

**Die Lithofazies des Oberjura (Malm)
im Großraum München und deren Einfluss auf die
tiefengeothermische Nutzung**

**Inauguraldissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
des Fachbereichs Geowissenschaften
der Freien Universität Berlin**

vorgelegt von

Franz Böhm

Berlin 2012

Gutachter

Prof. Dr. Michael Schneider

Freie Universität Berlin
Institut für geologische Wissenschaften
Arbeitsbereich Hydrogeologie
Malteserstraße 74 – 100
12249 Berlin

Prof. Dr. Roman Koch

Institut für Paläontologie Universität Erlangen
Loewenichstr. 28
91054 Erlangen

Tag der Disputation: 09.11.2012

Vorwort

Die vorliegende kumulative Dissertation entstand im Rahmen eines vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) geförderten Forschungsverbundvorhabens (FKZ: 0327671A/B) der Freien Universität Berlin, Arbeitsbereich Hydrogeologie, zusammen mit der Erdwerk GmbH in München sowie dem Institut für Wasserchemie der TU München im Unterauftrag der FU Berlin. Zusätzlich wurde die AG Angewandte Sedimentologie und Bausteinforschung des GeoZentrums Nordbayern der Universität Erlangen-Nürnberg während der dreijährigen Laufzeit des Vorhabens mit eingebunden. Das Forschungsverbundvorhaben mit dem Titel „Wissenschaftliche und technische Grundlagen für ein strukturgeologisches und hydrogeologisches Modell zur Nutzung des geothermischen Potentials im Großraum München“ wurde in die vier untergeordneten Arbeitsgebiete Lithofazies, Strukturgeologie, Hydraulik und Hydrochemie gegliedert, die zusammen zu einer integrierten Reservoircharakterisierung des tiefen Malm im Großraum München führen. Die vorliegende Arbeit zur Lithofazies entstand dabei in enger Zusammenarbeit mit Herrn Dipl.-Geol. Ulrich Steiner (Arbeitsgebiet Strukturgeologie) und Herrn Dipl.-Geol. Alexandros Savvatis (Arbeitsgebiet Hydraulik).

Die Arbeit wurde zu Teilen publiziert in:

1. Kapitel 2: BÖHM, F., KOCH, R., HÖFERLE, R. & BAASCH, R. (2010): Der Malm in der Geothermiebohrung Pullach Th 2 – Faziesanalyse aus Spülproben (München, S-Deutschland). - Geol. Bl. NO-Bayern, 60: 17-49; Erlangen.

Mein Beitrag an dieser Veröffentlichung bestand in der Aufbereitung und geologischen Beschreibung der Spülproben der Bohrung, der stratigraphischen Grenzziehung unter Berücksichtigung der Bohrlochgeophysik sowie in der hydrogeologischen Interpretation der Bohrdaten. Die mikrofaziellen und diagenetischen Untersuchungen wurden von Hr. Prof. Koch am Geozentrum Nordbayern im Unterauftrag durchgeführt und von mir in einen Kontext zur Hydraulik in der Bohrung und zur geothermischen Nutzung gestellt.

2. Kapitel 3: BÖHM, F., BIRNER, J., STEINER, U., KOCH, R., SOBOTT, R., SCHNEIDER, M. & WANG, A. (2011): Tafelbankiger Dolomit in der Kernbohrung Moosburg SC 4: Ein Schlüssel zum Verständnis der Zuflussraten in Geothermiebohrungen (Östliches Molassebecken, Malm Delta-Zeta; Süddeutschland). - Z. Geol. Wiss., 39: 117-157; Berlin.

Mein Ziel der Arbeit war es, über mikrofazielle und diagenetische Dünnschliffuntersuchungen einen Zusammenhang zu petrophysikalischen Messwerten an Kernmaterial der Bohrung Moosburg SC 4 herzustellen, und die Übertragbarkeit der faziellen Ausprägung auf den Großraum München zu überprüfen. Der Fokus meines Beitrags richtete sich auf die Entwicklung eines Konzepts für ein faziell-hydraulisches Untersuchungsprogramm inkl. der Kernaufnahme und Probenahme relevanter Kernabschnitte im Kernlager des bay. Landesamts für Umwelt. Die Dünnschliffuntersuchungen sowie die Porositäts- und Permeabilitätsmessungen an Kernabschnitten, die Hr. Prof. Koch am Geozentrum Nordbayern im Unterauftrag durchführte, wurden von mir in den Kontext zur geothermischen Malm-Exploration gesetzt, und die Bedeutung und Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die geothermische Nutzung im Großraum München herausgearbeitet.

3. Kapitel 4: BÖHM, F., SAVVATIS, A., STEINER, U., SCHNEIDER, M. & KOCH, R. (2012): Lithofazielle Reservoircharakterisierung zur geothermischen Nutzung des Malm im Großraum München. – Grundwasser; Berlin (DOI: 10.1007/s00767-012-0202-4).

Die Veröffentlichung stellt den thematischen Schwerpunkt der vorliegenden Dissertation dar. In dem Fachartikel werden in komprimierter Form die Ergebnisse meiner Untersuchungen zur lithofaziellen Charakteristik von Geothermiebohrungen im Großraum München und deren Zusammenhang mit der Hydraulik des Grundwasserleiters Malm aufgezeigt, sowie die Entwicklung eines hydrostratigraphischen Modells als Basis einer Fazies-orientierten Explorationsstrategie für Geothermiebohrungen im Großraum München dargestellt. Die neu entwickelte und in diesem Artikel dargestellte „PAC-Analyse“ (Permeabilitätsabschätzung an Cuttings) ist als ein an der praktischen Arbeit orientiertes Ergebnis zu werten und basiert auf den grundlegenden Vorarbeiten der ersten beiden Veröffentlichungen. Die fazielle Gliederung elektrischer Imagelogs aus Malmbohrungen stellt einen wichtigen Bestandteil der Arbeit dar und wurde von Hr. Dipl.-Geol. U. Steiner und mir in Zusammenarbeit entwickelt (vgl. Steiner & Böhm, 2011 im Anhang A). Die in der Publikation dargestellten Parameter zur litho-

Vorwort

faziellen Charakterisierung der Bohrungen wurden von mir erhoben, die Veröffentlichung wurde von mir entwickelt und verfasst. Die Auswertung der hydraulischen Daten zur Korrelation mit den lithofaziellen Parametern wurde von Hr. Dipl.-Geol. A. Savvatis durchgeführt, der damit einen wichtigen Anteil an der Veröffentlichung hatte.

Im Rahmen des Forschungsverbundvorhabens fanden regelmäßige Arbeitstreffen mit dem zeitlich parallel durchgeführten Verbundvorhaben „Geothermische Charakterisierung von karstig-klüftigen Aquiferen im Großraum München“ (Schulz & Thomas, 2012) (FKZ: 0325013A) des Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik (LIAG) und Bayerischen Landesamtes für Umwelt statt. Die in der vorliegenden Arbeit dargestellten methodischen Ansätze zur lithofaziellen Reservoircharakterisierung des Malm im Großraum München, insbesondere die seismische Stratigraphie, die fazielle Differenzierung in Riff- und Beckenfazies sowie die hydrostratigraphische Gliederung, fanden zu einem großen Teil im Rahmen der Erstellung des hydrogeologischen Modells zum Großraum München (Huber, 2012) Eingang.

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit stellt zum einen die Entwicklung und Anwendung von praxisnahen Methoden zur lithofaziellen Reservoircharakterisierung des Malm aus Geothermiebohrungen im Molassebecken dar. Zum anderen werden für den Großraum München geltende Zusammenhänge der lithofaziellen Ausprägung mit der Gebirgsdurchlässigkeit und eine darauf abgestimmte, fündigkeitsoptimierte Explorationsstrategie aufgezeigt. So wurde im Hinblick auf potentielle Zuflusshorizonte eine Methode zur Abschätzung der Permeabilität aus Cuttings, die sog. PAC-Analyse entwickelt. Im Rahmen einer integrierten Reservoircharakterisierung können damit qualitative Permeabilitätsprofile der Bohrungen abgeleitet werden. Weitere Abschätzungen zur Porositäts- und Permeabilitätscharakteristik fanden auf Basis von Cuttingdünnschliffen statt, die außerdem durch mikrofazielle Untersuchungen zur Klärung des Ablagerungsraums und der lithostratigraphischen Korrelation der Bohrungen beitrugen. Im Hinblick auf die fazielle Gliederung der Bohrungen erwiesen sich die vorliegenden elektrischen Imagelogs von entscheidender Bedeutung. Durch deren Gegenüberstellung mit der lithofaziellen Ansprache des Bohrkleins, dem Abgleich mit Kernmaterial der vollständig im Malm gekernten Forschungsbohrung Moosburg SC 4 sowie Analogiestudien im Aufschluss, wurde während des Projekts eine fazielle Differenzierung der Malmkarbonate in Imagelogs erarbeitet. Im Zuge der Bohrdatenauswertung konnte eine Korrelation zwischen dem Gesamtdolomitgehalt einer Bohrung und deren Transmissibilität hergestellt werden: Mit steigendem Dolomitanteil steigt auch tendenziell die Gebirgsdurchlässigkeit. Da die Massenfazies der Malmkarbonate im Gegensatz zur Bankfazies eher zur Dolomitisierung neigt, ist erstere als geothermisches Reservoir anzusprechen. Entsprechend hat auch die Mächtigkeit von durchteufter Massen- bzw. Bankfazies Einfluss auf die Fündigkeit der Bohrungen: Je höher der Anteil der Massenfazies, umso größer ist gleichzeitig die Transmissibilität. Eine laterale Faziesdifferenzierung kann anhand der Texturanalyse und sedimentären Interpretation sowohl in 2D- als auch in 3D-Seismikdatensätzen erfolgen. So zeichnet sich die Massenfazies in der Seismik meist durch eine eher transparente, teils chaotische Textur, und die Bankfazies durch einen eher gleichmäßigen parallelen, „dünnen“ Reflektorverlauf aus. Auf Basis sequenzstratigraphischer Interpretationsansätze und unter Zuhilfenahme von seismischen Attributen konnte so aus seismischen Datensätzen eine konsistente Modellvorstellung für die Faziesverteilung des Malm im tiefen Untergrund entwickelt werden. Die daraus abgeleiteten, sehr kleinräumigen

Zusammenfassung

Fazieswechsel (100 m bis mehrere 100 m) mit Schwellen aus massigen „Riff-“ bzw. Biohermkomplexen und Becken mit geschichteten, rein kalkigen oder kalkmergeligen Karbonaten entsprechen dem Bild aus Aufschlüssen der fränkischen oder schwäbischen Alb. Dieses Bild hat sich auch weitgehend für den tiefen Malm im Großraum München bestätigt. Dadurch wird für den tiefen Untergrund des Molassebeckens die großräumige paläogeographische Vorstellung der *Südbayerischen Riffplattform* weiter differenziert.

Auf Basis der Ergebnisse zur lithofaziellen Differenzierung lässt sich folgende vereinfachte hydrostratigraphische Gliederung des Malm im Großraum München ableiten: Der liegende Malm Alpha bis Malm Gamma kann mit kalkmergeligen Partien als Grundwassergeringleiter eingestuft werden. Der tiefere und mittlere Malm, der stratigraphisch in etwa dem Malm Delta und Epsilon entspricht, ist aufgrund einer homogenen, lateral aushaltenden, dolomitischen Massenfazies als potentieller regionaler Grundwasserleiter anzusprechen. Der obere Malm Zeta ist durch lateral wechselnde Schwellen und Becken gekennzeichnet, was die lokale Ausbildung von Grundwasserleitern (dolomitisierte Massenfazies) bzw. -geringleitern (kalkige oder kalkmergelige Beckenfazies) bedingt. Damit nimmt die dolomitisierte Massenfazies eine Schlüsselrolle bei der geothermischen Exploration und Nutzung des Malm ein, da sie einerseits im tieferen und mittleren Malm ein feldeübergreifendes, gemeinsames Reservoir bildet, und andererseits im oberen Malm die Reservoirmächtigkeit vergrößert. Darüber hinaus steuert sie die Verkarstungsanfälligkeit und ist somit für die Gesamthydraulik des Malm und die Produktivität von Bohrungen ausschlaggebend. So spiegelt sich die kleinräumige, laterale Faziesdifferenzierung besonders in Bohrungen mit einer sehr unterschiedlichen Hydraulik und Produktivität wider, die beispielsweise von einem gemeinsamen Sammelbohrplatz aus abgeteuft wurden und am Top Malm eine horizontale Entfernung von mitunter < 2 km aufweisen.

Eine auf diesen Erkenntnissen basierende, faziesorientierte Explorationsstrategie sieht vor, die Bohrung auf den Top einer Schwelle oder eines Biohermkomplexes abzuteufen und anschließend den Malm in Massenfazies entlang einer möglichst langen Bohrstrecke aufzuschließen. Zusätzlich sollten Störungen bzw. tektonisch beanspruchte Bereiche aufgrund des erhöhten Verkarstungspotentials „aufgefädelt“ werden. Als „Negativbereiche“ sind Beckenstrukturen im oberen Malm bei der Festlegung des Bohrverlaufs unbedingt zu meiden.

Abstract

This paper presents the development and application of practical methods for a lithofacies-based reservoir characterization of the upper Jurassic [Malm] in the Molasse Basin using data from geothermal wells in the Greater Munich area. The paper furthermore identifies correlations applicable to the Greater Munich area between the lithofacial structure and the formation permeability and proposes a corresponding exploration strategy for geothermal deep wells that is aimed at optimizing the well path. A method for estimating the permeability from cuttings, the so-called PAC (*Permeabilität aus Cuttings*) analysis, was developed with regard to identifying potential inflow horizons. With this method it is possible to extrapolate qualitative permeability profiles for the wells as part of an integrated reservoir characterization. Further assessments of the porosity and permeability characteristics were made on the basis of thin cutting sections, which additionally also contributed to the review of the depositional environment and the lithostratigraphic correlation of the wells through microfacies analyses. The available electrical image logs proved to be of crucial importance for the facies classification of the wells. By comparing them to the lithofacial characterization from the borehole cuttings, matching them to the core material from the research well Moosburg SC 4 that was cored continuously in the Malm, and by studying outcrop analogues, it was possible in the course of the project to differentiate the facies of the Malm carbonates in image logs. In the course of analyzing the well data it was established that a correlation exists between the total dolomite content of the well and its transmissibility in that as the dolomite content increases, the rock permeability tends to increase as well. Since the massive facies of the Malm carbonates, in contrast to the bedded facies, is more prone to dolomitization, the massive facies may be interpreted as a geothermal reservoir. The thickness of the massive and bedded facies through which the boreholes are drilled, accordingly, also has an impact on the productivity of the wells. The higher the percentage of massive facies, the higher the transmissibility. A lateral facies differentiation can be made on the basis of texture analysis and sedimentary interpretation of 2D and 3D seismic data. The massive facies can usually be distinguished in seismic sections by a more transparent, partly chaotic texture and the bedded facies by a more homogeneous, parallel "thin" reflection line. Based on sequence stratigraphic interpretation approaches and with the aid of seismic attributes, it was thus possible to develop a consistent conceptual model for the facies distribution of the Malm in the deep underground from seismic data. The thus derived very small-scale facies changes, with swells

Abstract

of massive "reef" or bioherm complexes and basins with stratified marly or micritic carbonate rocks, are known from outcrops of the Franconian or Swabian Alb. This picture was also largely confirmed for the deep Malm in the Greater Munich area.

On the basis of the results from the lithofacies differentiation, the following simplified hydrostratigraphic classification of the Malm in the Greater Munich area can be derived: the Lowermost Malm Alpha to Malm Gamma with marly limestone portions may be characterized as an aquitard. The lower and middle Malm, which stratigraphically corresponds approximately to the Malm Delta and Epsilon, can be considered a potential regional aquifer due to a homogeneous, laterally dominant massive dolomitic facies. The upper Malm Zeta is characterized by laterally alternating swells and basins, resulting in the local formation of aquifers (dolomitized massive facies) or aquitards (limestone or marly limestone bedded facies). The dolomitized massive facies accordingly occupies a key role in the geothermal exploration and exploitation of the Malm, since it forms a field-spanning common reservoir in the deeper and middle Malm and also increases the thickness of the reservoir in the upper Malm. In addition, it affects the susceptibility to karstification and is thus a decisive factor for the overall hydraulic conductivity of the Malm and productivity of the wells. The small-scale lateral facies differentiation is reflected particularly in wells of very different hydraulic conductivities and productivities that were drilled for example from a common site and often have a horizontal distance from one another at the Top Malm < 2 km.

According to a facies-oriented exploration strategy based on these findings, a well should be drilled to the top of a swell or of a bioherm complex and the Malm should then be developed along the longest possible length in massive facies. In addition, faults or tectonically stressed areas should be "threaded" due to the increased karstification potential. Basin structures in the upper Malm considered as "negative areas" should be absolutely avoided in planning the drilling path.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Zusammenfassung	IV
Abstract	VI
Inhaltsverzeichnis	VIII
Abbildungsverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis	XII
1 Einführung: Paläogeographische und fazielle Entwicklung des Malm im zentralen süddeutschen Molassebecken	1
2 Der Malm in der Geothermiebohrung Pullach Th 2	7
3 Tafelbankiger Dolomit in der Kernbohrung Moosburg SC 4	35
4 Lithofazielle Reservoircharakterisierung zur geothermischen Nutzung des Malm im Großraum München	83
5 Die Fazies des Malm im Großraum München aus Bohrungen und Seismik	106
5.1 Fazielle Differenzierung im Großraum München auf Basis von Bohrungen	106
5.2 Seismische Faziesinterpretation und seismische Stratigraphie	112
6 Hydrothermale Nutzung des Malm im Großraum München	118
6.1 Hydrogeologie des Malmtiefengrundwasserleiters	118
6.2 Explorationsstrategie und Reservoirerschließung	121
7 Ausblick	124
8 Danksagung	127
9 Literatur	128
Anhang A: Tagungsbeiträge mit veröffentlichten Zusammenfassungen	136
Anhang B: Weitere Publikationen, Vorträge und Poster	151
Anhang C: Lebenslauf	153

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Übersichtskarte zur Paläogeographie im süddeutschen Jura (Meyer & Schmidt-Kaler, 1996).....	1
Abb. 2:	Isopachenkarte des Malm im Untergrund des süddeutschen Molassebeckens. Der Großraum München als Untersuchungsgebiet ist grün umrandet. Verändert nach Meyer & Schmidt-Kaler (1996) und Bachmann et al. (1987).....	2
Abb. 3:	Laterale und vertikale Differenzierung des Malm in Massen- und Bankfazies (nach Gwinner, 1976).....	5
Abb. 4:	Die Lage des Projektes Pullach und weiterer Geothermiebohrungen im Raum München.	11
Abb. 5:	Bohr- und Ausbauschema Pullach Th 2.	13
Abb. 6:	Bohrung Pullach Th 2, oberer Abschnitt: Lithologisch-fazielle Entwicklung im Purbeck und Malm. Farbe der Spülproben, stratigraphische Einstufung, Gamma-Log, Position der untersuchten Spülproben und der lithologischen Einheiten, Röntgendiffraktometer-Analyse auf Calcit / Dolomit, sowie fazielle Charakterisierung der Einheiten. MD = Bohrmeißelteufe (Measured Depth); TVD = wahre, vertikale Teufe (Total Vertical Depth).....	19
Abb. 7:	Bohrung Pullach Th 2, unterer Abschnitt: Lithologisch-fazielle Entwicklung im überwiegend dolomitischen Malm. Farbe der Spülproben, stratigraphische Einstufung, Gammaray-Log, Position der untersuchten Spülproben und der lithologischen Einheiten, Röntgendiffraktometer-Analyse auf Calcit / Dolomit, sowie fazielle Charakterisierung der Einheiten und Spülungsverluste. MD = Bohrmeißelteufe (measured depth); TVD = Wahre, vertikale Teufe (total vertical depth).....	22
Abb. 8:	Kristallgröße des Dolomits in Abhängigkeit vom Ausgangssediment und der Teufe (aus Lucia, 1999).	28
Abb. 9:	Faziesschema und Gliederung des Malm der Südlichen Frankenalb (verändert nach Meyer & Schmidt-Kaler, 1984). Der Bereich des Übergangs von der Massenfazies zu dazwischen befindlichem Biostromkalk/-dolomit (Schwammrasen) und Bankkalk ist im Rechteck markiert.	41
Abb. 10:	Faziesverteilung im Malm δ 4 und ϵ 2 in der Südlichen Frankenalb nach Meyer & Schmidt-Kaler (1984).	42
Abb. 11:	Ostteil des großen Dolomitbruchs östlich vom Bahnhof Eichstätt. Im östlichen Bereich ist der Übergang vom massigen Riff-dolomit in die östlich anschließende Schwammrasenfazies aufgeschlossen (verändert nach Meyer & Schmidt-Kaler, 1984; Wandhöhe ca. 80 m).....	43
Abb. 12:	Heutige Situation im großen Dolomitbruch östlich vom Bahnhof Eichstätt (Fotos R. Koch, 2010). A - Massiger Dolomit („Riff“) des Malm δ und ϵ überlagert von dünnbankigem Dolomit (Malm ϵ) und Plattendolomit des Malm ζ 1 (Wandhöhe ca. 60 m). Der östlich anschließende dickbankige Dolomit (B; Wandhöhe ca. 12 m) weist zahlreiche Kieselknollen und Löcher auf (C; Bildbreite ca. 60 cm).....	44

Tabellenverzeichnis

- Abb. 13: A - Geologischer Schnitt entlang der Püttlach von Behringersmühle nach Pottenstein. Östlich von Behringersmühle verlässt das Püttlachtal das Wiesentriff und ist in horizontal gegliederten, dicktafelbankigen Dolomit des Malm δ eingeschnitten. Die ebene Hochfläche darüber wird von den dünnen, kieselknollenreichen Dolomitbänken des Malm ε gebildet. Unter dem Schloß von Pottenstein steigen die Dolomitbänke zu einem weiteren Riffgürtel nach Osten an (aus Meyer & Schmidt-Kaler, 1992). B – Beispiel eines ungeschichteten Massendolomits am Rodenstein am Walberla bei Forchheim (Wandhöhe ca. 30 m; Foto R. Koch, 2009). C – Tafelbankiger Dolomit an den Bärenschluchtwänden im Püttlachtal (Wandhöhe ca. 30 m; Foto R. Koch, 2010). 45
- Abb. 14: Die Lage von Moosburg zwischen München und Landshut sowie weitere Ortschaften, in deren Umge-bung Bohrungen auf Kohlen-wasserstoffe und / oder im Rahmen von Geothermie-projekten abgeteuft wurden. 46
- Abb. 15: Faziesschnitt durch den Malm von Anzing über Erding nach Moosburg und Gifthal mit Massenkalk-Komplexen, dazwischen befindlichen Schwammrasenbänken im Malm δ und ε sowie Beckenfazies im Malm ζ (verändert nach Meyer, 1994). 47
- Abb. 16: Lithologische Beschreibung und stratigraphische Untergliederung der Kernstrecke Purbeck-Malm-Dogger in der Bohrung Moosburg SC 4 nach Meyer (1994). Ferner sind die untersuchten Proben (Kernmarsch – KM), das Gamma-Log und eine petrographische Kurzbeschreibung der Dünnschliffe aufgeführt. 52
- Abb. 17: Die tafelbankige Dolomitfazies des Malm δ bis Malm ζ 2 stellt die hydrogeologisch bedeutende Schichtfolge in der Bohrung Moosburg SC 4 dar. Lithologie und Beschreibung nach Meyer (1994), dargestellt sind ferner Position der Proben verschiedener Kernmärsche, Gamma-Log, gesteinsphysikalische Kenndaten ausgewählter Proben, Morphologie und Größe der Dolomitkristalle, petrographische Beschreibung sowie lithologische Intervalle A – F und Grenzen. 57
- Abb. 18: Charakteristische Kernabschnitte als repräsentative Beispiele für den „Sandwich-Aufbau“ der tafelbankigen Dolomite des Malm δ , ε , ζ 1 und ζ 2 in der Bohrung Moosburg SC 4. A - KM 63: Feingebankter Dolomit an der Basis des Malm ζ 2. B - KM 88: Löchriger Dolomit des Malm ε . C - KM 96: Dolomit mit Lochreihen und Hornsteinknollen (Ho) des Malm δ 60
- Abb. 19: Kristallgröße des Dolomits in Abhängigkeit vom Faziestyp des Ausgangssediments (aus Lucia, 1999). 61
- Abb. 20: Paläogeographie des Malm Zeta 3 der Südalb und des Molassebecken-Untergrundes. Nach Meyer & Schmidt-Kaler (1996). Der Großraum München als Untersuchungsgebiet ist rot umrandet. 106
- Abb. 21: Übersicht der realisierten Tiefengeothermiebohrungen im Süden Bayerns (Stand: 01.12.2011 aus Dorsch, 2012). 107
- Abb. 22: Geologisch-fazielle Interpretation von drei Geothermiefbohrungen aus dem Großraum München, die beispielhaft einem Faziesschnitt aus Böhm et al. (2011), verändert nach Meyer (1994), zugeordnet werden. 110
- Abb. 23: Mächtigkeitsverteilung der Malm-Massenfazies im Bereich Unterföhring. Breite, schwarze Linien: Bohrungsverlauf der abgelenkten Bohrungen Unterföhring Th 1 und Th 2, dünne schwarze Linien: Isolinien Top Purbeck (m NN), rote Linie:

Abbildungsverzeichnis

- Bewilligungsfeld Unterföhring, schwarze Haarlinien: angrenzende Konzessionsfelder, schwarz-gestrichelte Linie: 2D-Seismikprofile. 111
- Abb. 24: Vergleich der seismischen Textur im Bereich von Massenkalken mit chaotischer Signatur und Becken mit parallelen und geschichteten Signaturen an einem seismischen Profilschnitt aus 3D-Seismik ca. 30 km südl. von München. Grüne Linie: Top Lithothamnienkalk; rosa Linie: Top Purbeck; hellblaue Linie: Top Massenfazies = Top Reservoir; dunkelblaue Linie: Top Malm Gamma = Basis Reservoir; rote Linie: Top Dogger 112
- Abb. 25: Ausschnitt einer Faziesinterpretation einer 3D-Seismik, ca. 30 km südlich von München. Die Interpretation der Massenfaziesmächtigkeit zeigt eine fazielle Gliederung in Becken (blau-lila Farben) und Schwellen bzw. Kuppeln (gelb-rote Farben). Weiße Linien: Störungsausbisse an Top Massenfazies 113
- Abb. 26: Schema von typischen Reflektor-Terminierungen (nach Catuneanu, 2002 in Catuneanu, 2006)..... 114
- Abb. 27: Differenzierung von Becken- und Massenfazies auf Basis charakteristischer Reflektor-Terminierungen in der Kosinus-Phase. Es handelt sich um den gleichen Ausschnitt aus einem seismischen Profilschnitt einer 3D-Seismik im Süden von München wie in Abb. 24. Hellblau gestrichelt: Top Massenfazies; dunkelblau gestrichelt: Basis Massenfazies. 114
- Abb. 28: An bestehenden Bohrungen kalibriertes, seismisches Profil [m u. NN]. Die Bohrungen sind auf das seismische Profil projiziert. Gelbe Linie: Top Lithothamnienkalk; grüne Linie: Top Purbeck, hellblaue Linie: Top Massenfazies, dunkelblaue Linie: Basis Massenfazies = in etwa Top Malm Gamma, rote Linie: Basis Malm Alpha. 115
- Abb. 29: Vergleich eines aus 3D-Seismik interpretierten Faziesmodells ca. 30 km südl. von München (A: Kantenlänge des Kubus ca. 5 km, oberer Horizont = Top Massenfazies; unterer Horizont = Basis Massenfazies,) mit einem Blockbild zur Paläogeographie (B: Schemazeichnung Paläogeographie des Malm in Süddeutschland) aus Meyer & Schmidt-Kaler (1996). 117
- Abb. 30: Produktivitätskurven von 13 Geothermiebohrungen mit Faziescharakterisierung (Fazies: M = Massenfazies, B = Beckenfazies, Ü = Übergangsfazies). Bohrungen des gleichen Geothermieprojektes sind in der gleichen Farbe dargestellt..... 120
- Abb. 31: Links: Beispiel eines Reservoir-optimierten Erschließungskonzepts des Malm südlich von München. Zwei Bohrfadoptionen mit unterschiedlicher azimuthaler Ausrichtung im Reservoir (hellgrün/dunkelgrün); Rechts: Die seismische Line aus einer 3D-Seismik enthält eine differenzierte Darstellung des Malm mit Basis Malm, Basis und Top Massenfazies (gem. seismischer Textur) sowie Top Malm. 122
- Abb. 32: Erschließung des Malm im Streichen einer Riffschwelle auf den ersten 200 m TVD unter Top Malm. Riff- bzw. Massenfazies (blau) und Bank- bzw. Schichtfazies (grün) wurden auf Basis von 3D-Seismik kartiert..... 124

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Stratigraphische Übersicht des Malm in Süddeutschland mit Gegenüberstellung der internationalen Nomenklatur (ICS) und der regionalen Bezeichnung (nach Meyer & Schmidt-Kaler, 1989).....	3
Tab. 2:	Geologisches Profil mit den stratigraphischen Grenzen in der Bohrung Pullach Th 2 (Erdwerk, 2008).....	14
Tab. 3:	Dolomitkristallgröße, Kristallmorphologie und Größe der im Dünnschliff sichtbaren Poren aus den für Zuflüsse in Frage kommenden Intervallen in der Bohrung Pullach Th 2.	24
Tab. 4:	Spülungsverluste in der Bohrung Pullach Th 2.	26
Tab. 5:	Stratigraphische Untergliederung der Malm-Folge in der Bohrung Moosburg SC 4 nach Meyer (1999).....	47
Tab. 6:	Bezeichnung der Kristallgrößen authigener Bestandteile (Zement, Dolomit) nach Folk (1962).....	50
Tab. 7:	Beschreibung der in den Phototafeln 1 – 8 dokumentierten Kernmärsche der Bohrung Moosburg SC 4 nach Meyer (1994).....	53

1 Einführung: Paläogeographische und fazielle Entwicklung des Malm im zentralen süddeutschen Molassebecken

Die paläogeographische Entwicklung des Malm im heutigen zentralen Bereich des süddeutschen Molassebeckens beginnt mit der Überflutung des Vindelizischen Landes und Teilen der Böhmisches Insel. Dadurch entstand in Süddeutschland und dem Bereich des späteren Molassebeckens ein flaches Schelfmeer, der sog. Fränkische Schelf, der ohne trennende Schwelle zur Tethys hin geöffnet war (Meyer & Schmidt-Kaler, 1996). Der Verlauf der Küstenlinien in Mitteleuropa ist nicht genau bekannt. Fest steht, dass in Mitteleuropa und den umliegenden Gebieten eine - unter Umständen oder zeitweise in mehrere Inseln gegliederte - Festlandsschwelle bestand („Mitteldeutsche Schwelle“), die unter trockenem und warmem Klima der Abtragung unterworfen war, und als Liefergebiet für den siliziklastischen (tonigen) Eintrag diente (Abb. 1).

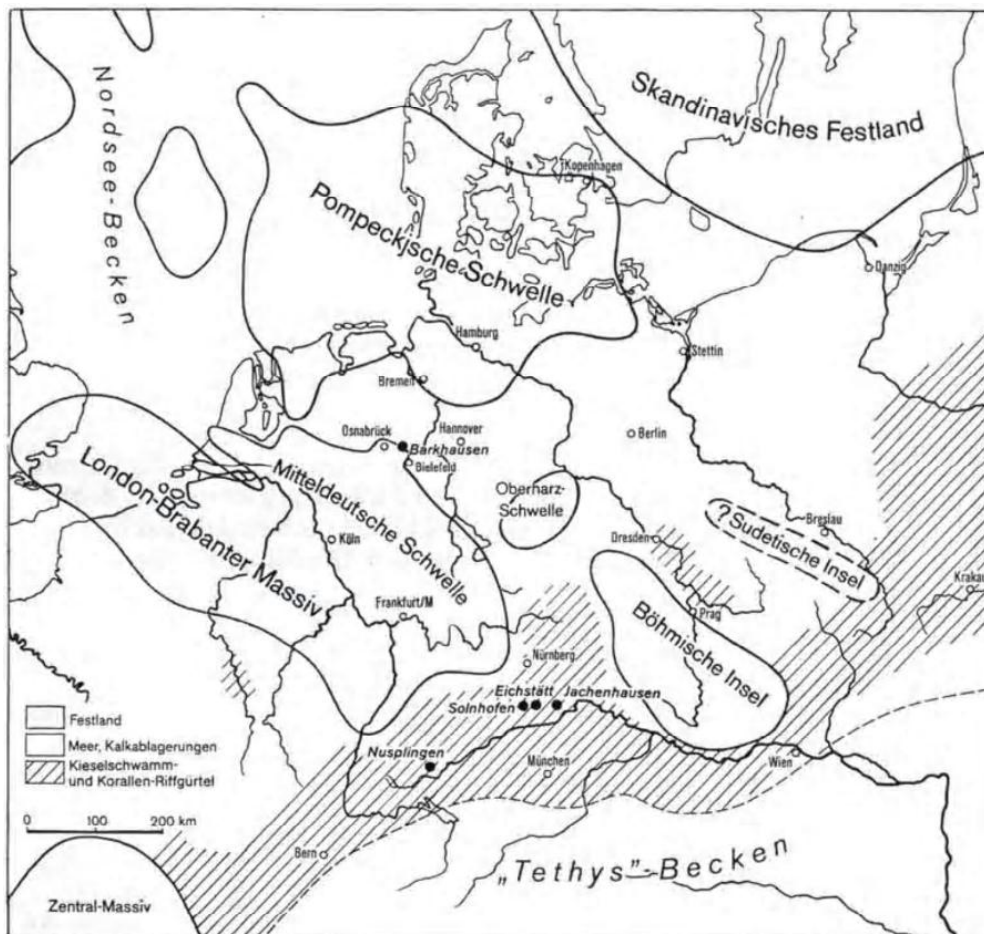


Abb. 1: Übersichtskarte zur Paläogeographie im süddeutschen Jura (Meyer & Schmidt-Kaler, 1996)

Die größte dieser Inseln lag im Bereich des heutigen Rheinischen Schiefergebirges und des daran anschließenden London-Brabanter Massivs, das evtl. über das Herzynische Hoch („Oberharz-Schwelle“) im Bereich des heutigen Harzes mit der Böhmisches Masse verbunden war (Geyer & Gwinner, 1986). Gemäß einiger Autoren bestanden zwischen diesen festländischen Bereichen Meeresstraßen („Hessische“ und „Sächsische Straße“), über die der klastische Feinkorneintrag nach Süddeutschland erfolgte (Meyer & Schmidt-Kaler, 1996).

Auf dem Fränkischen Schelf kamen während des oberen Jura unter tropischen Bedingungen vor allem helle Kalke und Mergel zur Ablagerung. In der nördlichen Frankenalb unterlag der Malm einer späteren Abtragung von ca. 200 m. Im zentralen süddeutschen Molassebecken und Bereich des Großraums München als Untersuchungsgebiet liegt er auch heute noch in seiner ursprünglichen Gesamtmächtigkeit von über 600 m vor (Abb. 2).

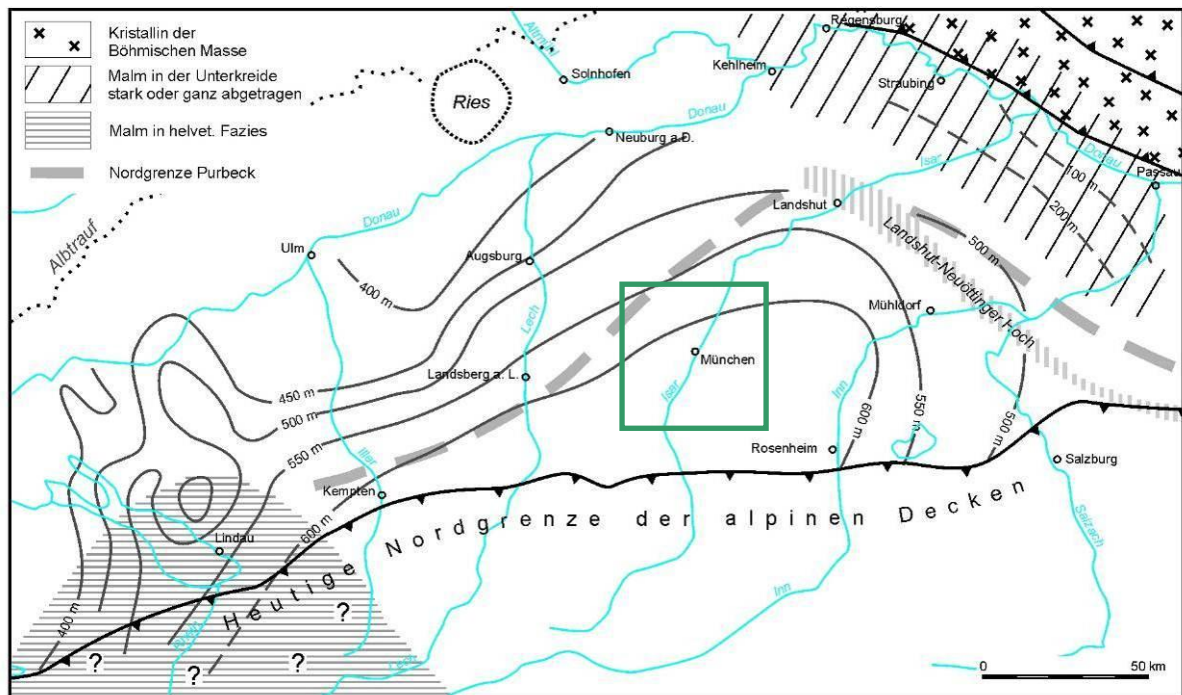


Abb. 2: Isopachenkarte des Malm im Untergrund des süddeutschen Molassebeckens. Der Großraum München als Untersuchungsgebiet ist grün umrandet. Verändert nach Meyer & Schmidt-Kaler (1996) und Bachmann et al. (1987).

Mit „Malm“ wurde ursprünglich der Zeitraum des oberen Jura bezeichnet. Synonym wird in Süddeutschland aufgrund der hier vorherrschenden hellen Karbonatgesteine auch „Weißer Jura“ oder „Weißjura“ verwendet. Allerdings ist „Malm“ kein gültiger stratigraphischer Begriff; der obere Jura wird in die Stufen Oxford, Kimmeridge und Tithon unterteilt.

Trotzdem wird der Begriff „Malm“ in Deutschland noch häufig verwendet, und zwar einerseits für den Zeitraum des oberen Jura, andererseits für die während dieser Zeit abgelagerten Gesteine. Auch in der vorliegenden Arbeit findet - zur Vergleichbarkeit mit der regionalen Fachliteratur, Publikationen und Schichtenprofilen - der Begriff „Malm“ sowohl als stratigraphische Bezeichnung, als auch für die in der Zeit des Oberjura abgelagerten Gesteine, weiterhin Verwendung.

Die Gliederung des Malm erfolgt anhand von Ammoniten nach einem auf litho- und biostratigraphischen Kriterien beruhenden Systems, das vorwiegend auf Quenstedt (1858) zurückgeht, der sich im 19. Jahrhundert mit der Geologie und Paläontologie des süddeutschen Jura befasste. So wird der Malm in sechs Abschnitte unterteilt, die von unten nach oben mit den griechischen Buchstaben Alpha, Beta, Gamma, Delta, Epsilon und Zeta unterteilt werden. Der Malm Delta kann zudem noch in 4 Abschnitte (Delta 1-4), der Malm Zeta in sechs Abschnitte (Zeta 1-6) unterteilt werden. Diese Gliederung findet nur im süddeutschen Raum Anwendung. Mittels der Ammonitenstratigraphie ist eine Anbindung dieser Gliederung an die internationale Stratigraphie möglich (Tab. 1). Demnach entspricht die Grenze Oxford / Kimmeridge etwa der Grenze Malm Beta / Gamma und die Grenze Kimmeridge / Tithon wird zwischen Malm Epsilon und Malm Zeta (in Franken) bzw. innerhalb des Malm Zeta 1 (in Württemberg) gezogen (Meyer. & Schmidt-Kaler, 1989).

Tab. 1: Stratigraphische Übersicht des Malm in Süddeutschland mit Gegenüberstellung der internationalen Nomenklatur (ICS) und der regionalen Bezeichnung (nach Meyer & Schmidt-Kaler, 1989)

Serie	Stufe (nach ICS)	Stufe nach QUENSTEDT (Franken)	Alter (Ma) (chronostratigraphisch)
Oberjura (Malm)	Tithonian	Zeta 1-6	150,8–145,5
	Kimmeridgian	Epsilon	155,6–150,8
		Delta 1-4	
		Gamma	
	Oxfordian	Beta	161,2–155,6
Alpha			

Die stratigraphische Gliederung des Malm geht mit mehr oder weniger ausgeprägten, beckenweiten lithologischen Großzyklen einher, die mit eher mergeligen Ablagerungen beginnen und zunehmend kalkig werden (Meyer & Schmidt-Kaler, 1989). Am auffälligsten

ist dies im unteren Malm, wo der mergelreiche Malm Alpha in den kalkigen Malm Beta übergeht. Darüber folgt der wiederum mergelreiche Malm Gamma, der in den kalkreichen Malm Delta übergeht. Im oberen Malm Delta erreichen die Massenkalk ihre größte Ausdehnung. Darüber wird diese Gliederung unscharf, aber innerhalb des Malm Zeta können z.T. weitere Mergel-Kalk-Zyklen unterschieden werden.

Koch (1997) untergliedert den Malm in fünf verschiedene Großfaziesseinheiten: Schwäbische Fazies, Fränkische Fazies, Argovische Fazies, Raurazische Fazies und Helvetische Fazies. Für diese lassen sich z.T. weitere lithofazielle Unterscheidungen durchführen.

In Süddeutschland treten drei der Großfaziesseinheiten in Erscheinung. Die Schwäbische Fazies, die vor allem auf der Schwäbischen Alb, aber auch in der nördlichsten Frankenalb zu beobachten ist, die Fränkische Fazies, die auf der Fränkischen Alb aufgeschlossen ist und auch vielfach unter dem bayerischen Molassebecken erbohrt wurde, sowie die Helvetische Fazies, die vor allem in den allochthonen Helvetischen Decken zu finden ist (Koch, 2000). Letztere ist in autochthoner Lagerung nur aus Bohrungen im Bodensee-Raum bekannt (z.B. Ravensburg GB1, Opfenbach 1) (Bertleff et al., 1988) und tritt im Großraum München und im zentralen Bereich des Molassebeckens nicht auf. Insgesamt sind alle diese Fazies von Karbonaten dominiert (Kalke, Dolomite, Mergel). Im Folgenden sollen die für den zentralen süddeutschen Teil der Molasse bedeutsamen Fazies genauer charakterisiert werden.

Die Schwäbische und Fränkische Fazies zeichnen sich durch helle Karbonate (Kalke, Kalkmergel, Dolomite) aus. Dabei können massige, ungebankte Bereiche (Massenkalk, dolomitisierte Massenfazies) von deutlich geschichteten und gebankten Bereichen (Bankkalk, Bank- bzw. Schichtfazies,) unterschieden werden. Beide entstammen einem relativ flachen Schelfmeer, für das Wassertiefen zwischen etwa 50 m und 150 m angenommen werden (Meyer & Schmidt-Kaler, 1996). Die Schwäbische Fazies ist generell durch einen höheren Mergelanteil charakterisiert, während die Fränkische Fazies häufiger dolomitisiert ist („Frankendolomit“). Als Faziesgrenze wurde die *Ries-Wiesent-Schwelle* als eine aufragende und die Sedimentationsräume trennende Riffschranke betrachtet (Meyer & Schmidt-Kaler, 1984). Nach Koch (2000) handelt es sich jedoch vielmehr um den mit Schwammkrusten-Besiedlung dominierten Übergangsbereich von der Fränkisch-Südbayerischen Schwamm-plattform in das Fränkische Mergelbecken.

Anhand lithologischer Kriterien werden innerhalb der Schwäbischen und Fränkischen Fazies massige von gebankten Ablagerungen unterschieden (Abb. 3).

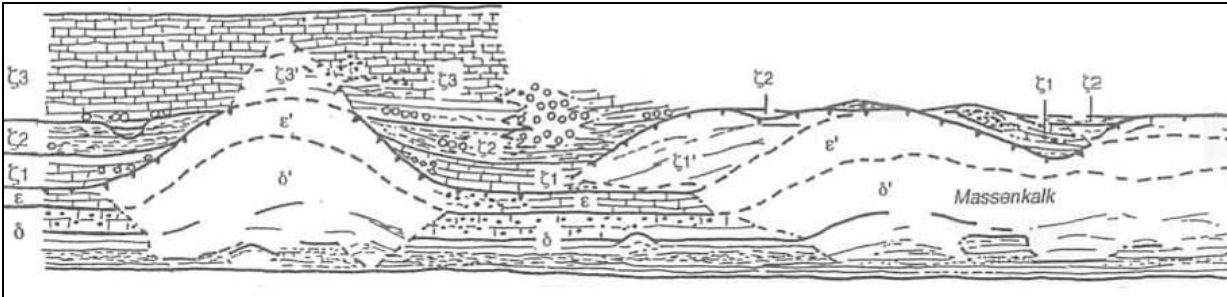


Abb. 3: Laterale und vertikale Differenzierung des Malm in Massen- und Bankfazies (nach Gwinner, 1976).

Massenfazies

Die Ablagerungen in Massenfazies sind häufig gänzlich ungeschichtet oder aber die Schichtung ist undeutlich bzw. irregulär. Sie werden in der älteren Literatur noch als „Schwamm-Riffe“ oder "Schwamm-Stotzen" bzw. Spongiolithe bezeichnet. Neueren Untersuchungen zufolge handelt es sich aber vielmehr um mehr oder weniger stark von Schwämmen bzw. von Schwamm-Algen-Mudmounds durchsetzte bzw. begrenzte, zementierte Karbonatsande. Diese bestehen vor allem aus Peloiden und Lithoklasten, bereichsweise auch aus Ooiden (Koch et al., 1994). Daneben trugen untergeordnet auch sessile Foraminiferen, Serpuliden, Bryozoen und vereinzelt auch Muscheln zum Aufbau bei. Ammoniten, die üblicherweise zur stratigraphischen Gliederung des Jura herangezogen werden, sind hier relativ selten. Da die Massenfazies ursprünglich als Kalk abgelagert wurde, spricht man auch von Massenkalken. Eine Umwandlung in Dolomit ist besonders in der Fränkischen Fazies häufig zu beobachten („Frankendolomit“). Nach Liedmann (1992) können im Malm dabei drei Dolomitierungs- und drei Dedolomitierungsphasen nachgewiesen werden.

Die massigen Bereiche erreichen häufig Durchmesser von etwa 500 m und erhoben sich nach Meyer & Schmidt-Kaler (1996) im Malm Delta maximal 50-80 m über den Meeresboden. Im Allgemeinen war der Höhenunterschied wahrscheinlich wesentlich geringer (Koch, 2000). Generell unterliegt das Auftreten der Massenkalken im Laufe des Oberjura zyklischen Schwankungen. Zeiten der Ausdehnung der Massenfazies korrelieren dabei mit zunehmendem Karbonat-Gehalt in der Bankfazies, während umgekehrt Zeiten des Rückgangs von Massenfazies mit zunehmendem Mergel-Anteil in den Bankkalken einhergehen

(Pawellek & Aigner, 2003). Dieser Zusammenhang kann klimatische Ursachen haben (z.B. wechselnder Toneintrag) oder auf Meeresspiegelschwankungen zurückzuführen sein. Im Malm Zeta breiten sich auch Korallen im zentralen Bereich des Molassebeckens aus, was auf eine langsame Verflachung des Ablagerungsraums hinweist.

