 1: Mikroskopische Aufnahmen von Dünnschliffen der Bohrung Gt Unterhaching 2

- A (Probe 3.200 mMD): Nachfall von Purbeck-Dolomit (oberhalb 3.185 mMD) mit Geisterstrukturen des primären Peloid-Lithoklast-Packstones;
- B (Probe 3.200 mMD): Purbeck-Dolomit mit *Favreina selevensis* in Längs- und Querschnitten;
- C (Probe 3.255 mMD): Malm zeta 6 (?) – pelletoider Mudstone mit einzelnen Dolomitrhomboedern;
- D (Probe 3.285 mMD): Malm zeta 1 bis 6 – feinkristalliner (links; < 50 bis 50 µm) und fein- bis mittelkristalliner Dolomit (rechts; 50 bis 100 µm Kristallitgröße) mit hypidiomorphen und xenomorphen Kristallen;
- E (Probe 3.345 mMD): Nachfall von Malm zeta 1 (?) – Lithoklast-Peloid-Pack- bis Grainstone;
- F (Probe 3.345 mMD): Malm epsilon (?) – mittel- bis grobkristalliner Dolomit (100 bis 300 µm Kristallgröße).

Tafel 2: Mikroskopische Aufnahmen von Dünnschliffen der Bohrung Gt Unterhaching 2

- A (Probe 3.400 mMD): Malm delta-epsilon – mittel- bis grobkristalliner Dolomit mit Interkristallinporen (Kristallgröße bis 0,5 mm);
- B (Probe 3.440 mMD): Malm delta-epsilon – mittel- bis grobkristalliner Dolomit mit Interkristallinporen und Peloid-Geisterstrukturen (Kristallgröße bis 0,5 mm);
- C (Probe 3.480 mMD): Malm delta-epsilon – Lithoklast-Peloid-Packstone mit Echinodermenbruchstücken (E) und Schalenresten;
- D (Probe 3.525 mMD): Malm delta-epsilon – feinkristalliner (links; < 50 bis 100 µm) und mittel- bis grobkristalliner Dolomit (rechts; 100 bis 400 µm Kristallgröße) mit hypidiomorphen und xenomorphen Kristallen und leichtem Zonarbau;
- E (Probe 3.580 mMD): Malm delta-epsilon – grobkristalliner Dolomit (200 bis 600 µm) mit Peloid-Geisterstrukturen;
- F (Probe 3.595 mMD): Malm delta (?) – mittel- bis grobkristalliner Dolomit (100 bis 300 µm) und ausgeprägten Interkristallinporen.

Tafel 1



Tafel 2