Bankfazies

Die Bankfazies bildete sich in den Bereichen zwischen den Massenkalken, die von etwas größerer Wassertiefe geprägt waren. Sie treten bereichsweise in Wechsellagerung mit den Massenkalken auf oder sie sind als *onlaps* an diese zu beobachten (Pawellek & Aigner, 2003). Dabei treten typischerweise *onlap*-Winkel zwischen etwa 5° und 15° auf (Berckheimer 1924, zitiert in Reiff 1988), aber auch Werte von bis zu 40° sind zu beobachten. *Onlaps* treten z.B. bei gröberklastischen Ablagerungen an ehemaligen „Riff“-Flanken auf (Meyer & Schmidt-Kaler, 1989), oder können bei mächtigeren oder häufigeren Mergeleinschaltungen vorkommen und sind dann auf die stärkere Kompaktion der tonreicheren Ablagerungen zurückzuführen (Reiff, 1988). Der Tonanteil der Bankkalke ist generell etwas höher als bei den Massenkalken. Im Gegensatz zur Massenfazies sind die Bankkalke im Allgemeinen seltener dolomitisiert.

Eine weitere Sonderentwicklung innerhalb der Bankfazies stellt der *Treuchtlinger Marmor* dar (Malm Delta, bis 60 m mächtig), der im Meter-Bereich gebankt ist. Er wurde vermutlich auf einer sehr flachen, allseits von Schwamm-Algen-Mudmounds umgebenen Plattform abgelagert (Kott, 1989; Koch, 2000).

2 Der Malm in der Geothermiebohrung Pullach Th 2

Publiziert von Böhm et al. (2010) in den Geologischen Blättern von Nordostbayern, Nr. 60, unter dem Titel: „Der Malm in der Geothermiebohrung Pullach Th 2 – Faziesanalyse aus Spülproben (München, S-Deutschland)“

Zusammenfassung

Die Bohrungen Pullach Th 1 und Th 2 wurden als Dublette von einem Sammelbohrplatz mit einem Abstand der beiden Ansatzpunkte von nur 7,5 m zueinander abgebohrt. Die Bohrung Pullach Th 2 hatte sich nach den ersten Fördertests mit einer Förderrate von ca. 45 l/s Thermalwasser und einer Fördertemperatur von knapp 107 °C als sehr produktiv erwiesen. Sie erschließt eine Malm-Schichtfolge von ca. 2984 m bis 3440 m (TVD) und wurde wahrscheinlich im Bereich des unteren Malm Delta eingestellt. Das entspricht einer wahren Mächtigkeit von ca. 456 m. Das hangende Purbeck wird von 2948 m bis 2984 m ausgewiesen und zeichnet sich durch Dolomikrite, Mikrosparite und Führung von Ooiden und den stratigraphisch leitenden Kotpillen *Favreina salevensis* aus. Eine Grenzziehung im oberen Bereich des Malm (Malm Delta, Epsilon, Zeta) ist schwierig. Es können nur lithologische/fazielle Einheiten unterschieden und der erbohrte Malm in zehn lithologische Einheiten (I – X) untergliedert werden. Dabei liegen die tieferen Einheiten VII – X als Dolomit in fast durchwegs homogener Ausbildung mit zum Liegenden zunehmender Kristallgröße vor. Dieser dolomitische Bereich des Malm ist für die Speichereigenschaften und die Zuflussraten von Bedeutung. Sie können als Zuflüsse aus so genannter Matrix-Porosität und –Permeabilität definiert werden. Die Speichergesteinseigenschaften hängen dabei überwiegend von der Größe der Dolomithomboeder, den zwischen diesen befindlichen Interkristallinporen und der im Wesentlichen aus beiden Parametern über die Weite der Porenhalsdurchmesser resultierenden Permeabilität ab. Hinzukommen lokal Gesteinslösporen (Vugs, Caverns) und Risse (Kluftporen, fractures). Dabei können über Klüfte weitere Zuflussraten sowohl im Dolomit als auch im Kalk erfolgen. Diese Klüfte können aber auch oft durch späten grobkristallinen Calcit wieder verfüllt werden.

Das Purbeck (Einheit I; 2948 m - 2984 m; M = ca. 36 m) mit rekristallisierten Kalken und feinkristallinem Dolomit weist vorwiegend nur eine Porosität von < 3 % und aufgrund der

geringen Kristallgröße vermutlich auch sehr geringe Permeabilität auf. Lokal kann aber auch eine höhere Porosität auftreten. Das Purbeck sollte daher im Molasse Untergrund auch mit in die Überlegung für Zuflüsse geothermischer Wässer einbezogen werden. Der dolomitische Bereich im tieferen Malm (Einheiten VII – X) erstreckt sich mit einer Mächtigkeit von 236 m über ein Teufenintervall von 3204 – 3440 m. Dieser „Frankendolomit“ weist unterschiedlich poröse und dichtere Bereiche auf. Von 3204 – 3228 m (Einheit VII) tritt ein fein- bis mittelkristalliner Dolomit von 24 m Mächtigkeit mit einer im Dünnschliff sichtbaren Porosität < 3 % auf. Ein etwas gröberer, fein- bis mittelkristalliner Dolomit ist von 3228 – 3257 m (Einheit VIII) mit einer Mächtigkeit von 29 m zu finden. Die sichtbare Porosität beträgt hier < 5 %. Von 3257 – 3297 m (Mächtigkeit = 40 m; Einheit IX) tritt ein wiederum etwas gröber kristalliner Dolomit auf, in dem die Kristalle zwischen 20 – 500 µm groß sind. Ein fein- bis grobkristalliner Dolomit (Einheit X; Kristallgröße 20 – 700 µm) wird von 3297 – 3443 m ET angetroffen (Mächtigkeit 46 m +? m). Er weist < 5 % sichtbare Porosität auf. Aufgrund der hier erreichten Endteufe von 3443 m ist nicht auszuschließen, dass dieser Bereich sich noch einige 10er Meter in das Liegende erstreckt. Grobkristalliner Calcit in den Spülproben stammt aus tektonischen Klüften im Dolomit, die durch ihn wieder teilweise oder sogar vollständig geschlossen wurden.

Abstract

The Pullach Th 1 and Th 2 wells were drilled as double wells from a single location at a distance of 7.5 m from each other. The Pullach Th 2 well is very productive, as indicated during the first test by a geothermal water flow rate of 45 l/s at a temperature of 107 °C. The well penetrates the Malm carbonates from ca. 2984 – 3440 m (TVD) and probably ended in the Lower Malm delta. This corresponds to a real thickness of about 456 m. 19 Overlying sediment of Purbeckian age was determined between 2948 – 2984 m and is characterized by dolomicrite, microsparite as well the occurrence of ooids and the stratigraphically indicative fecal pellets »Favreina salevensis«. It is difficult to determine the boundary in the upper part of the Malm (Malm delta, epsilon, zeta). Only lithologic/facial units can be distinguished there and the Malm carbonate rocks can be subdivided into ten lithologic units (I – X). The lower units VII – X are made up completely of dolomite, revealing increasing dolomite crystals size with increasing depth. This dolomitic part of the Malm is predominantly responsible for the good reservoir properties and the flow rates, which can be characterized as

flow caused by so-called matrix porosity and –permeability. The reservoir properties are predominantly triggered by the size and morphology of dolomite crystals and the intercrystalline pores in between. The pore throat diameters resulting from these parameters lead to different permeability. In addition, vugs and caverns as well as fracture pores occur locally. Fractures can result in additional flow rates in dolomite and in limestone. But these fractures can be cemented again by later calcite as documented in the recent study.

The Purbeckian (Unit I; 2948 - 2984 m; M = ca. 36 m) with recrystallized limestone and fine-crystalline dolomite reveals a visible porosity of only 3 %. A low permeability is assumed due to the small crystal size. Higher porosity can occur locally. Therefore the Purbeckian carbonates should also be taken into account when drilling for geothermal waters in the Malm of the Molasse Basin. The dolomitic interval in the Malm (Units VII – X), which is of interest for geothermal production, extends from 3204 – 3440 m (TVD) and is 236 m thick. This so-called Franconian dolomite is composed of different units with varying porosity and permeability. A fine- to middle-crystalline dolomite (unit VII; 3204 – 3228 m) 24 m thick reveals visible porosity of < 3 % in thin sections. Unit VIII (3228 – 3257 m; 29 m thick) is made up of somewhat coarser fine- to middle-crystalline dolomite with a visible porosity of < 5 %. A slightly coarser dolomite occurs between 3257 – 3297 m (40 m thick). It consists of dolomite crystals 20 – 500 µm in size. A fine- to coarse-crystalline dolomite (Unit X, crystal size 20 – 700 µm) occurs between 3297 – 3440 m depth (46 m + ? m thick). It exhibits < 5 % porosity. Due to the final depth at 3440 m it can not be excluded that this dolomite extends some tens of meters deeper. Coarse calcite crystals occurring in cutting samples come from tectonic fractures which were filled in partly or completely by late diagenetic calcite.

Einleitung und Zielsetzung

Die fazielle Entwicklung des süddeutschen oberen Jura (Malm) im Untergrund des Molassebeckens ist von besonderem Interesse für die geothermische Exploration, kommen doch die besten Zuflussraten aus dem dolomitischen Malm (Typ Frankendolomit) sowie aus Klüften in Dolomit und Kalk.

Die Fazies des Malm wird traditionell in „Massenkalke“ und „Bankkalke“ gegliedert (z. B. Meyer 1972, 1977; Wagenplast, 1972; Gwinner, 1976; Selg & Wagenplast, 1990). Die Massenkalke wurden herkömmlicherweise als „Schwamm-Algen-Riffe“ interpretiert, zwischen denen die gebankte Fazies abgelagert wurde. Den Massenkalken, welche häufig

dolomitisiert und recalcitisiert (Liedmann & Koch, 1990; Liedmann, 1992; Reinhold & Schröder, 1994; Reinhold, 1996) sowie geklüftet und verkarstet sind, wurde als potentielle Speichergesteine für Erdöl und Erdgas bereits besonderes Aufmerksamkeit geschenkt (Bachmann et al., 1987; Pasternak et al., 1997). Darüber hinaus spielen diese als Grundwasserspeicher (Aquifere) und Nutzgesteine eine erhebliche Rolle (Seiler et al., 1991; Michel, 1997; Koch, 2000; Kimmig et al., 2001). Koch et al. (2010) dokumentieren am Beispiel der Bohrungen Scherstetten 1 und Scherstetten 2 die Verhältnisse im Malm des Molasse-Untergrundes sowie der Erforschungsgeschichte. Anhand der Korrelation der beiden Bohrungen wird auch nachgewiesen, wie sich laterale Faziesänderungen in den Massenkalken des Malm auf eine Entfernung von nur 1,5 km auswirken können. Diese Änderungen auf kurze Distanz haben auch großen Einfluss auf die regionale und volumetrische Ausbildung von Speichergesteinen für geothermische Wässer.

Für das Geothermieprojekt in Pullach i. Isartal wurde im Auftrag der IEP (Innovative Energie für Pullach GmbH) die zweite der beiden Geothermiebohrungen – Pullach Thermal 2 - abgeteuft. Die Dublettenbohrungen stellen Erdwärme aus dem Malmtiefengrundwasserleiter bereit, die die Versorgung von gemeindlichen Einrichtungen und privaten Abnehmern der Gemeinde Pullach i. Isartal über das neu errichtete Nahwärmenetz sicherstellen. Die Bohrung Pullach Th 2 dient dabei als Reinjektionsbohrung.

Die Bohrung Pullach TH 2

Die Gemeinde Pullach i. Isartal (Abb. 4) legte bereits im Jahr 2001 mit einer geologischen Machbarkeitsstudie zur tiefen Geothermie die Grundsteine für eine spätere Erschließung und geothermische Nutzung des Malmtiefengrundwasserleiters. Das Ziel war stets die Wärmeversorgung gemeindlicher Liegenschaften und Gebäude sowie privater Kunden mittels hydrothermalen Geothermie. In den Jahren 2003 und 2004 erfolgten die bohrtechnische Detailplanung und das Ausschreibungsverfahren für eine geothermische Dublette, bestehend aus einer Förder- und einer Reinjektionsbohrung. Bohrbeginn der ersten Bohrung Pullach Th1 war der 4. Dezember 2004.

Die Bohrungen Pullach Th 1 und Th 2 wurden als Dublette von einem Sammelbohrplatz mit einem Abstand der beiden Ansatzpunkte von nur 7,5 m zueinander abgebohrt. Sie erschließen die wasserführenden Malmkarbonate in einer vertikalen Teufe von ca. 2.820 - 2.940 m unter Gelände, wo die Bohrungen durch eine horizontale Ablenkung aus der Vertikalen nach

Norden (Th 1) und Süden (Th 2) bereits einen Abstand von ca. 2 km haben. Die komplette Bohrung Th 1 wurde in der Rekordzeit von nur 42 Tagen abgeteuft. Nach Einbau des gelochten Liners und dem Fündigkeitsnachweis durch einen Pumpversuch wurde die zweite Bohrung Pullach Th 2 niedergebracht.

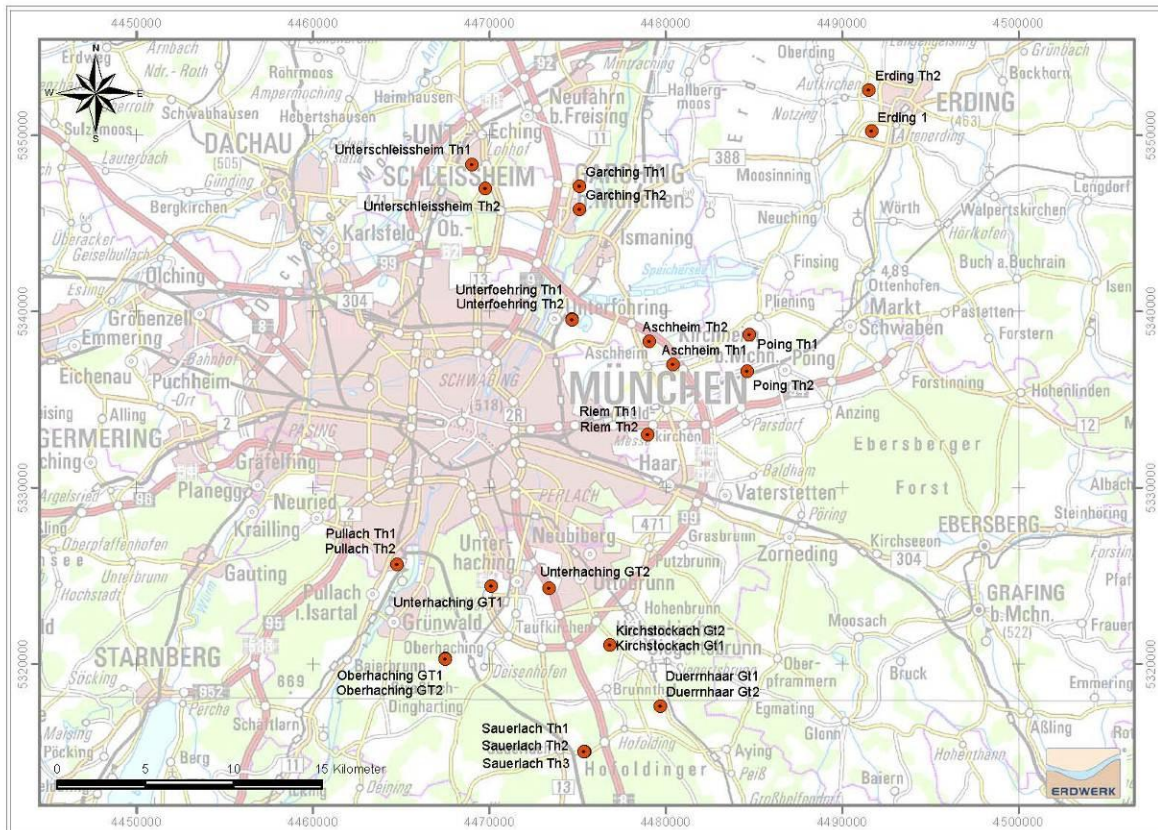


Abb. 4: Die Lage des Projektes Pullach und weiterer Geothermiebohrungen im Raum München.

Nach den ersten Fördertests hatte sich die Bohrung Th 2 mit ca. 45 l/s Thermalwasser und einer Fördertemperatur von knapp 107 °C als sehr produktiv erwiesen. Bereits ein Jahr nach Bohrbeginn, Bau der Wärmeübergabestation und Verlegung der Fernwärmeleitungen im ersten Bauabschnitt wurde mit der Wärmeversorgung der ersten Kunden begonnen. Die große Akzeptanz der Fernwärmeversorgung von privaten und öffentlichen Abnehmern mit Geothermie führte zu zunehmendem Bedarf an geothermischer Energie. Konsequenterweise läuft derzeit die Planung der dritten Bohrung Pullach Th 3. Bohrbeginn ist für Anfang 2011 geplant.

Neigung und Ablenkung

Die Bohrung Pullach Th 2 wurde in der ersten Bohrphase (16“) bis 765 m ungerichtet als Vertikalbohrung gebohrt (Abb. 5). In verschiedenen Teufen wurden dabei Neigungsmessungen (single shot) durchgeführt. Die Inklination betrug max. $0,6^\circ$ in Richtung Südost. Eine Annäherung in Richtung der Bohrung Pullach Th 1 konnte somit ausgeschlossen werden. In der 2. Bohrphase (12.1/4“) wurde ab 800 m gerichtet gebohrt, sodass bei einer Tiefe von ca. 1.240 m die geplante Neigung von ca. 40° in Richtung Süden erreicht und bis zum Ende der 2. Bohrphase gehalten wurde (Abb. 5). Auch in der 3. Bohrphase wurde zeitweise orientiert gebohrt, um eine Neigung zwischen 36° und 40° in Richtung Süden zu halten. Somit konnte der projektierte Landepunkt am Top Malm mit einer horizontalen Abweichung von nur wenigen Metern realisiert werden. Im Thermalwasserhorizont Malm (6.1/8“ Abschnitt) wurde ungerichtet bis auf Endteufe gebohrt. Die Neigung wurde dabei mit Werten zwischen min. ca. 34° und max. ca. 40° (und 38° bei Endteufe) in etwa gehalten. Die horizontale Entfernung zwischen Bohransatz- und Zielpunkt Top Malm (3.493 m MD, 2.946,2 m TVD) beträgt 1.583,45 m nach Azimut $179,94^\circ$. Die horizontale Gesamtabweichung bei Endteufe 4.120 m MD beträgt nach den Angaben des Richtbohrers 1.962,44 m nach Azimut $181,02^\circ$.

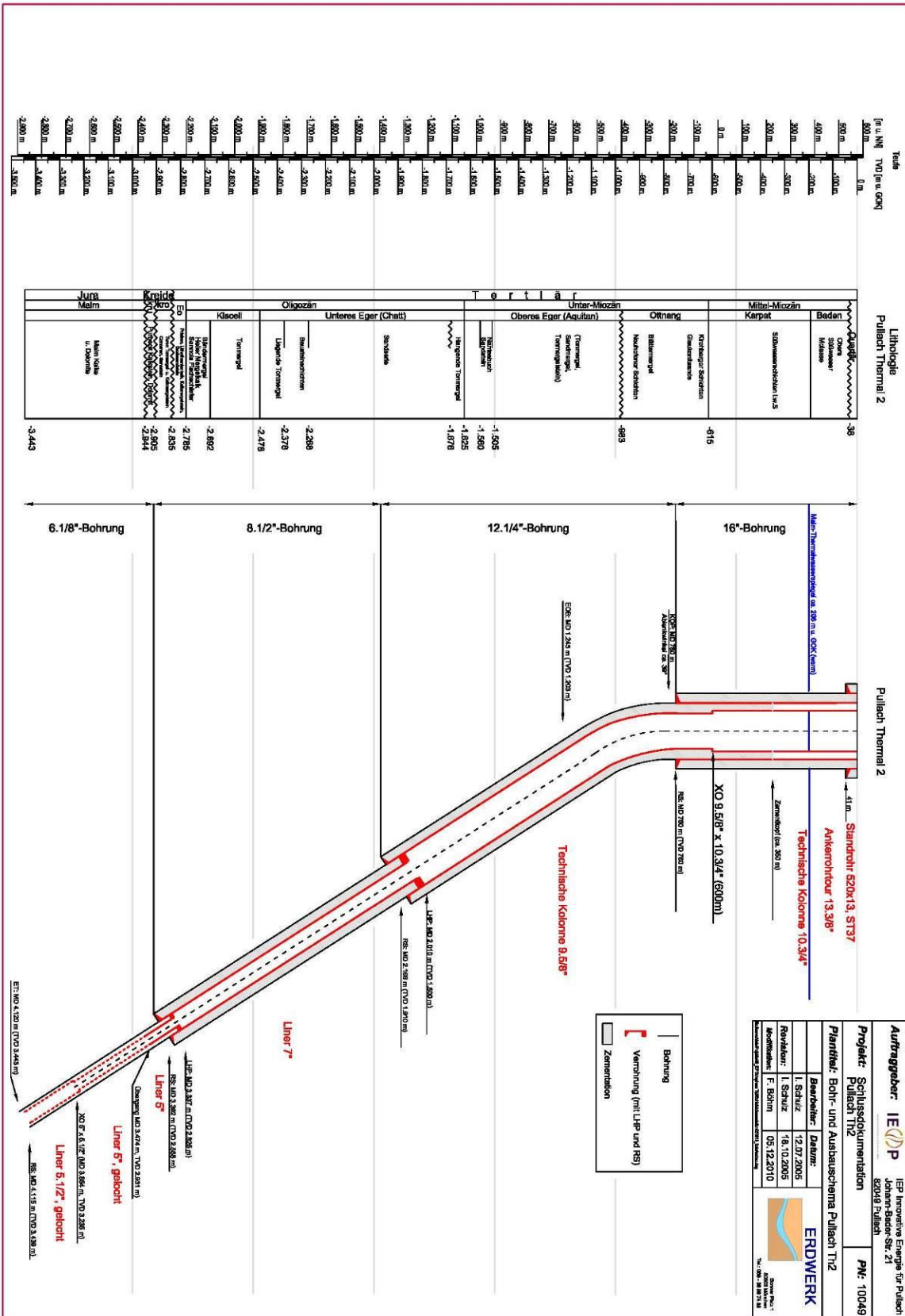


Abb. 5: Bohr- und Ausbauschema Pullach Th 2.

Das geologische Profil in der Bohrung Pullach Th 2

Das geologische Profil mit den stratigraphischen Grenzziehungen in der Bohrung Pullach Th 2 (Tab. 2) wurde nach den im Abstand von 10 m genommenen Bohrkleinproben und den geophysikalischen Bohrlochmessungen erstellt. Die Bohrung Pullach Th 2 ist mit Spülproben im Abstand von 10 m belegt und hat den Malm nur unvollständig durchteuft. Sie ist wahrscheinlich über den Bereich des unteren Malm Delta nicht hinausgekommen. Die Spülprobenanalyse lässt von etwa 3204 m bis zur Endteufe bei 3440 m eine durchgehende dolomitische Basis-Einheit von etwa 236 m Mächtigkeit erkennen, aus der vornehmlich gefördert wird.

Tab. 2: Geologisches Profil mit den stratigraphischen Grenzen in der Bohrung Pullach Th 2 (Erdwerk, 2008)

bis Bohrteufe MD [m]	bis vertikale Teufe TVD [m]	Lithologie	Mächtigkeit [m]
- 37,5	- 37,5	Quartär: Pleistozän, Würm-, Riß- und Mindelzeitliche Schotter	37,5
- - - Schichtlücke - - -			
- 190,0	- 190,0	Mittelmiozän: Baden, Nördliche Vollsotter-Abfolge, Lithozone L2	152,5
- 1.793,0	- 1.625,5	Untermiozän	1.435,5
- 615,0	- 615,0	Karpat, Süßwasserschichten i.w.S., OSM, Lithozone L1	425,0
- 668,0	- 668,0	Oberes Ottang, Kirchberger Schichten, Süßbrackwassermolasse	53,0
- 738,0	- 738,0	Mittleres Ottang, Glaukonitsande, OMM	70,0
- 780,0	- 780,0	Mittleres Ottang, Blättermergel	45,0
- 987,0	- 983,0	Unteres Ottang, Neuhofer Schichten, OMM	203,0
- - - Transgression - - -			
- 1.793,0	- 1.625,5	Oberes Eger (Aquitain); 1.640 – ca. 1.708 m (MD) Nantesbuch-Sandstein	642,5
- 2.902,0	- 2.478,5	Oberoligozän	853,0
- 1.860,0	- 1.676,0	Unteres Eger (Chatt), Hangende Tonmergel	50,5
- - - Transgression - - -			
- 2.635,0	- 2.268,5	Unteres Eger (Chatt), Sandserie	592,0
- 2.778,0	- 2.378,0	Unteres Eger (Chatt), Bausteinschichten	109,5
- 2.902,0	- 2.478,5	Unteres Eger (Chatt). Liegende Tonmergel	100,5
- 3.283,0	- 2.782,5	Unteroligozän	304,0
- 3.170,0	- 2.692,5	Kiscell (Rupel) Tonmergel	214,0
- 3.263,0	- 2.766,5	Kiscell (Rupel) Bändermergel	74,0
- 3.268,0	- 2.770,5	Kiscell (Rupel) Heller Mergelkalk	4,0
- 3.283,0	- 2.782,5	Kiscell (Rupel) Fischschiefer	12,0
- 3.352,0	- 2.835,5	Obereozän	53,0
- 3.325,0	- 2.815,5	Priabon, Lithothamnienkalk	33,0
- 3.335,0	- 2.823,5	Priabon Kalkmergelstein	8,0
- 3.352,0	- 2.835,5	Priabon Basissand	12,0

- - - Transgression - - -				
- 3.493,0	- 2.946,0	Kreide		110,5
- 3.417,0	- 2.887,0	Oberkreide		51,5
- 3.369,0	- 2.850,0		Turon Tonmergelstein	14,5
- 3.396,0	- 2.870,5		Turon Kalkmergelstein	20,5
- 3.417,0	- 2.887,0		Cenoman, Sandstein	16,5
- - - Schichtlücke - - -				
- 3.493,0	- 2.946,0	Unterkreide		59,0
- 3.429,0	- 2.896,0		Hauterive bis Valangin, Ton-, Tonmergelstein	9,0
- - - Schichtlücke - - -				
- 3.493,0	- 2.946,2		Berrias (Purbeck) Kalkstein, Dolomit	50,0
? - - - Schichtlücke - - - ?				
- 4.120,0	- 3.443,2	Jura		497,2
- 4.120,0	- 3.443,2		Malm Zeta	497,2

Untersuchtes Material und Untersuchungsmethoden

Es standen Spülproben im Abstand von 10 m in den zwei Aufbereitungsformen (Grobfraktion und Feinfraktion) in Röhrchen abgepackt zur Verfügung. Von diesen Proben wurden nach der ersten farblichen und lithologischen Unterteilung 23 Spülproben für die Herstellung von Dünnschliffen ausgewählt. Die Auswahl erfolgte dabei unter Berücksichtigung des Nachfall-Maximums und des Gamma-Logs, damit der entsprechende Lithotyp überwiegend, wenn nicht sogar ausschließlich in der jeweiligen Spülprobe vorhanden ist. So ist eine gute lithologische-fazielle Ansprache gewährleistet. Die so ermittelten Intervalle wurden mit der im Sampler-Log angegebenen Untergliederung und dem Gamma-Log verglichen. Die farbliche Unterteilung der Spülproben ergänzte diese Auswahl.

Es wurden 23 petrographische Dünnschliffe angefertigt und mit „Porenraum-Blau“ eingefärbt, wodurch alle offenen Porenräume in den Tafeln 1 - 5 blau erscheinen. Ferner wurden die Dünnschliffe mit Alizarin-S auf Calcit angefärbt, weshalb Calcit-Areale rot markiert sind. Die Klassifikation der Dünnschliffe erfolgt nach Dunham (1962) und die der Porosität nach Choquette & Pray (1970).

Die ermittelten Einheiten wurden, wenn möglich, am Gamma-Log orientiert. Die Auswertung der Spülproben (Cuttings) erfolgte gemäß Koch (1991) ebenso wie die Dokumentation der Lithotypen in den Phototafeln im Sinne der Spülprobenbearbeitung vom Hangenden zum Liegenden.

Von den Dünnschliffen der Dolomit-Spülproben wurden die Kristallgrößen und die Kristallmorphologie sowie die sichtbare Porosität im Dolomit bestimmt und in einer Tabelle dokumentiert (

Tab. 3: Dolomitkristallgröße, Kristallmorphologie und Größe der im Dünnschliff sichtbaren Poren aus den für Zuflüsse in Frage kommenden Intervallen in der Bohrung Pullach Th 2.). Diese Daten werden im Vergleich zu Spülungsverlusten in den verschiedenen Dolomit-Intervallen diskutiert, die Auskunft über die Ausbildung der Matrix-porosität und Matrixpermeabilität geben können, sofern sie nicht auf Klüfte allein zurück-zuführen sind. Zur Ermittlung des Calcit/Dolomit-Anteils im bedeutenden Teufenbereich wurden ferner 23 Spülproben pauschal über den Winkelbereich 29–32°, 2 θ (Cu, K α) röntgenographisch untersucht.

Ergebnisse

Die Ergebnisse werden entsprechend den oben beschriebenen Untersuchungsmethoden abgehandelt. Abschließend erfolgen die Synthese aller Ergebnisse und eine Charakterisierung der verschiedenen Dolomit-Intervalle im Hinblick auf die möglichen Zuflussraten.

Charakterisierung der 10 definierten Intervalle: farbliche Differenzierung und mikroskopische Analyse der Spülproben

Das untersuchte Intervall in der Bohrung Pullach Th 2 (2900 – 3440 m = 540 m Mächtigkeit; Bohrteufe = ca. 3440 m bis 4120 m) umfasst den basalen Teil der Unterkreide, sowie das Purbeck und dem Malm bis wahrscheinlich zum Malm Delta.

Es besteht im oberen Teil aus Kalkstein und im unteren Teil ab ca. 3204 m TVD aus Dolomit. Die zehn im Malm (einschließlich Purbeck) festgestellten lithologischen Einheiten können vom Top zur Basis mittels der Farbe der Spülproben und unter Berücksichtigung des Gamma-Log charakterisiert werden (Abb. 6 und Abb. 7). Dabei wird davon ausgegangen, dass geringe Zählraten im Gamma-Log auf geringe Tongehalte zurückzuführen sind und hohe Zählraten höhere Tongehalte widerspiegeln. Diese Tongehalte sind in der mikritischen Matrix der Karbonatgesteine enthalten. Aufgrund der geringen Partikelgröße der durch festländische Verwitterung eingeschwemmten Tonminerale werden diese gemeinsam mit feinem Mikrit (Partikelgröße < 4 μm) in Suspension transportiert und in Bereichen geringster Wasserenergie abgelagert, wie schon Folk (1959) diskutiert. Die Gesteinsfarbe ist überwiegend vom Gehalt an Tonmineralen sowie an Pyrit und organischem Material abhängig wie z.B. Wilson (1975) allgemein und Koch et al. (1997) am Beispiel von Kreidekalken aus Slowenien

dokumentieren. Die lithologischen Einheiten werden vom Hangenden zum Liegenden im Sinne der Spülprobenanalyse beschrieben.

Die mittels der Spülproben 3440 m, 3460 m und 3490 m MD beprobte lithologische Einheit der basalen Unterkreide ist überwiegend durch Siltsteine und Tonsteine charakterisiert (Taf. 1A). Darin sind Kreide-Kalke eingeschaltet, wie sie in der Spülprobe 3460 m (Taf. 1B) zu finden sind. Diese Wechselfolge von dünnen Kalk-/Mergelbänken mit mergelig-tonigen Partien mit Mächtigkeiten von etwa 2 - 5 m kommt im Gamma-Log durch das stark „gezackte Log-Shape“ deutlich zum Ausdruck.

Oberhalb 2938 m bis 2948 m TVD: Kreide Kalk:

M = 10 m (MD = 3480 – 3493 m)

Der hellgraue Kalk mit Echinodermenbruchstücken (Taf. 1B) und kantengerundeten Quarzkörnern deutet auf einen starken detritischen Einfluss hin, der wahrscheinlich durch ein Delta in den marinen Ablagerungsraum eingebracht wurde. Die siliziklastischen Körner (bis 250 µm) sind kantengerundet, was als Hinweis auf einen nur kurzen Küstensaum mit geringem lateralem Transport gesehen werden kann. Echinodermenbruchstücke weisen nur dünne syntaxiale Anwachsäume auf; Glaukonit tritt ebenfalls auf. Die Einheit mit 10 m Mächtigkeit besteht aus zwei sauberen Kalkpartien von jeweils etwa 2 m Mächtigkeit, die durch eine tonigere Zwischenschicht getrennt sind, wie deutlich aus dem Gamma-Log zu ersehen ist.

Einheit I: Purbeck 2948 – 2984 m TVD

M = 36 m: (MD = 3493 – 3544 m)

Graubrauner, überwiegend feinkristalliner Kalk und Dolomit (Abb. 6; Tab. 2) mit < 3 % Porosität und aufgrund der Partikelgröße vermutlich auch sehr geringer Permeabilität. Die lateralen Faziesänderungen der Purbeck-Kalke und -Dolomite sowie innerhalb des „Brekzien-Purbeck“ können regional auch erhebliche Porosität bedingen. Charakteristisch ist hier das grobe Peloid- bis Ooidgefüge sowie *Favreina salevensis*. An der Basis treten vereinzelt Ooide mit Durchmesser bis zu 0,3 mm auf (Taf. 1D). *Favreina salevensis* (Taf. 1C und D) ist besonders im oberen Teil des Purbeck häufig. Hier ist zum Teil noch deutliche Rest-Interpartikelporosität zu erkennen. Dichte rekristallisierte Mikrite (Taf. 1E) mit dolomitischem Anteil stellen auch einen charakteristischen Mikrofaziestyp des Purbeck dar.

Das Gamma-Log des hier anstehenden Purbeck (Abb. 6) weist eine Zunahme des Tongehaltes und damit auch der mikritischen Karbonate vom Liegenden zum Hangenden aus (fining upwards). Bei den beiden an der Basis auftretenden reinen kalkigen Partien von etwa 2-4 m Mächtigkeit, die durch geringe Gamma-Zählraten charakterisiert sind, handelt es sich um Ooid-Grainstones wie oben beschrieben. Die graubraune Farbe ist durch den höheren Tongehalt bedingt.

Einheit II: Oberster Malm Kalk 2984 – 3017 m TVD:

M = 33 m (MD = 3544 – 3579 m)

Der graue Kalk besteht aus unterschiedlichen Faziestypen in denen mikritische Lithoklasten und mikritisierte Ooide vorherrschen. Es treten Ooid-Peloid-Grainstones (Taf. 1C) auf, in denen gelegentlich die tangentialen Reliktstrukturen der Ooide (Durchmesser bis 0,6 mm) noch zu erkennen sind (Taf. 1F; Abb. 6). Die Grainstones sind meist dicht mit allseitigen Zementsäumen gut verfestigt und weisen nur sehr geringer Interkristallinporosität zwischen Calcitkristallen auf.

Das Gamma-Log dokumentiert, dass es sich hier um eine Wechselfolge von feinen, reinen Kalkbänken (Ooid-Grainstones) mit eingeschalteten Mikritlagen (hohe Gamma-Zählraten) handelt.

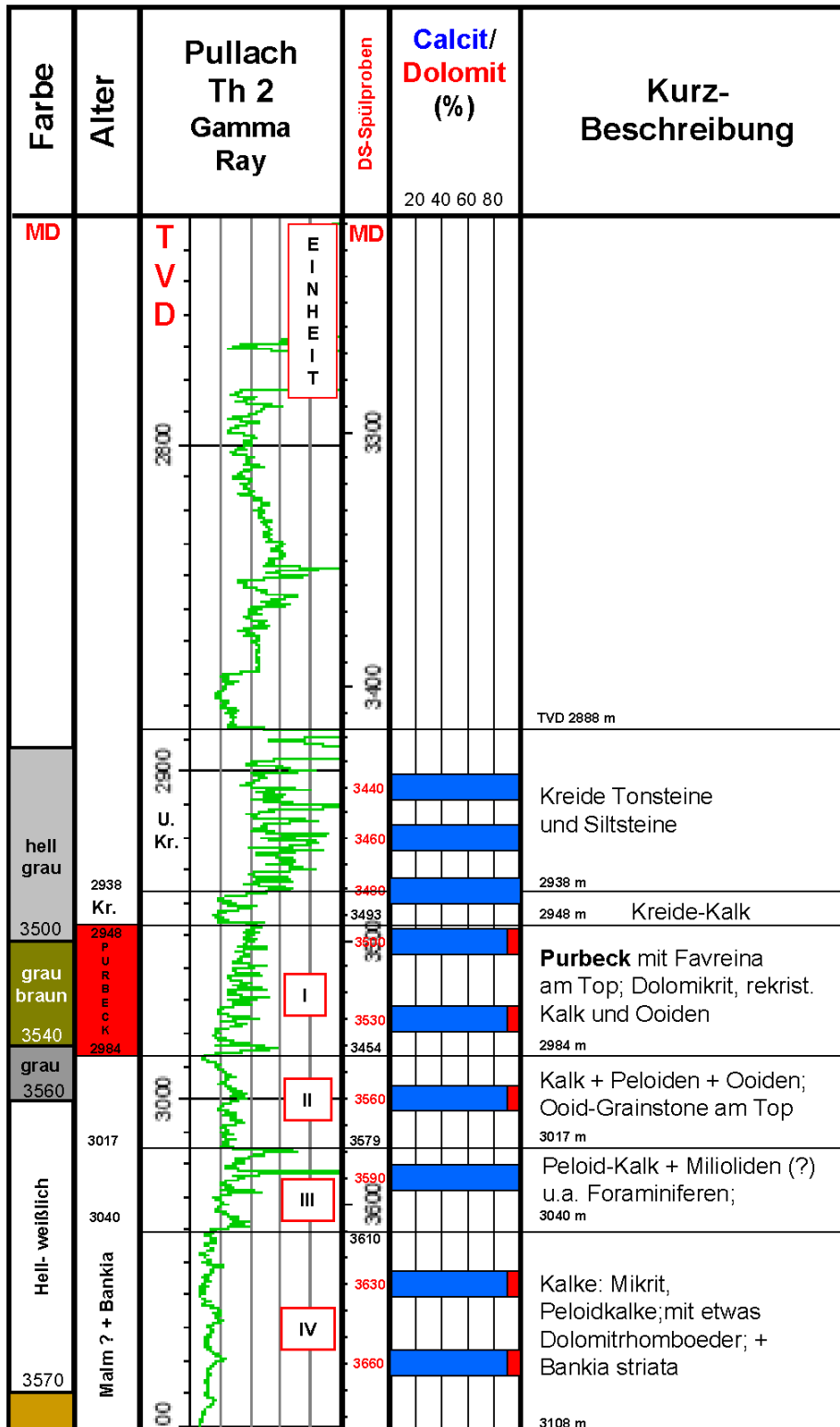


Abb. 6: Bohrung Pullach Th 2, oberer Abschnitt: Lithologisch-fazielle Entwicklung im Purbeck und Malm. Farbe der Spülproben, stratigraphische Einstufung, Gamma-Log, Position der untersuchten Spülproben und der lithologischen Einheiten, Röntgendiffraktometer-Analyse auf Calcit / Dolomit, sowie fazielle Charakterisierung der Einheiten. MD = Bohrmeißelteufe (Measured Depth); TVD = wahre, vertikale Teufe (Total Vertical Depth).

Einheit III: Oberster Malm Kalk 3017 – 3040 m TVD:

M = 23 m (MD = 3579 – 3610 m)

Der in den Spülproben helle, weißliche Peloid-Lithoklastkalk (Taf. 2A; Abb. 6) besteht überwiegend aus mikritischen Lithoklasten und Peloiden und lässt im Dünnschliff neben Milioliden auch andere benthische Foraminiferen erkennen. Lokal sind Bereiche mit mehr Mikrit (Packstones) vorhanden. Reine Lithoklast-Peloidkalke (Grainstones), die auch aus völlig mikritisierten Ooiden (Größe bis 0,3 mm) bestehen können (Taf. 2B), treten in geringmächtigen Lagen auf. Die Kalke sind durch granularen Zement dicht verfestigt (Taf. 2B). Die Wechselfolge von reinen Peloid-Lithoklastkalken mit mehr matrixreichen Kalken wird durch das Gamma-Log gut dokumentiert.

Einheit IV: Peloidkalk 3040 – 3108 m TVD:

M = 68 m (MD = 3610 – 3689 m)

In diesem Intervall ist generell ein heller, weißlicher Peloidkalk mit wenigen mikritisierten Ooiden und Mikrofossilien vorherrschend (Taf. 2C, D, E und F; Abb. 6). Mikritische Matrix ist in vielen Bereichen noch vorhanden (Packstones; Taf. 2C und D). Ferner treten hier lokal idiomorphe Dolomitrhomboeder auch in größeren Ansammlungen auf, die sowohl in den Bereichen zwischen den Allochemen (Taf. 2D) als auch an dünne Klüfte gebunden (Taf. 2C) auftreten. Manche mikritische Lithoklasten und Peloiden weisen „fitting“ auf, wodurch Konkav-Konvex-Kontakte zwischen den Körnern gebildet werden (Taf. 2E). Neben einzelnen reinen Mudstones sind hier besonders Packstones mit der stratigraphisch leitenden *Bankia striata* bedeutend (Taf. 2F). In Querschnitten ist deutlich die mikritische Umhüllung zu erkennen, die von der ehemaligen Wandung noch erhalten geblieben ist. Generell handelt es sich hier um Kalke mit nur geringen Tongehalten, die durch etwas tonigere Einschaltungen unterbrochen sind, wie aus dem Gamma-Log zu ersehen ist.

Einheit V: Reiner Feinpeloidkalk 3108 – 3154 m TVD:

M = 46 m (MD = 3689 – 3749 m)

In den hell- und dunkelbraunen, dichter Feinpeloidkalken mit mikritischer Matrix sind nur sehr wenige Bruchstücke von biogenen Komponenten zu finden (Taf. 3A und B; Abb. 7). Dabei handelt es sich vorwiegend um feine Echinodermenbruchstücke. Der Kalk ist mäßig rekristallisiert, wie von den hellen, granularen Calcitaren dokumentiert wird (Taf. 3B).

Aus der Farbe und dem Gamma-Log geht hervor, dass diese Kalke allgemein einen erhöhten Tongehalt (dunkelbraun) und nur im oberen Bereich einen geringeren Tongehalt (hellbraun) aufweisen.

Einheit VI: Mikrit und Feinpeloidkalk 3154 – 3204 m TVD:

M = 50 m (MD = 3749 – 3813 m)

Dunkle und grauschwarze Kalke in diesem Intervall bestehen aus dichtem Mikrit (Mudstone) und Feinpeloidkalk (Taf. 3B, Abb. 7). Vereinzelt sprossen, kleine idiomorphen Rhomboeder von Dolomit (bis 100 µm Größe) in der mikritischen Matrix (Taf. 3C). An der Basis zwischen etwa 3190 – 3200 m TVD tritt ein fast rein dolomitischer Bereich aus fein- bis mittelkristallinem Dolomit (Taf. 3E) mit etwa 10 m Mächtigkeit auf. Die Kristallgröße beträgt überwiegend 50 – 350 µm und die sichtbare Porosität generell < 5 %. Sie kann aber lokal zwischen 5 – 10 % betragen und aus freien Interkristallinopen von bis zu 50 µm Größe zwischen großen idiomorphen Dolomitkristallen bestehen (Taf. 3F).

Das Gamma-Log weist eine saubere Basis aus reinem Dolomit aus, der auch farblich durch weiße Spülproben hervorsticht. Unmittelbar im Hangenden entwickelt sich ein sehr toniger, wahrscheinlich rein mikritischer Bereich mit hohen Zählraten, der von grauem Kalk überlagert wird.

Ab Einheit VII zum Liegenden sind überwiegend reine Dolomitgesteine mit nur gering wechselnden Gehalten an Tonen (Nichtkarbonatanteil) ausgebildet (Abb. 7). Die unterschiedlichen Tongehalte beeinflussen die Kristallgröße der Dolomite beim Dolomitierungsprozess während der tieferen Versenkungsdiagenese, wie anschließend erläutert wird.

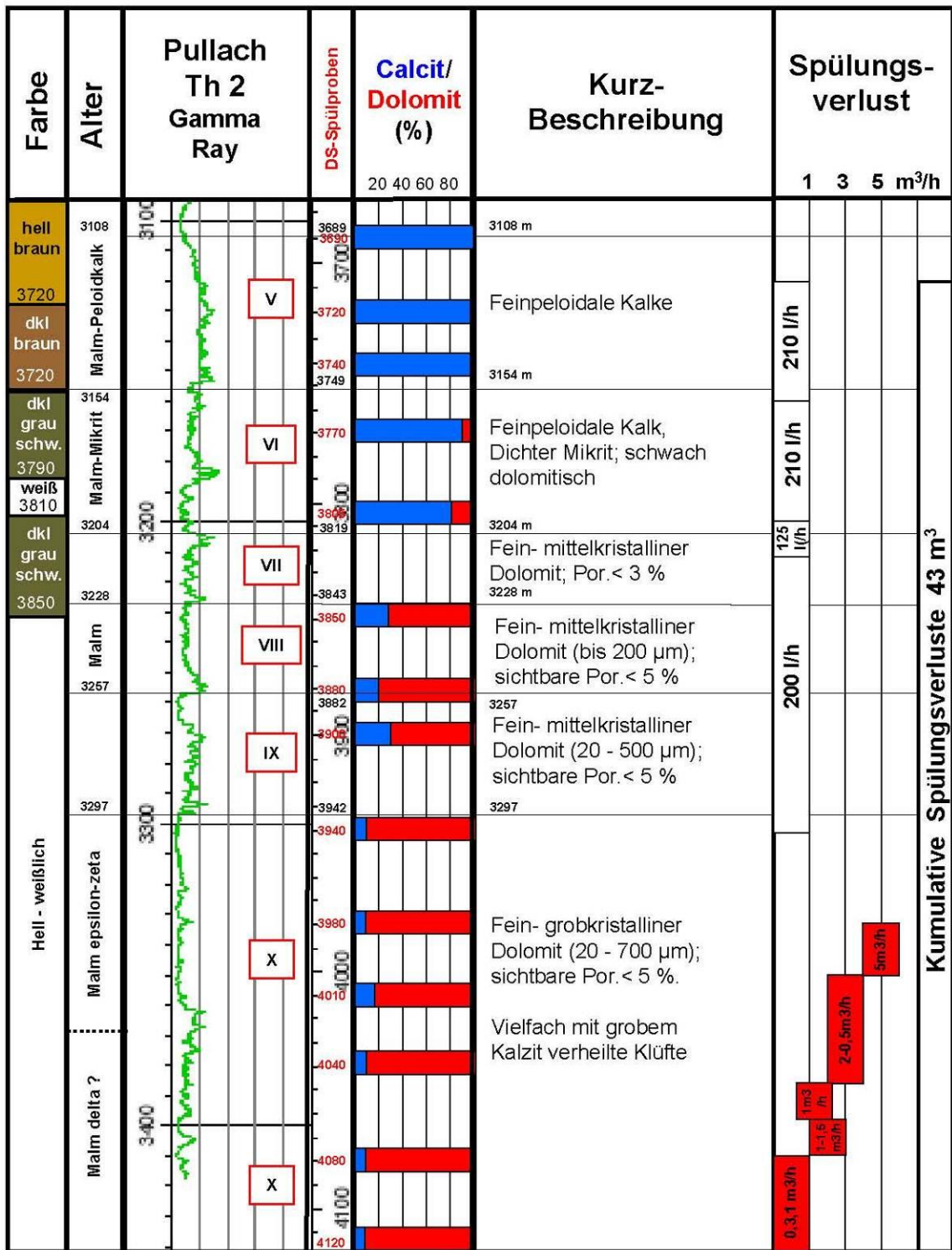


Abb. 7: Bohrung Pullach Th 2, unterer Abschnitt: Lithologisch-fazielle Entwicklung im überwiegend dolomitischen Malm. Farbe der Spülproben, stratigraphische Einstufung, Gammaray-Log, Position der untersuchten Spülproben und der lithologischen Einheiten, Röntgendiffraktometer-Analyse auf Calcit/Dolomit, sowie fazielle Charakterisierung der Einheiten und Spülungsverluste. MD = Bohrmeißelteufe (measured depth); TVD = Wahre, vertikale Teufe (total vertical depth).

Einheit VII: Fein- bis mittelkristalliner Dolomit 3204 - 3228 m TVD:

M = 24 m (MD = 3813 – 3843 m)

Ein dunkelgrauer bis schwarzer, fein- bis mittelkristalline Dolomit tritt zwischen 3204 m und 3228 m Teufe auf und ist durch die Spülprobe bei 3850 m MD erfasst (Taf. 4A; Abb. 7; Tab. 3). Er zeigt sichtbare Interkristallinporosität < 3 %, an der auch Rissporosität beteiligt ist. Grobe Calcitkristalle, die an Dolomitkristallen in der Spülprobe anhaften (Taf. 4A) weisen darauf hin, dass einige Klüfte mit grobgranularem Calcit im Laufe der späteren Diagenese wieder verheilt (geschlossen) wurden. Wie aus dem Gamma-Log zu ersehen ist, handelt es sich hier wieder um eine Wechselfolge von Kalk und Dolomit mit geringeren und höheren Tongehalten. Aufgrund des generell höheren Tongehaltes ist auch der Dolomit nur fein- bis mittelkristallin ausgebildet, wie nachfolgend erläutert wird.

Einheit VIII: Fein- bis mittelkristalliner Dolomit 3228-3257 m TVD:

M = 29 m (MD = 3843 - 3882 m)

Der etwas gröbere, fein- bis mittelkristalline Dolomit (bis 500 µm Kristallgröße; Taf. 4B; Abb. 7; Tab. 3) lässt zum Teil bis < 5 % sichtbare Interkristallinporosität erkennen und ist ebenfalls mit Rissen durchsetzt. Dort, wo ehemalige Echinodermenbruchstücke vorhanden waren, sind nun große idiomorphe, trübe, einschlußreiche Dolomitkristalle ausgebildet, die noch Geisterstrukturen der primären Echinodermenbruchstücke erkennen lassen und einheitliche Auslöschung aufweisen, die als von den Echinodermenbruchstücken ererbt interpretiert wird. Manche großen Kristalle weisen sekundäre Intrakristallinporen auf. Ehemalige Risse sind oft mit grobkristallinem bis blockigem Calcit unbekanntes Alters (Oberster Malm, Kreide, Tertiär ?) verfüllt. Die Einheit VIII ist an der Basis von einem tonigeren und daher wahrscheinlich feiner kristallinen Bereich begrenzt. Der mittlere Bereich von etwa 20 m Mächtigkeit, der die geringsten Gamma-Zählraten aufweist, besteht vermutlich überwiegend aus mittelkristallinem Dolomit.

Einheit IX: Fein- Mittelkristalliner Dolomit 3257 – 3297 m TVD:

M = 40 m (MD = 3882 – 3943 m)

Der in den Spülproben hell-weißlich erscheinende Dolomit (Kristallgröße 20 – 500 µm; Taf. 4C; Abb. 7; Tab. 3) in dieser Einheit IX ist am Top aus überwiegend mittel- bis grobkristallinem Dolomit zusammengesetzt und wird zum Liegenden etwas feiner kristallin.

Dies zeigt sich besonders in der geringen Gamma-Zählrate am Top der Einheit. Die sichtbare Porosität beträgt < 5%, kann allerdings auch große Interkristallporen von bis zu 50 µm Größe aufweisen. Einige Dolomitkristalle weisen helle Anwachsäume auf, was auf ein Weiterwachstum in der tieferen Versenkungsphase schließen lässt. Auch hier sind ehemals vorhandene Risse mit grobblockigem Calcit unbekanntem Alters verfüllt.

Tab. 3: Dolomitkristallgröße, Kristallmorphologie und Größe der im Dünnschliff sichtbaren Poren aus den für Zuflüsse in Frage kommenden Intervallen in der Bohrung Pullach Th 2.

Cutting Teufe (m)	Dolomit-Kristallgröße (µm)	Dolomit Kristall-Morphologie			Porengröße µm	Bemerkungen
		Xen	Hyp	Idio		
Einheit I: MD 2948 – 2984 m (Cutting 3500, 3530, 3560 m) Purbeck						
3500	< 10	X	-	-	< 2 ?	Dolomikrit
3530	< 10-30	X	-	-	< 5	Lithoklast, Pel.
3530	< 10-30	X	X	-	< 5 -20	Lithoklast, Ooid
3550	< 10-30	X	-	-	< 5 - 20	Dolomikrit
3530	< 10-100	X	X	-	< 5	Ooid-Grainstone
Einheit VI: MD 3748 – 3812 m (Cutting 3805 m) Malm						
3805	20-50	-	X	-	< 5	Feinkrist. Dolomit
3805	50-200	-	X	X	< 10	Feinkrist. Dolomit
3805	50-350	X	X	-	<10 - 50	Fein-mittlerekrist. Dol.
Einheit VII: MD 3812 – 3844 m (Cutting 3850 m) Malm						
3850	<20-50	X	X	-	<< 5	Feinkrist. Dolomit
3850	10-200	-	X	-	<10 - 20	Feinkrist.Dol+Calcit
Einheit VIII: MD 3844 – 3882 m (Cutting 3880, 3900 m) Malm						
3880	20-400	X	X	-	<5 - 50	Mittelkr.Dol.+ Calc.
3900	100-500	-	X	X	20 - 100	Mittelkrist. Dol.
Einheit IX: MD 3882 – 3932 m (Cuttings 3900, 3940 m) Malm						
3900	100-500	X	X	-	10 – 50	Mittelkrist. Dol.
Einheit X: MD 3932 – 4120 m (Cuttings 3980, 4010, 4040, 4080, 4120 m) Malm						
3980	20-300	-	X	X	10 – 30	Mittelkr. Dol.+Calc
4010	10-600	-	X	X	10 - 50	M-gr.kr. Dol.+Calc
4040	50-300	X	X	X	5 – 10	Mittelkr. Dol.+Calc
4080	50-700	XX	X	-	< 10 -50	M-gr.kr. Dol.+Calc
4120	5-300	-	X	-	< 10	Mittelkr. Dol.

Einheit X: Fein- bis grobkristalliner Dolomit 3297 – 3440 m TVD:

M = 147 m (MD = 3943 - 4120 m)

Die hellen, weißlichen Spülproben bestehen aus fein- bis grobkristallinem Dolomit (420 – 700 µm; Taf. 4D, E und F sowie Taf. 5; Abb. 7;

Tab. 3: Dolomitkristallgröße, Kristallmorphologie und Größe der im Dünnschliff sichtbaren Poren aus den für Zuflüsse in Frage kommenden Intervallen in der Bohrung Pullach Th 2.), sind besonders in den oberen 60 m sehr rein und daher grobkristallin, wie aus den sehr geringen Gamma-Zählraten zu entnehmen ist. Es sind hier vermehrt besonders große Kristalle

(bis 700 µm) mit einschlußreichem, trübem Kern und hellem Anwachssaum zu finden. Auch sind große Intrakristallinoporen (Sekundärporosität) zu beobachten (Taf. 4 E und F), was auf eine Korrosion der Dolomitkristalle zurückzuführen ist. Die sichtbare Porosität kann hier bis 5 % betragen. Grobkristalliner Calcit (Taf. 4 E und Taf. 5 A), der auch zu finden ist, stammt aus tektonischen Klüften, die durch ihn wieder geschlossen wurden.

Im mittleren Bereich dieser Einheit weist eine erhöhte Gamma-Strahlung auf etwas feiner kristallinen Dolomit hin, wie er in den Spülproben bei 4040 m und 4080 m MD angetroffen wird (Taf. 5 B und C). Er weist zum Teil verzahntes Kristallgefüge auf (Taf. 5 B).

Andere Bereiche sind von zahlreichen interkristallinen Rissen durchzogen (Taf. 5 C) was auf die Sprödigkeit des Dolomits hindeutet. Einschaltungen von sauberem, grobkristallinem Dolomit (Taf. 5 D) sind durch geringe Gamma-Strahlung charakterisiert.

Die erreichte Basis der Einheit X weist wieder mittelkristallinen Dolomit mit verzahntem Kristallgefüge auf (Taf. 5 E und F). Auch hier sind Risse zu finden, die mit später gebildetem Calcit wieder verfüllt sind (Taf. 5 E).

Dolomit-Kristallgröße, -Morphologie, sichtbare Porosität und Spülungsverluste

Die mikroskopische Analyse und das Vermessen der Kristallgrößen von Dolomit, der Morphologie der Dolomitkristalle (idiomorph, hypidiomorph, xenomorph) und der Größe der sichtbaren (blau eingefärbten) Porenräume sollen zur Interpretation der Zuflussraten in Abhängigkeit vom Dolomit-Typ dienen. Da in der Bohrung Pullach Th 2 keine abschnittswisen Zuflußraten vorliegen, werden diese Daten anschließend im Hinblick auf die Spülungsverluste diskutiert, die in einzelnen Bereichen deutliche Unterschiede aufweisen.

Die Bohrung Pullach Th 2 weist in der erschlossenen Malm-Schichtfolge eine Zuflußrate von ca. 45 l/s auf. Diese Zuflußraten beschränken sich voraussichtlich im Wesentlichen auf den dolomitischen Teil der lithologischen Einheiten VI – X.

Geht man davon aus, dass ein Großteil der Zuflußraten über Interkristallinoporen zwischen den Dolomitkristallen unterschiedlicher Größe erfolgt, müsste ein Zusammenhang zu den Spülungsverlusten bestehen, insofern diese auch überwiegend an Interkristallinoporen gebunden sind. Der Fluidtransport kann in diesem Fall nur über die so genannte Matrixpermeabilität erfolgen. Zuflußraten und Spülungsverluste über Klüfte dürften keinen Zusammenhang zum Anteil an Dolomit und der Größe der Interkristallinoporen und damit der Dolomitkristallgröße, erkennen lassen.

Spülungsverluste im Zielhorizont (Malmtiefengrundwasserleiter)

Insgesamt konnten ab 3.709 m MD bis zum Erreichen der Endteufe (4.120 m MD) kumulative Spülungsverluste von 43 m³ festgestellt werden (Abb. 7).

Die ersten Spülungsverluste in der Bohrung Pullach Th 2 traten in einer Teufe von 3.709 m MD (= 3.122 m TVD) auf, ab ca. 175 m vertikal unter Top Malm (2.946 m TVD). Die schleichenden Spülungsverluste ab 3.709 m traten in Horizonten auf, die eine geringe, jedoch zunehmenden Anteil an Dolomit in den Spülproben erkennen lassen.

Die stärksten Spülungsverluste im Malm waren im tieferen Malm, in den untersten ca. 150 Bohrmeter (ca. 110 m vertikal), ab einer Teufe von ca. 3.980 m MD mit ca. 5 m³/h (1,4 l/s) zu verzeichnen. Diese traten erstmals auf, als überwiegend dolomitische Kalke und Dolomite durchteuft wurden. Es fällt weiterhin auf, dass genau in diesem Teufenbereich ein Gasanstieg von ca. 0,1 % C1 auf über 2 % C1 gemessen wurde.

Tab. 4: Spülungsverluste in der Bohrung Pullach Th 2.

Bohrmeisterteufe m (MD)	Menge der Spülungsverluste	Strecke der Spülungsverluste
3.709,0 – 3.753,0	schleichend (ca. 210 l/h)	ges. 5 m ³ auf 44 m Bohrstrecke
3.753,0 – 3.806,5	schleichend (ca. 210 l/h)	Ges. 5 m ³ auf 53,5 m Bohrstrecke
3.806,5 – 3.820,0	schleichend (ca. 125 l/h)	Ges. 3 m ³ auf 13,5 m Bohrstrecke
3.820,0 – 3.939,0	schleichend (ca. 200 l/h)	Ges. 3 m ³ auf 119 m Bohrstrecke
?	?	?
3.980,0 – 4.000,0	zunehmend (ca. 5 m ³ /h)	ges. 8 m ³ auf 20 m Bohrstrecke
4.000,0 – 4.046,0	kontrolliert (2,0 – 0,5 m ³ /h)	
4.046,0 – 4.059,0	kontrolliert (ca. 1,0 m ³ /h)	
4.059,0 – 4.076,0	kontrolliert (ca. 1,0 – 1,5 m ³ /h)	
4.076,0 – 4.120,0	kontrolliert (0,3 – 1,0 m ³ /h)	

Vergleicht man die Spülungsverluste mit der lithologischen Ausbildung des Malm, wird deutlich, dass sie fast ausschließlich im dolomitischen Malm auftreten. Daraus kann geschlossen werden, dass Spülungsverluste kaum über Klüfte erfolgen.

Im Dolomit ist auffallend dass die Menge der Spülungsverluste mit der Idiomorphie und Größe der Kristalle im Dolomit (Tab. 4) zunehmen. So treten die höchsten, kontrollierten Spülungsverluste dort auf, wo die größten Dolomitkristalle (von 3980 – 4000 m TVD; bis 700 µm) und gut sichtbare große Interkristallinopen zu finden sind. Im Vergleich zum Gamma-Log zeigt sich, dass die besonders reinen Dolomite mit den geringsten Gamma-Log-Readings die höchsten Spülungsverluste aufweisen. Bereich mit höheren Gamma-Readings

und demzufolge etwas erhöhte Anteile an Nicht-Karbonaten weisen wesentlich geringere Spülungsverluste auf. Der Grund hierfür liegt in dem besonderen Wachstum der Dolomitkristalle während der späteren diagenetischen Entwicklung der Massenkalke.

Diskussion und Schlussfolgerungen

Ausbildung der Dolomitkristalle, Spülungsverluste und Zuflußraten:

Für die Speichereigenschaften und die Zuflussraten sind ebenso wie für die hier dokumentierten unterschiedlichen Spülungsverluste in verschiedenen Intervallen, wahrscheinlich überwiegend alleine die dolomitischen Bereiche von Bedeutung. Die hier vorhandenen Zuflüsse können als Zuflüsse aus der so genannten Matrix-Porosität und –Permeabilität definiert werden. Zusätzlich sind Klüfte zu beachten, über die als sekundäre Porosität weitere Zuflussraten sowohl im Dolomit als auch im Kalk erfolgen können.

Dabei wird die Permeabilität nach diesem Modell vorwiegend durch die so genannte Matrix-Porosität bedingt; d.h. die Interkristallinoporen zwischen den Dolomitkristallen. Dabei spielen sowohl die Morphologie der Dolomitkristalle als auch der Porenräume eine entscheidende Rolle. Dolomit, der aus großen, idiomorphen Kristallen besteht, weist deutlich sichtbare interkristalline Porenräume auf.

Besonders große und überwiegend hypidiomorph und meist sogar xenomorph ausgebildete Dolomitkristalle können dagegen wiederum kaum sichtbare Porenräume aufweisen. Hier erfolgte ein Weiterwachsen, bis die ehemals freien Interkristallinoporen fast vollständig durch neu gebildeten Dolomit verschlossen wurden, der die Vorgänger-Kristalle als Kristallisationskeime genutzt hat. Diese Kristalle zeigen meist einen klaren, einschlussfreien Anwachsraum aus stöchiometrischem Dolomit, der wahrscheinlich vorwiegend in der tieferen Versenkungsdiagenese gebildet wurde, wie von Tucker & Wright (1990) und Liedmann & Koch (1990) für den Malm in Süddeutschland beispielhaft beschrieben.

Kalke mit primär hohem Anteil an Nicht-Karbonat können nur fein- bis mittelkristallinen Dolomit bilden. Aufgrund der geringen Kristallgröße führt hier allerdings selbst eine idiomorphe Ausbildung der Dolomitkristalle nicht zu großen Interkristallinoporen und damit auch nicht zu höheren Matrix-Zuflussraten (Matrix-Permeabilität).

Je größer und idiomorpher die Dolomitkristalle (ohne erhebliche Rekristallisation und/oder Weiterwachsen) umso größer die Interkristallinoporen und umso besser die Matrix-Permeabilität. Die Größe der Dolomitkristalle hängt dabei auch vom Reinheitsgrad (Anteil an

Nicht-Karbonat) im primären Kalkstein ab, da die fein verteilten Tonpartikelchen das Wachstum größer Dolomitkristalle behindern (Koch et al., 2010), was mit den Verhältnissen bei der Rekristallisation von Kalken, wie sie von Bausch (1968) für den Malm beschrieben wurden, zu vergleichen ist. Dieser Zusammenhang wird auch in der Darstellung verschiedener Dolomite deutlich, die einerseits aus matrixreichen Mudstones und Wackestones mit hohem Anteil an Nichtkarbonaten und andererseits aus Packstones und Grainstones mit geringen oder gar keinen Anteilen an Nichtkarbonat hervorgegangen sind, wie von Lucia (1999) dokumentiert (Abb. 8). Dabei weisen aus Packstones und Grainstones entstandene Dolomite durchwegs größere Kristalle auf.

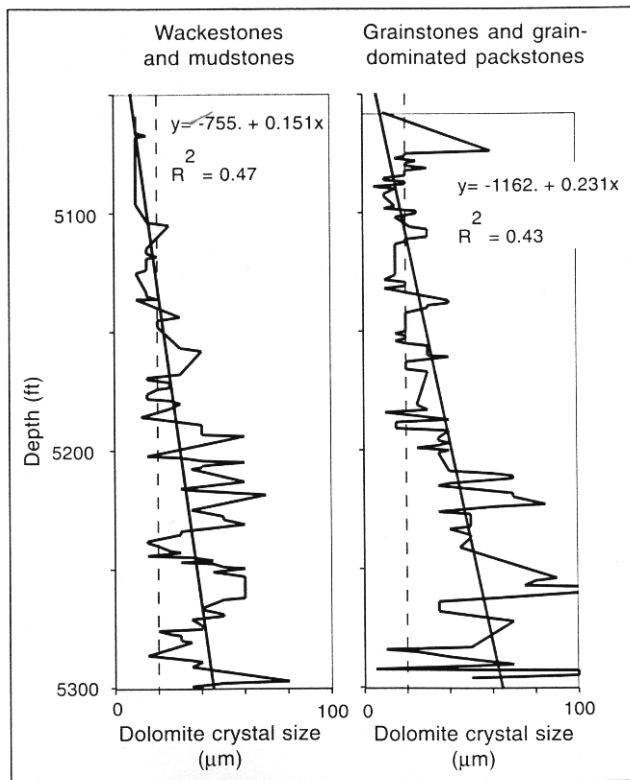


Abb. 8: Kristallgröße des Dolomits in Abhängigkeit vom Ausgangssediment und der Teufe (aus Lucia, 1999).

Die Größe der Dolomitkristalle steuert über die Porenradien die Permeabilität. Dabei gilt, dass kleine Kristalle kleine Porenradien und damit geringe Permeabilität bedingen. Große Dolomitkristalle weisen dagegen große Porenradien auf, was für eine bessere Permeabilität sorgt. Zusätzlich ist zu beachten, dass idiomorphe Dolomitkristalle bessere Permeabilität bedingen als hypidiomorphe oder gar xenomorphe Kristalle. D.h. je stärker das Kristall-

gefüge verzahnt ist, umso schlechter ist die Permeabilität. Beide Parameter greifen ineinander. So kann es sein, dass ein hochporöser feinkristalliner Dolomit, dessen sichtbare Poren aus großen Molds und Vugs bestehen, nur sehr geringe Permeabilität aufweisen kann, da die Dolomitkristalle sehr klein und verzahnt sind und daher extrem kleine Porenhalsdurchmesser aufweisen. Mittelkristalline Dolomite mit vorwiegend großen Interkristallinporen weisen dagegen größere Porenhalsdurchmesser und somit gute Permeabilitäten auf. Grobkristalline Dolomite sind überwiegend durch Weiterwachsen von mittelkristallinem Dolomit entstanden. Dadurch wurden die ehemals noch vorhandenen großen Interkristallinporen fast vollständig

verschlossen. Sie weisen daher nur noch geringe Permeabilität auf. Diese Zusammenhänge zwischen Dolomit-Kristallmorphologie, Dolomit-gefüge und Porosität ist in der Literatur mehrfach beschrieben worden (Sibley 1982, Sibley & Gregg 1987, Lucia 1999), für den Malm im Molasse-Untergrund von Liedmann & Koch (1990), Liedmann (1992), Reinhold & Schroeder (1994), Reinhold (1996), Koch (2000), Wolfgram et al. (2009) und Koch et al. (2010). Wie in der Bohrung Pullach Th 2 gezeigt, können allerdings auch späte Bildung von Calcit die interkristallinen Porenräume und vorher gebildete Kluftporen wieder teilweise oder sogar vollständig verschließen. In diesem Fall kommt es zu dichten kalkigen Dolomit ohne, dass der Dolomit eine Phase des Weiterwachstums durchgemacht hat.

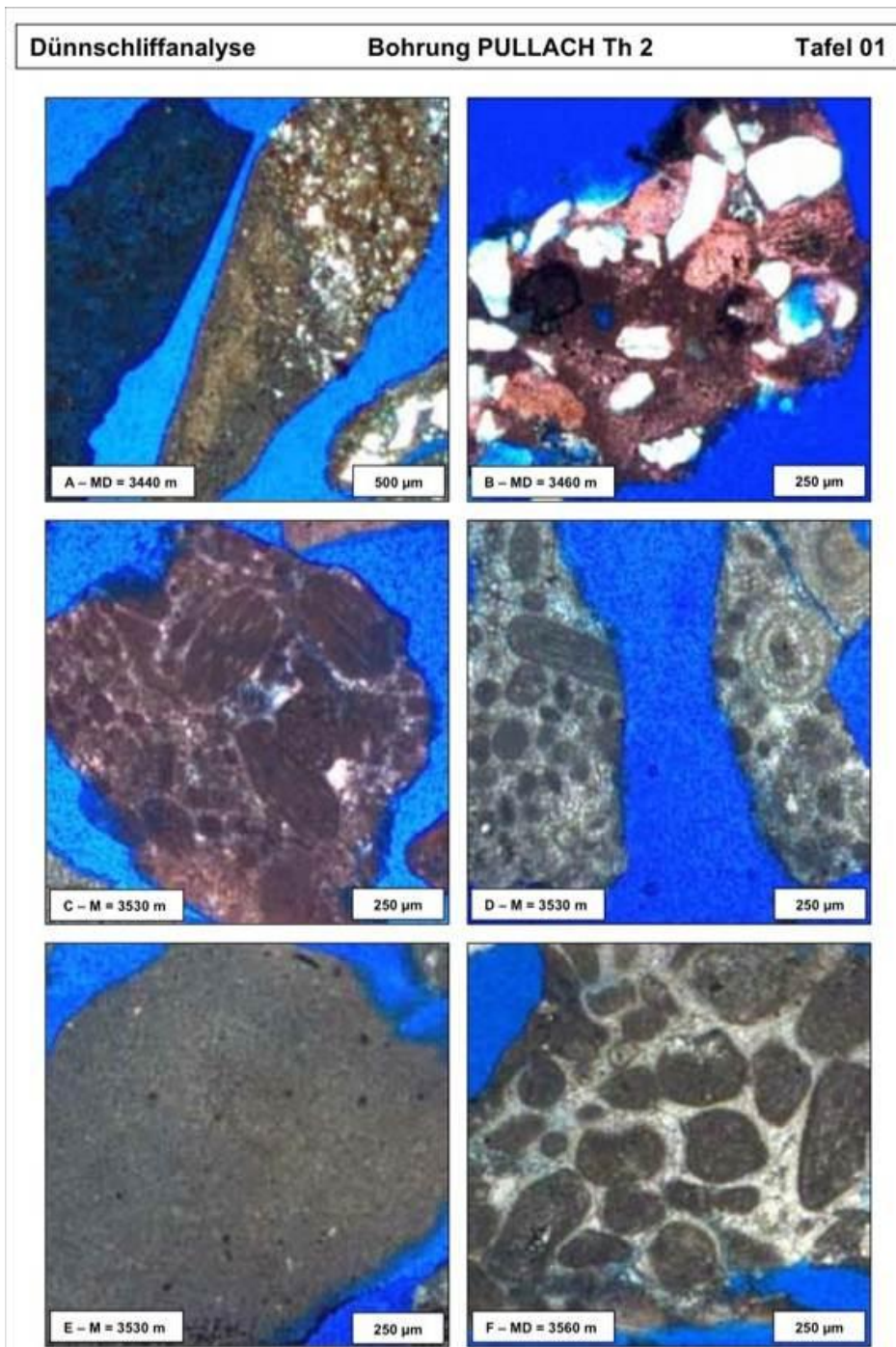
Es zeigt sich ferner, dass die Primärfazies, d.h. die primären Bildungsbedingungen der Massenkalk und der benachbarten Sedimente (Bankfazies; Randbereich, Becken), wie von Koch et al. (2010) in den Bohrungen Scherstetten 1 und Scherstetten 2 beschrieben, einen wesentlichen Einfluss auf die weitere Porositätsentwicklung selbst während der verschiedenen späteren Phasen der Dolomitierung haben.

Für das Verständnis geothermischer Speichergesteine im Malm Süddeutschlands ist daher zunächst eine fazielle Analyse selbst aus Spülproben empfehlenswert. Auf dieser Grundlage können die weiteren diagenetischen Entwicklungen, die zur Bildung permeabler Trägersteine und/oder zur Bildung dichter Gesteine führen besser verstanden werden. Auch ist ein Verständnis der räumlichen Entwicklung und lateralen und vertikalen Verzahnung unterschiedlich poröser Karbonatgesteine nur auf der Grundlage dieser Daten möglich.

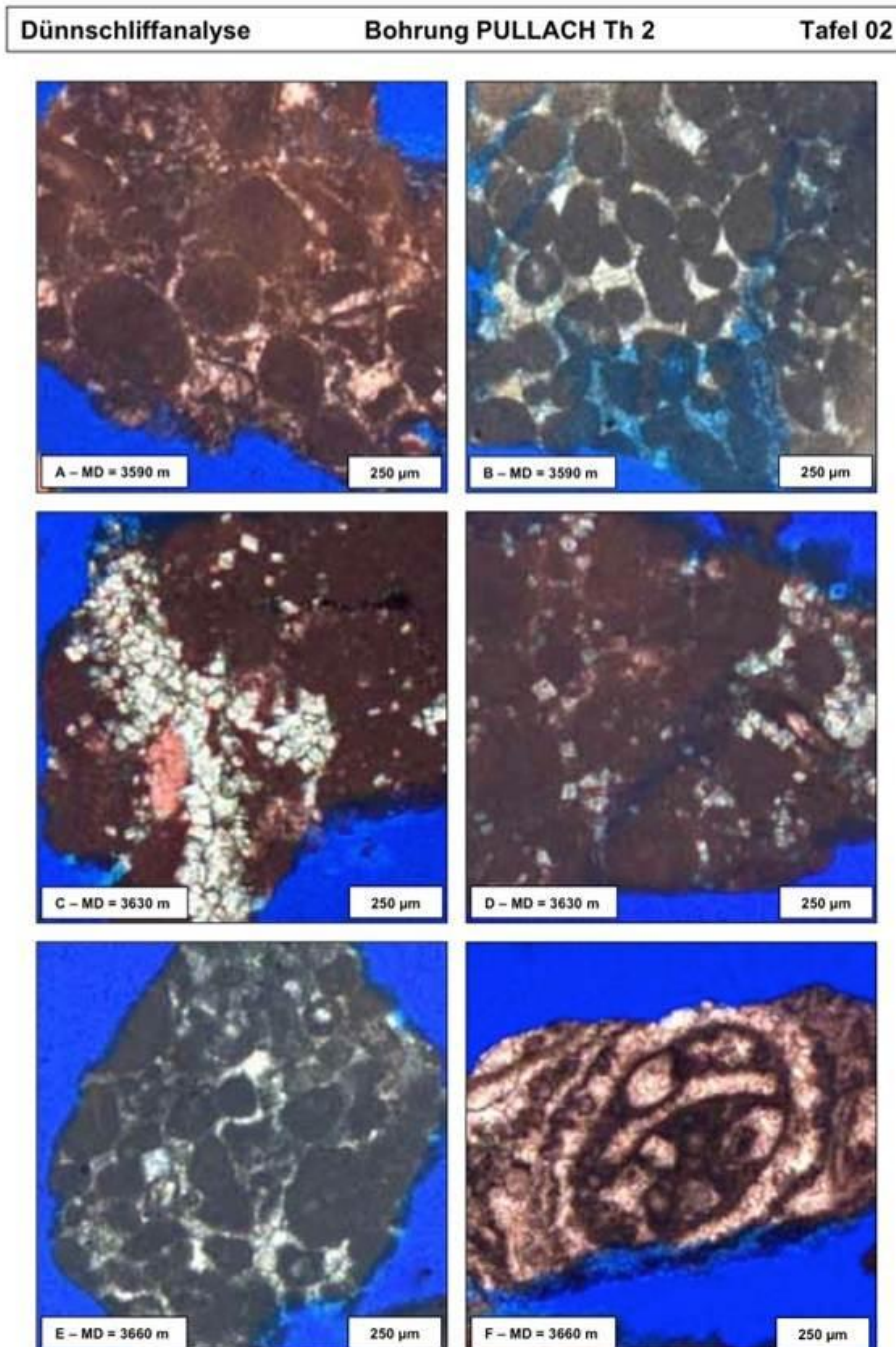
Danksagung

Herr Prof. Dr. W. v. Gosen (Erlangen) und einem ungenannten Gutachter danken wir für kritische Durchsicht des Manuskriptes und Korrekturen. Der IEP danken wir für die Bereitstellung der Bohrungsdaten und der Freigabe zur Veröffentlichung.

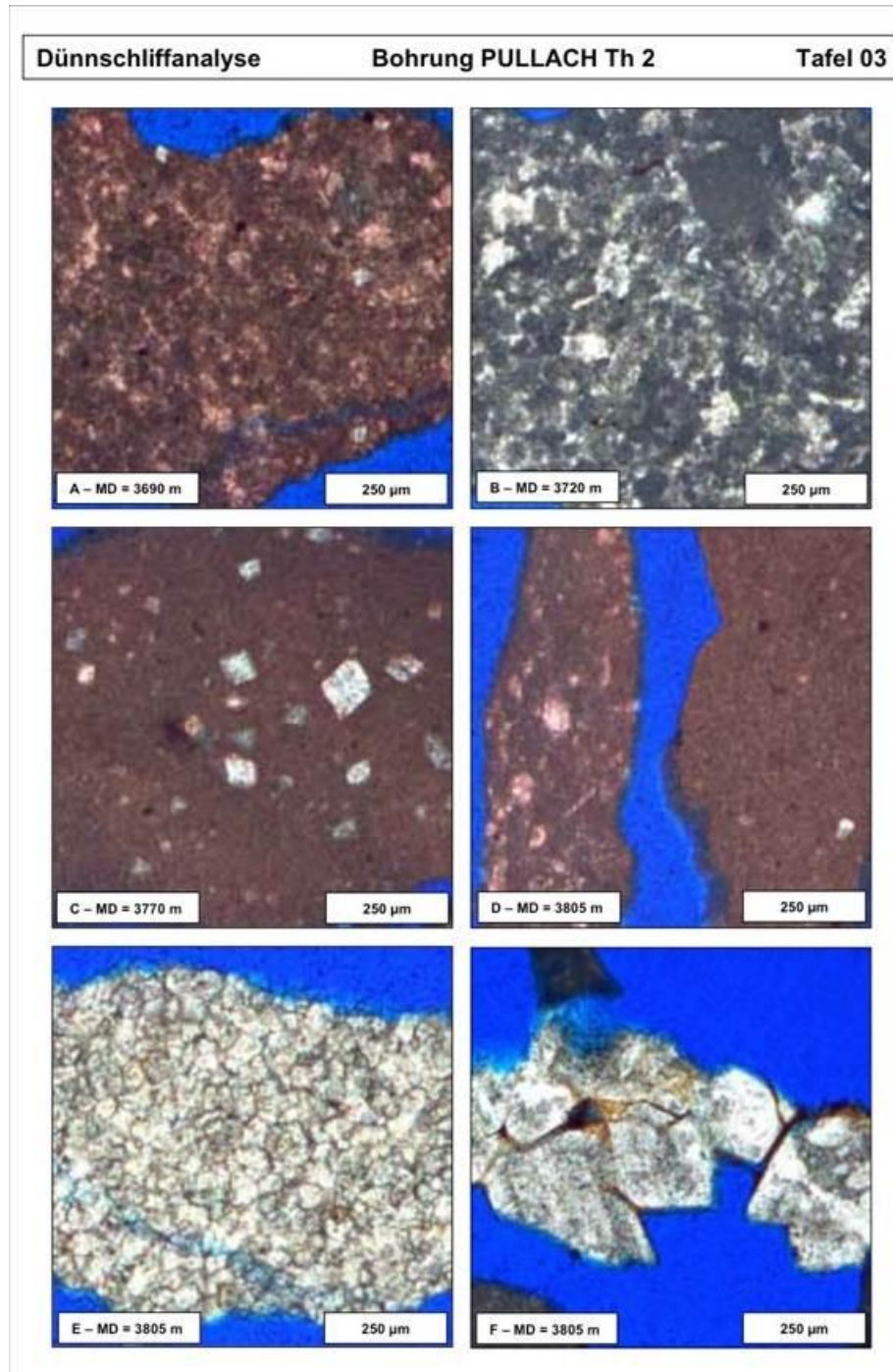
Taf. 1: **A** - Graubrauner Siltstein der basalen Unterkreide aus einer Wechselfolge von dünnen Kalk-/Mergelbänken mit mergelig-tonigen Partien; **B** - Hellgrauer Kalk mit Echinodermenbruchstücken und kantengrundeten Quarzkörnern (bis 250 µm). Die Echinodermenbruchstücke weisen nur vereinzelt dünne, syntaxiale Anwachssäume auf; **C** - (**Einheit I; Purbeck**) Favreinen-reicher Lithoklast-Peloid-Packstone mit kleinen Restinterpartikelporen (blau); **D** - (**Einheit I; Purbeck**) Ooid-Grainstone mit Ooiden von bis zu 0,3 mm und deutlichen tangentialen Reliktstrukturen; **E** - (**Einheit I; Purbeck**) dichter, rekristallisierte Mikrit mit dolomitischem Anteil; **F** - (**Einheit II; Oberster Malm**) Ooid-Peloid-Grainstone mit tangentialen Reliktstrukturen der Ooide (bis 0,6 mm) und allseitigen Zementsäumen;



Taf. 2: **A** – (**Einheit III; Oberster Malm**) Heller, weißlicher Peloid-Lithoklastkalk mit mikritischen Lithoklasten, Peloiden und vereinzelt Milioliden und andere benthische Foraminiferen; **B** - (**Einheit III; Oberster Malm**) Reiner Lithoklast-Peloidkalke (Grainstones) mit völlig mikritisierten Ooiden (Größe bis 0,3 mm) und granulearem Zement; **C und D** – (**Einheit IV; Oberster Malm**) Heller, weißlicher Peloidkalk mit wenigen mikritisierten Ooiden und Mikrofossilien und mikritischer Matrix; idiomorphe Dolomithomboeder kommen auch in größeren Ansammlungen zwischen Partikeln und an Klüfte gebunden vor; **E** – (**Einheit IV; Oberster Malm**) Lithoklast- Peloidkalk (Packstone-Grainstone) mit „fitting“ der Allochemie; **F** - (**Einheit IV; Oberster Malm**) Packstone mit der stratigraphisch leitenden *Bankia Striata*.

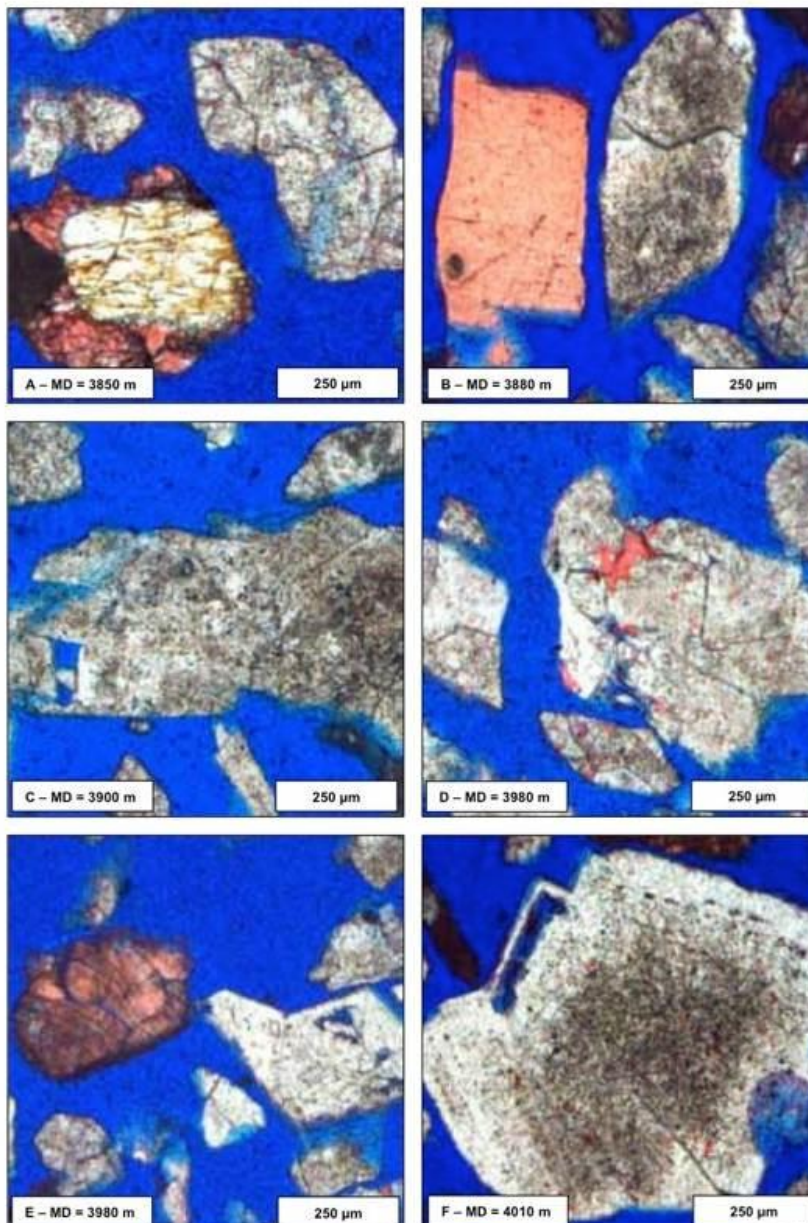


Taf. 3: A und B – (Einheit V; Oberster Malm) Hell- und dunkelbrauner, dichter Feinpeloidkalken mit mikritischer Matrix und nur sehr wenige Bruchstücke von biogenen Komponenten (vorwiegend Bruchstücke von Echinodermen); **C und D - (Einheit VI; Oberster Malm)** Grauschwarzer, dichter Mudstone und Feinpeloidkalk mit vereinzelt kleinen idiomorphen Dolomithomboedern (bis 100 µm Größe); **E und F - (Einheit VI; Oberster Malm)** Fein- bis mittelkristallinem Dolomit aus Kristallen von 50 – 350 µm Größe und sichtbarer Interkristallinporosität < 5 %. Lokal können größere Poren von bis zu 50 µm Größe zwischen großen idiomorphen Dolomitkristallen vorkommen.

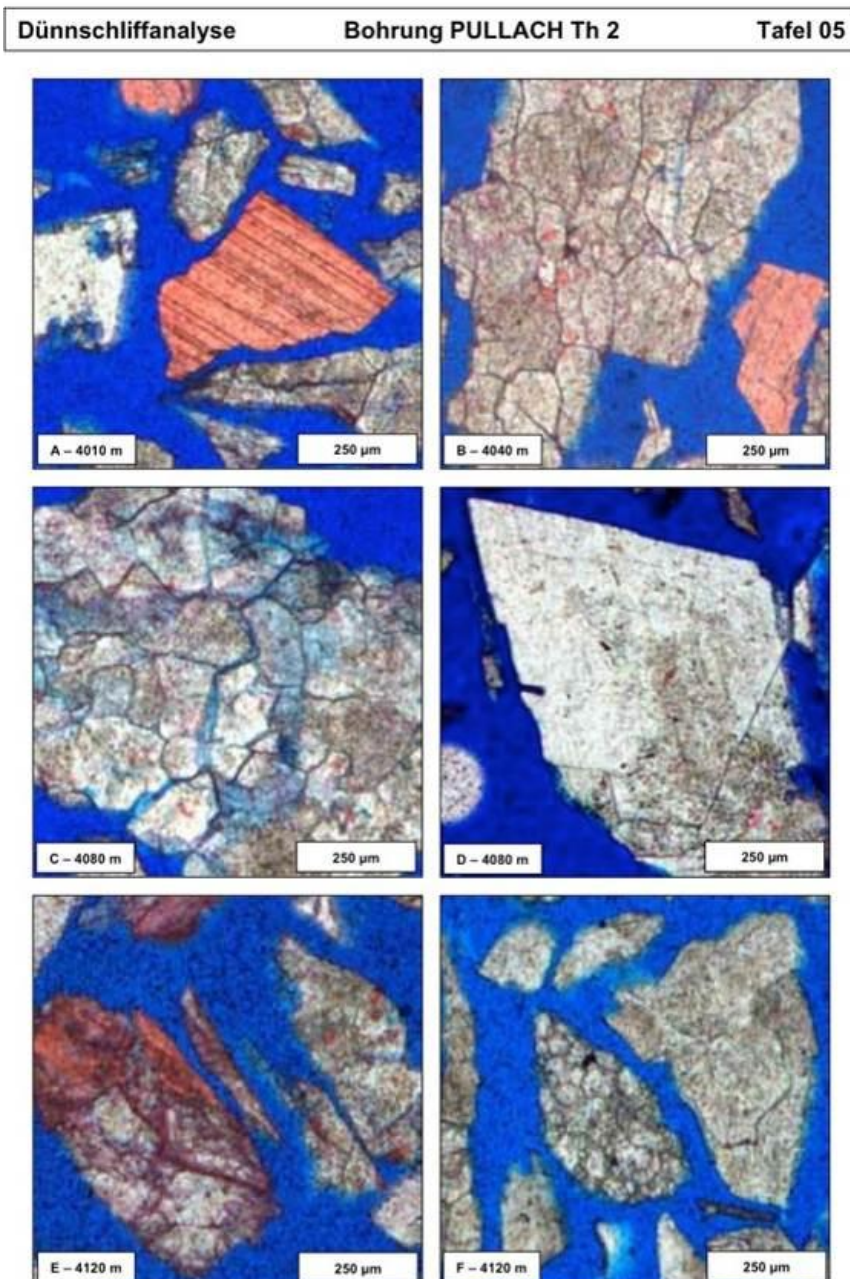


Taf. 4: **A - (Einheit VII; Oberer Malm)** Fein- bis mittelkristalline Dolomit mit sichtbare Interkristallinporosität und Kluftporen < 3 %. Grobgranulare Calcitkristalle, die an Dolomitkristallen in der Spülprobe anhaften, stammen aus zementierten Klüften; **B - (Einheit VIII; Oberer Malm)** Fein- bis mittelkristalline Dolomit von bis 500 µm Kristallgröße und bis < 5 % sichtbare Interkristallinporosität und Rissen. Große, einschlusreiche Kristalle, die einheitlich auslöschten, werden auf primäre Bruchstücke von Echinodermen zurückgeführt; grobe Calcitkristalle stammen aus zementierten Klüften; **B - (Einheit IX; Oberer Malm)** Der in den Spülproben hell-weißlich erscheinende Dolomit (Kristallgröße 20 – 500 µm) kann lokal große Interkristallinporen von bis zu 50 µm Größe aufweisen; **E und F (Einheit X; Oberer Malm)** Hier tritt ein fein- bis grobkristallinem Dolomit (420 – 700 µm), der besonders in den oberen 60 m sehr rein und daher grobkristallin ist; einschlusreiche, trübe Kerne und hellem Anwachssaum und große Intrakristallinporen (Sekundärporosität) sind häufig; sichtbare Porosität bis 5 %;

Dünnschliffanalyse Bohrung PULLACH Th 2 Tafel 04



Taf. 5: A und B - (Einheit X; Oberer Malm) Im mittleren Bereich der Einheit X wird der Dolomit feinkristalliner und weist stark verzahnte hypidiomorphe bis xenomorphe Kristalle auf; **C und D - (Einheit X; Oberer Malm)** mittel- bis grobkristalliner Dolomit ist hier von zahlreichen Rissen durchsetzt, welche die Kristalle umlaufen; lokal sind besonders große, idiomorphe Dolomitkristalle zu finden; **E und F - (Einheit X; Oberer Malm)** im untersten Teil der Einheit X ist der Dolomit wieder feiner kristallin und weist durch Calcit (rot gefärbt) verschlossene Klüfte und Interkristallinporen auf.



3 Tafelbankiger Dolomit in der Kernbohrung Moosburg SC 4

Publiziert von Böhm et al. (2011) in der Zeitschrift für geologische Wissenschaften, Nr. 39, unter dem Titel: „Tafelbankiger Dolomit in der Kernbohrung Moosburg SC 4: Ein Schlüssel zum Verständnis der Zuflussraten in Geothermiebohrungen des Malmaquifers (Östliches Molasse-Becken, Malm Delta - Epsilon; Süddeutschland)“

Zusammenfassung

Die Bohrung Moosburg SC 4 wurde 1990 auf eine Endteufe von 1585,20 m abgeteuft und Purbeck (134 m) und Malm (453 m) durchgehend gekernt. Die tafelbankigen Dolomite des Malm δ , ϵ , ζ 1 und ζ 2 (236 m Mächtigkeit) bestehen aus einer alternierenden Folge von mittel- bis grobkristallinen, mit zwischengeschalteten sehr fein- bis feinkristallinen Dolomiten. Sie stellen einen Sandwich-Aufbau (layer-cake) mit bevorzugt horizontalen Wegsamkeiten für Fluide und vertikalen Permeabilitätsbarrieren dar.

Die fazielle Entwicklung (31 Dünnschliffe) wird von der Basis des Malm bis zur Unterkreide beschrieben. Der Schwerpunkt liegt auf dem tafelbankigen Dolomit des Malm δ bis ζ 2, der im Vergleich zu Aufschlüssen in der Nördlichen und Südlichen Frankenalb diskutiert wird.

Größe und Morphologie der verschiedenen Dolomit-Typen sowie Gesamtporosität (18 Proben) und Luft-Permeabilität (Hasslerzelle; 36 Plugs) wurden ermittelt.

Die Mächtigkeiten der nutzbaren Einheiten mit wechselnden petrophysikalischen Eigenschaften betragen etwa 106 m für den Malm δ und ϵ , 37 m für den Malm ζ 1 und 61 m für den Malm ζ 2. Die ermittelten Porositäten bewegen sich zwischen $\ll 1\%$ und 17,1 %. Permeabilitäten sind durch Interkristallinporen zwischen den Dolomitkristallen bedingt (Matrixpermeabilität) und streuen von 0,03 mD bis zu 62,7 mD.

Größe, Morphologie und Verzahnung der Dolomitkristalle steuern die Permeabilität. Im Malm δ/ϵ weisen Dolomite fein-, mittel- bis grobkristalline, hypidiomorphe und idiomorphe Kristalle (bis 300 μm) und Permeabilitäten von bis zu 48,0 mD und 62,7 mD auf. In den Einheiten mit höherem Anteil an Nichtkarbonaten (Tone; höheres Gamma-Log) sind dagegen überwiegend xenomorphe bis hypidiomorphe Dolomitkristalle von bis 100 μm Größe anzutreffen und die Permeabilitäten liegen im Bereich von 0,03 mD bis 0,26 mD. Sehr poröse

Zonen (bis 17,1 %) im Malm ζ 1 bestehen aus idiomorphen Kristallen (20 - 70 μm), die ein loses Kristallgefüge bilden (6,5 mD und 46,2 mD Permeabilität).

Basierend auf den ermittelten Permeabilitäten von 0,03 mD bis 62,7 mD berechnen sich unter Reservoirbedingungen ($T = 77\text{ }^\circ\text{C}$; $c = 650\text{ mg/l}$) in der Bohrung Moosburg SC 4 „Matrixproduktivitäten“ von ca. $0,8 \cdot 10^{-5}$ bis $0,016\text{ l/(s*bar)}$ für eine 1 m lange Bohrlochstrecke im Bereich der tafelbankigen Dolomite. Bezogen auf die 236 m Mächtigkeit der dolomitischen Einheiten ergibt sich somit ein maximaler Produktivitätsindex von $3,8\text{ l/(s*bar)}$, dem eine Gesamtproduktivität der Bohrung von $5,4\text{ l/(s*bar)}$ gegenübersteht. Wesentliche Zuflüsse in einer vergleichbaren Geothermiebohrung im Malmaquifer müssten dementsprechend aus tektonisch beanspruchten, geklüfteten und verkarsteten Bereichen erfolgen.

Abstract

The Moosburg SC 4 well was drilled in 1990 and reached the final vertical depth at 1585.0 m. Purbeck (134 m) and Malm (453 m) were completely cored. The thick-bedded dolomite of the Malm δ , ϵ , ζ 1 und ζ 2 (236 m thick) is composed of an alternation of medium to coarse crystalline and intercalated very fine to fine crystalline dolomite forming a “sandwich-construction” with predominantly horizontal migration potential for fluids and vertical permeability barriers.

The facies (31 thin sections) is described from the base of the Malm to the Lowermost Cretaceous. The thick-bedded dolomites of the Malm δ to ζ 2 are compared to outcrops in the Northern and Southern Franconian Alb.

The size and morphology of the varying dolomite types as well as the total porosity (18 samples) and permeability (Hassler cell; 36 plugs) were analysed.

The thickness of the different usable units with varying petrophysical characteristics is about 106 m (Malm $\delta - \epsilon$), 37 m (Malm ζ 1), and 61 m (Malm ζ 2). Porosities vary between $\ll 1\%$ and 17.1 %. Permeability is created by intercrystalline pores between dolomite crystals (matrix permeability) and varies between 0.03 – 62.7 mD.

The size, morphology and interlocking of dolomite crystals actually determine the permeability. Fine, medium to coarse crystalline hypidiomorphic to idiomorphic dolomite of the Malm δ/ϵ exhibit permeabilities of up to 48.0 mD and 62.7 mD. Units with higher amounts of non-carbonate (clay; higher gamma log) are predominantly composed of

xenomorphic to hypidiomorphic dolomite crystals < 100 µm in size and reveal permeabilities between 0.03 – 0.26 mD.

Very porous zones (up to 17.1. %) in the Malm ζ 1 consist of idiomorphic crystals (20 – 70 µm) forming a loose, open crystal texture (permeability 6.5 mD and 46.2 mD).

Under reservoir conditions (T= 77 °C; TDS= 650 mg/l) a matrix productivity of $0,8 \cdot 10^{-5} - 0.016 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{bar})$ is calculated for a 1 m thick interval in the well-bedded dolomite zone of the Moosburg SC 4 well, based on analysed permeabilities (0.03 – 62.7 mD). A maximum matrix productivity index of $3.8 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{bar})$ can be calculated for the entire 236 m thick dolomitic unit. The productivity index of $5.4 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{bar})$ obtained from pumping test analysis in the well Moosburg SC 4 shows the significant influence of tectonic fractured and karstified zones on the flow rate of an geothermal well in the Malm aquifer.

Einleitung

Der Malm als tiefes karbonatisches Grundwassersystem stellt ein komplexes Zusammenspiel von Karst-, Poren- und Kluftgrundwasserleiter dar. Zunächst galten in der geothermischen Erschließung Störungen als dominierende hydraulische Elemente. Dies gilt grundsätzlich immer noch für die Anbindung eines Reservoirs an eine Geothermiebohrung. Mit zunehmender Kenntnis der Geologie und Sedimentologie des Malm stellt sich jedoch heraus, dass die Charakterisierung der Grundwasserdynamik anhand eines umfassenderen Reservoirmodells erfolgen sollte, das eine Kombination von Lithofazies und Strukturgeologie als wesentliche geologische und hydrodynamische Komponenten integriert.

Auf Basis eines vom BMU geförderten Forschungsverbundvorhabens (FKZ: 0327671A/B) wird derzeit eine umfassende geologische und hydrogeologische Studie zur Grundwasserdynamik des Malm in Hinblick auf die geothermische Nutzung erarbeitet. Projektpartner in dem Verbundprojekt „Wissenschaftliche und technische Grundlagen zur strukturgeologischen und hydrogeologischen Charakterisierung tiefer geothermisch genutzter Grundwasserleiter am Beispiel des süddeutschen Molassebeckens“ sind der Arbeitsbereich Hydrogeologie der FU Berlin und die Firma Erdwerk GmbH als Industriepartner sowie das Institut für Wasserchemie der TU München im Unterauftrag der FU-Berlin (Schneider et al., 2009). Die Arbeitsgruppe „Angewandte Faziesforschung“ vom Institut für Paläontologie am GeoZentrum Nordbayern wurde in einem frühen Projektstadium im Themenschwerpunkt Lithologie, Fazies und Porositätsentwicklung (Diagenese) mit eingebunden.

Die Malmtiefbohrung Moosburg SC 4 stellt für das Verständnis des geothermischen Reservoirs insofern eine sehr wichtige Rolle dar, da sie vom Purbeck als Oberkante des potentiellen Thermalwasserreservoirs bis in den oberen Dogger hinein durchgehend als Kernbohrung vorliegt. Sämtliche Geothermiebohrungen im Großraum München wurden dagegen nur im Spülbohrverfahren niedergebracht, so dass zur Beurteilung der Lithofazies lediglich Bohrklein in Sand- bis maximal Feinkiesfraktion zur Verfügung steht. Aus der Bohrung Moosburg SC 4 können dagegen durch das Vorliegen von Kernmaterial wichtige Informationen zum Zusammenhang zwischen Lithofazies und Durchlässigkeit abgeleitet werden. Diese Ergebnisse sind durch Einordnung der Bohrung Moosburg SC 4 in einen regionalgeologischen Faziesrahmen zum Teil auf andere Malm-Geothermiebohrungen im süddeutschen Molassebecken übertragbar.

Aufgrund der immer noch relativ geringen Bohrungsdichte, den sehr selten vorhandenen Informationen aus Kernmaterial sowie nur vereinzelt und kleinräumig vorhandener 3D-seismischer Daten, stellen zudem Analogiestudien im Aufschluss einen zentralen Bestandteil der Reservoircharakterisierung des Malmtiefengrundwasserleiters dar. Es gilt dabei die vorhandenen Erkenntnisse zur Entstehung, Verbreitung und Differenzierung der Fazies des Malm in Süddeutschland, die größtenteils auf Studien aus obertägigen Aufschlüssen der fränkischen und schwäbischen Alb beruhen, auf den Malm im tiefen Untergrund des süddeutschen Molassebeckens zu übertragen.

Die fazielle und diagenetische Entwicklung des süddeutschen Oberen Jura (Malm) im Untergrund des Molasse-Beckens ist dabei von besonderer Bedeutung für die geothermische Exploration, da die besten Zuflussraten zu bisher nicht bekannten Anteilen sowohl aus dem dolomitischen Malm selbst (Typ Frankendolomit; Matrixproduktivität) als auch aus Klüften in Dolomit und Kalk kommen (Wolfgramm et al., 2009; Böhm et al.; 2010, Koch et al., 2010).

Die Fazies des Malm wird traditionell in „Massenkalke“ und „Bankkalke“ gegliedert (z. B. Wagenplast, 1972; Gwinner, 1976; Meyer, 1972, 1977; Meyer & Schmidt-Kaler, 1984, 1992; Selg & Wagenplast 1990). Die Massenkalken wurden herkömmlicherweise als „Schwamm-Algen-Riffe“ interpretiert, zwischen denen die gebankte Fazies abgelagert wurde. Den Massenkalken, welche häufig dolomitisiert und recalcitisiert (Liedmann & Koch, 1990; Liedmann, 1992; Reinhold & Schroeder, 1994; Reinhold, 1996) sowie geklüftet und

verkarstet sind, wurde als potentielle Speichergesteine für Erdöl und Erdgas bereits besondere Aufmerksamkeit geschenkt (Bachmann et al., 1987; Pasternak et al., 1997).

Koch et al. (2010) dokumentieren am Beispiel der Bohrungen Scherstetten 1 und 2 die Verhältnisse im Malm des Molasse-Untergrundes südlich von Augsburg sowie die Erforschungsgeschichte. Anhand der Korrelation der beiden Bohrungen wird auch nachgewiesen, wie sich laterale Faziesänderungen in den Massenkalken des Malm auf eine Entfernung von nur 1,5 km auswirken können. Auch die derzeit noch nicht abgeschlossenen Untersuchungen zur Fazies von Geothermiebohrungen im Großraum München im Rahmen des o.g. Forschungsverbundvorhabens bestätigen die oft kleinräumigen Faziesveränderungen. Diese Änderungen auf kurzer Distanz haben auch großen Einfluss auf die regionale und volumetrische Ausbildung von Speichergesteinen für geothermische Wässer und damit die Explorationsstrategie bei Geothermiebohrungen zur Minimierung des Fündigkeitsrisikos. In der geothermalen Erschließung im süddeutschen Molasse-Becken wurde deshalb erstmals im Geothermieprojekt Unterföhring eine struktureologisch und faziell orientierte Explorationsstrategie auf Basis neuer 2D-seismischer Messungen verfolgt (Böhm et al., 2007).

In der Nördlichen und Südlichen Frankenalb sowie in Bohrungen im Bereich Regensburg werden häufig so genannte dicktafelbankige Kalke und Dolomite des Malm δ und ϵ beschrieben (Meyer & Schmidt-Kaler, 1984, 1992). Dieser tafelbankige Dolomit wird als Übergangsfazies zwischen der ungeschichteten Massenfazies und den gebankten Kalken, die in den Wannsen zwischen der Massenfazies abgelagert wurden, angesehen. Meyer (1977a) unterscheidet zwischen dolomitisertem Treuchtlinger Marmor, der noch sehr gute Bankung aufweist, und dolomitierten tafelbankigen Schwammkalken, die nur undeutlich sehr dick gebankt sind und Kieselknollen sowie sekundär verkieselte Schwämme aufweisen.

Derartige tafelbankige Schwamm-Dolomite sind in der Bohrung Moosburg SC 4 im Malm δ , ϵ , ζ 1 und ζ 2 mit einer Mächtigkeit von etwa 236 m (1226 – 1462 m) durchgehend erschlossen. Meyer (1994) beschreibt eine Wechselfolge (vom Liegenden zum Hangenden) von löchrigem Dolomit mit Hornsteinen (Malm δ und ϵ), zu Plattendolomit, feingebanktem Dolomit, massigem Dolomit und gebanktem Dolomit (Malm ζ 1) hin zu dünnen, dolomitischen Kalken, Dolomit mit wenigen Fugen und dolomitischen Kalken (Malm ζ 2).

Diese alternierende Abfolge mit ihrer ausgeprägten horizontalen Orientierung der sedimentären Schichtungsmerkmale lässt eine Anisotropie in der räumlichen Ausbildung der

gesteinsphysikalischen Eigenschaften (Porosität, Permeabilität) erwarten, dies mit z.B. geringer vertikaler und deutlich größerer horizontaler Permeabilität. Im Vergleich zur dolomitischen Massenfazies werden daher andere spezifische Eigenschaften für die Fließraten geothermischer Wässer in dem hier angetroffenen tafelbankigen Dolomit angenommen (vgl. Wolfgramm et al., 2009; Böhm et al., 2010; Koch et al., 2010). Hydrogeologisch ist daher ein sog. „Layer-Cake“-Modell, mit schichtgebundenen Zuflüssen unterschiedlicher Höhe zu erwarten.

Schwammrasenbänke im Malm der Südlichen und Nördlichen Frankenalb

Nach Meyer & Schmidt-Kaler (1984) bilden Schwämme nicht nur kuppelförmige Riffbauten (Biohermfazies), die den Meeresboden um mehr als 50 m überragen sondern sie siedeln auch in so genannten eher ebenflächigen Schwammrasenbänken zwischen den Riffbauten. Diese Biostrom- oder Schwammrasen-Fazies vermittelt somit zwischen der Schicht- und Riff-Fazies (Abb. 9 und Abb. 10). Der biogene Anteil ist in ihr geringer als in den Riffen, insbesondere fehlt ein durchgehendes Riffgerüst; Schwämme und Algenkrusten sind locker verteilt. Nimmt die Schwammbesiedlung flächenhaft zu, so bilden sich im höheren Malm δ und ϵ undeutlich-dickbankige, aber ebenflächige tafelbankige Kalke und Dolomite. Trotz neuer Interpretationen der Faziesverhältnisse (Koch et al., 1994, 2010) wird nachfolgend die Benennung der Faziestypen gemäß Meyer & Schmidt-Kaler (1984) beibehalten, um den Bezug zur umfangreichen Literatur leichter zu ermöglichen (Meyer, 1972, 1975, 1977a, 1977b, 1981; Meyer & Schmidt-Kaler, 1984, 1987, 1989, 1990, 1992; Schmidt-Kaler, 1985; Streit & Meyer, 1985).

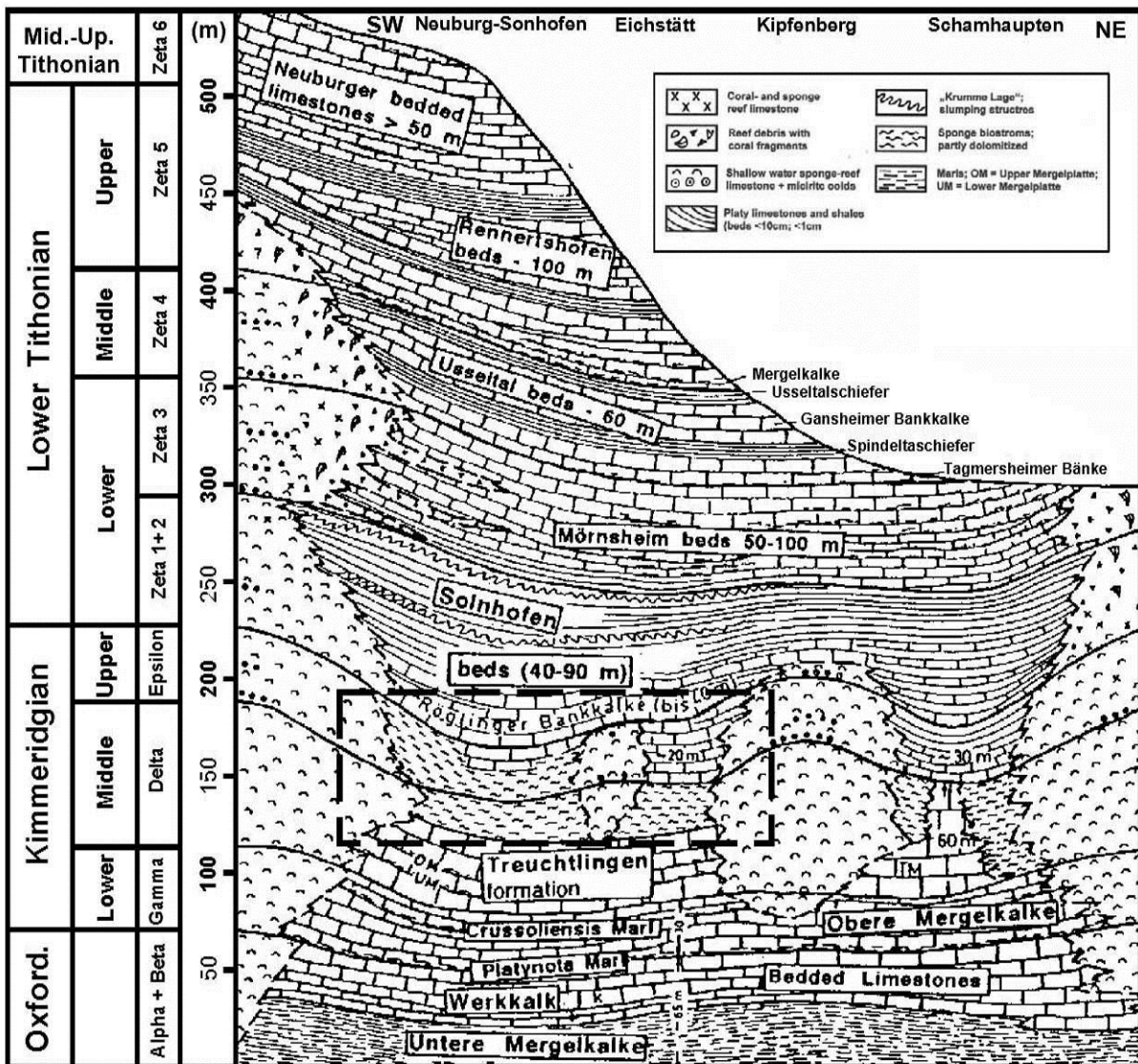


Abb. 9: Fazieschema und Gliederung des Malm der Südlichen Frankenalb (verändert nach Meyer & Schmidt-Kaler, 1984). Der Bereich des Übergangs von der Massenfazies zu dazwischen befindlichem Biostromkalk/-dolomit (Schwammrasen) und Bankkalk ist im Rechteck markiert.

Neben den Schwämmen mit nur dünnen mikrobiellen Krusten kommen vor allem Brachiopoden, Echinodermen, Bryozoen und Serpeln vor. Unter dem Mikroskop erkennt man, dass die Schwammrasen in ausgedehnten Kleinpartikelkalken aus Pellets, Onkoiden, Intraklasten und Ooiden angesiedelt sind. Dazu kommen noch die schon im Treuchtlinger Marmor häufigen Tubiphyten und weitere sessile Foraminiferen. Zahlreiche in Horizonten angeordnete Kieselknollen und sekundär verkieselte Schwämme (Meyer & Schmidt-Kaler, 1984) sind für die tafelbankige Biostrom-Fazies charakteristisch.

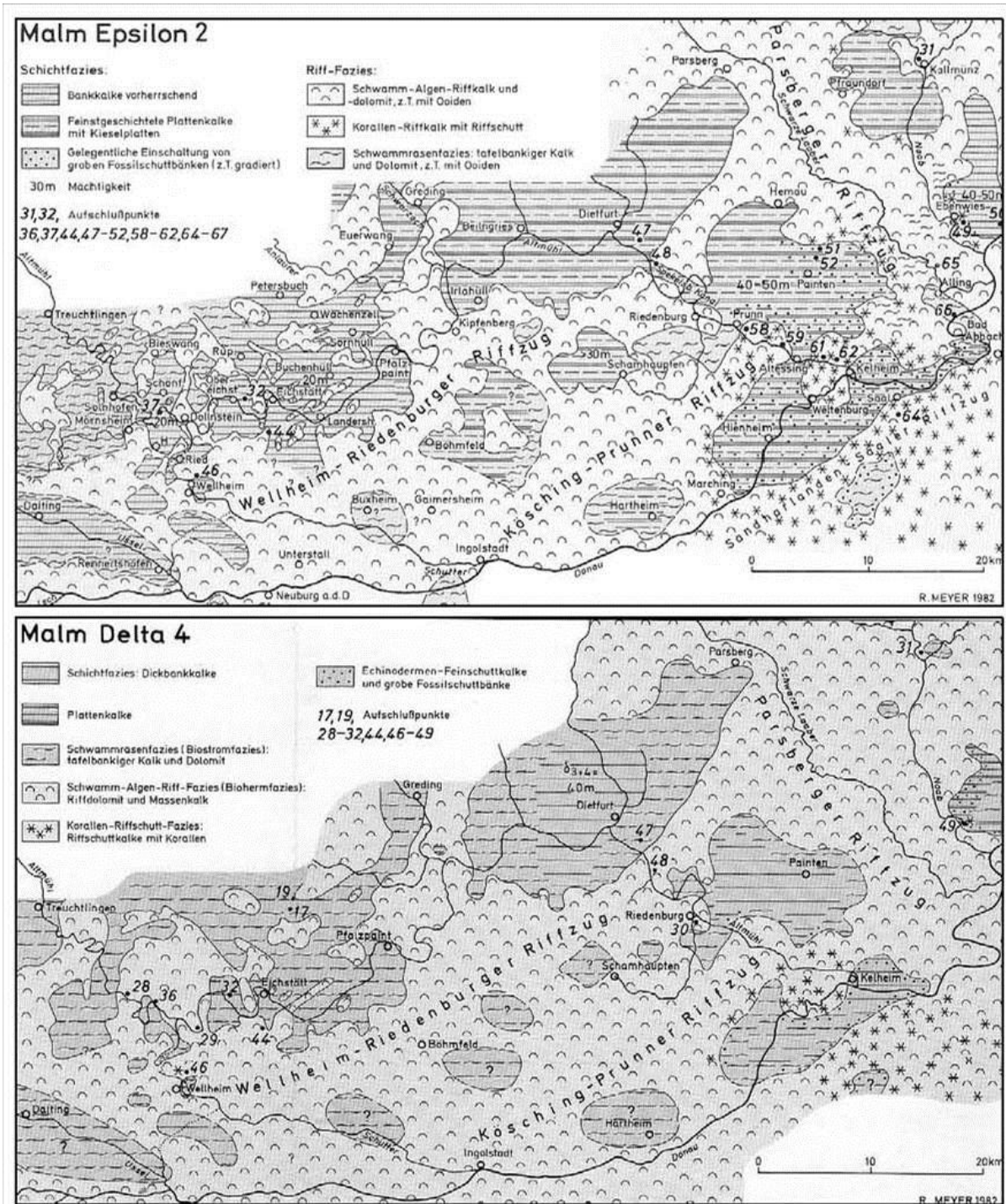


Abb. 10: Faziesverteilung im Malm δ 4 und ϵ 2 in der Südlichen Frankenalb nach Meyer & Schmidt-Kaler (1984).

Der große Dolomitsteinbruch östlich vom Bahnhof Eichstätt (Abb. 11) zeigt den Übergang vom massigen Riffdolomit in die gebankte Schwammrasenfazies deutlich. Die fast 100 m hohen Wände des Dolomitsteinbruches erschließen nach Meyer & Schmidt-Kaler (1984) den Malm δ bis Malm ζ 1. Im Malm δ ist ein wenig gegliedertes, weit gespanntes Riffgewölbe

entwickelt, das aus mittel- bis grobkörnigem, massigem Dolomit mit nur wenigen Schichtfugen besteht. Im Osten am Brucheingang schließt die Schwammrasenfazies mit sehr dicken, dunkelgrau gefleckten, Hornstein-führenden Dolomitbänken an. Sie fallen mit $5 - 7^\circ$ nach Osten vom Riff weg ein, das sich im Bereich der δ/ε -Grenze in seinem Top ca. 30 m über diese Schwammrasendolomitbänke erhebt.

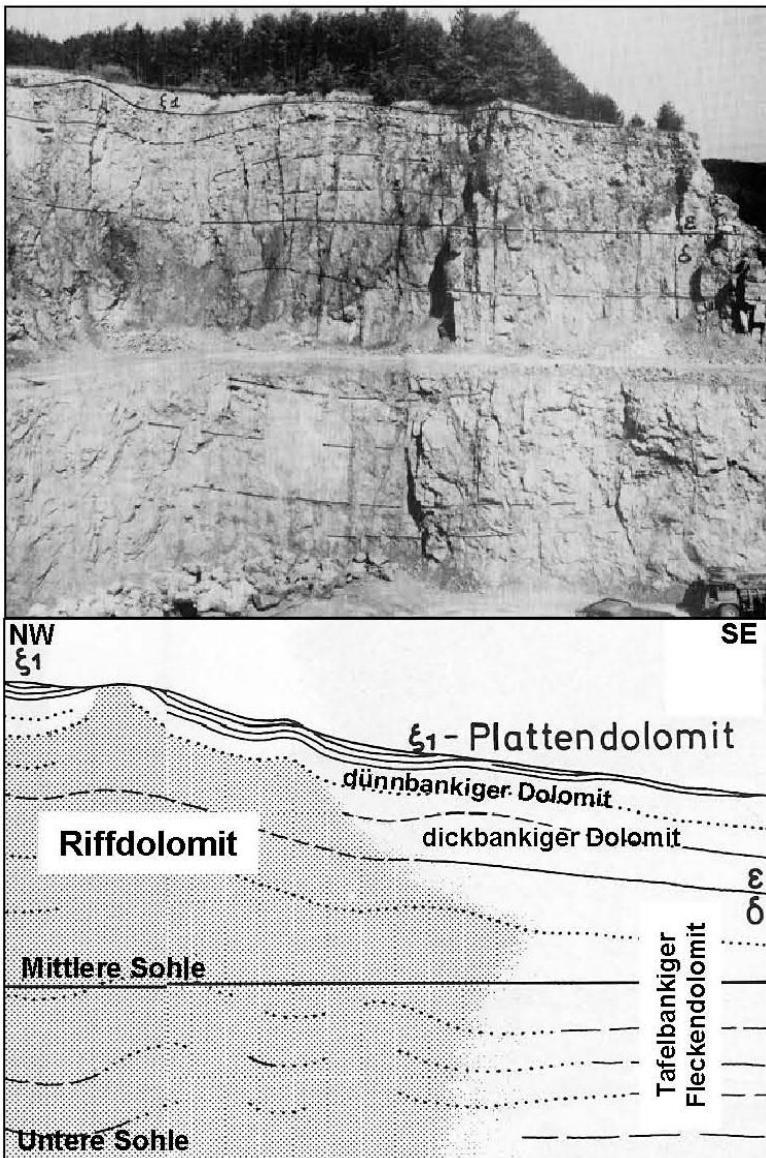


Abb. 11: Ostteil des großen Dolomitbruchs östlich vom Bahnhof Eichstätt. Im östlichen Bereich ist der Übergang vom massigen Riffdolomit in die östlich anschließende Schwammrasenfazies aufgeschlossen (verändert nach Meyer & Schmidt-Kaler, 1984; Wandhöhe ca. 80 m).

Im Malm ε konzentriert sich das Schwammwachstum auf einige Kernzonen, die nur undeutlich als Kuppeln hervortreten. Dazwischen liegen Bereiche mit dünneren, wannenartig lagernden Schwammrasen- und Dolomitbänken (Meyer & Schmidt-Kaler, 1984). Diese dunkelgefleckten Dolomite lassen noch Brachiopoden, Echinodermenreste und Tuberoide

erkennen. An der Steinbruchoberkante überdecken die Plattendolomite des Malm ζ 1 in welliger Lagerung die vom Rand her absterbenden Schwammrasen und Schwammriffe.

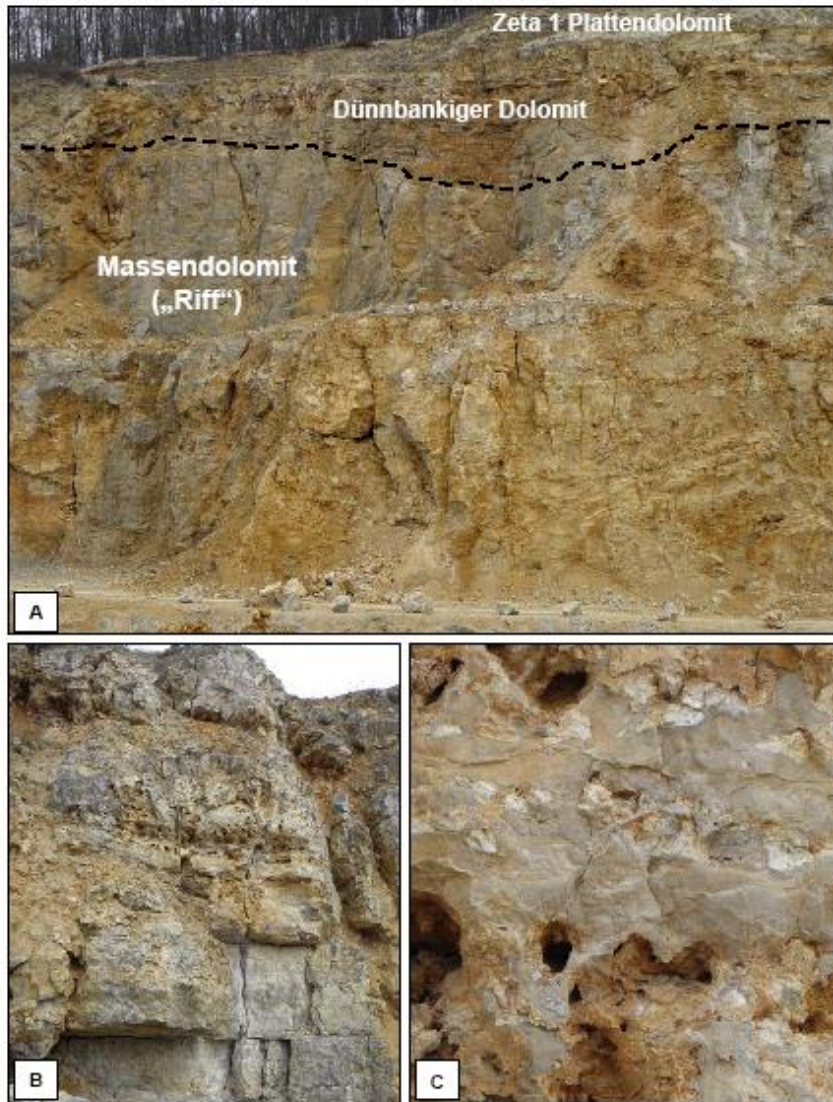


Abb. 12: Heutige Situation im großen Dolomitbruch östlich vom Bahnhof Eichstätt (Fotos R. Koch, 2010). A - Massiger Dolomit („Riff“) des Malm δ und ϵ überlagert von dünnbankigem Dolomit (Malm ϵ) und Plattendolomit des Malm ζ 1 (Wandhöhe ca. 60 m). Der östlich anschließende dickbankige Dolomit (B; Wandhöhe ca. 12 m) weist zahlreiche Kieselknollen und Löcher auf (C; Bildbreite ca. 60 cm).

Die heutigen Aufschlussverhältnisse (Abb. 12) im Dolomitbruch am Bahnhof Eichstätt zeigen nach wie vor die dolomitische Dickbankfazies sehr gut aufgeschlossen wie von Meyer & Schmidt-Kaler (1984) dokumentiert. Ferner treten die in Reihen angeordnete Kieselknollen in unterschiedlichen Verwitterungsstadien bis hin zur Bildung von großen Löchern auf, wie sie in den Kernen der Bohrung Moosburg SC 4 ebenfalls anzutreffen sind.

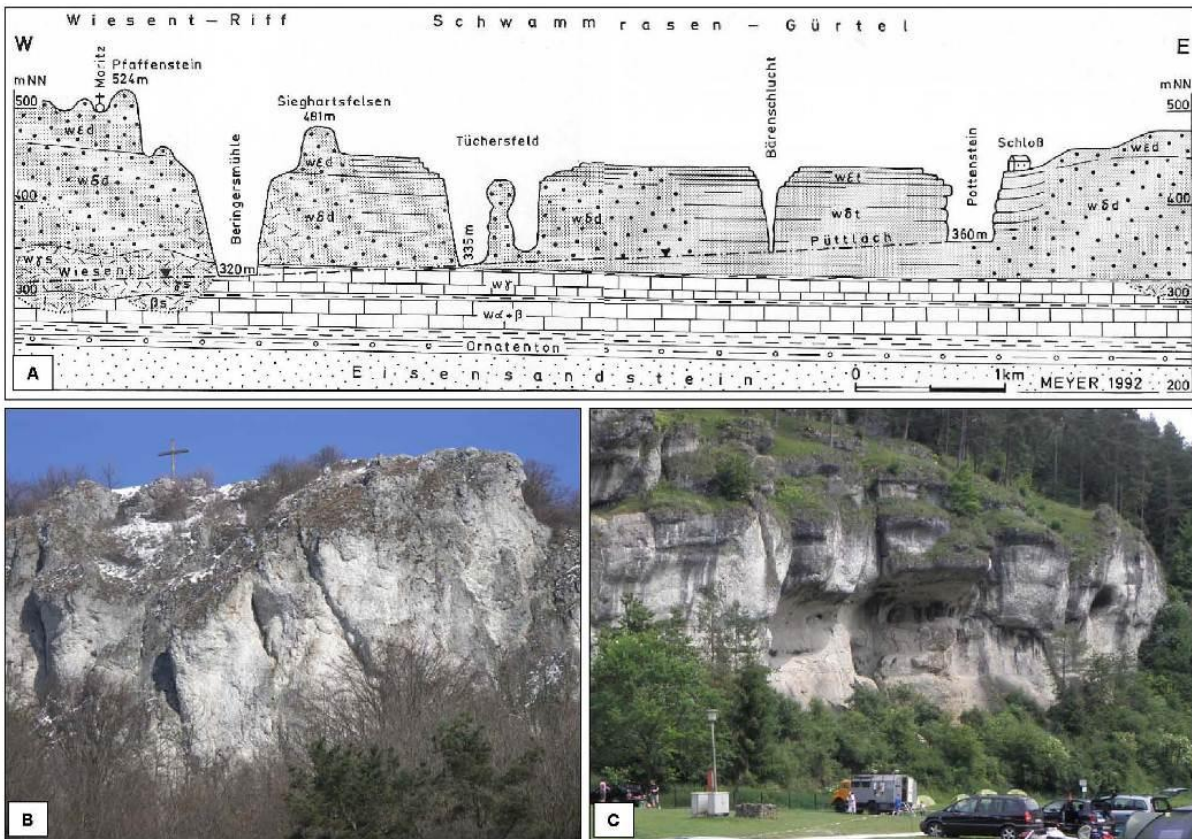


Abb. 13: A - Geologischer Schnitt entlang der Püttlach von Behringersmühle nach Pottenstein. Östlich von Behringersmühle verlässt das Püttlachtal das Wiesentriff und ist in horizontal gegliederten, dicktafelbankigen Dolomit des Malm δ eingeschnitten. Die ebene Hochfläche darüber wird von den dünnen, kieselknollenreichen Dolomitbänken des Malm ϵ gebildet. Unter dem Schloß von Pottenstein steigen die Dolomitbänke zu einem weiteren Riffgürtel nach Osten an (aus Meyer & Schmidt-Kaler, 1992). B – Beispiel eines ungeschichteten Massendolomits am Rodenstein am Walberla bei Forchheim (Wandhöhe ca. 30 m; Foto R. Koch, 2009). C – Tafelbankiger Dolomit an den Bärenschluchtwänden im Püttlachtal (Wandhöhe ca. 30 m; Foto R. Koch, 2010).

In der Nördlichen Frankenalb sind vergleichbare Aufschlußverhältnisse im Püttlachtal zwischen Behringersmühle und Pottenstein sehr gut zu studieren (Abb. 13 A und C), wie von Meyer & Schmidt-Kaler (1992) dokumentiert. Östlich von Behringersmühle verlässt das Püttlachtal das Wiesentriff und ist in horizontal gegliederten, dicktafelbankigen Dolomit des Malm δ eingeschnitten, wie besonders bei den Bärenschluchtwänden etwa 1 km westlich von Pottenstein aufgeschlossen (Abb. 13 C). Unter dem Schloß von Pottenstein kann man das Ansteigen der Dolomitbänke zu einem weiteren Riffgürtel nach Osten hin beobachten. Ein Vergleich mit massigem, ungeschichtetem Dolomit („Riffdolomit“), wie er etwa am Rodenstein, dem S-Gipfel des Walberla bei Forchheim, aufgeschlossen ist, machen den megaskopischen Unterschied deutlich, der sich letztendlich auch in mikroskopischen Merkmalen und in unterschiedlichen Fließraten von Wässern im Porensystem im

Malmtiefengrundwasserleiter widerspiegeln sollte. Dabei spielt die vertikale Trennung verschiedener Dolomiteinheiten durch Einschaltungen von Plattendolomit und/oder Ton-Mergel-Fugen eine wesentliche Rolle (vertikale Permeabilitätsbarrieren).

Die Bohrung Moosburg SC 4

Die Bohrung Moosburg SC 4, die sich zwischen München und Landshut befindet (Abb. 14), wurde im Auftrag der Südchemie AG im Jahre 1990 abgeteuft. Sie ist die erste Bohrung im süddeutschen Molasse-Becken, aus der das Purbeck (134 m) und der Malm (453 m) in einem durchgehenden Kernprofil vorliegen (Meyer, 1994). Sie ist daher für die Diskussion über Zuflussraten aus dem dolomitischen Malm, wie er in den meisten Geothermieprojekten im Großraum München anzutreffen ist, von besonderer Bedeutung.

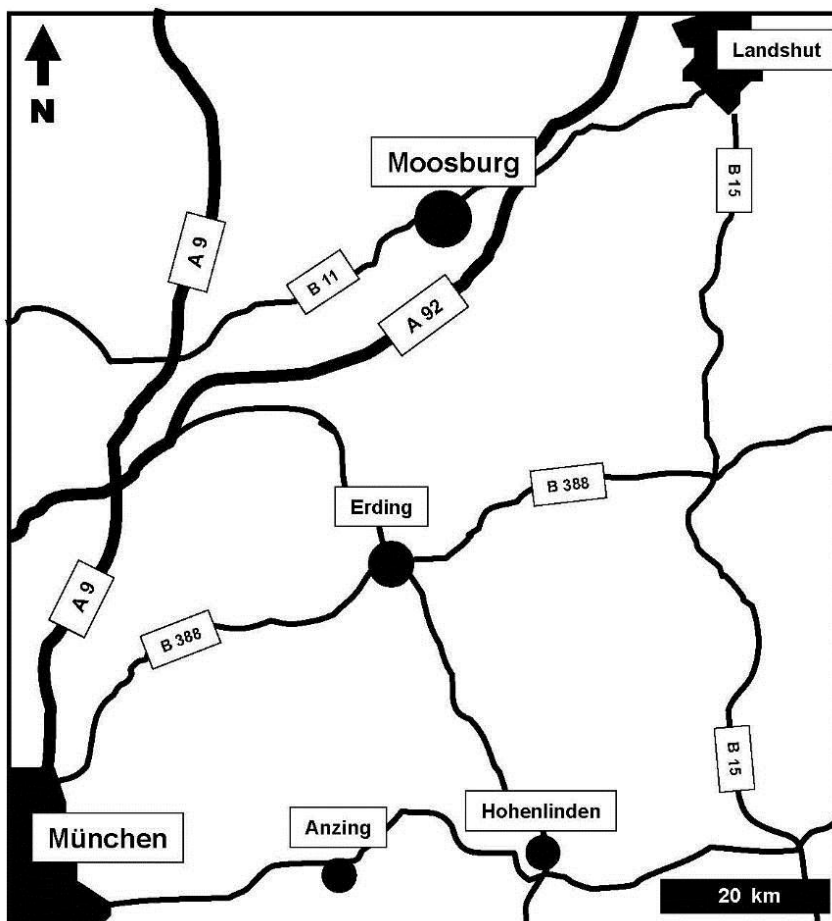


Abb.14: Die Lage von Moosburg zwischen München und Landshut sowie weitere Ortschaften, in deren Umgebung Bohrungen auf Kohlenwasserstoffe und / oder im Rahmen von Geothermieprojekten abgeteuft wurden.

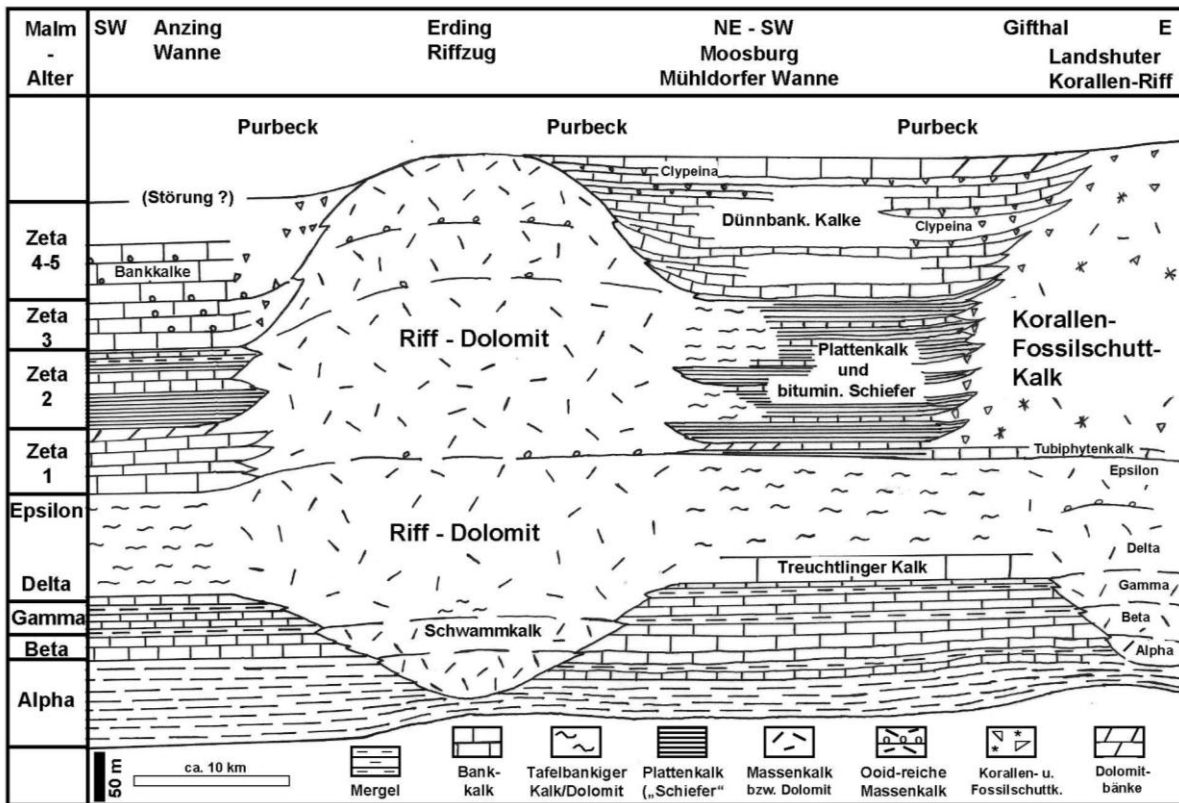


Abb. 15: Fazieschnitt durch den Malm von Anzing über Erding nach Moosburg und Gifthal mit Massenkalk-Komplexen, dazwischen befindlichen Schwammrasenbänken im Malm δ und ϵ sowie Beckenfazies im Malm ζ (verändert nach Meyer, 1994).

Im Liegenden des Gault-Sandsteins durchteuft die Bohrung nach der Gault-Transgression den gesamten Malm und erreicht die Endteufe bei 1585,20 m im Oberen Dogger (Tab. 5).

Tab. 5: Stratigraphische Untergliederung der Malm-Folge in der Bohrung Moosburg SC 4 nach Meyer (1999).

Gault-Transgression (982 m)	
1115,80 m	Purbeck (133,80 m)
1569,20 m	Malm (453,40 m)
1226,00 m	Malm ζ (Bankkalke)
1476,50 m	Malm δ - ζ : Dolomit
1502,00 m	Malm γ
1569,20 m	Malm $\alpha + \beta$
1585,20 m	Oberer Dogger bis Parkinsonien-Oolith

Die Bohrung Moosburg SC 4 liegt nach Meyer (1994) im Übergangsbereich von der Schicht- zur Massenfazies. Daher sind auch in den massigen Dolomitgesteinen des Malm ζ immer

wieder feingeschichtete, plattige Lagen eingeschaltet (Abb. 15). Die aus Schwammrasen hervorgegangenen tafelbankigen Dolomite des Malm δ und ϵ zeigen einschließlich des Schwamm-führenden Treuchtlinger Marmors an der Basis eine ausgeglichene Mächtigkeit um 100 m. Damit sind im Bereich Moosburg zwischen 1226 und 1462 Kernmeter etwa 236 m Malm in dolomitischer Ausbildung erschlossen.

Untersuchungsmaterial und Methoden

Für die ersten Untersuchungen, deren Schwerpunkt den Zusammenhang zwischen verschiedenen Ausbildungen der Dolomite und gesteinsphysikalischen Parametern (Porosität, Permeabilität) betrifft, wurden 31 Kernproben entnommen. Zusätzlich wurden 10 Proben aus den hangenden Kreidekalken und den Kalken des Unteren Malm (α , β , γ) zur vollständigen Dokumentation der lithologischen Abfolge analysiert. Detaillierte, z.T. Bank-für-Bank-Untersuchungen werden z. Zt. durchgeführt. Wie Koch et al. (2010) und Böhm et al. (2010) deutlich machen, sollte das Purbeck aufgrund der in ihm vorhandenen dolomitischen und porösen Zonen in die Betrachtung möglicher Zuflusszonen einbezogen werden. Für die geothermische Nutzung wird das Purbeck jedoch aus Gründen potentieller Bohrlochinstabilität sowie regional auftretenden hydrochemischen Problemen oft verrohrt oder durch einen ungelochten Liner abgesperrt.

Stratigraphische Fragen im Purbeck-Kreide-Bereich müssen anhand von Log-Korrelationen und einer detaillierten Mikrofaziesanalyse noch geklärt werden.

Die Proben wurden makroskopisch aus Kernmärschen (Kernstrecken) entnommen, die für die unterschiedlichen, möglichen Zuflussraten geothermischer Wässer (von dicht bis hochporös und permeabel) besondere Lithologie aufweisen. Ziel war es, das gesamte Spektrum der verschiedenen Porositätstypen, wie Interkristallinporen, Partikellösungsporen (molds), Gesteinslösungsporen (vugs), Kluftporen (fractures) und Kanalporen (channels), zu erfassen. Die Position der Proben ist in Tab. 3 unter Angabe des jeweiligen Kernmarsches und der lithologischen, makroskopischen Kernanalyse von Meyer (1994) dokumentiert.

Es wurden 31 petrographische Dünnschliffe angefertigt und mit „Porenraum-Blau“ eingefärbt, wodurch alle offenen Porenräume in den Tafeln 1 - 8 blau erscheinen. Ferner wurden die Dünnschliffe mit Alizarin-S auf Calcit angefärbt, weshalb Calcit-Areale rot

markiert sind. Die Klassifikation der Dünnschliffe erfolgt nach Dunham (1962) und die der Porosität nach Choquette & Pray (1970).

Die Kristallgröße in den verschiedenen Dolomit-Typen (Tab. 6) wird in Anlehnung an die Angaben von Folk (1962) für die authigenen Bestandteile in Kalk und Dolomit vorgenommen. Folk (1962) beschreibt, dass die Größen der Allocheme und der authigenen Bestandteile getrennt betrachtet werden müssen. Dabei wird auch diskutiert, dass die häufigste Kristallgröße für Dolomit zwischen 62 μm und 250 μm liegt und daher dieses Intervall als mittelkristallin bezeichnet wird.

Im Vergleich zur gebräuchlichen Einteilung in Korngrößenklassen wurde die 62 μm Grenze auf 63 μm verändert, was der Silt/Sand-Grenze in der Korngrößenanalyse entspricht. Ferner zeigen die hier durchgeführten Messungen und der Zusammenhang zu gesteinsphysikalischen Kenndaten, dass der Bereich 63 – 250 μm zur genaueren Analyse weiter unterteilt werden muss. Wir wählen daher die Unterteilung in < 63 μm = Sehr feinkristallin, 63 – 125 μm = feinkristallin, 125 – 250 μm = mittelkristallin und > 250 μm = grobkristallin. Die Ergebnisse sind in Tab. 6 dokumentiert.

Von 18 Proben wurde die Gesamtporosität mittels Auftriebsswägung bestimmt. Von 36 Proben wurden Plugs gebohrt (5 cm Länge, 3 cm Durchmesser) und die Permeabilität für Gas im Labor Dr. Zinkernagel (Bochum) mittels Hasslerzelle ermittelt.

Kristallgrößen, Kristallmorphologie und petrophysikalische Kennwerte

Die Angaben der Kristallgrößen in Tab. 2 sind bei der Benennung der Dolomitproben auf die Hauptbereiche des Spektrums der Kristallgrößen fokussiert. Daher können in der Spalte der reinen Messungen (Kristallgröße μm) sowohl geringere als auch größere Kristallgrößen angegeben sein. Bei der Kristallmorphologie wird in Kristallgefüge aus überwiegend xenomorphen, stark verzahnten kristallen, aus hypidiomorphen und aus idiomorphen Kristallen unterschieden. Bei idiomorphen Kristallen handelt es sich um gut ausgebildete Dolomitrhomboeder, die sowohl im gesamten, dann meist porösen Gestein als auch besonders in freie Partikel- und Gesteinslösungs-poren hinein ausgebildet sind. Dort hatten sie ausreichend Raum für die Ausbildung besonders ausgeprägter, schöner Rhomboeder-endflächen.

Tab. 6: Bezeichnung der Kristallgrößen authigener Bestandteile (Zement, Dolomit) nach Folk (1962).

Probe	Porosität (%)	Permeabilität (mD)	Kristallgröße (µm)	Kristallmorphologie			Benennung der Dolomitproben (Hauptbereiche der Kristallgröße)
				Xenomorph	Hypidiomorph	Idiomorph	
KM 47	2,1	0,43	50 - 220	X	XXX	X	Fein- bis mittelkristallin
KM 51	0,7	0,03	50 - 120	-	XX	XXXX	Feinkristallin
KM 60	0,6	0,03-0,26	20 - 100	XX	XXX	-	Sehr fein- bis feinkristallin
KM 63	17,1	6,4	20 - 70	-	X	XXXX	Sehr fein- bis feinkristallin
KM 66	0,9	-	20 - 100	X	XXX	-	Sehr fein- bis feinkristallin
KM 70	7,3	46,9	20 - 100	X	X	XXXX	Sehr fein- bis feinkristallin
KM 75	7,6	-	50 - 120	X	XX	XXX	Sehr fein- bis feinkristallin
KM 80	1,0	0,22	50 - 120	XX	XXX	X	Sehr fein- bis feinkristallin
KM 82	-	-	50 - 400	X	XXX	X	Mittel- bis grobkristallin
KM 83	1,1	0,05	20 - 100	X	XXXX	XX	Sehr fein- bis feinkristallin
KM 85	-	-	80 - 300	X	XXXX	XX	Mittel- bis grobkristallin
KM 88	5,4	62,7	50 - 300	X	XXX	XXX	Mittel- bis grobkristallin
KM 94	-	-	50 - 300	X	XXX	X	Fein- bis mittel- und grobkristallin
KM 98	7,6	0,4	100 - 300	-	XXX	XXX	Mittel- bis grobkristallin
KM 101	2,4	-	50 - 200	XX	XXXX	X	Fein- bis mittelkristallin
KM 102	1,4	-	20 - 100	XX	XXXX	X	Sehr fein- bis mittelkristallin

Petrographische Beschreibung der Bohrung Moosburg SC 4

Die makroskopische Analyse der Bohrung Moosburg SC 4 wurde von Meyer (1999) durchgeführt. Hieraus wurden ausgewählte Passagen der verschiedenen Kernmärsche (Kernstrecken) übernommen und zusammen mit den petrographischen Analysen der von uns ausgewählten Dünnschliffe dokumentiert (Abb. 8, Tab. 3). Die Beschreibungen erfolgen vom Hangenden zum Liegenden. Der für die Fragestellung bedeutende Bereich des dolomitischen Malm δ bis ζ 1 wird in dem gesonderten Kapitel 7 im Detail beschrieben und diskutiert.

Das Purbeck (982,0 – 1115,80 m) weist eine Mächtigkeit von 133,80 m auf (Abb. 16). Es besteht nach Meyer (1994) im südlichen Molassebecken aus salinaren Ablagerungen mit charakteristischen groben Oolithen, dolomitischen Laminiten und Breccien. Das Purbeck wird von der auflagernden Unterkreide diskordant gekappt und weist daher eine unterschiedliche Mächtigkeit auf (Bohrung Moosburg 133,80 m; Bohrung Ampfing 62 m; Bohrung Gifthal 128 m).

In der Bohrung Moosburg SC 4 treten an der Basis des Purbeck dichte Mikrite mit deutlichen Stylolithen auf, an die zum Teil Lösungsporen (Kanalsporen) gebunden sind (Taf. 1/A; KM 20). Das Gamma-Log weist auf deutlich hohe Tongehalte im Wechsel mit einigen „sauberen“ Ooid-Kalken und wahrscheinlich *Favreinen*-Packstones (zwischen 1040 – 1050 m), wie z.B. aus der Bohrung Pullach Th 2 von Böhm et al. (2010) beschrieben. Die Ooid-Packstones und Grainstones des Purbeck zeigen auch hier, wie in anderen Bohrungen, z.T. beträchtliche Porositäten und sollten daher in die Überlegungen hinsichtlich der Zuflussraten geothermischer Wässer durchaus einbezogen werden.

Die Kalksteine des Malm ζ 4 und 5 (1115 – 1176 m; 61 m Mächtigkeit) bestehen aus so genannten „Breisteinen“ (Meyer, 1994), bei denen es sich um partikelreiche Kalke mit großer Diversität an biogenen Komponenten handelt (Taf. 1 C – F; KM 21 und KM 26).

Mikritische und peloidale Kalke mit Mikrofossilien, wie *Bankia striata*, *Clypeina jurassica* und benthische Foraminiferen, sind häufig. Tonige Kalke weisen einige besonders Ton-reiche Horizonte auf, die im Gamma-Log durch entsprechend hohe Ausschläge charakterisiert sind (Abb. 16).

Das als Malm ζ 3 (1176 – 1226 m; 50 m Mächtigkeit) eingestufte Intervall weist dagegen reinere Kalke mit geringen Nichtkarbonanteilen auf, was sich gemäß Litholog nach Meyer (1994) in größeren Bank-Mächtigkeiten äußert.

Die ansonsten hellen Kalke zeigen an der Basis dunkle, wellige Tonfasern, was die Entwicklung von etwas tonigem Kalk zu reinem Kalk deutlich macht. Der dichte Mikrit an der Basis der Folge (Taf. 2/A und B; KM 37) enthält neben einzelnen biogenen Bruchstücken auch zahlreiche idiomorphe kleine Dolomithomboeder und markiert damit den Top der dolomitischen Abfolge in der Bohrung Moosburg SC 4 (Abb. 16, Tab. 7).

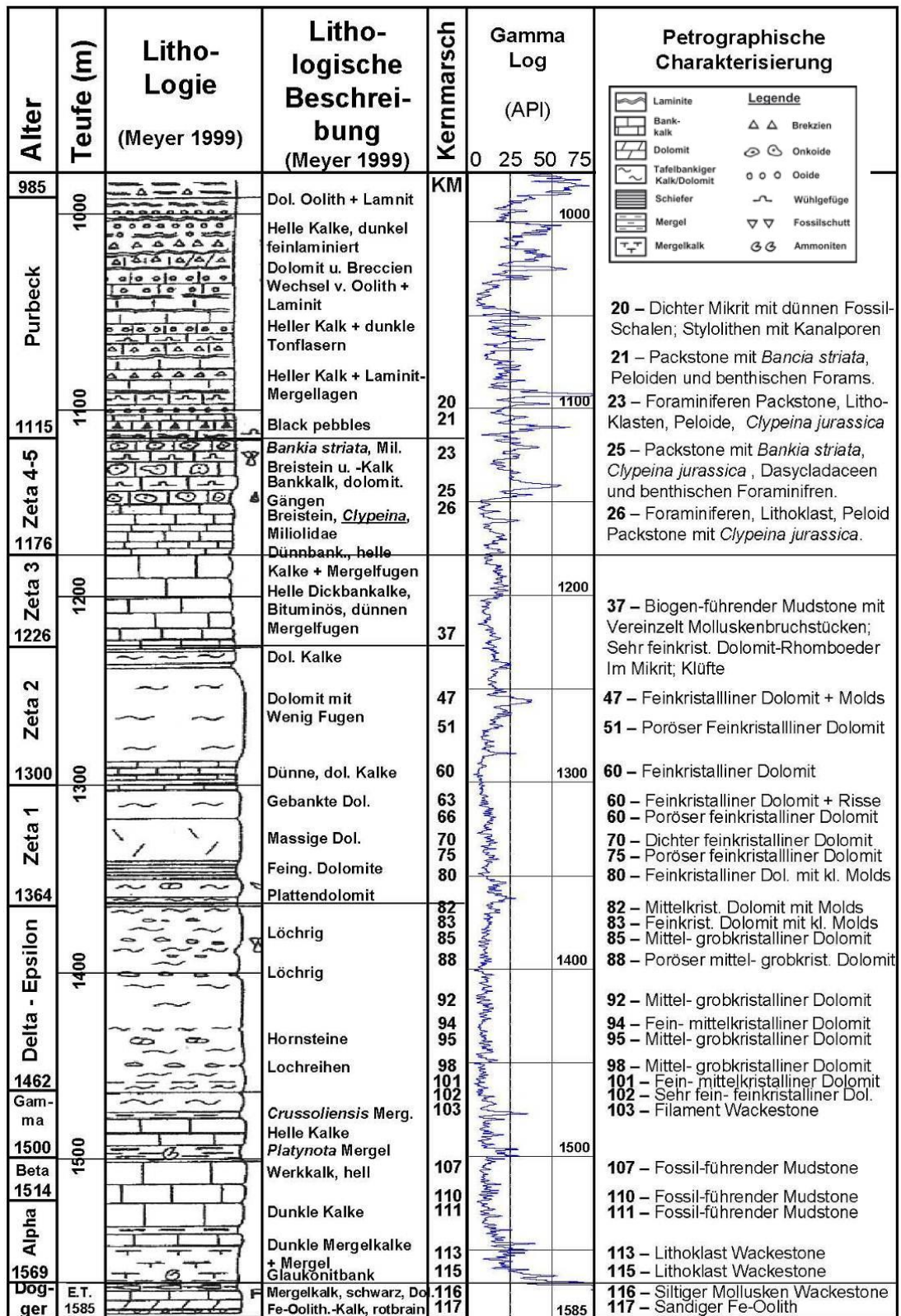


Abb. 16: Lithologische Beschreibung und stratigraphische Untergliederung der Kernstrecke Purbeck-Malmdogger in der Bohrung Moosburg SC 4 nach Meyer (1994). Ferner sind die untersuchten Proben (Kernmarsch – KM), das Gamma-Log und eine petrographische Kurzbeschreibung der Dünnschliffe aufgeführt.

Tab. 7: Beschreibung der in den Phototafeln 1 – 8 dokumentierten Kernmärsche der Bohrung Moosburg SC 4 nach Meyer (1994).

Kern- marsch Probe	Teufen- Intervall (m)	Stratigraphie (Meyer1999)	Kernmarschbeschreibung (Meyer 1994)
20	1099,40 – 1108,40	Purbeck Basis	Oolithkalk, hell, massig; heller Massenkalk; Stylolithkalk mit „black pebbles“; einzelne Feinschuttpartikel
21 – 26	1108,40 – 1116,80 bis 1147,10 – 1156,10	Malm ζ 4 - 5	Helle, weiße, massige styl. Kalke, laminiert mit wenigen dkl. Tonflasern (oben dkl. Schuttpartikel); hellgraue Wühlbauten + feine Laminite bis 1 m über Basis; darunter poröse, breisteinartige Onkoidkalke; helle Onkoide < 1 cm; lappig, konzentrisch aufgebaut; <u>Mikrofazies</u> : massenweise <i>Bankia striata</i> CAROZZI; viele Foraminiferen (<i>Textulariidae</i> , <i>Miliolidae</i> ; selten Schnecken). <i>Für weitere Beschreibungen wird auf Meyer (1994) verwiesen, da Purbeck und oberster Malm (ζ 4-5) für die vorliegende Fragestellung nicht relevant sind.</i>
37	1218,20 – 1223,60	Malm ζ 3	Helle Kalke mit dunklen, welligen, dünnen Mergelfasern im Abstand von 0,2 m > 1 m
47	1252,10 – 1255,80	Malm ζ 2	Ab hier Poren bis 1 cm im bräunlichen, harten Dolomit, z.T. etwas gröber, meist mittelkristallin; Poren mit größeren Dolomitkristallen besetzt.
48 – 60 51	1255,80 – 1290,20	Malm ζ 2	Ebensolcher, harter Dolomit, mittelkristallin, meist ohne Poren, dunkelgrau, leicht bituminös; ab 2 m unter Kopf KM 60 wieder Beginn der nun deutlich gebankten, hellen Kalke (ab 1287,60 m)
60 – 62 60	1287,60 – 1302,50	Malm ζ 2	Heller, etwas feiner kristalliner dolomitischer Bankkalk mit ebenen, z.T. fein geschichteten dunklen, etwas mergeligen Zwischenlagen im Abstand von 5-10 cm; z.T. auch 20 cm (dünn- bis mittelbankige); dunkle Lagen 1 cm bis selten 5 cm; leicht bituminös.
63	1302,50 – 1310,90	Malm ζ 1	Gebankte, feinkristalline, braune Dolomite mit dunklen, ebenen Schichtfugen.
67 – 76 70	1318,00 – 1340,00	Malm ζ 1	Dunkelgraue, feste, splitterige, massive Dolomite, mittelkristallin, nur sehr wenig Hohlräume; große Calcitdruse bei 1338 – 1339 m und bei 1333 m.
80	1348,90 – 1356,50	Malm ζ 1	Etwa ab 1352 m Einsetzen des massiven Dolomits; ab 1356 m Beginn der löchrigen Dolomit-Fazies, massig; bei 1356,50 m Hornsteinknolle: Mikrofazies: Schwamm mit dünner Kruste mit Rhaxen; Muscheln, Bryozoen.

83 - 85	1364,50 – 1381,20 m	Malm $\delta - \epsilon$	Es folgen löchrige (meist 0,5 cm bis 3 cm) feste, dunkelgraue Dolomite z.T. mit etwas Pyrit, größere Lösungshohlräume 3 m unter Kopf; bei 1367,50 m Hohlraum bis 10 cm, rund. Große Hohlräume an der Basis, z.T. etwa plattige Dolomite. Die Hohlräume sind meist geschlossen.
88 + 89	1391,60 – 1400,00	Malm $\delta - \epsilon$	Weiterhin löchrige, feste Dolomite (fleckig), die partienweise hellfleckig und etwas calcitischer (recalcitisiert) sind. Rekristallisierte, zuckerkörnige Partien sind z.T. herausgelöst worden und bilden Löcher.
94	1428,10 – 1435,60	Malm $\delta - \epsilon$	Deutlich dünnflaseriger Dolomit (1-2 cm; selten 5 cm)
98	1449,00 – 1458,00	Malm $\delta - \epsilon$	Tafelbankiger Dolomit wie oben mit dunkelgrauen horizontalen Schlieren im etwas helleren Dolomit; horizontale Lochreihen.
102	1476,50 – 1481,00	Malm γ	1476,50 – 1478,50 m, Horizont der <i>Crussoliensis</i> -Mergel. Dolomitisierte Bänke, z.T. tuberolithisch mit dünnen Mergelzwischenlagen bis 1477,74 m; bis 1477,98 m dolomit. Mergel, darunter folgen schwach tuberolithische Bankkalke, hellgrau mit deutlichen dunklen, dünnen (bis 1 cm) Mergelfasern.
107	1505,30 – 1512,00	Malm β	Helle Werkkalke (Malm beta) von 1502 – 1514,50 m in Bänken von 10 bis 60 cm mit dünnen schwarzen Fugen.

Der Malm $\zeta 2$ (1226 – 1300 m; 74 m Mächtigkeit; Abb. 16) besteht am Top und an der Basis aus dünn gebankten dolomitischen Kalken (Meyer, 1994). Sie schließen ein mehr massiges Dolomitpaket mit nur wenigen Bankfugen ein, in dem allerdings auch dichter, feinkristalliner Dolomit eingeschaltet ist. Der hier auftretende, bräunliche, harte Dolomit ist besonders im mittleren Paket von etwa 50 m Mächtigkeit auch etwas gröber, meist mittelkristallin und zeigt größere Hohlräume, die randlich mit größeren Dolomitkristallen besetzt sind (Taf. 2/C und D; KM 47). Legt man die Grenzen nach der lithologischen Ausbildung des Dolomits, erstreckt sich dieses mittlere Intervall von 1226 – 1287 m und weist somit 61 m Mächtigkeit auf (Abb. 17). Die Grenze zum liegenden dünnen, dolomitischen Kalk (Meyer, 1994), bei dem es sich nach der Dünnschliffanalyse um einen dichten, sehr feinkristallinen Dolomit handelt (Taf. 3/A und B; KM 60), befindet sich demnach bei 1287 m, noch 13 m über der eigentlichen Grenze zum Malm $\zeta 1$.

Der deutlich gebankte, harte und feinkristalline Dolomit, welcher die mittlere Einheit einschließt, weist dagegen kaum größere sichtbare Porenräume auf (Taf. 2/E und F; KM 51

und Taf. 3/A und B; KM 60) und lässt feine Tonfasern erkennen, was einen höheren primären Tongehalt und den Ausschlag im Gamma-Log unterstreicht.

Im Malm ζ 1 (1300 – 1364 m; 64 m Mächtigkeit) ist ein weiteres massiges Dolomitpaket anzutreffen, das im Hangenden und Liegenden von dünn gebanktem und plattigem Dolomit umrahmt ist (Abb. 16 und Abb. 17; Tab. 6 und Tab. 7). Der dort gebankte, feinkristalline, braune Dolomit weist dunkle, ebene Schichtfugen auf.

Der im mittleren Bereich vorkommende dunkelgraue, feste, splitterige, massive Dolomit (Mächtigkeit ca. 40 m) ist sehr fein- bis feinkristallin und lässt nur sehr wenige größere Hohlräume erkennen (Taf. 3/ E und F; KM 66).

Lagenweise sind allerdings hochporöse sehr fein- bis feinkristalline Dolomite eingeschaltet (Taf. 2/C und D; KM 63 und Tafel 3/A und B; KM 70), in denen extrem offene Interkristallporen zu finden sind. Dies kann wahrscheinlich auf die Auslösung von restlichen, calzitischen Bereichen zurückgeführt werden, in denen die ehemals frei im Kalzit schwimmenden Dolomithomboeder zurückgeblieben sind. Ausgangsgestein dürfte ein mit idiomorphen Rhomboedern nur unvollständig dolomitierter Kalk gewesen sein. Der meiste hier auftretende Dolomit ist sehr fein- bis feinkristallin und weist deutlich sichtbare Interkristallporen (Taf. 4/C und D; KM 75) oder ein dicht verzahntes Kristallgefüge auf (Taf. 4/E und F; KM 80).

Legt man die Grenzen für dieses mittlere, massige Dolomitpaket nach lithologischen und petrophysikalischen Parametern fest, so ergibt sich eine Mächtigkeit von 37 m und das massige Dolomitpaket reicht von 1303 – 1340 m (Abb. 17). Die liegende Grenze der überwiegend feinkristallinen Einheit des feingebankten Dolomits und Plattendolomits (nach Meyer, 1994) befindet sich unverändert bei 1364 m, was der Grenze zum Malm ϵ entspricht.

Der Malm δ - ϵ wird nach Meyer (1994) von 1364 m bis 1462 m (Mächtigkeit = 98 m) angetroffen. Die Abfolge kann in einen oberen Bereich, der in etwa dem Malm ϵ und einen unteren Bereich, der dem Malm δ entspricht, untergliedert werden. Zum Hangenden wird der Malm ϵ von dem basalen Plattendolomit des Malm ζ 1 begrenzt. Die Grenze zum liegenden Malm δ kann etwa in der Mitte des Schichtpaketes bei ca. 1430 m gezogen werden. Sie trennt dann den liegenden, überwiegend mittel- bis grobkristallinen Dolomit mit Hornstein und

Lochreihen von dem hangenden, löchrigen sehr fein- bis feinkristallinen Dolomit. Auch tritt im oberen Bereich noch vermehrt plattiger Dolomit auf.

Der obere Dolomit (Malm ϵ) ist mittel- bis grobkristallin (Taf. 5/A und B; KM 82) und lässt einige noch offene Gesteinslösungsporen (Vugs) erkennen, die bis zu 10 cm groß sein können. Dieses Paket wird an der Basis durch etwas plattigen Dolomit begrenzt, der durchwegs feinkristallin ist (Taf. 5/C und D; KM 83).

Der weiterhin löchrige, feste, fleckige Dolomit, der partienweise hellfleckig erscheint (Meyer 1994), ist mittel- bis grobkristallin und zeigt sowohl Kanalporen (Channel-Porosity; Taf. 5/E und F; KM 85) entlang von Stylolithen als auch weite, offene Interkristallinporen (Taf. 6 A und B; KM 88).

Ein deutlich dünnflaseriger, fein- bis mittelkristalliner Dolomit (Taf. 6/C und D; KM 94) besteht aus intensiv verwachsenen Kristallen und zeigt nur wenige noch offene Partikel- und/oder Gesteinslösungsporen, deren Wände mit idiomorphen Enden von Dolomitkristallen bedeckt sind.

Mittel- bis grobkristalliner Dolomit (Taf. 6/E und F; KM 98; Taf. 7/A und B; KM 101) im unteren Teil der Schichtfolge entspricht dem basalen Teil des Malm δ . Dieser wird von Meyer (1994) als tafelbankiger Dolomit mit dunkelgrauen horizontalen Schlieren im etwas helleren Dolomit mit horizontalen Lochreihen beschrieben.

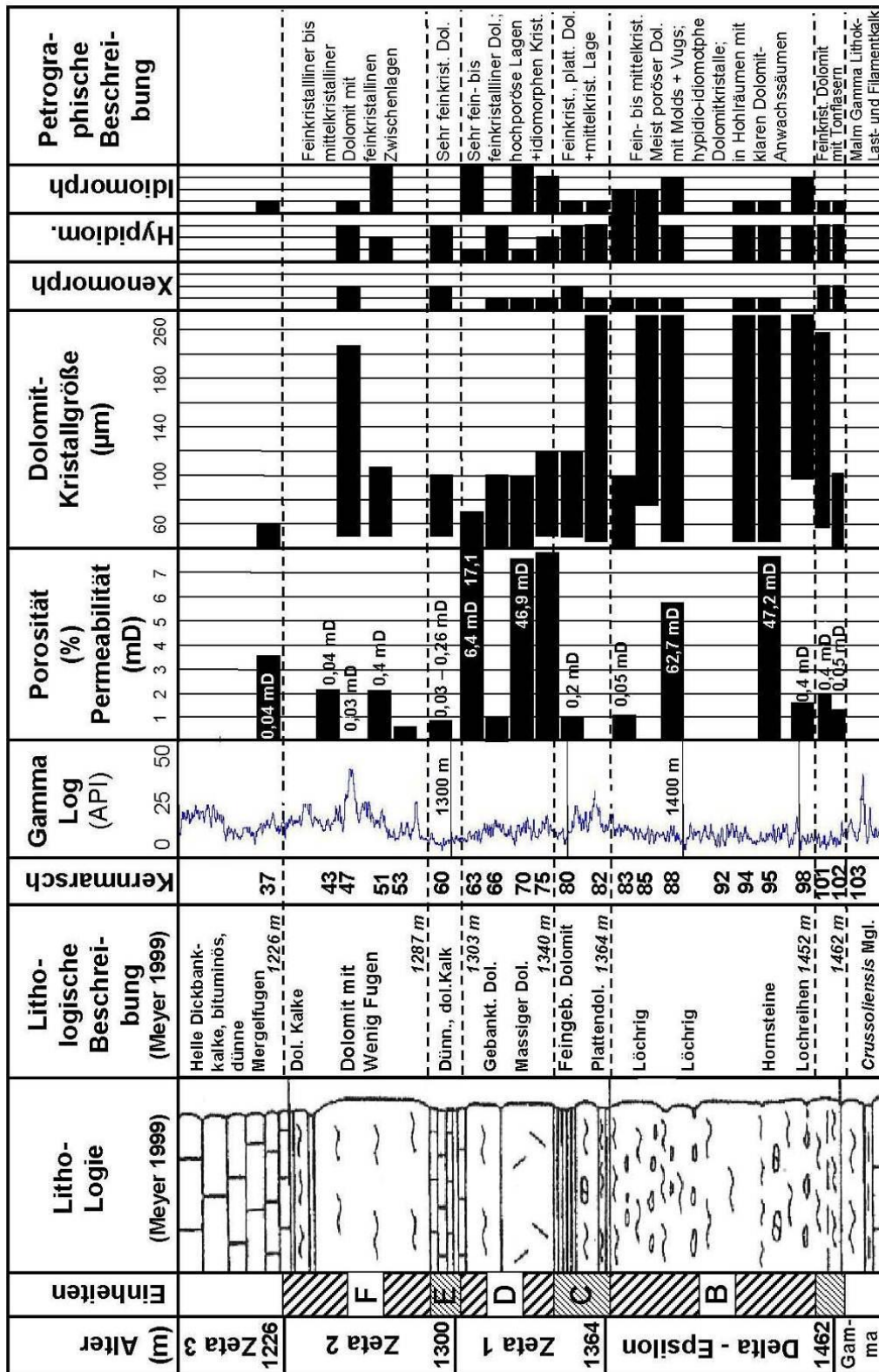


Abb. 17: Die tafelbankige Dolomitfazies des Malm δ bis Malm ζ 2 stellt die hydrogeologisch bedeutende Schichtfolge in der Bohrung Moosburg SC 4 dar. Lithologie und Beschreibung nach Meyer (1994), dargestellt sind ferner Position der Proben verschiedener Kernmärsche, Gamma-Log, gesteinsphysikalische Kenndaten ausgewählter Proben, Morphologie und Größe der Dolomitkristalle, petrographische Beschreibung sowie lithologische Intervalle A – F und Grenzen.

Der an der Basis auftretende, mit Tonschlieren durchsetzte feinkristalline Dolomit (Abb. 16) lässt nur noch kleine Lösungsporen erkennen, die fast vollständig mit idiomorph weiter gewachsenem Dolomit verschlossen sind (Taf. 7/C und D; KM 102). Sie werden auf vereinzelt in einem tonigen, dichten Mikrit schwimmende biogene Komponenten zurückgeführt, die im Verlauf der Diagenese gelöst wurden und offene Molds hinterlassen haben.

Die Schichtfolge des Malm δ und ε entspricht in der Gesamtheit den aus Aufschlüssen der Südlichen und Nördlichen Frankenalb beschriebenen Beispielen (Abb. 11, Abb. 12 und Abb. 13). Dies trifft auch auf die gesamte Mächtigkeit zu, die im Dolomitbruch am Bahnhof Eichstätt von Meyer & Schmidt-Kaler (1984) mit etwa 100 m (einschließlich etwas Malm ζ 1 im Hangenden) und in der Bohrung Moosburg SC 4 von Meyer (1994) mit 98 m angegeben wird.

Der Malm γ wird von Meyer (1994) mit einer Mächtigkeit von 38 m angegeben (1462 – 1500 m). In der Probe KM 103 schwimmen dünne Schalenbruchstücke (Filament-Kalk) neben anderen Bruchstücken von Mikrofossilien in dichtem Mikrit. Dieser Faziestyp tritt in mehreren Bohrungen (z.B. Altensteig 1, Pomoni et al. 1989; Schersteten 1 und 2, Koch et al. 2010) im obersten Malm γ bis in den Basisbereich des Malm δ auf und kann daher als lithostratigraphisch leitend angesehen werden. Der Malm γ wird gut durch die beiden stratigraphischen Zonen der *Platynota*- und der *Crussoliensis*-Mergel charakterisiert, die als deutliche Tonbereiche im Gamma-Log zu erkennen sind (Abb. 16).

Der Malm β wird von 1500 – 1514 m angezeigt (Mächtigkeit 14 m). Er tritt als heller Werkkalk in Bänken von 10 bis 60 cm mit dünnen schwarzen Fugen auf. In dem dichten Mudstone, schwimmen nur vereinzelt feine Fossilreste. Gelegentlich treten feine Tonflasern und Stylolithen auf, entlang derer auch wenige Kanalporen durch Lösung ausgebildet sein können (Taf. 7/E und F; KM 107). Dichte, fossilführende Mudstones bis Wackestones mit dünnen Tonflasern enthalten Calcisphären, Schwammnadeln und kleine Fossilbruchstücke (Taf. 8/A und B; KM 111).

Der Malm Beta weist die in vielen Logs sichtbare charakteristische Dreiteilung (z.B. Altensteig 1, Pomoni et al., 1989; Schersteten 1 und 2, Koch et al., 2010) in einen liegenden und hangenden relativ „sauberen“ Bereich (geringe Tonanteile; geringe Gamma-Impulsrate)

und einen mittleren, etwas tonigeren Bereich (höhere Gamma-Impulsrate) auf (Abb. 16). Der von Meyer (1994) ausgewiesene Malm β mit nur 14 m Mächtigkeit könnte daher nach den Logs anders interpretiert werden, wie von Koch et al. (2010) am Beispiel der Bohrungen Scherstetten 1 und 2 dokumentiert, und damit eine Mächtigkeit von etwa 35 m erreichen (1500 – 1535 m).

Der Malm α (1514 – 1569 m) weist eine Mächtigkeit von 55 m auf, enthält aber im oberen Bereich auch Gesteine, die in den Malm β gestellt werden könnten.

In dem Lithoklast-Wackestone schwimmen zahlreiche Lithoklasten als dunklere, meist rundliche Komponenten (Taf. 8/C und D; KM 113). Dabei handelt es sich um Schlamm-Gerölle, wie sie für den basalen Bereich des Malm häufig charakteristisch sind. Das Gamma-Log weist die Entwicklung von toniger, siltiger Basis zu mehr reinen Kalken im Hangenden auf, was sich in der Abnahme der Gamma-Impulsrate deutlich zeigt (Abb. 16).

Der Dogger (1569 – ET 1585 m) zeichnet sich durch erhöhte Tongehalte, einige Molluskenbruchstücke und/oder durch karbonatisch gebundene Sandsteine aus (Taf. 8/E und F; KM 116).

Die tafelbankigen Dolomite des Malm δ , ϵ , ζ 1 und ζ 2 als potentieller Zufluss für geothermische Wässer

Die tafelbankigen Dolomite des insgesamt etwa 236 m mächtigen Intervalls (1226 – 1462 m) sind für den potentiellen Zufluss geothermischer Wässer vor allem in Bohrungen des östlichen Molasse-Beckens von besonderem Interesse (Abb. 17).

Hinzu kommt die vertikale Wechsellagerung von Intervallen von Dolomit mit unterschiedlicher Kristallgröße, Porosität und Permeabilität. Darüber hinaus sorgen eingeschaltete Zonen sehr feinkristalliner Dolomite mit deutlichen, horizontalen Tonfasern für vertikale Permeabilitätsbarrieren. Die tafelbankigen Dolomite vom Malm δ bis zum Malm ζ 2 stellen in der Bohrung Moosburg SC 4 eine alternierende Folge von mittel- bis grobkristallinen Dolomit-Schichten mit zwischengeschalteten sehr fein- bis feinkristallinen Dolomiten dar (Abb. 16, Abb. 17 und Abb. 18). Diese Abfolge kann daher im lagerstättenkundlichen Sinne als Sandwich-Aufbau (layer-cake) mit bevorzugt horizontalen Wegsamkeiten für Fluide und vertikalen Permeabilitätsbarrieren interpretiert werden.

Die von Wolfgramm et al. (2009), Böhm et al. (2010) und Koch et al. (2010) diskutierten Gesetzmäßigkeiten, die für die unterschiedliche Ausbildung sehr fein-, fein- mittel- und grobkristalliner Dolomite und deren gesteinsphysikalische Kenndaten verantwortlich sind, gelten sowohl für den Massendolomit anderer Tiefenaufschlüsse als auch für den tafelbankigen, geschichteten Dolomit der Bohrung Moosburg SC 4. Dabei werden massige, dolomitische Körper im Malm des Molasse-Beckens generell als Zonen mit zu erwartenden höherer hydraulischer Durchlässigkeit gesehen (Jodocy & Stober, 2009).

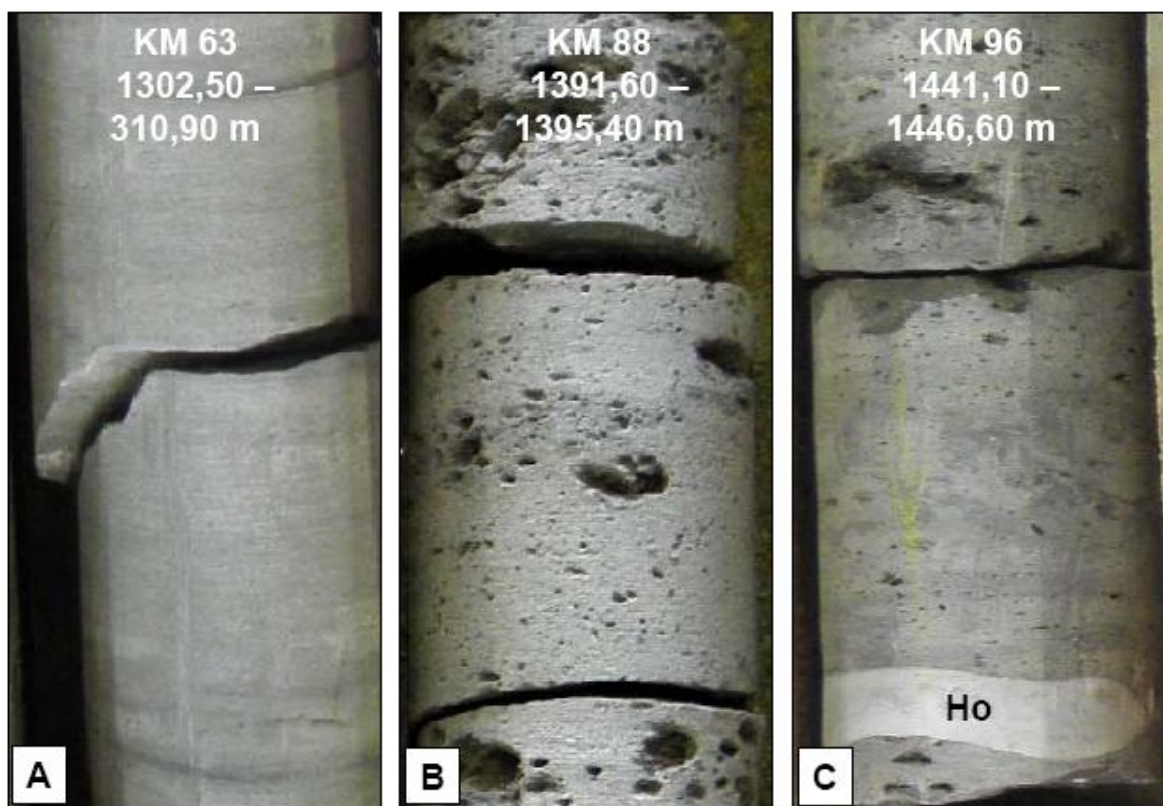


Abb. 18: Charakteristische Kernabschnitte als repräsentative Beispiele für den „Sandwich-Aufbau“ der tafelbankigen Dolomite des Malm δ , ϵ , ζ 1 und ζ 2 in der Bohrung Moosburg SC 4. A - KM 63: Feingebankter Dolomit an der Basis des Malm ζ 2. B - KM 88: Löchriger Dolomit des Malm ϵ . C - KM 96: Dolomit mit Lochreihen und Hornsteinknollen (Ho) des Malm δ .

Die in der Bohrung Moosburg SC 4 erschlossenen Folge von tafelbankigen Dolomiten kann vom Liegenden zum Hangenden gemäß den petrographischen Charakteristika und den gesteinsphysikalischen Kenndaten in die Abschnitte A – F untergliedert werden (Abb. 17). Die Mächtigkeiten der nutzbaren Einheiten mit wechselnden petrophysikalischen Eigenschaften betragen dabei etwa 106 m für den Malm δ und ϵ , 37 m für den Malm ζ 1 und 61 m für den Malm ζ 2. Die an wenigen Proben ermittelten Porositäten betragen zwischen

<< 1 % und 17,1 % (Abb. 17). Die Permeabilitäten streuen von 0,03 mD bis zu 62,7 mD. Die bei einem derartigen Gestein vorhandenen Zuflüsse können aus der so genannten Matrix-Porosität und –Permeabilität hergeleitet werden. Die gemessenen Permeabilitäten der Kernproben sind vorwiegend durch die so genannte Matrix-Porosität bedingt; d.h. die Interkristallin-poren zwischen den Dolomitkristallen. Dabei spielen sowohl die Morphologie der Dolomitkristalle als auch die der Porenräume eine entscheidende Rolle. Dolomit, der aus großen, idiomorphen Kristallen besteht, weist deutlich sichtbare und größere interkristalline Porenräume auf. Dieser Zusammenhang zwischen Kristallgröße im Dolomit und Permeabilität ist in Abb. 17 dokumentiert. Vor allem im Malm δ und ϵ sind fein-, mittel- und grobkristalline Dolomite (bis 300 μm Kristallgröße) anzutreffen, welche dann Permeabilitäten von bis zu 48,0 mD und 62,7 mD aufweisen können. Hier sind neben überwiegend hypidiomorphen auch besonders häufig idiomorphe Kristalle ausgebildet. In den sowohl durch die petrographische Beschreibung als auch durch das Gamma-Log als mehr tonig ausgewiesenen Einheiten sind dagegen überwiegend xenomorphe bis hypidiomorphe Dolomitkristalle geringer Größe anzutreffen (bis 100 μm). Die hier gemessenen

Permeabilitäten liegen im Bereich von 0,03 mD bis 0,26 mD.

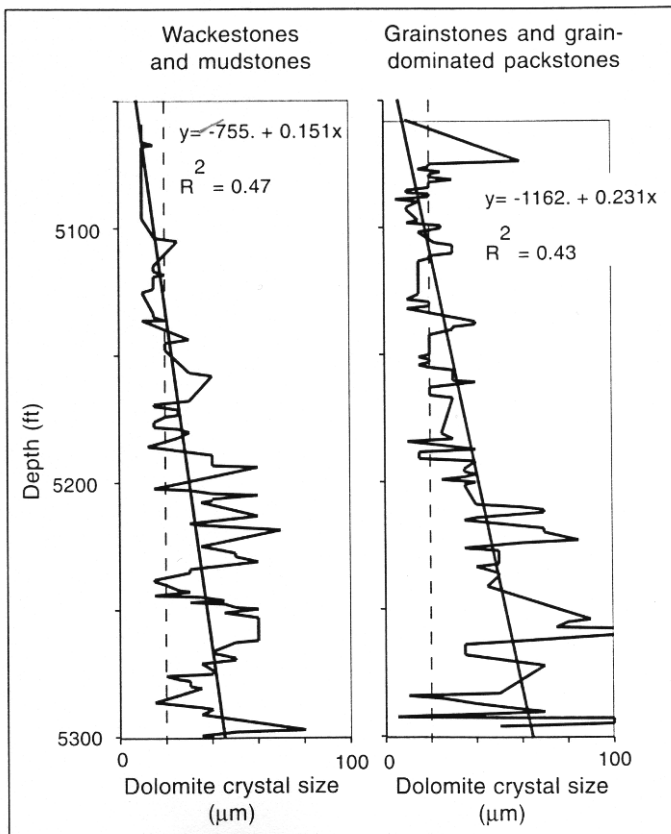


Abb. 19: Kristallgröße des Dolomits in Abhängigkeit vom Faziestyp des Ausgangssediments (aus Lucia, 1999).

Je größer und umso mehr idiomorphe Dolomitkristalle (ohne erhebliche Rekristallisation und / oder Weiterwachsen) vorhanden sind, umso größer sind die Interkristallin-poren und umso besser ist die Matrix-Permeabilität. Es zeigt sich, dass die Größe der Dolomitkristalle vom Reinheitsgrad (Anteil an Nicht-Karbonat) im primären Kalkstein abhängt.

Dies wird dahingehend interpretiert, dass fein verteilte Tonpartikelchen das Wachstum größerer Dolomitkristalle behindern (Koch et al., 2010). Dies ist mit den Verhältnissen bei der Rekristallisation von Kalken, wie sie von Bausch (1968) für den Malm beschrieben wurden, zu vergleichen. Dieser Zusammenhang wird auch in der Darstellung verschiedener Dolomite deutlich, die einerseits aus matrixreichen Mudstones und Wackestones mit hohem Anteil an Nichtkarbonaten und andererseits aus Packstones und Grainstones mit geringen oder gar keinen Anteilen an Nichtkarbonat hervorgegangen sind, wie von Lucia (1999) dokumentiert (Abb. 19).

Sibley et al. (1994) geben als Grund für den Zusammenhang zwischen Kristallitgröße im Ausgangssediment und der Größe der Dolomitkristalle das Verhältnis von Nukleationsrate zu Kristallwachstum an. In feinkristallinem Ausgangsmaterial (Mudstones, Wackestones) ergeben sich dabei zwangsläufig höhere Nukleationsraten, was dann zu kleineren Dolomitkristallen führt.

Die Größe der Dolomitkristalle steuert über die Porenhalsdurchmesser die Permeabilität. Dabei gilt, dass kleine Kristalle kleine Porenhalsweiten und damit geringe Permeabilität bedingen. Große Dolomitkristalle weisen dagegen große Porenhalsweiten auf, was für eine höhere Permeabilität sorgt. Zusätzlich ist zu beachten, dass idiomorphe Dolomitkristalle bessere Permeabilität bedingen als hypidiomorphe oder gar xenomorphe Kristalle. D.h. je stärker das Kristallgefüge verzahnt ist, umso geringer ist die Permeabilität. Beide Parameter greifen ineinander. So kann es sein, dass ein hochporöser feinkristalliner Dolomit, dessen sichtbare Poren aus großen Molds und Vugs bestehen, nur sehr geringe Permeabilität aufweist, da die Dolomitkristalle sehr klein und verzahnt sind und daher extrem kleine Porenhalsdurchmesser aufweisen. Mittelkristalline Dolomite mit vorwiegend großen Interkristallinporen weisen dagegen größere Porenhalsdurchmesser und somit hohe Permeabilitäten auf.

Besonders große und überwiegend hypidiomorph und meist sogar xenomorph ausgebildete Dolomitkristalle können dagegen wiederum kaum sichtbare Porenräume aufweisen. Hier kann ein Weiterwachsen der Kristalle erfolgen, bis die ehemals freien Interkristallinporen fast vollständig durch neu gebildeten Dolomit verschlossen wurden, der die Vorgänger-Kristalle als Kristallisationskeime genutzt hat. Diese Kristalle zeigen meist einen klaren, einschlussfreien Anwachssaum aus stöchiometrischem Dolomit, der wahrscheinlich vorwiegend in der tieferen Versenkungsdiagenese gebildet wurde, wie von Tucker & Wright (1990) und

Liedmann & Koch (1990) für den Malm in Süddeutschland beschrieben. Bei in-situ Rekristallisation kann je nach Zusammensetzung der Porenwässer auch eine Porositätszunahme von bis zu 13 % bei der Umwandlung von Kalk in Dolomit erfolgen.

Aus Kalken mit primär hohem Anteil an Nicht-Karbonat als Vorläufergestein können nur fein- bis mittelkristalline Dolomite gebildet werden. Aufgrund der geringen Kristallgröße führt hier allerdings selbst eine idiomorphe Ausbildung der Dolomitkristalle nicht zu großen Interkristallinporen und damit auch nicht zu höheren Matrix-Zuflussraten (Matrix-Permeabilität).

Diese Zusammenhänge zwischen Dolomit-Kristallmorphologie, Dolomitgefüge und Porosität ist in der Literatur mehrfach beschrieben worden (Sibley, 1982; Sibley & Gregg, 1987; Lucia, 1999). Für den Malm im Molasse-Untergrund liegen Daten von Liedmann & Koch (1990), Liedmann (1992), Reinhold & Schroeder (1994), Reinhold (1996), Koch (2000), Wolfgram et al. (2009), Böhm et al. (2010) und Koch et al. (2010) vor. Die in diesen Arbeiten diskutierten Daten bestätigen darüber hinaus die bereits früher getroffene Feststellung, dass Dolomit vorwiegend in der „Schwamm-Fazies“ gebildet wurde (Lang, 1964; Fritz, 1965; Bausch, 1963).

Dies liegt nach Liedmann & Koch (1990) daran, dass die dolomitisierenden Porenlösungen vorwiegend durch die poröse Fazies der Packstones/Floatstones der Peloid-Lithoclast-Ooid-Fazies der Karbonatsande, durch welche die Massenkalkkomplexe nach Koch et al. (1994) überwiegend aufgebaut wurden, perkolieren konnten.

Eine Ausnahme stellen jedoch die in den Proben KM 63 (Taf. 3/C und D) und KM 70 (Taf. 4/A und B) anzutreffenden sehr fein- bis feinkristallinen Dolomite dar. Sie bestehen überwiegend aus idiomorphen Kristallen von nur 20 - 70 µm Größe, die ein loses Kristallgefüge mit sehr hoher Porosität bilden.

Für ihre Bildung wird eine besondere Diagenese angenommen, während der relativ früh in einem Mudstone kleine Dolomitkristalle gebildet wurden, die in der Matrix schwammen. Diese feine Kalk-Matrix wurde durch spätere Lösung entfernt, so dass nur noch die Dolomitkristalle, die schwerer löslich sind als der feine Kalk, als poröses „Skelett“ übrig blieben. Dabei kann nach Liedmann & Koch (1990) die frühe Umwandlung von metastabilem Mg-Cacit in stabilen Calcit und das dabei in die Porenlösung abgegebene MgCO₃ eine wesentliche Rolle gespielt haben. Ebenso kann die an Styolithen gebundene Dolomitisierung bedeutend sein.

All diese verschiedenen, von Meder (1987) als „initialen Dolomit“ bezeichneten Bildungen können während der Versenkungsdiagenese als Nukleation für die weitere Dolomitisierung gedient haben. Bei höheren Temperaturen und erhöhtem Druck reichen geringere Mg/Ca-Verhältnisse im Porenwasser aus (Usdowski, 1967, 1974; Sibley et al., 1994), um stabilen Dolomit zu bilden, der dann als klare, einschlussfreie Anwachsäume auf früheren, einschlussreichen Dolomitkristallen kristallisiert. Dieser Prozess kann dann auch zur massiven Dolomitisierung in der Versenkungsdiagenese führen.

Generell müssen in den hier untersuchten tafelbankigen Dolomiten der diagenetische Ablauf und besonders die möglicherweise unterschiedlichen Dolomitierungsprozesse zu verschiedenen Zeiträumen im Laufe der gesamten diagenetischen Entwicklung aber neu diskutiert werden.

Wertet man Beschreibungen von Aufschlüssen (Bausch, 1963; Meyer, 1972; Meyer, 1977a, 1977b; Koch et al., 2003; Koch & Weiss, 2005) und Bohrungen (Streit & Meyer, 1985; Meyer & Schmidt-Kaler, 1987), in denen tafelbankiger Dolomit und Dickbankkalke vorkommen, auch nur grob aus, so ist auffallend, dass diese in den unterschiedlichsten räumlichen Verbandsverhältnissen stehen. Es kann daher wohl kaum von einem einzigen, alles überprägenden Dolomitierungsprozess während der Versenkungsdiagenese ausgegangen werden. Auch die verschiedenen Modelle, die für die Dolomitisierung von Massenkalken bisher entwickelt wurden (Bausch, 1963; Bausch et al., 1986) deuten darauf hin, dass es verschiedene Bereiche und Pfade einer frühen, initialen Dolomitisierung gegeben haben muss die im Verlauf der späteren Diagenese überprägt und/oder homogenisiert wurden. Daten aus Geländeaufnahmen zeigen bereits drei verschiedene Dolomit-Typen (Blank, 1998; Heckert, 1997; Koch, 2000). Es wird schichtgebundener Dolomit im Malm ϵ angetroffen, der mit scharfer Grenze Kalke überlagert. Ihm gegenüber tritt Dolomit an Störungszonen auf, der anschließend lateral in Kalke des Malm δ , ϵ und ζ vorgedrungen ist. Interessant erscheint auch der Dolomit, der nur im Bereich von kleineren und größeren Schwammriffen und am Rand von Schwammriff-Komplexen auftritt. Dies kann dazu führen, dass vollkommen dolomitische kleine Schwammriffe von nur etwa 1 m Durchmesser isoliert in einer gebankten Kalkfazies schwimmen. Für die geothermische Exploration hat diese partielle Dolomitisierung jedoch keine große Bedeutung.

Es muss insgesamt festgehalten werden, dass hier noch erheblicher Forschungsbedarf über die diagenetischen Abläufe und speziell der Dolomitierung im Malm des Molasse-Beckens besteht.

Die bisher für den Malm entwickelten Modelle (Liedmann & Koch, 1990; Liedmann, 1992; Reinhold & Schroeder, 1994; Reinhold, 1996) müssen unter Berücksichtigung der speziellen Fragestellung überprüft und ergänzt werden. Nur daraus können unter Beachtung der primärfaziellen Gegebenheiten (Koch et al., 2010) realistische Berechnungsgrundlagen für die Wegsamkeiten hydrothermaler Wässer in den verschiedenen Fazies/Diagenese-Bereichen der Malm-Karbonate ermittelt werden.

Für eine risikominimierte und hinsichtlich der Fündigkeit optimierte Explorationsstrategie von Geothermiebohrungen hat ein zukünftig besseres Verständnis der diagenetischen Abläufe und Dolomitierungsprozesse eine zentrale Bedeutung.

Bedeutung der Matrixpermeabilität der Dolomite für die potentielle Produktivität der Bohrung Moosburg SC 4

Die an ausgewählten Proben ermittelten gesteinsphysikalischen Kenndaten erlauben die Abschätzung potentieller Zuflussraten geothermischer Wässer im tafelbankigen Dolomit (dolomitische Dickbankfazies) der Bohrung Moosburg SC 4.

Für die einzelnen stratigraphischen Abschnitte der tafelbankigen Dolomite in der Bohrung Moosburg SC 4 ergeben sich sehr unterschiedliche theoretische Zuflussraten. Bezogen auf die an den Kernmarschen gemessene Spannweite der Permeabilitäten von 0,03 mD bis 62,7 mD berechnen sich auf einer Bohrstrecke von 1 m bei 1 bar Druckabsenkung unter Reservoirbedingungen ($T = 77^{\circ}\text{C}$; $c = 650\text{mg/l}$) „Matrixproduktivitäten“ im Bereich von ca. 0,000008 bis 0,016 l/(s*bar). Die Spannweite reflektiert die hohe Variabilität der „Matrixproduktivität“ aufgrund der wechselnden Verhältnisse im tafelbankigen Dolomit. Die Werte der maximalen Matrixproduktivität liegen im Bereich der aus theoretischen Annahmen ermittelten Werte für den Malmaquifer von 0,01- bis 0,02 l/(s*bar) nach WOLFGRAM et al. (2009).

Ausgehend von der maximalen „Matrixproduktivität“ von 0,016 l/(s*bar) pro Bohrmeter berechnet sich für die tafelbankigen Dolomite mit einer Mächtigkeit von 236 m ein Produktivitätsindex von $PI = 3,8$ l/(s*bar) für die Bohrung Moosburg SC 4. Dieser Wert entspricht dem maximalen Anteil der Matrixpermeabilität an der Gesamtproduktivität der

Bohrung. Vergleicht man diese mit der anhand von Pumpversuchsdaten ($Q = 10 \text{ l/s}$) der Bohrung Moosburg SC 4 berechneten Produktivität von $PI = 5,4 \text{ l/(s*bar)}$, so lässt sich ableiten, dass ein signifikanter Zufluss in die Bohrung über tektonisch beanspruchte, geklüftete und verkarstete Bereiche erfolgt. Aus den Überlegungen zur „Matrixproduktivität“ und dem für die Berechnung verwendeten Maximalwert der Matrixpermeabilität von $62,7 \text{ mD}$ geht hervor, dass der Anteil des Zuflusses aus tektonischen Elementen und Verkarstung in die Bohrung sogar noch höher anzusetzen ist. Eine exakte Quantifizierung der verschiedenen Zuflussanteile erfordert eine detaillierte und umfassende hydraulische Gesamtbewertung der Bohrung Moosburg SC 4, die Gegenstand des aktuellen Forschungsvorhabens zur Charakterisierung des Malmtiefengrundwasserleiters im süddeutschen Molassebecken (Schneider et al., 2009) ist.

Dank

Die vorliegenden Untersuchungen konnten im Rahmen des BMU-Projektes „Wissenschaftliche und technische Grundlagen zur struktureologischen und hydrogeologischen Charakterisierung tiefer geothermisch genutzter Grundwasserleiter am Beispiel des süddeutschen Molassebeckens“ (FKZ: 0327671A/B) durchgeführt werden.

Herrn Thomas Fritzer vom Bayer. Landesamt für Umwelt danken wir herzlich für die Bereitstellung des Untersuchungsmaterials.

Für kritische Durchsicht des Manuskriptes und wertvolle Hinweise und Verbesserungsvorschläge danken wir Herrn Prof. Dr. W. v. Gosen herzlich. Einem weiteren ungenannten Gutachter danken wir für die kritische Durchsicht und Korrekturen.

Tafel 1 – 8: Fotos von Kernproben (linke Kolonnen, Bildbreite = 5 cm) und Dünnschliffphotos (rechte Kolonnen, Maßstäbe = 500 µm) der unterschiedlichen lithologischen Einheiten in der Bohrung Moosburg SC 4.

Tafel 1 / Plate 1:

Probe KM 20 / sample KM 20 (A und B):

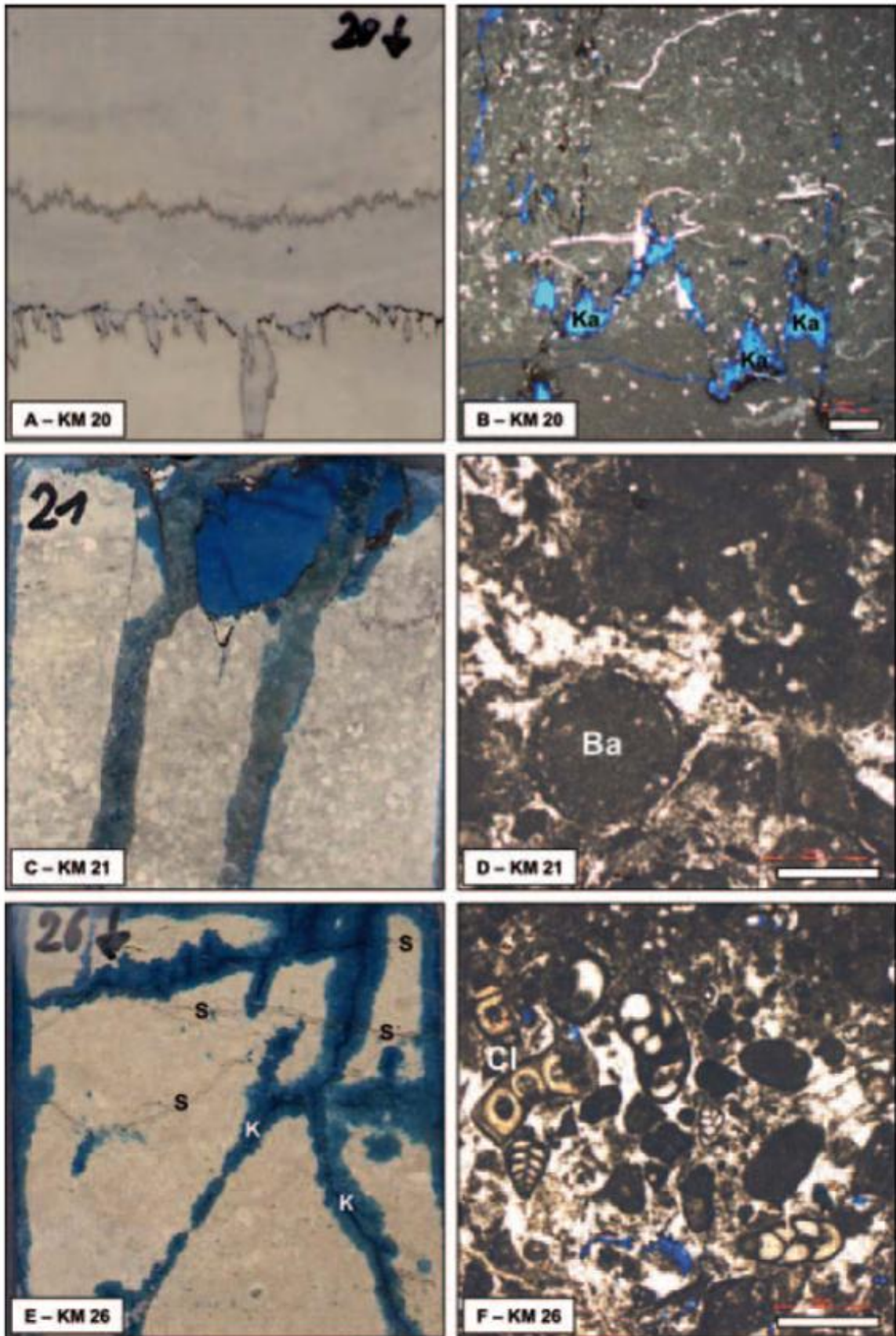
Dichter Wackestone mit gut ausgeprägten Vertikalstylolithen mit mäßiger Amplitude und z.T. erheblicher Tonanreicherung (A). Wackestone mit feinem Fossilbruch und Kanalporen (Ka in B) entlang von Stylolithen.

Probe KM 21 / sample KM 21 (C und D):

Der „Breisteinartiger Onkoidkalk“ (nach Meyer, 1994) stellt einen partikelreichen Packstone dar, der z.T. von deutlichen subvertikalen Klüften mit bis zu 0,7 cm Breite und mit Kluffüllung durchsetzt ist (C). Der Bankia-Lithoklast-Peloid-Packstone weist häufig *Bankia striata* (Ba in D) und sparitisch zementierte Bereiche auf.

Probe KM 26 / sample KM 26 (E und F):

Die von Meyer (1994) so genannte „Breisteinfazies“ besteht aus körnigen Kalken, die reich an biogenen und abiogenen Partikeln sind. Zahlreiche subvertikale Klüfte (K in E) sowie Stylolith-Scharen (S in E) mit geringer Amplitude durchziehen das Gestein. Entlang dieser Schwächungszonen ist auch das blaue Tränkungsmedium bevorzugt in den Kalkstein eingedrungen. Der Clypeina-Foraminiferen-Packstone mit *Clypeina jurassica* (Cl in F) zeigt zahlreiche benthische Foraminiferen, Lithoklasten und Peloiden sowie granularem Calzitcement.



Tafel 2 / Plate 2:

Probe KM 37 (A und B) / sample KM 37 (A and B):

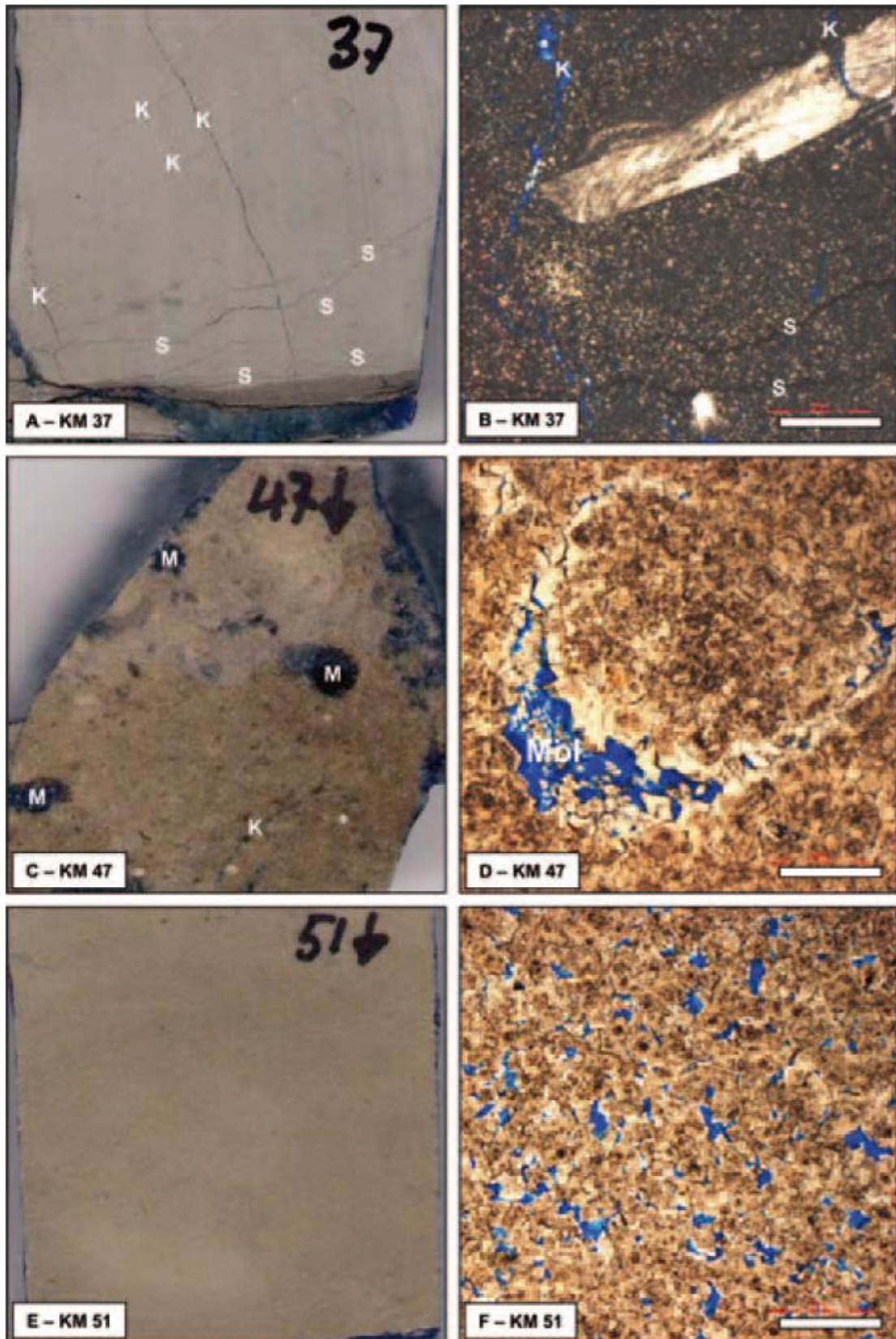
Dichter dolomitischer Kalkstein von dünnen Klüften (K in A) und Stylolithbahnen (S in A) durchsetzt. Die Häufigkeit der Stylolithen nimmt mit Annäherung an die Ton-reichere Basislage zu. Dichter, schwach dolomitischer, Biogen-führender Mudstone mit Stylolithen (S in B) und subvertikalen Klüften (K in B). In der Matrix schwimmen sehr kleine ($< 10 - 25 \mu\text{m}$), isolierte, idiomorphe Dolomithomboeder.

Probe KM 47 (C und D) / sample KM 47 (C and D):

Sehr fein- bis mittelkristalliner, dichter Dolomit (Porosität = 0,7 %; Permeabilität = 0,03 mD) mit Molds (M in C) sowie dünnen Klüften (K in C). In den Lösungshohlräumen sind die sonst trüben, einschlussreichen Dolomitekristalle mit idiomorphen Kristall-Enden weitergewachsen. Trotzdem können meist die „Geisterstrukturen“ ehemaliger biogener Komponenten, z.B. Mollusken (Mol in D) an der Form der verbliebenen Hohlräume noch erkannt werden.

Probe KM 51 (E und F) / sample KM 51 (E and F):

Der makroskopisch scheinbar dichte, feinkristalline Dolomit (E) besteht aus $50 - 120 \mu\text{m}$ großen idiomorphen bis hypidiomorphen Kristallen (F). Dazwischen sind durch gerade Kristallflächen begrenzte Interkristallporen ausgebildet (Porosität 2,1 %; Permeabilität 0,43 mD). Die relativ geringe Permeabilität weist darauf hin, dass die Kristalle entgegen dem zweidimensionalen, mikroskopischen Eindruck räumlich doch intensiv verwachsen sind.



Tafel 3 / Plate 3:

Probe KM 60 (A und B) / sample KM 60 (A and B):

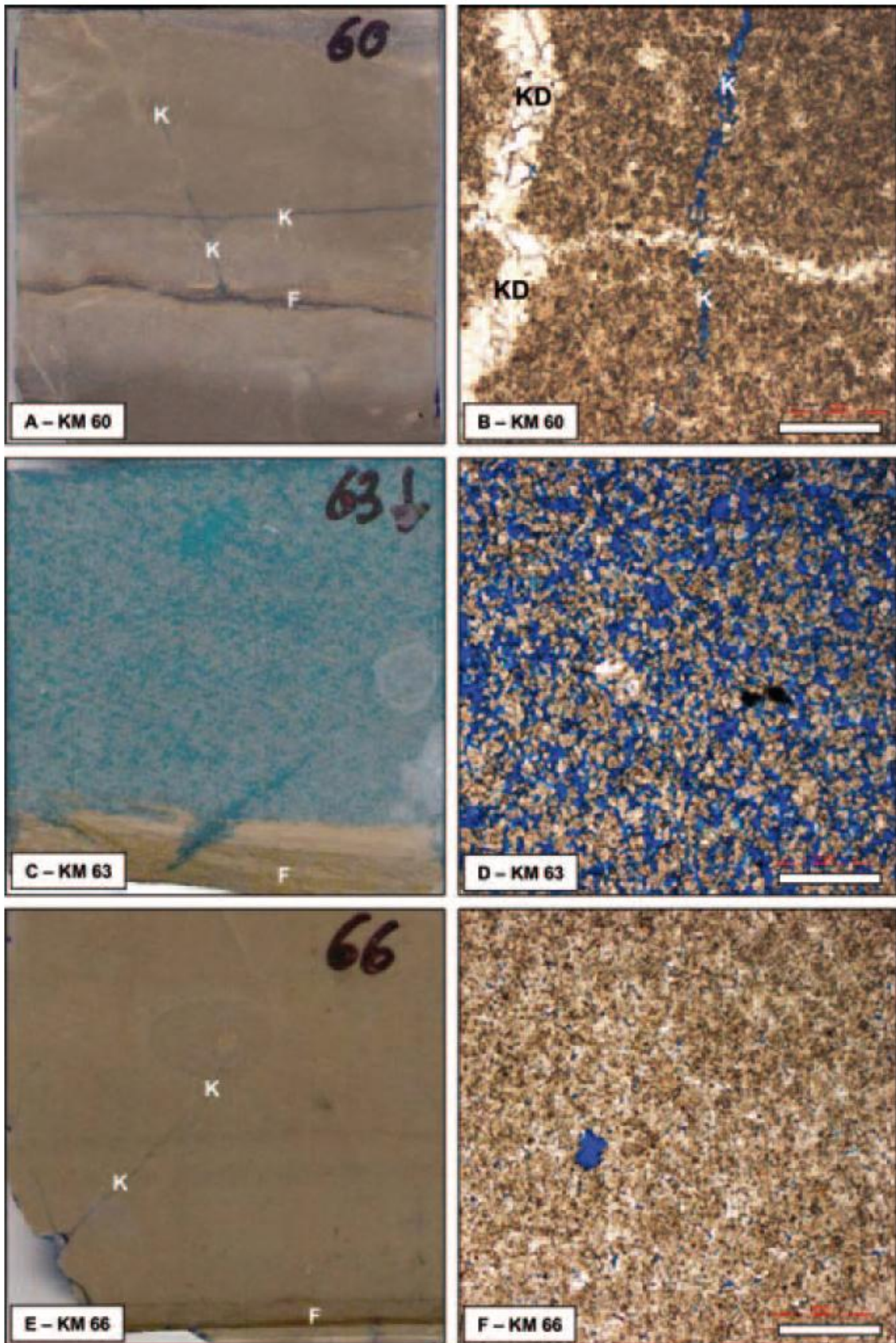
Dichter, sehr fein- bis feinkristalliner Dolomit (20 – 100 µm) mit homogener Kristallgröße aus äquigranularen, hypidiomorphen, bräunlichen, einschlussreichen Kristallen (Porosität 0,6 %; Permeabilität 0,03 – 0,26 mD). Das Gestein wird von einigen Klüften durchzogen (K in A), die mit hellem, xenomorphen Dolomit (KD in B) verheilt sind, der aus älteren, trüben Dolomitkristallen in den freien Kluftporenraum weitergewachsen ist. Andere Klüfte (K in A und B) geringer Weite sind offen (blau eingefärbt). Ferner treten stylolithische Tonflasern auf (F in A).

Probe KM 63 (C und D) / sample KM 63 (C and D):

Sehr poröser, sehr fein- bis feinkristalliner Dolomit (Porosität = 17,1 %; Permeabilität = 6,4 mD) aus überwiegend idiomorphen Kristallen von 20 – 70 µm Größe und sehr gut ausgebildeter Interkristallinporosität. Die durchwegs sehr kleinen Kristalle erklären die trotz hoher sichtbarer Porosität relativ geringe Permeabilität aufgrund der wahrscheinlich sehr kleinen Porenhalsdurchmesser. An der Basis treten dünne Tonflasern auf (F in C).

Probe KM 66 (E und F) / sample KM 66 (E and F):

Der dichte, sehr fein- bis feinkristalline Dolomit (Porosität = 0,9 %) mit dünnen tonigen Lagen (F in E) und homogenen, hypidiomorphem Kristallgefüge wird von wenigen Klüften durchsetzt. Kleine vugs sind ganz selten. Die im Dünnschliff als blaue Flecken sichtbaren kleinen Interkristallinporen (< 20 µm) sind nur durch sehr kleine Porenhäse miteinander verbunden, was auf sehr geringe Permeabilität (< 0,01 mD ?) schließen lässt.



Tafel 4 / Plate 4:

Probe KM 70 (A und B) / sample KM 70 (A and B):

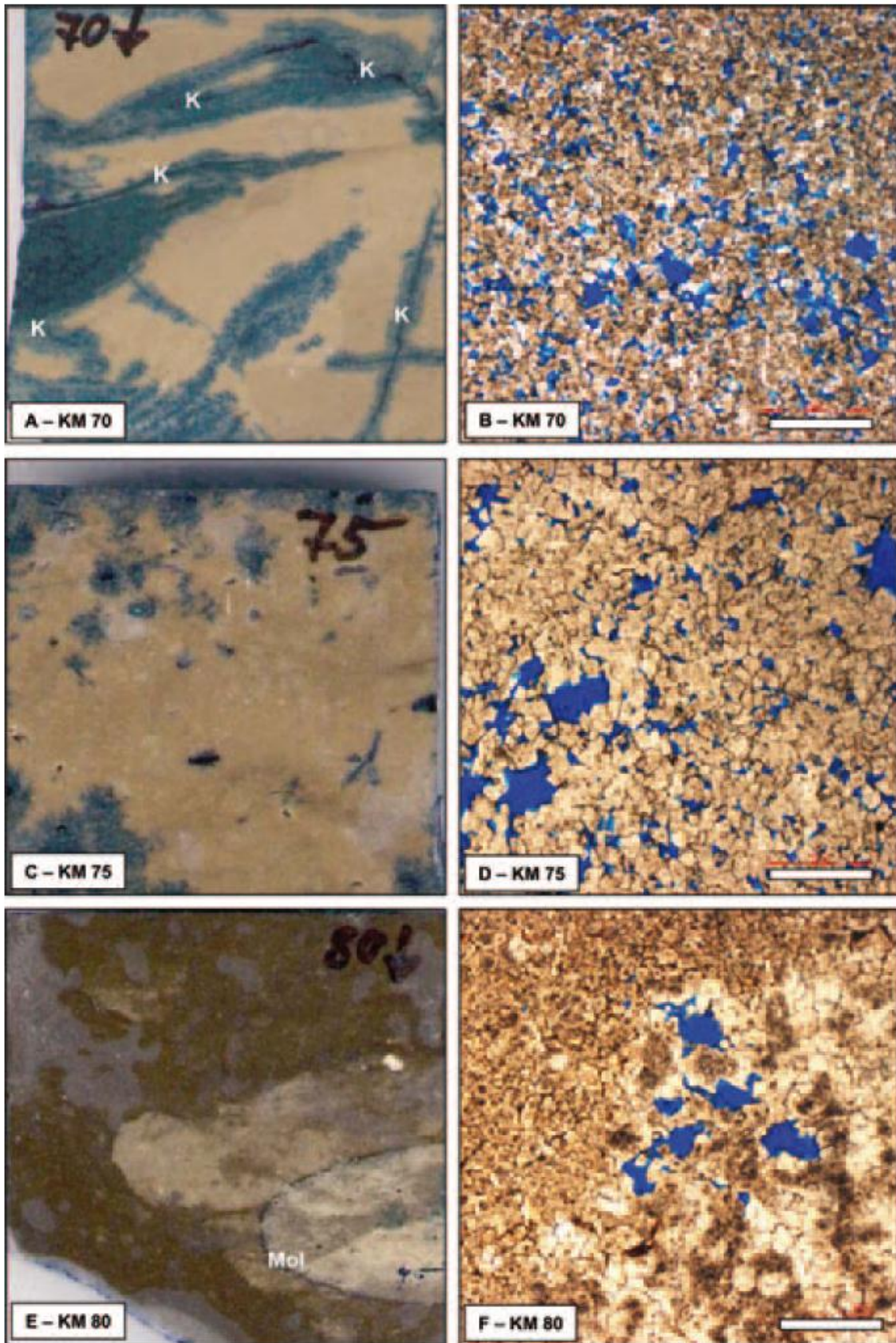
Zahlreiche meist offene, dünne Klüfte (K in A) durchziehen den porösen, sehr fein- bis feinkristallinen Dolomit (Porosität = 7,3 %; Permeabilität = 46,9 mD). Entlang dieser Klüfte und in besonders porösen Zonen konnte das blau gefärbte Tränkungsmedium gut eindringen. Zwischen den hypidiomorphen bis idiomorphen Kristallen von 20 – 100 µm Größe sind gute Interkristallinporen ausgebildet (B).

Probe KM 75 (C und D) / sample KM 75 (C and D):

Sehr fein- bis feinkristalliner, homogener Dolomit (Porosität = 7,6 %) mit nur wenigen kleinen vugs und überwiegend aus idiomorphen und aus vielen hypidiomorphen Kristallen bestehend. Daher kann auch eine mäßige bis gute Permeabilität angenommen werden.

Probe KM 80 (E und F) / sample KM 80 (E and F):

Dieser sehr fein- bis feinkristalline Dolomit (Porosität = 1,0 %; Permeabilität = 0,22 mD) weist auch einige Molluskenbruchstücke als Geisterstrukturen (Mol in E) und nur kleine Lösungshohlräume (F) auf. Die Größe der überwiegend hypidiomorphen Kristalle beträgt 50 – 120 µm mit größeren Kristallen im Bereich der Hohlräume.



Tafel 5 / Plate 5:

Probe KM 82 (A und B) / sample KM 82 (A and B):

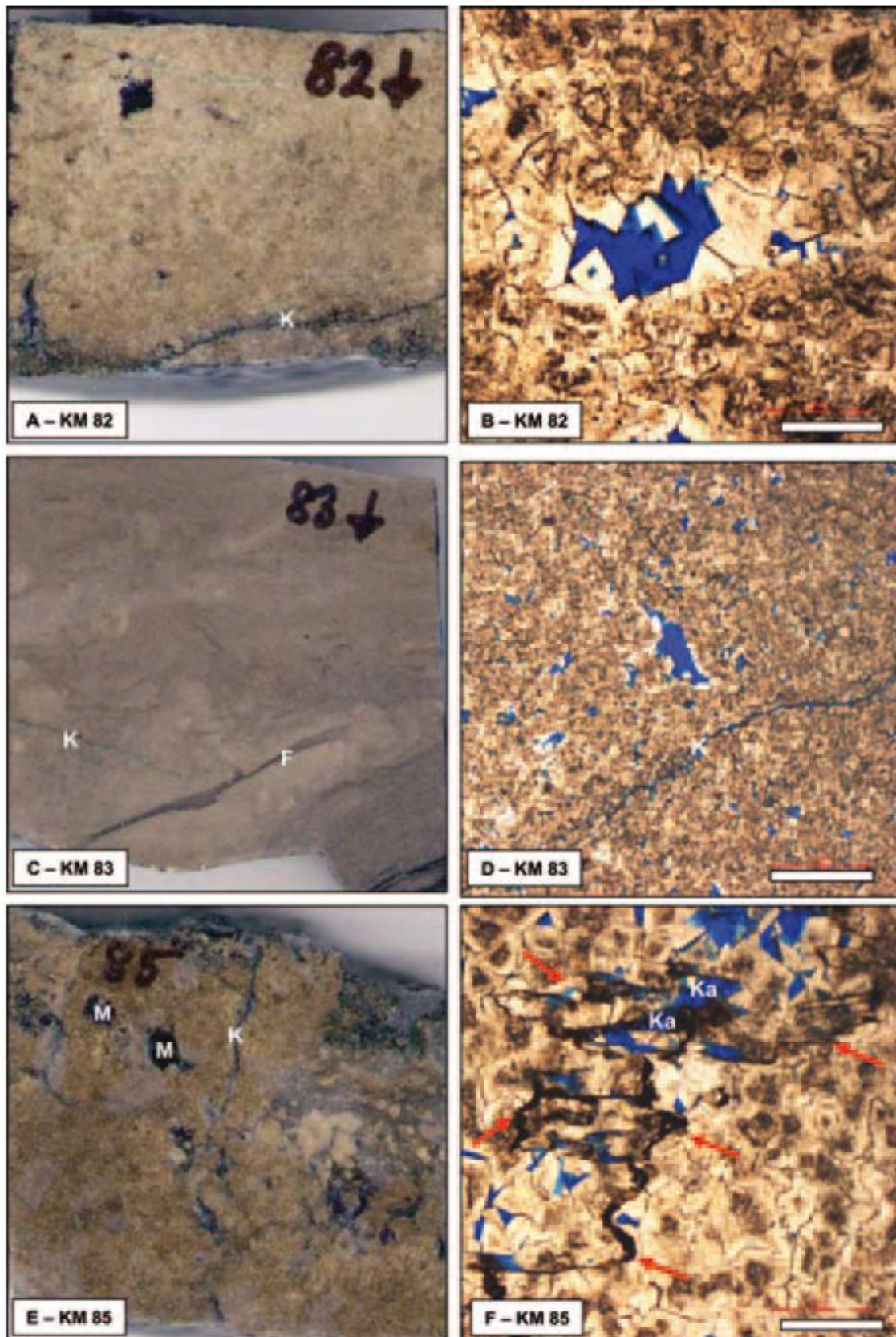
Mittel- bis grobkristalliner, homogener Dolomit aus 50 – 400 µm großen Kristallen und teilweise offenen Klüften (K in A). Die größten Kristalle sind mit sauberen Anwachssäumen in offene Lösungsporen weitergewachsen. Auch im homogenen Dolomit sind viele Kristalle mit Anwachssäumen zu finden, was auf Umkristallisation und Weiterwachstum während der Versenkungsdiagenese zurückzuführen ist.

Probe KM 83 (C und D) / sample KM 83 (C and D):

Der sehr fein- bis feinkristalline, homogene Dolomit (Porosität = 1,1 %; Permeabilität = 0,05 mD) mit einigen Tonflasern (F in C) und dünnen, offenen Klüften (K in C und D) besteht durchwegs aus hypidiomorphen Kristallen von 20 – 100 µm Größe. Der Dolomit zeigt nur kleine Reste von Lösungsporen und sehr kleine Interkristallinoren.

Probe KM 85 (E und F) / sample KM 85 (E and F):

Dieser Kernbereich der Probe KM 85 besteht aus mittel- bis grobkristallinem Dolomit mit 80 – 300 µm großen, hypidiomorphen und idiomorphen Kristallen. Er ist dem Kernbereich der Probe KM 88 sehr ähnlich, weshalb die dort gemessenen gesteinsphysikalischen Kenndaten hier wahrscheinlich auch gelten (Porosität = 5,4 %; Permeabilität = 62,7 mD). Neben Klüften (K in E) und Lösungsporen (Molds, M in E) sind besonders horizontale Stylolithen, die durch lateralen tektonischen Druck entstanden sind, auffallend (F). An diese Stylolithen mit deutlichen Tonanreicherungen (Pfeile in F) und mäßiger Amplitude sind auch Kanalporen (Ka in F) gebunden, wodurch die Permeabilität noch erhöht werden dürfte.



Tafel 6 / Plate 6:

Probe KM 88 (A und B) / sample KM 88 (A and B):

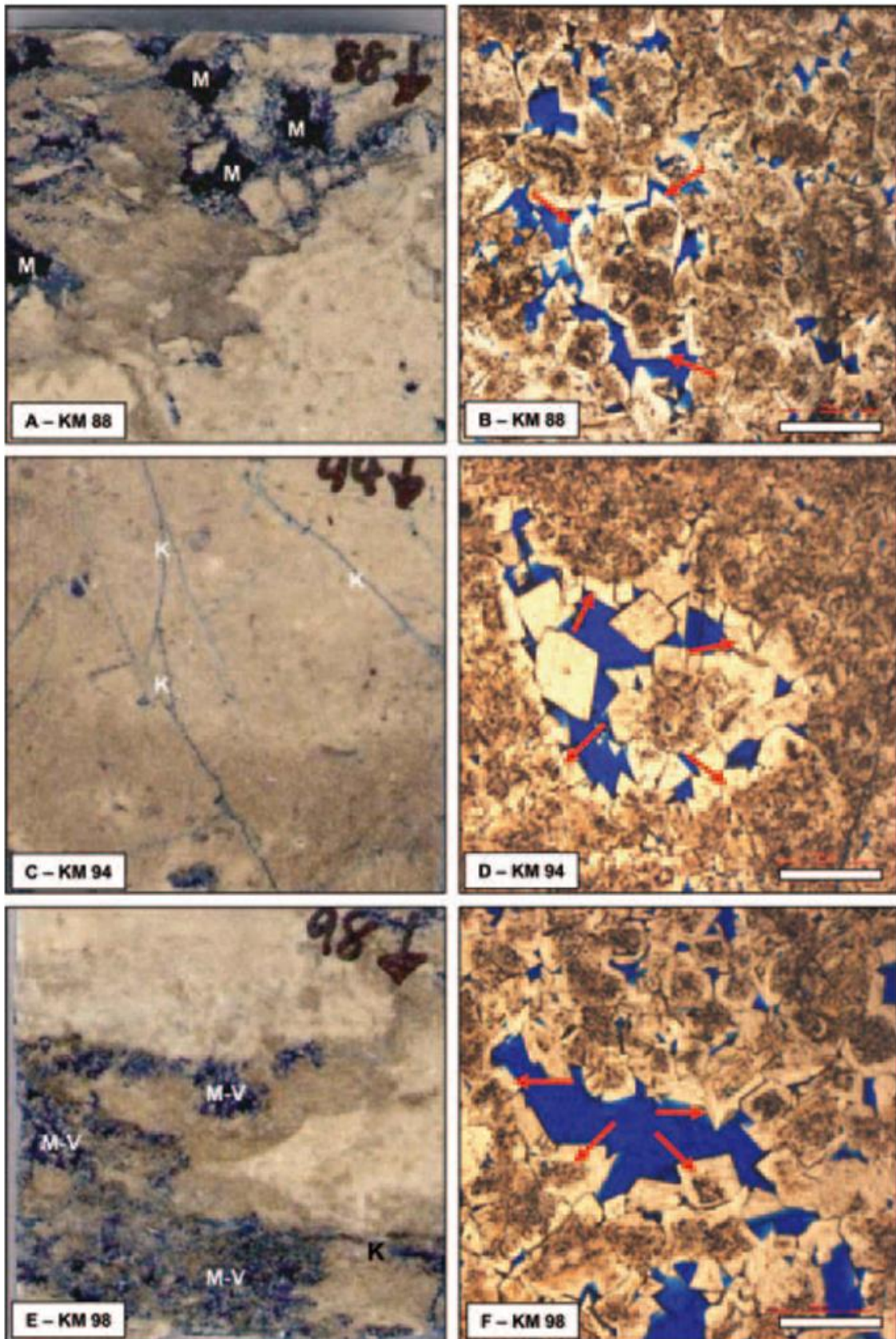
In diesem Kernbereich der Probe KM 88 treten auf engstem Raum poröse (Porosität = 5,4 %; Permeabilität = 62,7 mD) und weniger poröse Zonen auf, die durch Klüfte gegeneinander versetzt sind. Der mittel- bis grobkristalline Dolomit, aus 50 - 300 µm großen, hypidiomorphen und idiomorphen Kristallen, weist häufig helle, einschlussfreie Anwachssäume auf (Pfeile in B). Sie sind in offene Poren hinein besonders gut ausgebildet (B) treten aber auch im gesamten Dolomit auf. Die um relikthafte Lösungsporen (Molds, Vugs) ausgebildete Porosität (A und B) wurde durch Breckzien-Porosität (M in A) überprägt.

Probe KM 94 (C und D) / sample KM 94 (C and D):

Der fein- bis mittel- und grobkristalline Dolomit, aus 50 – 300 µm großen, hypidiomorphen Kristallen, zeigt klare idiomorphe Anwachssäume (Pfeile in D) nur in offenen Lösungsporen. Der Dolomit ist von zahlreichen feinen Klüften (K in C) durchzogen.

Probe KM 98 (E und F) / sample KM 98 (E and F):

Dicht erscheinende und sehr poröse Zonen mit Partikel- und Gesteinslösungsporen (M-V in E) und Klüften (K in E) sind eng vergesellschaftet. Im Durchschnitt weist der Dolomit eine Porosität von 7,6 % und eine Permeabilität von 47,2 mD auf. Zahlreiche Dolomitkristalle zeigen Weiterwachstum mit klaren, einschlussfreien Säumen um einschlussreiche Kernbereiche (Pfeile in F). Doch scheint das nur begrenzte Weiterwachstum ausreichend offene Interkristallinopen zuzulassen, wie durch die gute Permeabilität belegt ist.



Tafel 7 / Plate 7:

Probe KM 101 (A und B) / sample KM 101 (A and B):

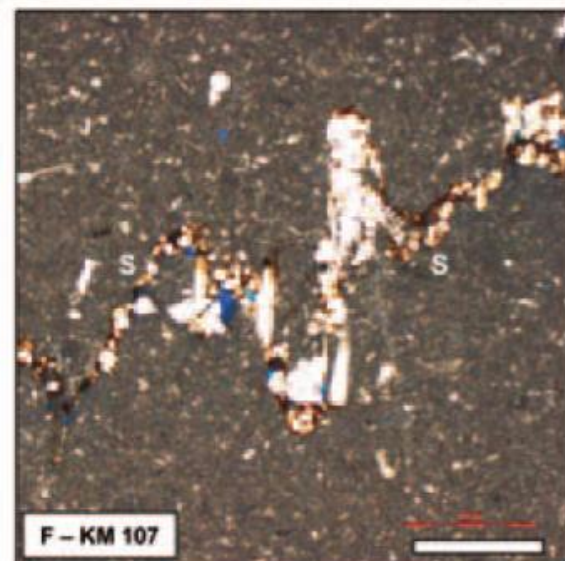
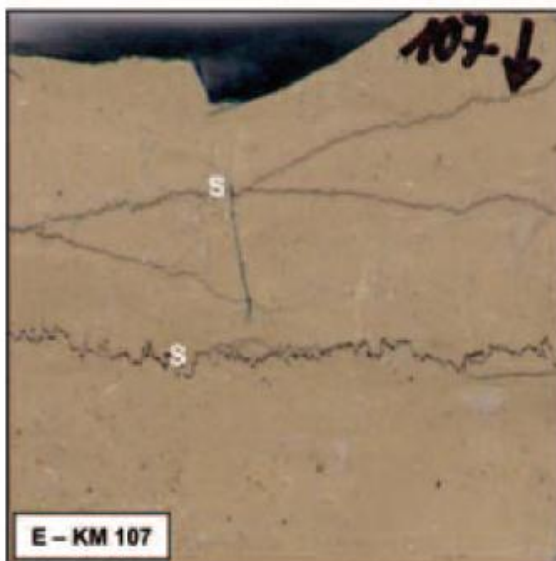
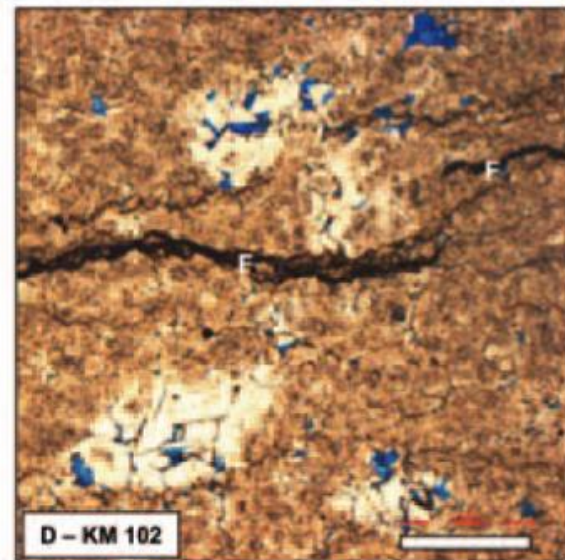
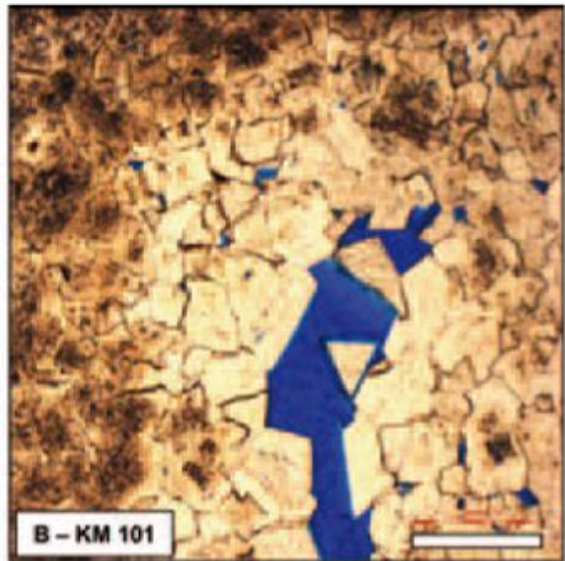
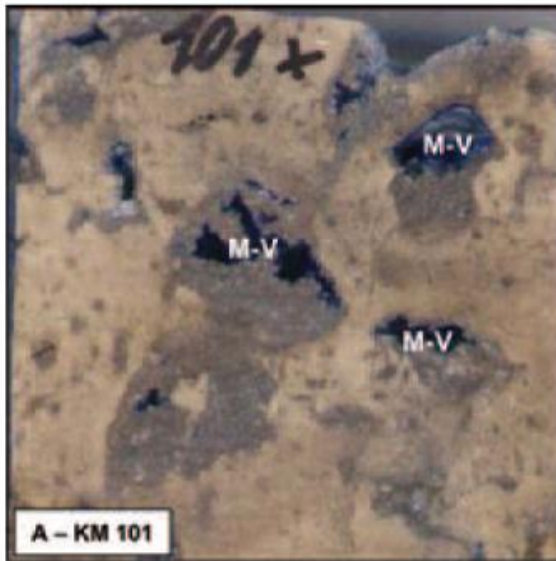
Fein- bis mittelkristalliner Dolomit aus 50 – 200 µm großen, hypidiomorphen Kristallen (B) mit nur wenigen einschlussfreien Anwachssäumen (Porosität = 2,4 %; Permeabilität = 0,4 mD). Grobe, klare Kristalle werden nur in den Lösungsporen (Molds, Vugs; M-V in A) angetroffen. Die porösen Zonen sind fleckhaft im Dolomit verteilt (A).

Probe KM 102 (C und D) / sample KM 102 (C and D):

Sehr fein- bis mittelkristalliner (20 – 100 µm), schwach laminiertes Dolomit mit Tonfasern (F in C und D) und schichtparallel aufgerissenen dünnen Klüften (K in C). Die regellos verteilten Lösungsporen mit sauberen Dolomitmikrokristallen deuten ebenso wie die zahlreichen Tonfasern (F in C und D) auf einen primären tonigen Wackestone mit nur wenigen biogenen Komponenten hin, die nun nur noch als Lösungsporen erkennbar sind. Wie aufgrund der xenomorphen und hypidiomorphen, verzahnten Kristalle und des flaserigen Gefüges zu erwarten, konnten nur 1,4 % Porosität und eine Permeabilität von 0,05 mD gemessen werden.

Probe KM 107 (E und F) / sample KM 107 (E and F):

Heller, dichter Mudstone (E) mit nur vereinzelt feinen Fossilresten (F). Gelegentlich treten feine Tonfasern und Stylolithen auf (S in E und F), entlang derer auch wenige Kanäle durch Lösung ausgebildet sein können.



Tafel 8 / Plate 8:

Probe KM 111 (A und B) / sample KM 111 (A and B):

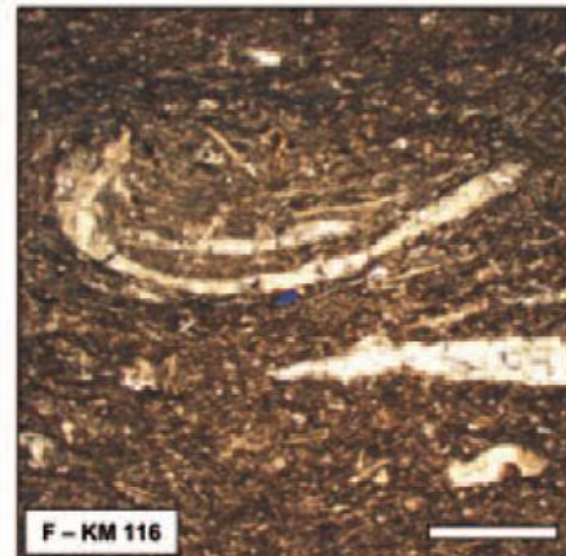
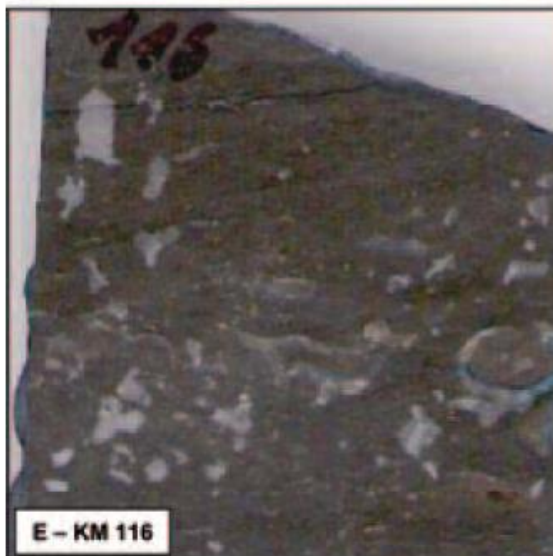
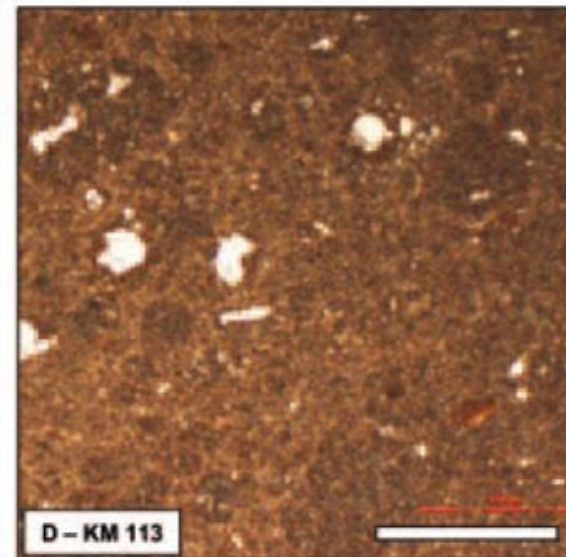
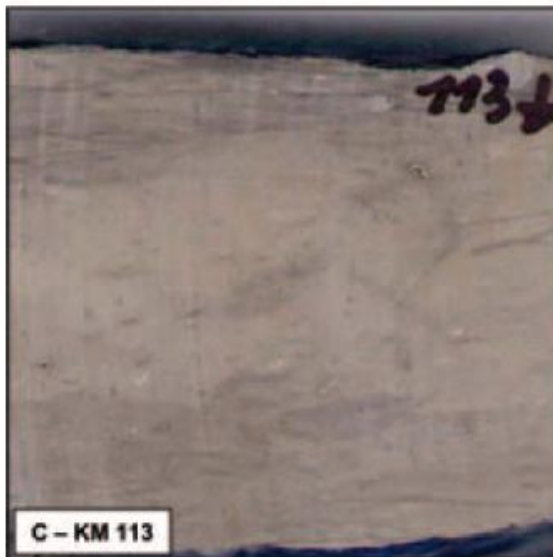
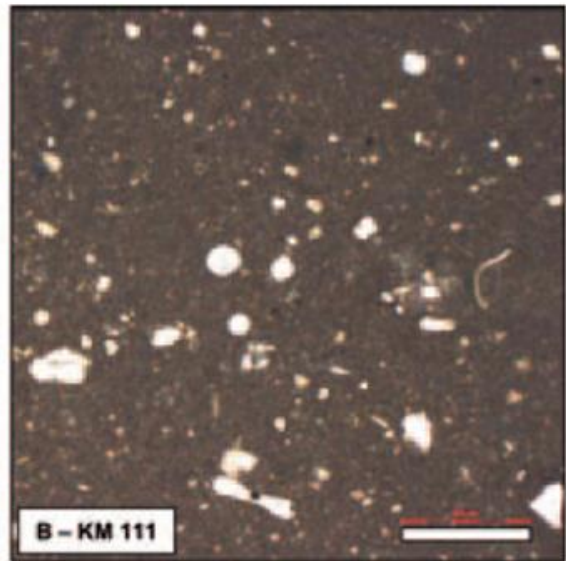
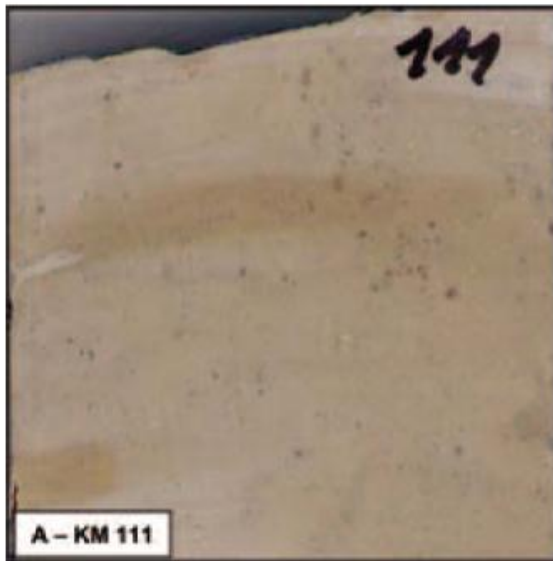
Heller, dichter fossilführender Mudstone bis Wackestone mit dünnen Tonfasern, Calcisphären, Schwammnadeln und kleinen, nicht näher bestimmten Fossilbruchstücken.

Probe KM 113 (C und D) / sample KM 113 (C and D):

Lithoklast-Wackestone mit Tonfasern (C) und zahlreichen dunkelbraunen bis rötlichbraunen Lithoklasten, die in einer helleren, rötlichbraunen Matrix schwimmen (D). Sie stellen aufgearbeiteten Mikrit dar. Vereinzelt sind feine biogene Reste zu finden.

Probe KM 116 (E und F) / sample KM 116 (E and F):

Die Dogger Sedimentgesteine zeichnen sich durch erhöhte Ton- und Siltgehalte und einige Molluskenbruchstücke aus. In diesen Kalksteinen unmittelbar unterlagernden Schichten treten karbonatisch gebundene Sandsteine mit einigen biogenen Bruchstücken und Fe-Ooiden auf.



4 Lithofazielle Reservoircharakterisierung zur geothermischen Nutzung des Malm im Großraum München

Publiziert von Böhm et al. (2012) in der Zeitschrift „Grundwasser“ der FH-DGG

Link zur Zeitschrift: <http://dx.doi.org/10.1007/s00767-012-0202-4>

Dieser Artikel ist durch ein copyright geschützt. Sämtliche Rechte liegen beim Springer-Verlag.

This article is protected by copyright and all rights are held exclusively by Springer-Verlag.

Zusammenfassung

Die zunehmende geothermische Nutzung des Malm im Untergrund des Großraums München erforderte ein besseres Systemverständnis des Tiefengrundwasserleiters. Auf Basis einer lithofaziellen Bewertung von 17 Malm-Geothermiebohrungen als ein Baustein einer integrierten Reservoircharakterisierung kann ein direkter Zusammenhang zwischen Lithofazies und Hydraulik abgeleitet werden. Demnach stellen im Malm des tiefen Untergrunds vorwiegend dolomitisierte Massenkalke den Grundwasserspeicher dar. Die Bohranalysen führen zu einer vereinfachten hydrostratigraphischen Gliederung, wonach der liegende Malm Alpha bis Gamma als Grundwassergeringleiter fungiert, Malm Delta und Epsilon einen großräumig, flächig verbreiteten, relativ homogenen Grundwasserleiter darstellen und der Malm Zeta aufgrund der lateral stark variierenden Fazies sowohl als Grundwasserleiter, als auch Geringleiter ausgeprägt sein kann. Primärfaziell unterschiedliche Ablagerungsräume der Malm Karbonate in Schwellen- oder Beckenposition verantworten - zusammen mit der später erfolgten Dolomitisierung -, ob eine Geothermiebohrung in einem hydraulisch „guten“ oder „ungünstigen“ Gebiet niedergebracht wurde. Aus den Daten ergibt sich eine neue Explorationsstrategie, die neben dem bisherigen strukturgeologischen Fokus nun vor allem auf die fazielle Ausprägung des Malm gerichtet ist.

Abstract

The significant increase of geothermal production from the Malm reservoir in the greater area of Munich requires a more detailed understanding of the deep aquifer system. On the basis of lithofacies evaluation of 17 geothermal wells a good correlation between lithofacies and hydraulics has been proven. In the deeper subsurface the main reservoir capacity within in the Malm is provided by predominantly dolomitized massive limestones.

Well analysis lead to a simplified hydrostratigraphic profile, the lower Malm Alpha to Gamma acts as an aquitard, Malm Delta and Epsilon shows a two-dimensional widespread, relatively homogeneous aquifer and the Malm Zeta due to lateral significant facies changes can develop both aquifer and aquitard characteristics. Facies changes depending largely on a sill or basin position and subsequent dolomitization are crucial factors for a well drilled down in a hydraulic “good” or “poor” area. Inspired from this results a new exploration strategy may focus more on facies characteristics than structural features within the Malm reservoir.

5 Die Fazies des Malm im Großraum München aus Bohrungen und Seismik

5.1 Fazielle Differenzierung im Großraum München auf Basis von Bohrungen

Die Kartenbeilagen aus dem paläogeographischen Atlas des süddeutschen Oberjura (Malm) von Meyer & Schmidt-Kaler (1989) repräsentieren bis heute den veröffentlichten Kenntnisstand hinsichtlich der regionalen faziiellen Entwicklung des Malm im tiefen Untergrund des Molassebeckens, eingehängt an Tiefbohrungen, die den Malm aufgeschlossen haben. So entspricht auch die Faziesverteilung im Malm Zeta 3 im aktuellen Bayerischen Geothermieatlas (StMWIVT 2010) immer noch der Kartendarstellung aus dem paläogeographischen Atlas von Meyer & Schmidt-Kaler (1989). Demnach liegt der Malm im Großraum München als Untersuchungsgebiet im Zentrum der sog. *Südbayerischen Riffplattform* (Abb. 20), einer lateral großflächig homogen ausgeprägten Karbonatplattform mit Massen- und Rifffazies, sowie Dickbankfazies (Treuchtlinger Fazies).

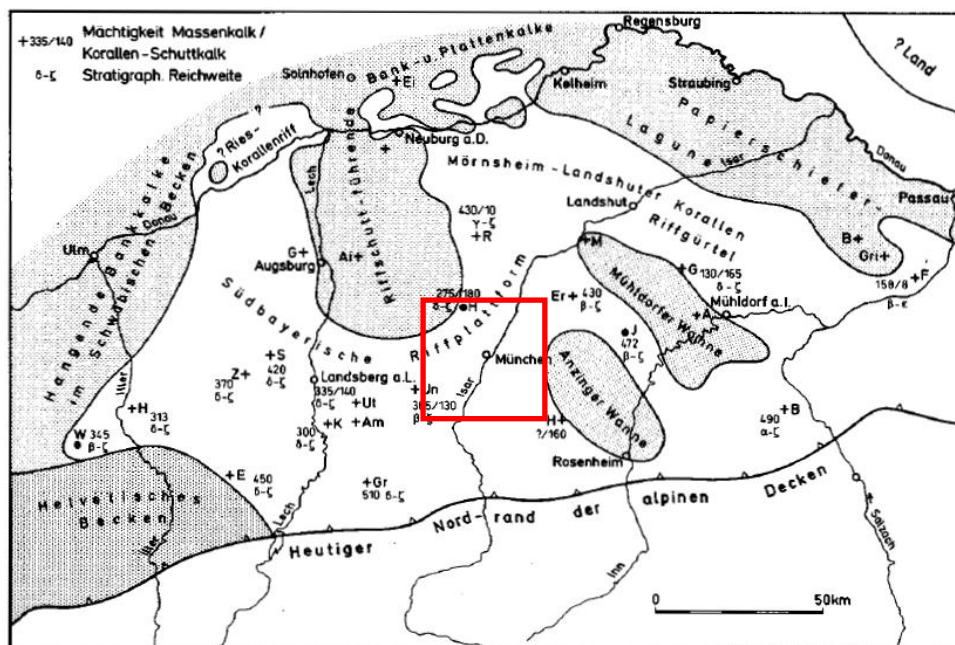


Abb. 20: Paläogeographie des Malm Zeta 3 der Südalb und des Molassebeckens-Untergrundes. Nach Meyer & Schmidt-Kaler (1996). Der Großraum München als Untersuchungsgebiet ist rot umrandet.

Die Fazies des Malm im Großraum München aus Bohrungen und Seismik

Meyer & Schmidt-Kaler (1989) weisen bei ihren Ausführungen zur Faziesverteilung jedoch darauf hin, dass innerhalb der Großfaziesräume auch kleinere Faziesbereiche, wie kleinere Plattenkalkwannen in größeren Riffarealen auftreten können. Jede neue Bohrung kann das hier skizzierte Bild hinsichtlich der Faziesverteilung weiter präzisieren. So existierten im Jahr 1989 im Umfeld des Untersuchungsgebiets lediglich vier, auf Kohlenwasserstoffexploration ausgerichtete Tiefbohrungen, die den Malm aufgeschlossen haben: Hebertshausen 1 (nordwestliche Ecke des Untersuchungsgebiets), Erding 1 (nordöstliche Ecke des Untersuchungsgebiets), Unterbrunn 3 (südwestliche Ecke des Untersuchungsgebiets) und Mattenhofen 1 (südöstliche Ecke des Untersuchungsgebiets). In den ersten drei Bohrungen wurde der Malm komplett durchteuft, in Mattenhofen wurde die Bohrung bereits im Malm Zeta eingestellt.

Durch den regelrechten „Boom“ der geothermischen Erschließung des Malm in den vergangenen zehn Jahren kann heute auf eine vielfach größere Datenbasis zum Malm im tiefen Untergrund des süddeutschen Molassebeckens zurückgegriffen werden. So wurden seit dem ersten konventionellen Geothermieprojekt in Unterschleißheim im Jahr 2002 bis Ende 2011 im Großraum München 26 Geothermiebohrungen mit über 100.000 Bohrmeter abgeteuft (Abb. 21). Zahlreiche weitere Projekte sind aktuell in der Ausführung oder Planung, so dass mit einem deutlichen Zuwachs an Bohrdaten in naher Zukunft gerechnet werden kann.

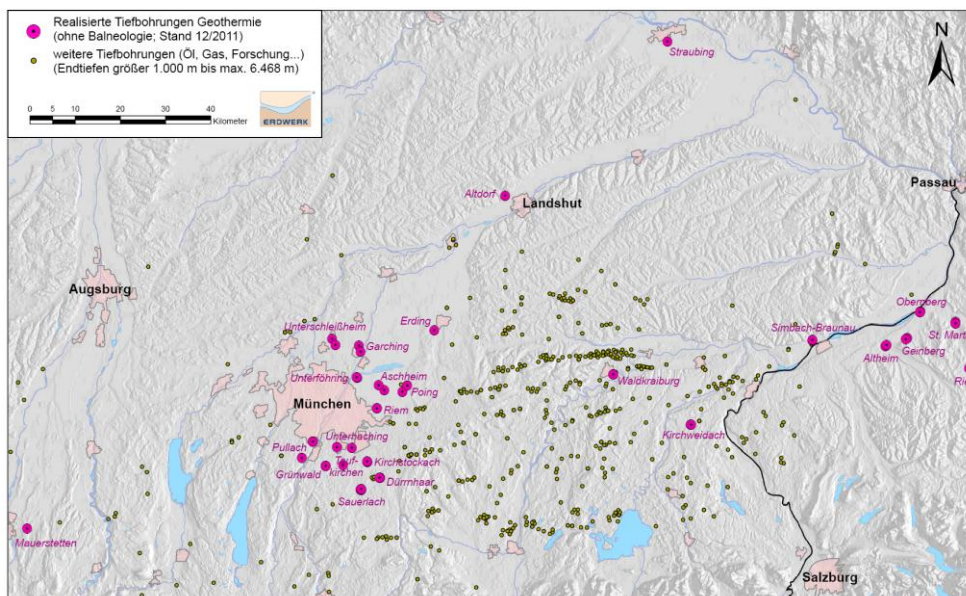


Abb. 21: Übersicht der realisierten Tiefengeothermiebohrungen im Süden Bayerns (Stand: 01.12.2011 aus Dorsch, 2012).

Im Rahmen des Forschungs- und Promotionsvorhabens konnte mit 17 Tiefbohrungen, die alle im Spülbohrverfahren niedergebracht wurden, auf einen Großteil der innerhalb des Untersuchungsgebiets vorliegenden Bohrdaten aus dem Malm zurückgegriffen werden.

Aus der faziellen Auswertung der Bohrungen auf Basis der unter Kap. 0-4 beschriebenen Methoden, ergibt sich ein sehr differenziertes Bild der lithofaziellen Ausprägung des Malm im Großraum München. Grundsätzlich können dabei folgende drei durchteufte Großfaziesbereiche unterschieden (Abb. 22):

1. Massenfazies

Eine Bohrung die typische Massenfazies im Großraum München aufschließt, zeichnet sich lithologisch durch eine ausgeprägte Dolomitisierung des Malm aus, die bis in den Malm Beta oder gar Alpha hinabreichen kann. Die Dolomite setzen dabei meist wenige zehner Meter unter Top Malm ein und variieren in ihrer Kristallmorphologie je nach primärfaziellm Ausgangssediment. Der durchschnittliche Tonanteil in der Bohrung, abgeleitet aus der GR-Messung, ist relativ niedrig ($< 10 \text{ API}^1$), d.h. die Karbonatfazies ist sehr „rein“, und im elektrischen Imagelogs sind nur selten Schichtgrenzen erkennbar (vgl. Abb. 22). Eine lithostratigraphische Unterteilung im Hangenden des Malm Gamma ist aufgrund der Dolomitisierung und der „reinen“ Massenfazies daher meist nur unter Vorbehalt möglich. Die Farbskala der Dolomite des Malm Zeta bis Delta variieren meist von weiß, über hellbraun bis hellgrau. Oft treten auch klare, durchscheinende Dolomite in Erscheinung. Der tiefe Malm Gamma bis Alpha unterscheidet sich dagegen, selbst wenn er partiell dolomitiert vorliegt, meist farblich durch einen deutlich dunkleren, braungrauen Farbton vom Hangenden und weist einen etwas höheren Tongehalt auf.

2. Übergangsfazies

Eine Bohrung die Übergangsfazies aufschließt, zeichnet sich durch eine relativ heterogene Abfolge von Dolomit und Kalk mit eingeschalteten kalkmergeligen Partien aus. Der Tonanteil ist entsprechend variabel, was in erhöhten Gamma-Ray-Werten innerhalb des Malm zum Ausdruck kommt. Im elektrischen Imagelogs wechseln immer wieder massige Partien mit Mächtigkeiten von teils einigen zehner Metern mit gebankten Partien ab (vgl. Abb. 22). Charakteristisch für Bohrungen in der Übergangsfazies sind aus dem elektrischen Imagelogs

¹ API = American Petroleum Institute, bei GR-Messung kalibrierte Maßeinheit für die Zählraten der Gamma-Strahlung

nach Steiner & Böhm (2011) interpretierte Bioherme im mittleren Malm, die nicht dolomitisiert wurden (vgl. Abb. 22). Auch ist in den dolomitisierten Partien im tieferen Malm noch die Primärschichtung im elektrischen Imagelog erkennbar. Diese Bereiche können auch den tafelbankigen Dolomiten des Malm Delta / Epsilon zugeordnet werden, wie sie in der Bohrung Moosburg SC 4 auftreten (vgl. Böhm et al., 2011). Die Dolomite werden dann wieder von geschichteten Kalken unterlagert, die dem Malm Gamma bis Alpha zuzuordnen sind.

3. Beckenfazies

Eine Bohrung die typische Beckenfazies aufschließt, zeichnet sich zunächst durch ihren vorwiegend kalkigen und kalkmergeligen Charakter aus. Die GR-Werte sind entsprechend durchgehend erhöht (teils > 30 API). Im elektrischen Imagelog tritt bis zum mittleren, im Einzelfall bis zum tieferen Malm fast ausschließlich gebankte Fazies in Erscheinung (vgl. Abb. 22). Trotzdem setzen im tieferen Malm auch massige Dolomite mit mehreren zehner Metern Mächtigkeit ein, die dem Malm Epsilon und Delta zugeordnet werden können. Die Dolomite werden ihrerseits aber wieder von gebankter, kalkiger Fazies des Malm Gamma bis Alpha unterlagert.

Die Zuordnung der Bohrungen in die drei Typen Massen-, Übergangs,- und Beckenfazies lässt sich schematisch auf einen Faziesschnitt von Meyer (1994) übertragen (Abb. 22). In den Bohrprofilen in TVD (true vertical depth) sind zur lithofaziellen Charakterisierung jeweils von links nach rechts die prozentuale Kalk-Dolomit-Verteilung, die Gamma-Ray-Messung als Maß für den Tongehalt im Karbonat, das elektrische Imagelog sowie die daraus abgeleitete Interpretation der übergeordneten Faziestypen Massen- und Bankfazies dargestellt.

Die Fazies des Malm im Großraum München aus Bohrungen und Seismik

Der in Abb. 22 verwendete Faziesschnitt von Meyer (1994) umfasst dabei eine Strecke von ca. 100 km Länge von Reichertshausen im Nordwesten bis Ampfing im Nordosten von München. Die laterale fazielle Differenzierung innerhalb der sog. Südbayerischen Riffplattform ist nach der Faziescharakterisierung der Bohrungen jedoch deutlich kleinräumiger. So zeigt sich aus den abgeteufte Geothermiebohrungen oftmals ein Fazieswechsel von einer dolomitisierten Massenfaziesbohrung hin zu einer von Bankkalk geprägten Bohrung in Beckenposition auf einer horizontalen Distanz von teils < 2 km. Als markante sind die geothermischen Dubletten Unterföhring Th 1 / Th 2 und Kirchstockach Gt 1 / Gt 2 sowie die Triplette in Pullach Th 1 bis Th3 zu nennen, deren fazielle Charakteristik zum Teil in Böhm et al. (2012) (vgl. Kap. 4) beschrieben werden. Der Ausschnitt aus einem an die Bohrungen kalibrierten Faziesmodell von Unterföhring (Abb. 23) zeigt exemplarisch den kleinräumigen faziellen Wechsel im Großraum München. Im Rahmen der Modellerstellung wurde dabei Top Massenfazies und Basis Massenfazies auf Basis von drei 2D-seismischen Profilen auskartiert und an den bestehenden Bohrungen eingehängt.

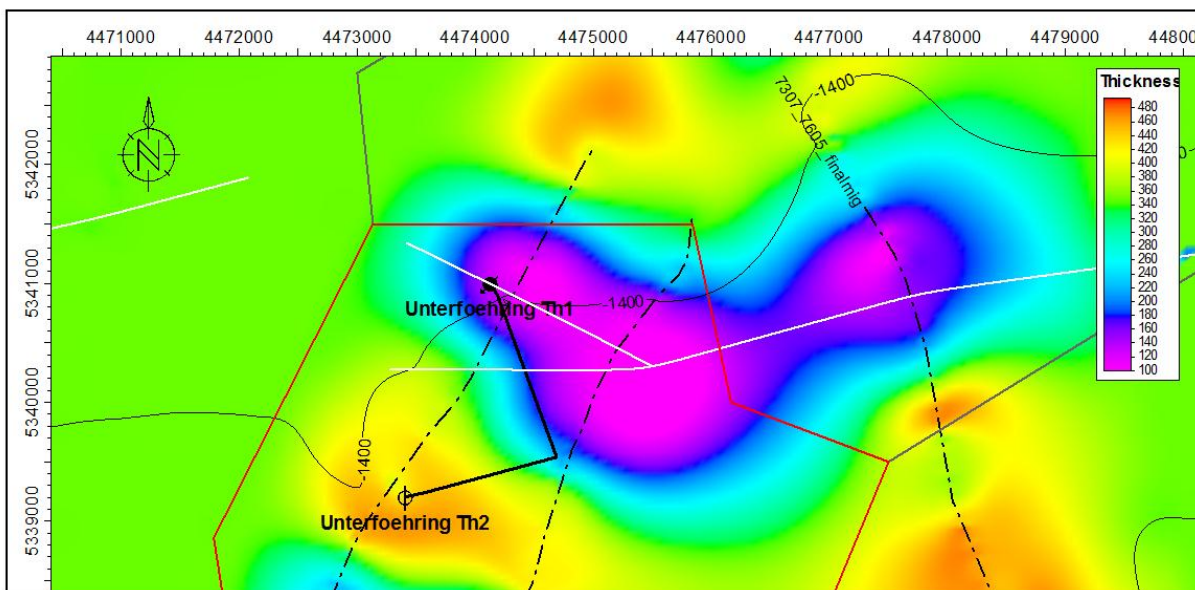


Abb. 23: Mächtigkeitsverteilung der Malm-Massenfazies im Bereich Unterföhring. Breite, schwarze Linien: Bohrungsverlauf der abgelenkten Bohrungen Unterföhring Th 1 und Th 2, dünne schwarze Linien: Isolinien Top Purbeck (m NN), rote Linie: Bewilligungsfeld Unterföhring, schwarze Haarlinien: angrenzende Konzessionsfelder, schwarz-gestrichelte Linie: 2D-Seismikprofile.

5.2 Seismische Faziesinterpretation und seismische Stratigraphie

Neben den Bohrdaten liefern reflexionsseismische Messungen, die bereits seit einigen Jahrzehnten im Zuge der Kohlenwasserstoffexploration, aber auch im Rahmen der Vorerkundung aktueller Geothermiebohrungen im Molassebecken neu aufgezeichnet wurden, die entscheidende Datengrundlage zur Erstellung von faziellen 3D-Gebirgsmodellen. Hierfür kann die seismische Fazies im Malm grundsätzlich der Textur nach in die zwei übergeordneten Faziesbereiche Massen- bzw. Rifffazies auf der einen Seite und Bank- bzw. Schichtfazies auf der anderen Seite untergliedert werden (u.a. SCHLAF et al., 2005; THOMAS & SCHULZ, 2005). In neueren, qualitativ hochwertigen seismischen Profilen mit Überdeckungsgraden im Malm > 30-fach, stellt sich die Bankfazies im Malm in Form markanter, lateral aushaltender Reflektorzüge, oft mit relativ hoher Reflektivität dar. Dies spiegelt den gebankten, schichtigen Gesteinsaufbau wieder. Die Massenfazies des Malm weist im seismischen Bild hingegen eine eher chaotisch erscheinende Textur mit vielen kurzen, konvexen Reflektorstücken auf und bildet meist Aufwölbungen (Abb. 24).

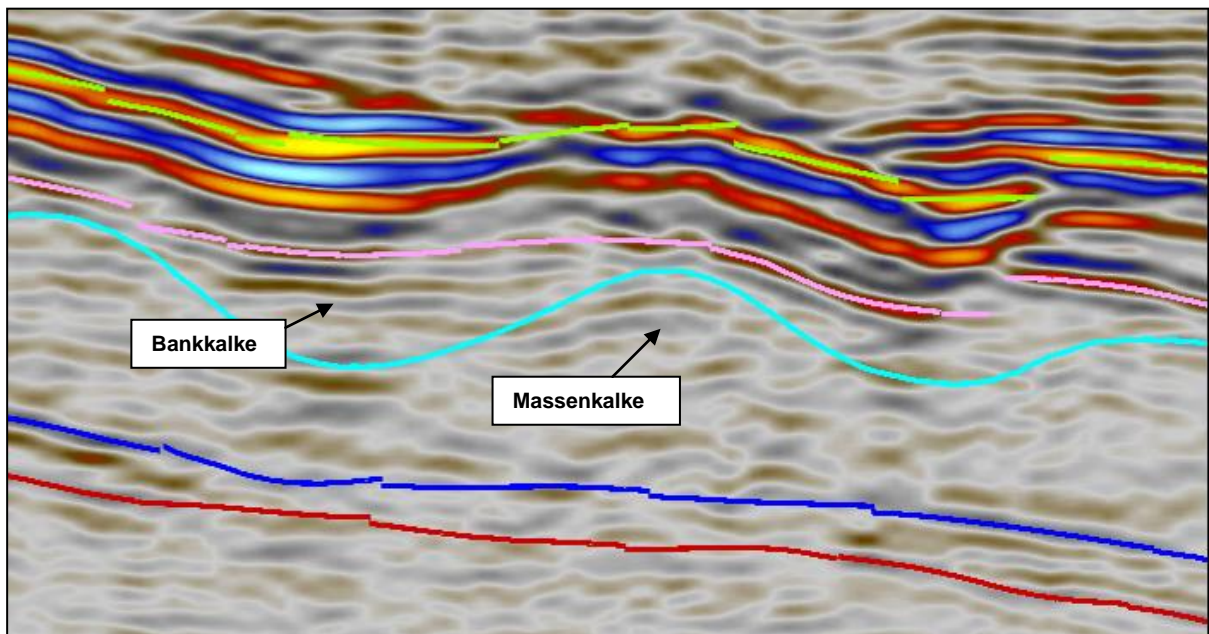


Abb. 24: Vergleich der seismischen Textur im Bereich von Massenkalken mit chaotischer Signatur und Becken mit parallelen und geschichteten Signaturen an einem seismischen Profilschnitt aus 3D-Seismik ca. 30 km südl. von München. Grüne Linie: Top Lithothamnienkalk; rosa Linie: Top Purbeck; hellblaue Linie: Top Massenfazies = Top Reservoir; dunkelblaue Linie: Top Malm Gamma = Basis Reservoir; rote Linie: Top Dogger

In 3D-seismischen Datensätzen können diese Aufwölbungen teils als kuppelförmige Gebilde, teils aber auch als morphologische Schwellen identifiziert werden (Abb. 25). Diese morphologischen Schwellen pausen sich zudem häufig bis in die überlagernde Stratigraphie durch; Einbuchtungen bzw. Aufwölbungen der Reflektoren von Top Lithothamnienkalk bis Top Purbeck (zumindest im Großraum München) zeugen von flächigen Ausbildungen der Becken- oder Massenkalk-Areale im darunterliegenden Malm.

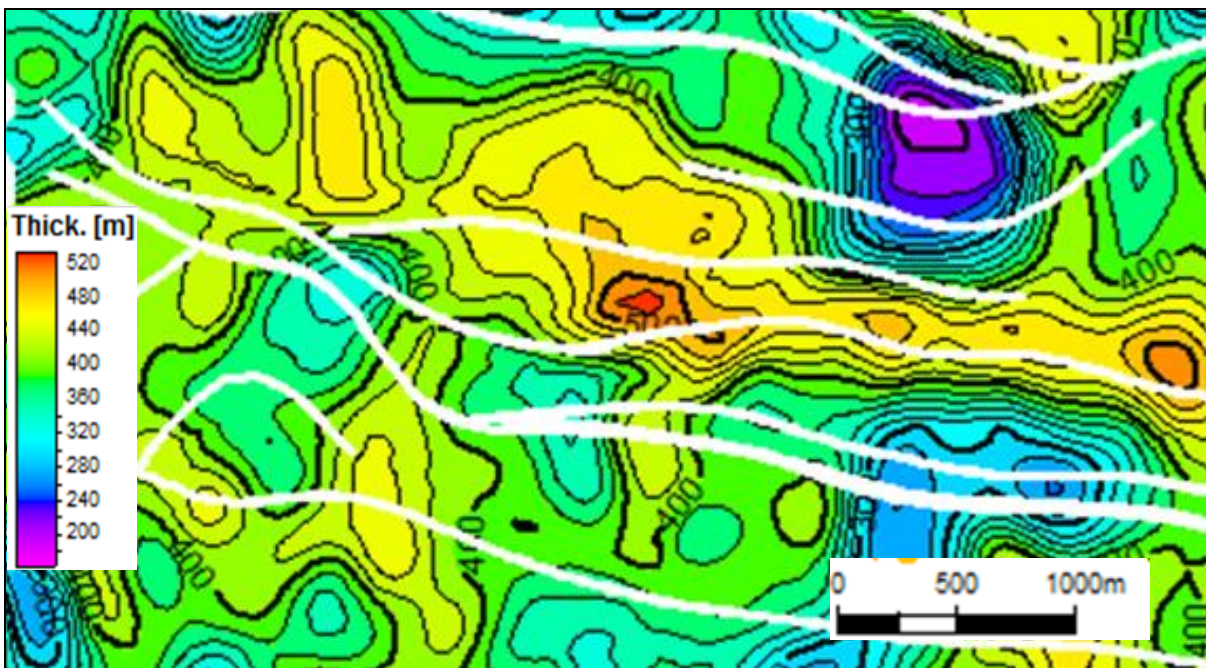


Abb. 25: Ausschnitt einer Faziesinterpretation einer 3D-Seismik, ca. 30 km südlich von München. Die Interpretation der Massenfaziesmächtigkeit zeigt eine fazielle Gliederung in Becken (blau-lila Farben) und Schwellen bzw. Kuppeln (gelb-rote Farben). Weiße Linien: Störungsausbisse an Top Massenfazies

Bei der Kartierung der Fazies in seismischen Profilen haben sich zudem geologische Ansätze der sog. seismischen Stratigraphie, eine bereits seit Jahrzehnten in der Kohlenwasserstoff-industrie etablierte Explorationspraxis (Catuneanu, 2006), als wichtiges Entscheidungskriterium herausgestellt. Durch die Evaluierung charakteristischer Reflektor-Terminierungen im seismischen Bild wie z.B. onlaps, downlaps, toplaps, werden Horizonte von genetischen sedimentären Einheiten definiert und im Datenraum korreliert (Abb. 26).

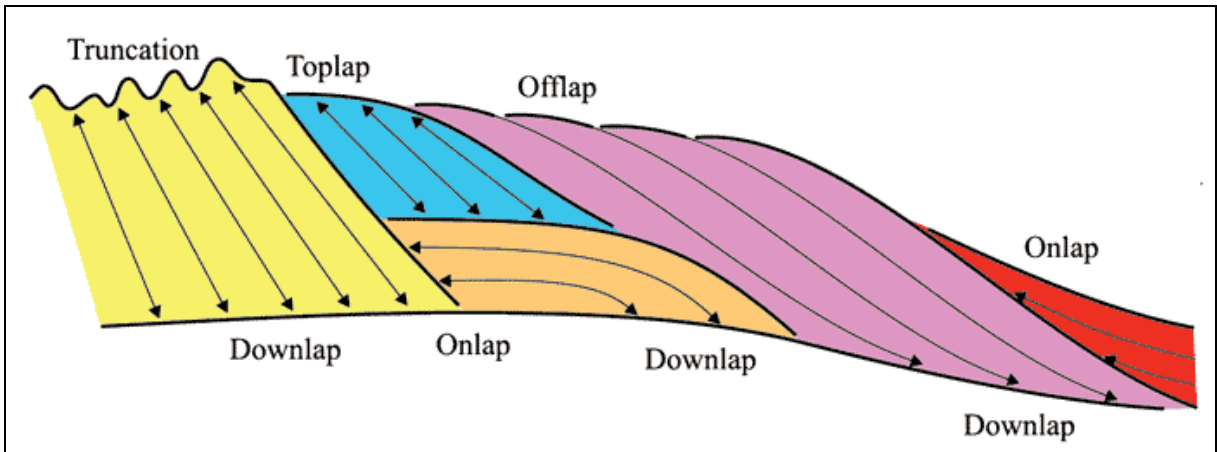


Abb. 26: Schema von typischen Reflektor-Terminierungen (nach Catuneanu, 2002 in Catuneanu, 2006).

Vor allem 3D-seismische Datensätze bieten die Möglichkeit der Anwendung einer Vielzahl von mathematischen Analysemethoden, die über die Darstellung des reinen Reflektorbildes hinausgehen. Die Berechnung und Darstellung dieser sog. seismischen Attribute zeigt in der Regel petrophysikalische Phänomene im Untergrund an, die Rückschlüsse auf die Lithofazies zulassen (z.B. Pearson & Hart, 2004). Ein Fokus wird z.B. auch auf die Interpretation von Verkarstung in 3D-Seismik mit Attributanalysen gelegt (Hartmann et al., 2010, Lüschen et al., 2011). Attribute wie die „Cosine of phase“ (Abb. 27) dienen dazu, die Auflösung von Bruchstrukturen zu erhöhen oder auch Diskontinuitäten, Störungen, Schichtungen, Sequenzgrenzen und Onlap-Strukturen zu identifizieren.

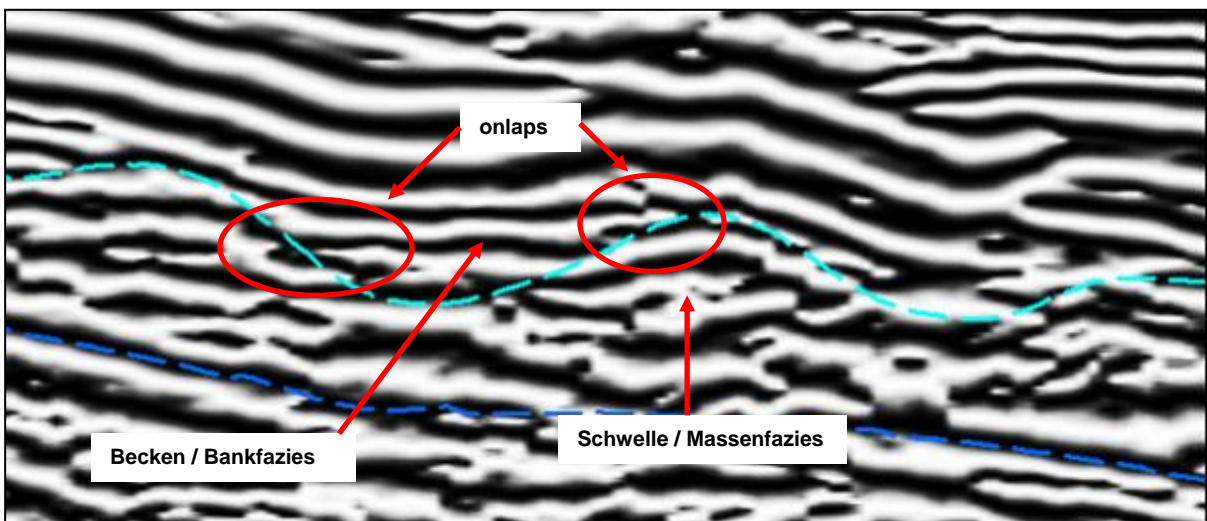


Abb. 27: Differenzierung von Becken- und Massenfazies auf Basis charakteristischer Reflektor-Terminierungen in der Kosinus-Phase. Es handelt sich um den gleichen Ausschnitt aus einem seismischen Profilschnitt einer 3D-Seismik im Süden von München wie in Abb. 24. Hellblau gestrichelt: Top Massenfazies; dunkelblau gestrichelt: Basis Massenfazies.

Die Fazies des Malm im Großraum München aus Bohrungen und Seismik

An vorhandenen Bohrungen kalibrierte seismische Profile aus dem Großraum München zeigen, dass ein typisches „3er-Reflektorenband“ in der Seismik im Bereich der Basis des Malm die von Bank- und Schichtkalken dominierte Abfolge des tieferen Malm (Malm Alpha bis Gamma) widerspiegelt (vgl. Abb. 28). Demnach muss die Basis Malm bzw. Top Dogger in den untersten markanten Reflektor mit negativer Amplitude gelegt werden. Der obere Reflektor des 3er-Bandes spiegelt dagegen die Grenze Malm Gamma / Malm Delta wider. Da sich der tiefere Malm Alpha bis Gamma im Großraum München petrophysikalisch vom darüber liegenden Malm Delta grundlegend unterscheidet, konnte somit eine sehr wichtige stratigraphische und hydrostratigraphische Grenze in der Seismik definiert werden. Der Top des Massenkalks stellt dagegen keinen durchgehenden Reflektor dar. Der Horizont markiert im Fall einer Schwellenposition den Übergang der Massenfazies zum darüber liegenden Purbeck oder einer geringmächtigen Bankfazies des obersten Malm Zeta 5-6, im Fall einer Beckenposition den Übergang zur Bankfazies im mittleren bis oberen Malm.

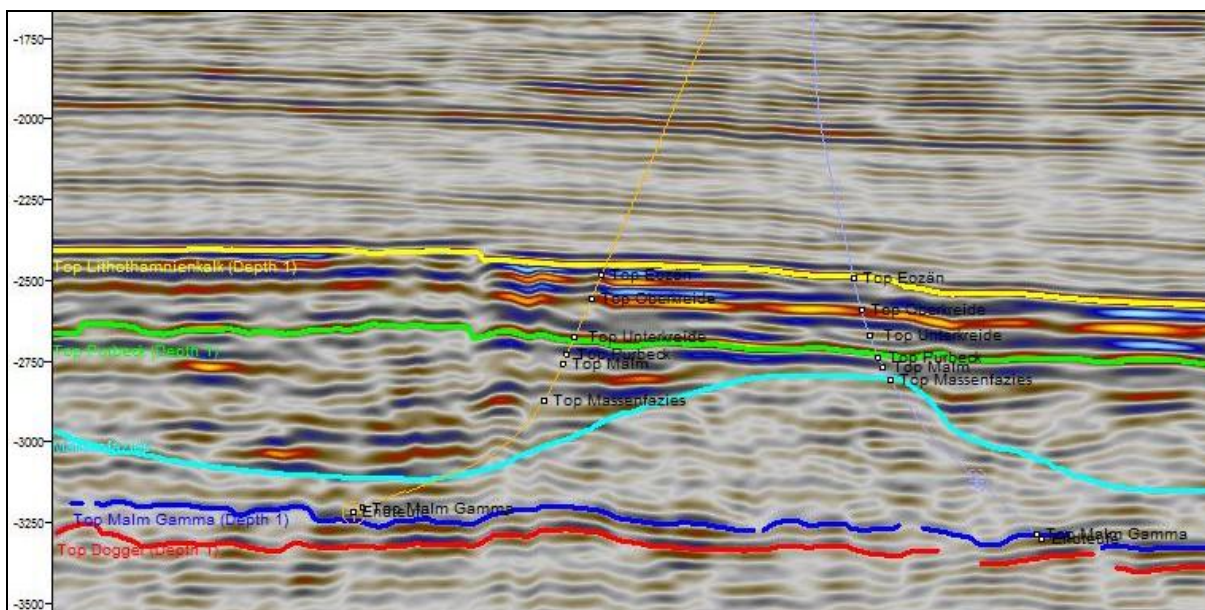


Abb. 28: An bestehenden Bohrungen kalibriertes, seismisches Profil [m u. NN]. Die Bohrungen sind auf das seismische Profil projiziert. Gelbe Linie: Top Lithothamnienkalk; grüne Linie: Top Purbeck, hellblaue Linie: Top Massenfazies, dunkelblaue Linie: Basis Massenfazies = in etwa Top Malm Gamma, rote Linie: Basis Malm Alpha.

Durch die Kombination der lithofaziellen Untersuchungen an Geothermiebohrungen und der Entwicklung einer seismischen Stratigraphie ist es gelungen, für den Großraum München ein konsistentes Lithofaziesmodell zu rekonstruieren. Die für die einzelnen Geothermieprojekte

erstellten fazies- und strukturdifferenzierten geologischen Modelle dienen in einem weiteren Schritt als Basis eines Reservoir- oder Explorationsmodells zur geothermischen Nutzung.

Die verschiedenen Ansätze zur Analyse der seismischen Daten führen im Großraum München im Malm Zeta zu einer ausgeprägten, lateralen Differenzierung in Massen- und Beckenfazies. Becken können dabei eine Erstreckung von einigen 10er Metern bis mehreren Kilometern besitzen. Gleiches gilt für Kuppeln oder Schwellen in Massenfazies. Ein Vergleich der faziellen Differenzierung aus 3D-Seismik mit einem Blockbild zur paläogeographischen Situation im Malm aus Meyer & Schmidt-Kaler (1996) (Abb. 29) zeigt, dass sich auch hier der gleiche Skalierungsansatz wiederfindet, wie er bereits zum 2D-Faziesprofil in Abb. 22 beschrieben wurde.

Die Fazies des Malm im Großraum München aus Bohrungen und Seismik

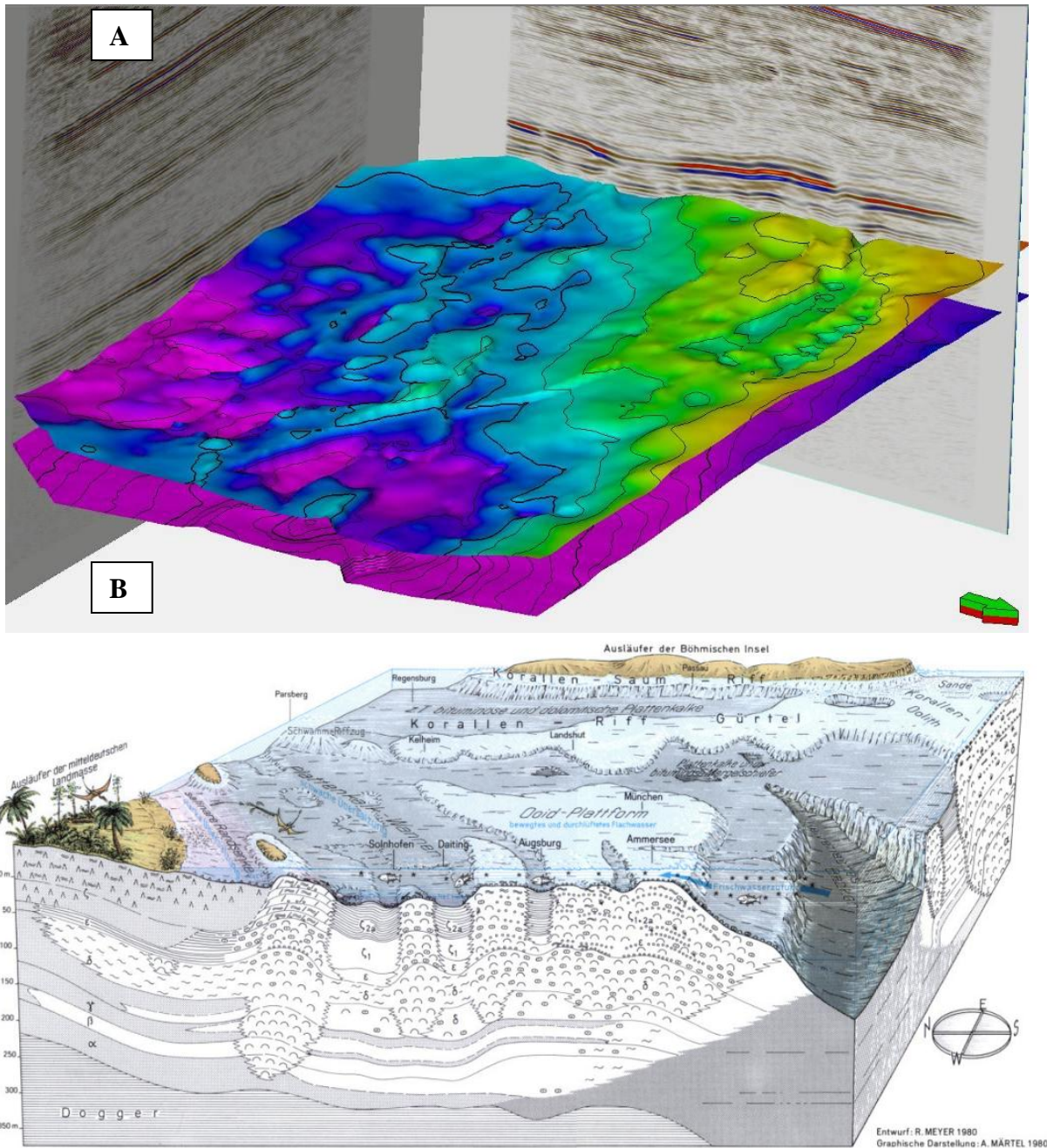


Abb. 29: Vergleich eines aus 3D-Seismik interpretierten Faziesmodells ca. 30 km südl. von München (A: Kantenlänge des Kubus ca. 5 km, oberer Horizont = Top Massenfazies; unterer Horizont = Basis Massenfazies,) mit einem Blockbild zur Paläogeographie (B: Schemazeichnung Paläogeographie des Malm in Süddeutschland) aus Meyer & Schmidt-Kaler (1996).

Die laterale Faziesentwicklung entspricht somit prinzipiell der schematischen großräumigen Darstellung im Blockbild von Meyer & Schmidt-Kaler (1996), ist in der Realität jedoch deutlich kleinräumiger.

6 Hydrothermale Nutzung des Malm im Großraum München

6.1 Hydrogeologie des Malmtiefengrundwasserleiters

Nach Stier & Prestel (1991) wird die Hydraulik des Malm in ihrer Gesamtheit durch die regionale Faziesverbreitung, die Funktionsweise der Verkarstung und die zeitliche Karstentwicklung gesteuert. Diese Kernaussage zu den hydraulischen Eigenschaften des Malm kann aus den Erkenntnissen zahlreicher Geothermiebohrungen bestätigt werden. Somit ist darin die Basis für eine weiterführende und aktuell gültige Reservoircharakterisierung des Malm im tiefen Untergrund des Großraum Münchens zu sehen.

Vor diesem Hintergrund und auf Basis der aufgeführten grundlegenden Arbeiten zur Primärfazies und Dolomitdiagenese von Malmkarbonaten (Bausch, 1968; Liedman & Koch, 1990; Koch et al., 1994; Reinhold, 1996; Koch, 1997) wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit zunächst ein Fokus auf die Bedeutung der Dolomitisierung in Hinblick auf die Zuflüsse von Thermalwasser in Geothermiebohrungen gelegt (Böhm et al. 2010, Böhm et al. 2011). Die Bohrungsanalysen im Großraum München bestätigten, dass der dolomitische Bereich für die Speichereigenschaften und die Zuflussraten im Malm von entscheidender Bedeutung ist. Die Dolomite stellen dabei potentielle Zuflussbereiche über die so genannte Matrix-Porosität und –Permeabilität. Die Speichergesteinseigenschaften hängen im Detail überwiegend von der Größe der Dolomitrhomboeder, der Dolomitkristallmorphologie, den zwischen diesen befindlichen Interkristallinopen und der im Wesentlichen aus diesen Parametern über die Weite der Porenhalsdurchmesser resultierenden Permeabilität ab (Böhm et al. 2010). Die detaillierten Kernuntersuchungen zur Lithofazies und Permeabilität an der Bohrung Moosburg SC 4 zeigen jedoch, dass die Zuflussraten über die sog. Matrix-permeabilität nur einen Teil zu der Gesamtproduktivität einer Bohrung beitragen können (Böhm et al., 2011). Ein wesentlicher Anteil des Zustroms muss demnach auch in vergleichbaren Geothermiebohrungen im Molassebecken über tektonisch beanspruchte Bereiche oder Verkarstung erfolgen.

Auch wenn der quantitative Zuflussanteil der einzelnen Komponenten Matrix, Klüftung und Verkarstung im Bohrlochmaßstab von Bohrung zu Bohrung stark variiert und nicht genau beziffert werden kann, so konnte durch die Korrelationen lithofazieller Parameter mit deren

Durchlässigkeit, die aus dem Wideranstieg aus Pumpversuchen ermittelt wurde, von Böhm et al. (2012) dezidiert aufgezeigt werden, dass die fazielle Ausprägung des Malm im Großraum München im Reservoirmaßstab den entscheidenden Einfluss sowohl auf die Reservoirhydraulik als auch auf die Produktivität der untersuchten Geothermiebohrungen hat. So zeigt sich der Trend, dass je mehr Dolomit durch eine Bohrung aufgeschlossen wurde, umso höher auch die ermittelte Gebirgsdurchlässigkeit war. Auch war die Gebirgsdurchlässigkeit umso größer, je mehr Massenfazies aufgeschlossen wurde. Des Weiteren bestätigte sich, dass vorwiegend die Massenfazies im Gegensatz zur Bankfazies zur Dolomitisierung neigt. Während in einer typischen Beckenbohrung mit geringem Anteil an Massenfazies meist nur unmittelbar die Massenfazies dolomitisiert vorliegt, so greift in einer Bohrung mit einem hohen Gesamtanteil an Massenfazies die Dolomitisierung in die Bankfazies über.

Die Produktivität einer Bohrung ist neben der Durchlässigkeit des Reservoirs von Faktoren wie dem Bohrdurchmesser, der aufgeschlossenen Bohrstrecke und der hydraulischen Anbindung des Reservoirs an das Bohrloch abhängig. Trotzdem spiegeln sich die beschriebenen kleinräumigen Faziesunterschiede letztendlich auch in den mitunter stark unterschiedlichen Produktivitäten einzelner Bohrungen eines Geothermieprojekts wider, die beispielsweise von gemeinsamen Sammelbohrplätzen abgeteuft wurden und daher am Top Malm lediglich horizontale Entfernungen zwischen 1,3 km bis max. 3 km voneinander aufweisen. So können die abgeteuften Geothermiebohrungen auch hydraulisch in Bereiche von Beckenfazies, Übergangsfazies und Massenfazies klassifiziert werden (Abb. 30).

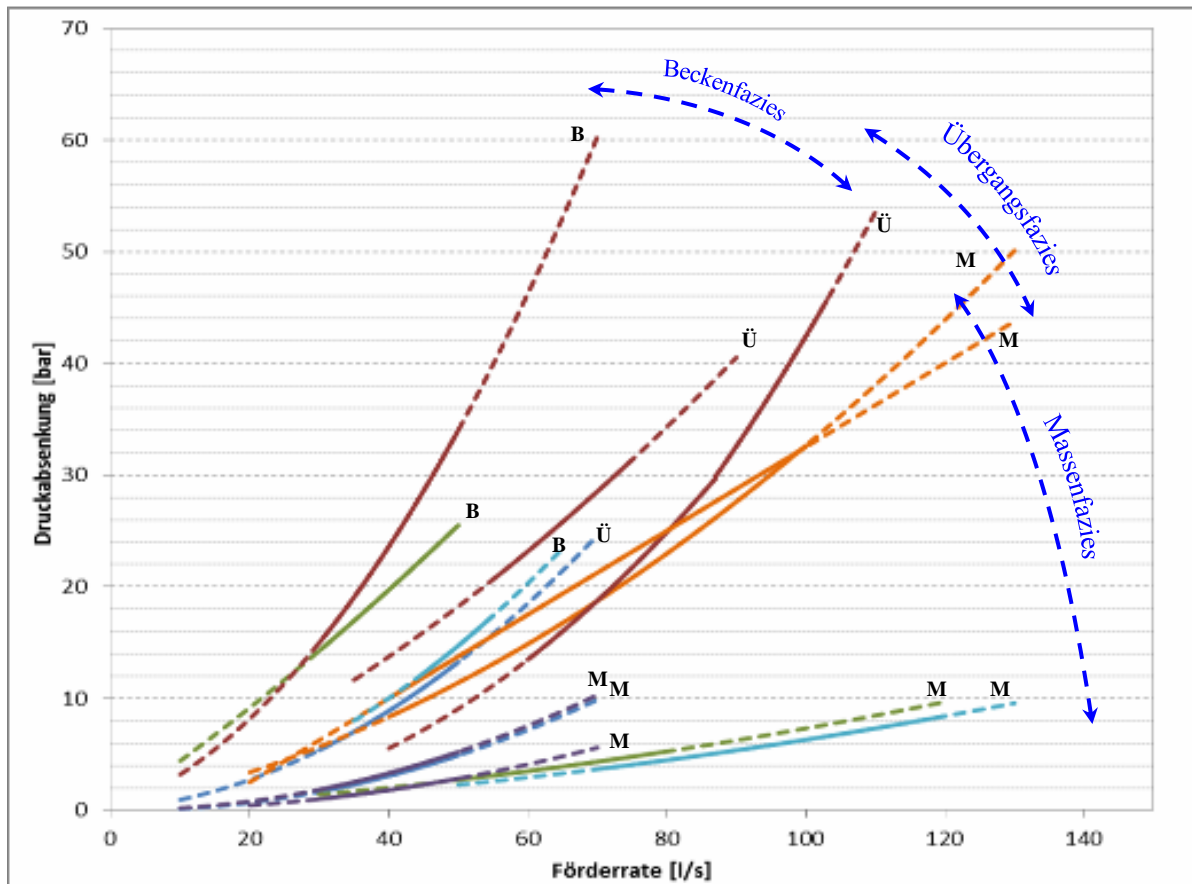


Abb. 30: Produktivitätskurven von 13 Geothermiebohrungen mit Faziescharakterisierung (Fazies: M = Massenfazies, B = Beckenfazies, Ü = Übergangsfazies). Bohrungen des gleichen Geothermieprojektes sind in der gleichen Farbe dargestellt.

Die Beobachtungen zur Auswirkung der kleinräumigen Faziesdifferenzierung auf die Hydraulik des Malm werden auch von den Ergebnissen der Auswertung hydraulischer Testdaten im Rahmen des GeotIS-Projekts (Birner et al., 2009) bestätigt. Hier werden als Beispiele die Dubletten Straubing Th 1 und Th 2 sowie Riem Th 1 und Th 2, die ebenfalls von einem Sammelbohrplatz aus abgeteuft wurden, sowie die benachbarten Geothermiestandorte Unterhaching und Pullach aufgeführt. Als Grund für die lokal teils stark schwankende Permeabilität um mehr als den Faktor 10 werden auch von Birner et al. (2009) lokale Fazieswechsel und eine unterschiedliche tektonische Beanspruchung der Gesteine vermutet. Auch Fritzer (2012) stellt für den Großraum München fest, dass neben der tektonischen Struktur die Fazies von wesentlicher Bedeutung für die Produktivität der Geothermiebohrungen im Großraum München ist.

6.2 Explorationsstrategie und Reservoirerschließung

Auf Grundlage der oben dargestellten Untersuchungen sollte bei der Auswahl des Bohrziels und eines geeigneten Bohrpfads, die Unterscheidung der beiden übergeordneten Faziesbereiche Massen- und Bankfazies in der Seismik stärker als bisher betrachtet werden und sogar in den Vordergrund der Erschließungsvarianten rücken. Idealerweise zielt eine Bohrung auf eine Riffschwelle bzw. eine Riffkuppel in Massenfazies und durchteuft anschließend diese entlang einer möglichst langen Strecke.

Sofern 2D-Seismik als Explorationsgrundlage herangezogen wird, besteht im Großraum München im mittleren bis tieferen Malm -was in etwa dem Malm Delta und Epsilon entspricht- flächendeckend die größte Aussicht, den Dolomit in Massenfazies anzutreffen. Die Aufbauphase der Ablenkung (Inklination) aus der Vertikalen sollte dann mit Erreichen des mittleren Malm abgeschlossen sein, um eine möglichst lange produktive Filterstrecke in der Massenfazies aufzuschließen. Liegt ein 3D-seismischer Datensatz und somit die Möglichkeit einer 3-dimensionalen Differenzierung in Riff- und Beckenfazies vor, sollte die Aufbauphase bereits vor Top Malm größtenteils abgeschlossen sein, um so den oberen Malm in Massenfazies mit langer Filterstrecke aufzuschließen.

Anders als im hangenden, tieferen Tertiär, ist der Aufbau großer Ablenkwinkel im Malm aufgrund seiner Gebirgsstabilität möglich. Zudem lässt sich das bohrtechnische Risiko durch den Einsatz moderner RSS-Richtbohrsysteme² bei der geothermischen Erschließung des Malm weiter eindämmen (Lentsch & Baasch, 2011).

In azimuthaler Richtung verläuft die Bohrung idealerweise in einem verhältnismäßig spitzen Winkel zur Störungszone, um diese samt einhergehender Verkarstung ebenfalls entlang einer großen Filterstrecke zu erschließen. Bei Störungen mit markanten Versatzbeträgen (>50m) sollte möglichst versucht werden, Top Malm auf der Hochscholle anzufahren und die Störung von der Hochscholle kommend zu durchteufen (Abb. 31). Bei einer Erschließung von der Tief- in die Hochscholle ist andernfalls mit einer starken „Reservoirverkürzung“ im Bohrverlauf auszugehen.

² RSS = Rotary Steerable System (automatisierte Richtbohrsysteme)

Des Weiteren kann für die Hochscholle eine im Gegensatz zur Tiefscholle verstärkte Verkarstung am Top Malm vermutet werden. Möglicherweise hängt dies von einer oft von Massenfazies dominierten Ausprägung des Malm in der an eine Störung angrenzenden Hochscholle ab. Auch aufsteigende CO₂-reiche Tiefenwässer, die Mischungskorrosion hervorrufen und kalk-aggressiv wirken, könnten eine verstärkte Verkarstung der Hochscholle bewirken.

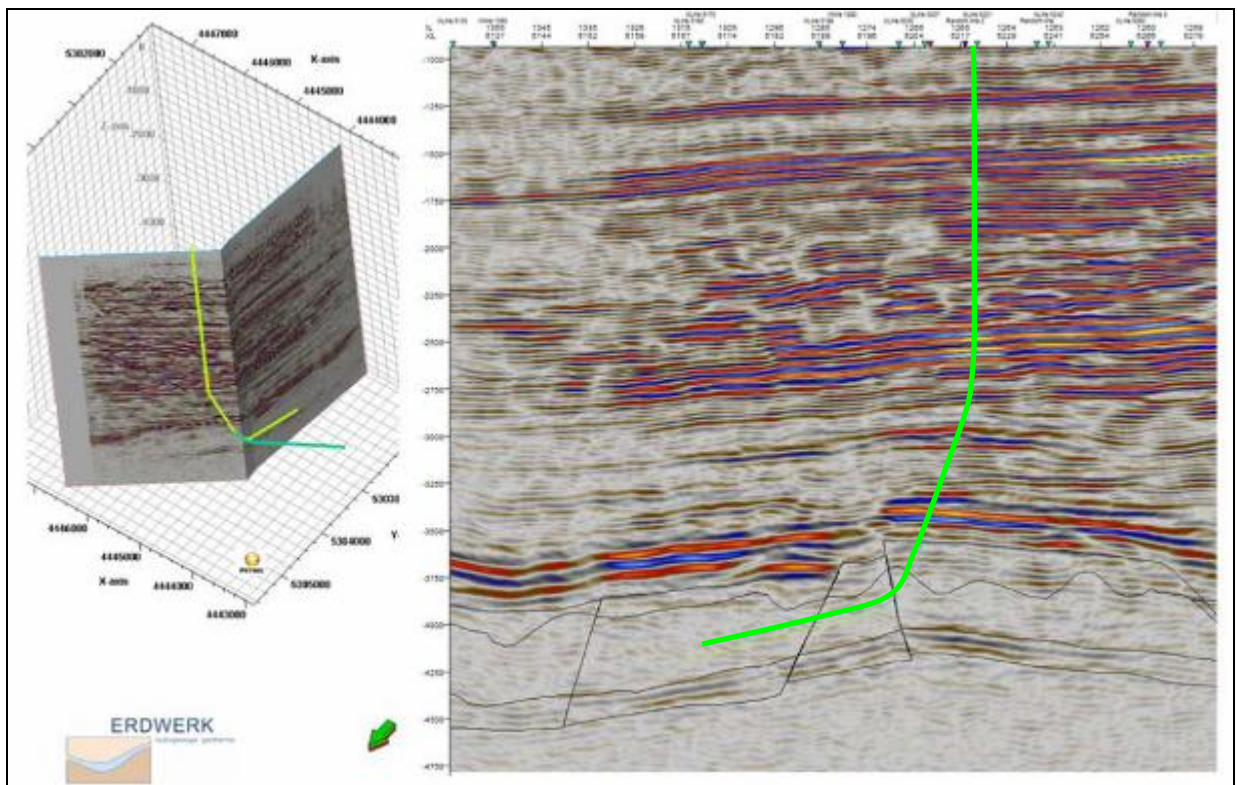


Abb. 31: Links: Beispiel eines Reservoir-optimierten Erschließungskonzepts des Malm südlich von München. Zwei Bohrfadoptionen mit unterschiedlicher azimuthaler Ausrichtung im Reservoir (hellgrün/dunkelgrün); Rechts: Die seismische Line aus einer 3D-Seismik enthält eine differenzierte Darstellung des Malm mit Basis Malm, Basis und Top Massenfazies (gem. seismischer Textur) sowie Top Malm.

Für eine tiefengeothermische Erschließung im Süden von München, mit dem Fokus auf die Stromerzeugung und den damit einhergehenden hohen Produktivitätserwartungen, ist die Ausbildung des oberen Malm (Zeta) in Massenfazies das entscheidende Kriterium. So sind die Bereiche als besonders günstig zu bewerten, in denen die Massenfazies bis zur Oberkante des Malm hinaufreicht und sich ggf. auch noch bis in die Morphologie der Kreide bzw. des tieferen Tertiärs als Hochlage durchpaust. Markante Beckenstrukturen im oberen Malm, die

sich durch Schichtfazies größerer Mächtigkeit auszeichnen, sind dagegen als „Negativgebiete“ unbedingt zu meiden.

Um eine risikominimierte und fündigkeitsoptimierte Bohrplanung zu ermöglichen, sollte in der Projektentwicklung und Vorerkundung der Fokus daher stets auf die Erstellung von möglichst detaillierten Reservoirmodellen, d.h. geologischen und hydrogeologischen Modellen auf Basis einer Fazies- und strukturgeologischen Interpretation von 3D-Seismik gelegt werden. Im Idealfall sollte als Endprodukt der Vorerkundung ein an umliegenden Bohrungen kalibriertes 3D-Reservoirmodell vorliegen, das bereits während der Projektentwicklung für eine thermisch-hydraulische Vorabsimulation geplanter Erschließungsvarianten genutzt werden kann.

7 Ausblick

Auf Basis von hochauflösenden 3D-seismischen Datensätzen, wie sie mittlerweile bei der Vorerkundung von Projekten zur Stromerzeugung zum Standard geworden sind, könnten die Bohrpfade künftig vermehrt mit bis zu einer horizontalen Neigung und ggf. entlang des Tops einer Riff- bzw. Massenfaziesschwelle geführt werden (Abb. 32). Die Wahrscheinlichkeit des Antreffens lithofaziell gebundener Verkarstung, die auch in größeren Bohrtiefen zu einer sehr guten Produktivität führen kann, ist in diesem Bereich am größten.

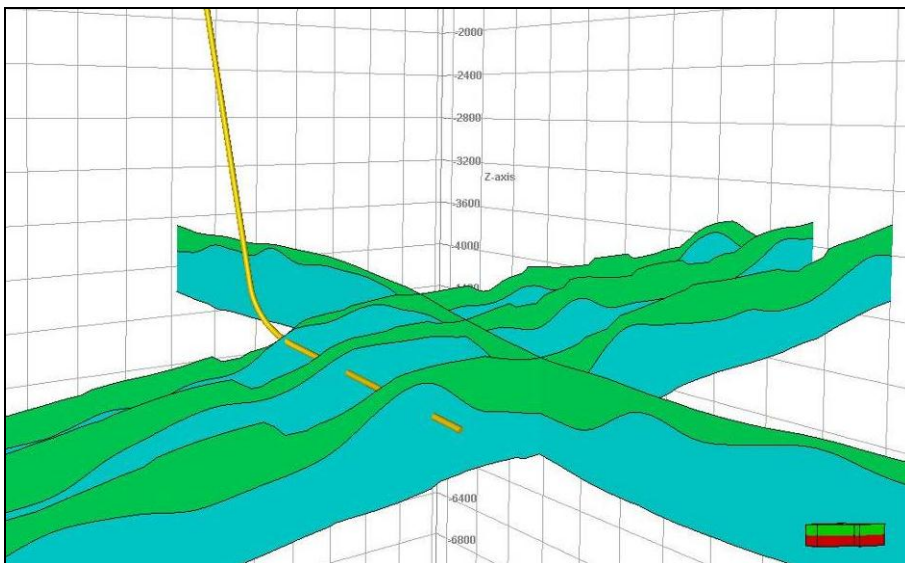


Abb. 32: Erschließung des Malm im Streichen einer Riffschwelle auf den ersten 200 m TVD unter Top Malm. Riff- bzw. Massenfazies (blau) und Bank- bzw. Schichtfazies (grün) wurden auf Basis von 3D-Seismik kartiert.

Durch eine Multilateralschließung des Malmreservoirs, wie sie im Kohlenwasserstoffbereich bereits Standard ist, könnte die Produktivität von Bohrungen und damit die Wirtschaftlichkeit des gesamten Geothermievorhabens zukünftig noch deutlich erhöht werden. Da in keiner der bisher ausgewerteten Bohrungen signifikante bohrtechnische Schwierigkeiten im Malm auftraten und die Malmkarbonate nach bisheriger Erkenntnis als sehr standfest eingestuft werden (in vielen Geothermieprojekten zur Stromerzeugung wurde daher auf einen Stützliner im Malm zu Gunsten der geringeren Rohrreibungsverluste verzichtet), ist es nur eine Frage der Zeit, bis die erste Multilateralschließung im Rahmen einer Malm-Geothermiebohrung realisiert wird.

Auch zeichnet sich aktuell ab, dass Attributanalysen der 3D-Seismik in Zukunft eine immer wichtigere Rolle einnehmen. Hierbei ist es wichtig, die Attributanalysen, die unterstützend bei der Erstellung eines Reservoirmodells zur faziellen Differenzierung des Malm verwendet

werden (vgl. Kapitel 5.2), von den Attributanalysen zu unterscheiden, die zur petrophysikalischen Interpretation des Reservoirs herangezogen werden. Vor einer Attributanalyse hinsichtlich petrophysikalischer Eigenschaften des Reservoirs sollte im Malm stets eine geologische Differenzierung entsprechend der hydrogeologischen Einheiten (Massen- bzw. Beckenfazies) stattfinden, da sonst beispielsweise nicht eindeutig zwischen der Gesamtporosität in mikritischen Kalkmergeln und nutzbarer Porosität in dolomitierten Massenkalken unterschieden werden kann. Letztendlich können die Attributanalysen jedoch erst nach erfolgter Bohrung kalibriert und mit geologischen Eigenschaften belegt werden. Der detaillierten Reservoircharakterisierung der zukünftig abgeteufte Bohrungen und der Evaluierung und Kalibrierung der zu Grunde liegenden 3D-Seismik kommt daher zukünftig eine noch bedeutendere Rolle als bisher zu.

Die wahrscheinlich größten, geologischen aber auch bohrtechnischen Herausforderungen der bisherigen tiefengeothermischen Erschließung des Malm im süddeutschen Molassebecken warten u.a. in Form der aktuell in Planung befindlichen Projekte Holzkirchen, Königsdorf oder Traunstein. Die genannten Geothermievorhaben haben gemeinsam, dass sie am Nordrand der Nördlichen Kalkalpen liegen und vertikale Bohrtiefen von bis zu 6.000 m zum Ziel haben. Aber auch die kurz vor der Ausführung stehenden Projekte Bernried und Geretsried weisen geplante Erschließungstiefen von bis zu 5.000 m TVD auf. In Hinblick auf die dort zu erwartende Durchlässigkeit des Reservoirs ist zu beachten, dass beispielsweise gemäß Lucia (2007) eine Verschlechterung der Permeabilität in Karbonaten mit Zunahme der Tiefenlage zu erwarten ist. Jedoch zeigen die bislang ausgewerteten Geothermiebohrungen im Großraum München mit Erschließungstiefen zwischen ca. 2.500 m TVD und ca. 4.500 m TVD keine eindeutige Korrelation zwischen Hydraulik und Tiefenlage des Reservoirs. Im Rahmen von Schüttungsprognosen wurde daher aufgrund der nicht möglichen Quantifizierbarkeit eine Verschlechterung der Hydraulik mit der Tiefe zunächst außen vorgelassen. Für wirtschaftliche Betrachtungen sollte trotzdem eine Verringerung der Durchlässigkeit aufgrund von geringer Porosität (z.B. Kompaktion des Korngerüsts durch den höheren Überlagerungsdruck), ungünstiger Diagenese (z.B. Calcit ausfällung in Porenräumen oder Klüften) oder vergleichbar geringer Verkarstung (z.B. aufgrund fehlender Expositionszeit des Malm durch kontinuierliche Kreidesedimentation) in Betracht gezogen werden.

Um diesen möglichen, ungünstigen geologischen Bedingungen entgegenzuwirken und eine wirtschaftliche Produktivität der Bohrungen im Vorfeld zu untermauern, sollten –wie am Anfang des Ausblicks und im vorherigen Kapitel 6.2 beschrieben- bereits in der Planung möglichst lange Ablenkstrecken im Reservoir und ggf. Multilateralkonzepte berücksichtigt werden. Die Produktivität -und damit Wirtschaftlichkeit der Bohrung- hängt somit zum einen von der geologisch-faziellen Ausgangssituation und zum anderen von der zu Grunde liegenden Explorationsstrategie ab.

In faziell und damit hydraulisch günstigen Regionen, in denen gleichzeitig ein günstiger geothermischer Gradient und ausreichend hohe Temperaturen zur geothermalen Wärme- und / oder Stromerzeugung vorliegen, wird zukünftig eine starke Verdichtung der Geothermiebohrungen stattfinden. Diese Entwicklung ist aktuell im Großraum München zu beobachten. Als Vorreiter der kommunalen Wärmeversorgung sind z.B. das Projekt Pullach i. Isartal mit der Erweiterungsbohrung Pullach Th 3 oder die geplante Erweiterung der geothermischen Nutzung in Unterföhring durch eine weitere Dublette Th 3 / Th 4 zu nennen.

Um einen Großteil des geothermischen Potentials des Malm im Großraum München nutzbar zu machen, wird in Zukunft die geothermische Nutzung möglicherweise zu einer derart starken Verdichtung führen, dass die fazielle Ausprägung des Malm bei der der Wahl des Bohrziels zunächst wieder etwas in den Hintergrund rückt. So hat sich gezeigt, dass auch Bohrungen in Beckenfazies eine ausreichend hohe Durchlässigkeit aufweisen, um als Reinjektionsbohrungen –bei hohen Injektionsraten ggf. unter Zuhilfenahme einer Reinjektionspumpe- genutzt zu werden. Bei einer zunehmenden geothermischen Nutzung des Malm steht dann zukünftig ein komplexes, bestenfalls feldestübergreifendes Reservoirmanagement im Vordergrund, dem ein flexibles Fazies- und strukturdifferenziertes Reservoirmodell zu Grunde liegt, das jederzeit an neue Erkenntnisse aus Bohrungen und Seismik angepasst werden kann.

8 Danksagung

Das Forschungsverbundvorhaben, das der vorliegenden Arbeit zu Grunde liegt, entstand im Jahr 2008 auf Initiative von Herrn Prof. Dr. M. Schneider und Herrn Dr. A. Schubert. Vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) wurden über den Projektträger Jülich dafür Projektmittel über einen Bewilligungszeitraum von 3 Jahren bereitgestellt.

Herrn Prof. Dr. Michael Schneider möchte ich für die Betreuung der vorliegenden Arbeit sowie das in mich gesetzte Vertrauen sehr herzlich danken.

Ebenso möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Roman Koch für die fachliche Unterstützung, die Augen öffnenden Analogiestudien im Aufschluss und die zahlreichen, Früchte tragenden Diskussionen herzlich bedanken.

Mein besonderer Dank gilt dem Geschäftsführer der Erdwerk GmbH, Herrn Dr. Achim Schubert. Er hat mich von Beginn meiner Anstellung bei Erdwerk an zur Promotion ermutigt und stets die kreative Basis für Forschung und Entwicklung neben dem „normalen Projektalltag“ gefördert.

Bei meinen ebenfalls promovierenden Arbeitskollegen und Mitstreitern Ulrich Steiner und Alexandros Savvatis möchte ich mich für die hervorragende Teamarbeit bedanken. Ohne sie wäre die Arbeit in dieser Form nicht möglich gewesen.

Genauso gilt mein Dank allen Erdwerk-Kollegen/innen, die mich immer bei meiner Arbeit während der letzten Jahre unterstützt haben. An dieser Stelle möchte ich mich natürlich explizit bei meinem Kollegen Dr. Klaus Dorsch bedanken, der nicht nur mit seinen fachlichen Beiträgen das Forschungsvorhaben bereicherte. Als Betreuer meiner Diplomarbeit und damals selbst noch Doktorand, hat er mich bei hydrogeologischen Geländearbeiten im Rahmen eines Geothermieprojekts in Südchile im wahrsten Sinne „ins kalte Wasser“ geschmissen und so letztendlich mit meinen geothermischen Werdegang beeinflusst.

Bei Johannes Birner und Dr. Lutz Thomas der Arbeitsgruppe Hydrogeologie der Freien Universität Berlin möchte ich mich für die Zusammenarbeit im Forschungsverbundvorhaben bedanken.

Tatkräftige Unterstützung kam zudem von Johannes Linde im Rahmen seiner Werkstudententätigkeit, von Dr. Martin Elsner bei der Regionalgeologie, von Renate Höferle beim Ausmerzen einiger Fehlerleutchen, von Dr. Caro Leiter bei den Literaturziten und nicht zuletzt von unserem Neuzugang, aber bereits Experten auf dem Gebiet der Lithofazies, Sebastian Dirner.

Meiner Familie, insbesondere meiner Mutter und meinem Sohn otto (auch wenn er sich dessen vielleicht noch nicht ganz bewusst war) möchte ich für die mentale Unterstützung, meinem Bruder Andi für die Mithilfe bei der formellen Endredaktion danken.

9 Literatur³

- ANDRES, G. (1985): Fränkische Alb und Malmkarst des Molassebeckens. Grundwassergleichenkarte von Bayern 1:500.000 mit Erläuterungen. - Schriftenreihe Bayer. Land. f. Wasserw., **20**: 23–25; München.
- BACHMANN, G.H., MÜLLER & M. WEGGEN, K. (1987): Evolution of the Molasse Basin (Germany, Switzerland). - In: P.A. ZIEGLER (Hrsg.): Compressional intraplate deformations in the Alpine Foreland, *Tectonophysics*, **137**, 77–92; Amsterdam.
- BAUSCH, W.M. (1963): Der Obere Malm an der unteren Altmühl. - Nebst Untersuchungen über das Riffproblem. – Erlanger Geol. Abh., **49**: 104-111; Erlangen.
- BAUSCH, W.M. (1968): Clay content and calcite crystal size of limestones. - *Sedimentology*, **10**: 71-75.
- BAUSCH, W.M., ECKSTEIN, G.-O. & HOEFS, J. (1986): Zur Genese der „Braunkalke“ des fränkischen Malms. - *Geologica Bavarica*, **89**: 189-207; München.
- Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie (StMWIVT) (2010): Bayerischer Geothermieatlas – Hydrothermale Energiegewinnung. 92 S.; München.
- BERTLEFF, B., JOACHIM, H., KOZIOROWSKI, G. LEIBER, J., OHMERT, W., PRESTEL, R., STOBER, I., STRAYLE, G., VILLINGER, E. & WERNER, J. (1988): Ergebnisse der Hydrogeothermiebohrungen in Baden-Württemberg. - *Jh. geol. Landesamt Baden-Württemberg*, **30**: 27-116.
- BIRNER, J., FRITZER, T., JODOCY, M, SCHNEIDER, M. &STOBER, I. (2009): Molassebecken. – In: Schulz, R. (Hrsg.): Aufbau eines geothermischen Informationssystems für Deutschland – Endbericht. – LIAG–Bericht, Archiv–Nr. 0128452, Hannover.
- BLANK, C. (1998): Stratigraphische Neuaufnahme und Fazieskartierung 1 : 5000 des Gebietes Eberswang, Dollnstein, Breitenfurt.- Unveröffentlichte Diplomkartierung, 104 S.; Univ. Erlangen.
- BÖHM, F., SCHWARZ, F. & KRAUS, O. (2007): 2D-seismische Untersuchungen für das Geothermieprojekt Unterföhring bei München. Interpretation einer Riffstruktur im Malm als bevorzugtes Erschließungsziel für Thermalwasser. – *Geoth. En.*, **55**: 14-16; Geeste.
- BÖHM, F., KOCH, R., HÖFERLE, R. & BAASCH, R. (2010): Der Malm in der Geothermiebohrung Pullach Th 2 – Faziesanalyse aus Spülproben (München, S-Deutschland). - *Geol. Bl. NO-Bayern*, **60**: 17-49; Erlangen.

³ Das Literaturverzeichnis umfasst sämtliche Literaturzitate der vorliegenden Arbeit inklusive der der Tagungsbeiträge im Anhang A

Literatur

BÖHM, F., SAVVATIS, A. & STEINER, U. (2011): Lithofazielle Reservoircharakterisierung als Schlüssel zur geothermischen Nutzung im Großraum München. Vortrag. – Der Geothermiekongress 2011; Bochum.

BÖHM, F., BIRNER, J., STEINER, U., KOCH, R., SOBOTT, R., SCHNEIDER, M. & WANG, A. (2011): Tafelbankiger Dolomit in der Kernbohrung Moosburg SC 4: Ein Schlüssel zum Verständnis der Zuflussraten in Geothermiebohrungen (Östliches Molassebecken, Malm Delta-Zeta; Süddeutschland). - Z. Geol. Wiss., **39**: 117-157; Berlin.

BÖHM, F., SAVVATIS, A., STEINER, U., SCHNEIDER, M. & KOCH, R. (2012): Lithofazielle Reservoircharakterisierung zur geothermischen Nutzung des Malm im Großraum München. – Grundwasser; Berlin, im Druck (DOI: 10.1007/s00767-012-0202-4).

BOURDET, D. (2002): Well test analysis: the use of advanced interpretation models - handbook of Petroleum Exploration and Production, 3.426 S.; Amsterdam.

BOURDET, D.P., WHITTLE, T.M., DOUGLAS, A.A. & PIRARD, Y.M. (1983): A New Set of Type Curves Simplifies Well Test Analysis. - World Oil, **May**: 95-106; Houston.

BOURDET, D. AYOUB, J.A. & PIRARD, Y.M. (1989): Use of Pressure Derivative in Well-Test Interpretation. - SPEFE, **June**: 293-302.

CATUNEANU, O. (2006): Principles of sequence stratigraphy. 375 S.; Amsterdam.

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

DORSCH, K., 2012: 10 Jahre geothermische Exploration im Molassebecken / Ein Fazit. - In Media Mind (Hrsg.): Geothermie in Bayern., 28-32; München.

DUNHAM, R. (1962): Classification of carbonate rocks according to depositional texture. - In: HAM, W. E. (Hrsg.): Classification of carbonate rocks. - AAPG Mem., **1**: 108-121; Tulsa.

EINSELE, G., JOSOPAIT, V., SEILER, K.P. & WERNER, J. (1983): Tiefe Grundwässer. Bedeutung, Begriffe, Eigenschaften, Erkundungsmethoden. - DVWK-Schriften, **61**, 1-108; Hamburg.

ERDWERK GMBH (2008): Schlussbericht Geothermiebohrung Pullach Thermal 2, unveröffentlicht.

FOLK, R.L. (1959): Practical petrographical classification of limestones. - AAPG Bull., **43**: 1-38; Tulsa.

FOLK, R. L. (1962): Spectral subdivision of limestone types. - in: HAM, W. E. (ed.): Classification of carbonate rocks. - AAPG Mem., **1**, 62-84, Tulsa.

FRICKE, S. & SCHÖN, J. (1999): Praktische Bohrlochgeophysik. 426 S.; Stuttgart

FRISCH, H. & HUBER, B. (2000): Ein Hydrogeologisches Modell und der Versuch einer Bilanzierung des Thermalwasservorkommens für den Malmkarst im Süddeutschen und im

Literatur

angrenzenden Oberösterreichischen Molassebecken. – Hydrogeol. Umwelt, **20**: 25-43; Würzburg.

FRITZ, P. (1965): Zur Genese von Dolomit und zuckerkörnigem Kalk im Weißen Jura der Schwäbischen Alb (Württemberg). Mikroskopische Untersuchungen und Isotopenanalysen. – Arb. Geol. Paläont. Inst., 100 S.; Stuttgart.

FRITZER, T.: (2012): Regionales geologisches 3D-Strukturmodell. – In: Schulz, R. (Hrsg.): Geothermische Charakterisierung von karstig-klüftigen Aquiferen im Großraum München – Endbericht. – LIAG-Bericht, Archiv-Nr. 0130392, Hannover.

GEYER, O.F. & GWINNER, M.P (1986): Geologie von Baden-Württemberg. - 472 S.; Stuttgart.

GREGG, J.M. & SIBLEY, D.F. (1984): Epigenetic dolomitization and the origin of xenotopic dolomite texture. - J. Sed. Petrol., **54**: 908-931; Tulsa.

GWINNER, M.P. (1976): Origin of the Upper Jurassic of the Swabian Alb (Southwest Germany). - Contrib. Sedimentol., **5**: 1-75; Stuttgart.

HARTMANN, VON L., BUNESS, H., THOMAS, R. & SCHULZ, R., (2010): Seismische Exploration in der Molasse als Grundlage für die Reservoirsimulation. – Der Geothermiekongress 2010; 6 S.; Karlsruhe.

HECKERT, M. (1997): Stratigraphische und fazielle Kartierung des Malm auf Blatt Dollnstein.- Unveröffentlichte Diplomkartierung 69 S.; Univ. Erlangen.

HUBER, B.: (2012): Hydrogeologisches Modell. – In: Schulz, R. (Hrsg.): Geothermische Charakterisierung von karstig-klüftigen Aquiferen im Großraum München – Endbericht. – LIAG-Bericht, Archiv-Nr. 0130392, Hannover.

JODOCY, M. & STOBBER, I. (2009): Geologisch-geothermische Tiefenprofile für den südwestlichen Teil des Süddeutschen Molassebeckens. - Z. dt. Ges. Geowiss., **160**: 359-366; Stuttgart.

JOUBERT, J.B. & MAÏTAN, V. (2010) Borehole image logs for turbidite facies identification: core calibration and outcrop analogues. - First Break, **28**: 55-66.

KIMMIG, B., WERNER, W. & AIGNER, TH. (2001): Hochreine Kalksteine im Oberjura der Schwäbischen Alb – Zusammensetzung, Verbreitung, Einsatzmöglichkeiten. - Z. angew. Geol., **47**: 101-108.

KOCH, R. (1991): Faziesanalyse aus Spülproben.- Zbl. Geol. Paläontol., I, **8**: 1029-1043; Stuttgart.

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; Erlangen.

Literatur

- KOCH, R. (2000): Die neue Interpretation der Massenkalk des Süddeutschen Malm und ihr Einfluß auf die Qualität von Kalksteinen für technische Anwendungen. - *Archaeopteryx*, **18**: 43-65.
- 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; Erlangen.
- KOCH, R., FLÜGEL, E., DIMKE, M., HASSELMEYER, B., MICHEL, U., ROSSNER, R. & SOBOTT, R. (1997): Die „Angewandte Faziesforschung“ am Institut für Paläontologie in Erlangen.- *Zbl. Geol. Paläont.*, 9, 130-174, Stuttgart.
- KOCH, R., HORNING, T., PFEIFFENBERGER, S., WAGNER, K. & WEISS, C. (2003): Becken-Hang-Plattform-Übergänge im Kimmeridge 1-3 der Nördlichen Frankenalb (Exkursion F am 24. April 2003). - *Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver., N.F.*, **85**: 169-201.
- KOCH, R. & WEISS, C. (2005): Basin-Platform Transitions in Upper Jurassic Limestones and Dolomites of the Northern Franconian Alb (Germany).- *Zitteliana*, **B26**: 43-56; München.
- KOCH, R., BACHMANN, G.H. & MÜLLER, M. (2010): Fazies des Oberen Jura (Malm) der Bohrungen Scherstetten 1 und 2 (Molasse-Becken, Süddeutschland) und ihre Bedeutung für die geothermische Exploration. - *Z. geol. Wiss.*, **38**: 327-351; Berlin.
- KOTT, R. (1989): Fazies und Geochemie des Treuchtlinger Marmors (Unter- und Mittel-Kimmeridge, Südliche Frankenalb). – *Berliner Geowiss. Abh., A* **111**, 115 S., Berlin
- LANG, H.B. (1964): Dolomit und zuckerkörniger Kalk im Weißen Jura der mittleren Schwäbischen Alb (Württemberg). - *N. Jb. Geol. Paläont. Abh.*, **120**: 253-299.
- LEMCKE, K. (1976): Übertiefe Grundwässer im süddeutschen Alpenvorland. *Bull. Ver. schweiz. Petroleum-Geol. u. -Ing.*, **42**: 9-18.
- LEMCKE, K. (1988): Das bayerische Alpenvorland vor der Eiszeit. *Geologie von Bayern I*, 115 S., Stuttgart.
- LEMCKE, K. & TUNN, W., (1956): Tiefenwasser in der süddeutschen Molasse und in ihrer verkarsteten Malmunterlage. - *Bull. Ver. Schweiz. Petroleum-Geol. und Ing.*, **23**: 35-56.
- LENTSCH, D. & BAASCH, R. (2011): Effizientes Tiefbohren in der Geothermie. – *Ingenieurspiegel*, **4**: 66-67; Bingen.
- LIEDMANN, W. (1992): Diagenetische Entwicklung süddeutscher Malmkarbonate (unter Berücksichtigung Lumineszenz- petrographischer, fluid inclusion und geochemischer Untersuchungsmethoden). – *Dissertation*, 307 S.; Univ. Heidelberg.
- LIEDMANN, W. & KOCH, R. (1990): Diagenesis and fluid inclusions of Upper Jurassic Sponge-Algal Reefs in SW-Germany. - *Facies*, **23**: 241-268; Erlangen.

Literatur

- LOGAN, J. (1964): Estimating Transmissibility from Routine Production Tests of Water Wells. *Ground Water*, **2**, 35-37.
- LUCIA, F.J. (1999): Carbonate reservoir Characterization, 226 S.; Berlin.
- LUCIA F. J., 2007: Carbonate Reservoir Characterization - An Integrated Approach, 2. Aufl.. – 336 S.; Heidelberg.
- LÜSCHEN, E, DUSSEL, M., THOMAS, R., & SCHULZ, R. (2011): 3D seismic survey for geothermal exploration at Unterhaching, Munich, Germany. *First Break*, **29**: 45-54.
- MEDER, K. (1987): Dedolomitisierung in oberjurassischen Karbonatsedimenten der Bohrung TB-3 Saulgau (W-Molasse, SW-Deutschland). - *Facies*, **17**: 189-196; Erlangen.
- MEYER, R.K.F. (1972): Stratigraphie und Fazies des Frankendolomits (Malm). 1. Teil: Nördliche Frankenalb. *Erlanger geol. Abh.*, **91**: 28 S.; Erlangen.
- MEYER, R.K.F. (1975): Mikrofazielle Untersuchungen in Schwamm-Biohermen und – Biostromen des Malm Epsilon (Ober-Kimmeridge) und obersten Malm Delta der Frankenalb. - *Geol. Bl. NO-Bayern*, **25**: 149-177; Erlangen.
- MEYER, R.K.F. (1977a): Stratigraphie und Fazies des Frankendolomits und der Massenkalk (Malm). 3. Teil: Südliche Frankenalb. - *Erlanger Geol. Abh.*, **104**: 40 S.
- MEYER, R.K.F. (1977b): Mikrofazies im Übergangsbereich von der Schwammfazies zur Korallen-Spongiomorphiden-Fazies im Malm (Kimmeridge-Tithon) von Regensburg bis Kelheim. – *Geol. Jb., A*, **37**: 33-69.
- MEYER, R.K.F. (1981): Malm (Weißer oder Oberer Jura).- In: HAUNSCHILD, H. & JERZ, H. (Hrsg.): - Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1 : 500 000, 62-68; München.
- MEYER, R.K.F. (1994): „Moosburg 4“, die erste Kernbohrung durch den Malm unter der bayerischen Molasse. - *Erlanger geol. Abh.*, **123**: 51-81, Erlangen.
- MEYER, R.K.F. & SCHMIDT-KALER, H. (1984): Erdgeschichte sichtbar gemacht. Ein geologischer Führer durch die Altmühlalb. - 260 S.; München.
- MEYER, R.K.F. & SCHMIDT-KALER, H. (1987): Der Jura in neuen Bohrungen in der Umgebung von Regensburg. - *Geol. Bl. NO-Bayern*, **37**: 185-216.
- MEYER, R.K.F. & SCHMIDT-KALER, H. (1989): Paläogeographischer Atlas des süddeutschen Oberjura (Malm). *Geol. Jb., A* **115**: 77 S.; Hannover.
- MEYER, R.K.F. & SCHMIDT-KALER, H. (1990): Paläogeographie und Schwammriffentwicklung des süddeutschen Malm.- *Facies*, **23**: 175-184.
- MEYER, R.K.F. & SCHMIDT-KALER, H. (1992): Wanderungen durch die Erdgeschichte (5): Durch die Fränkische Schweiz, 167 S.; München.

- MEYER, R.K.F. & SCHMIDT-KALER, H. (1996): Jura. – In: Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:500000, 112-125; München.
- MICHEL, U. (1997): Zum Retentionsvermögen von Massenkalken (Dolomiten) für Wasserinhaltsstoffe in der Südlichen Frankenalb; S. 1015-1022, In: KOCH, R., FLÜGEL, E., DIMKE, M., HASSELMAYER, B., MICHEL, U., ROSSNER, R. & SOBOTT, R. (Hrsg.): Die „Angewandte Faziesforschung“ am Institut für Paläontologie in Erlangen. - Zbl. Geol. Paläont., **9**; 130-174; Stuttgart.
- PASTERNAK, M., KOSINOWSKI, M., LÖSCH, J., MEYER, H.-J., PORTH, H. & SEDLACEK, R. (1997): Erdöl und Erdgas in der Bundesrepublik Deutschland. - 65 S.; Hannover.
- PAWELLEK, T. & AIGNER, T. (2003): Apparently homogenous „reef“-limestones built by high-frequency cycles: Upper Jurassic, SW-Germany. – Sedim. Geol., **160**: 259-284.
- PEARSON R.A. & HART B.S. (2004): Three-Dimensional Seismic Attributes Help Define Controls on Reservoir Development: Case Study from the Red River Formation, Williston Basin. - AAPG, **81**: 43–57.
- POMONI-PAPAIOANNOU, F., FLÜGEL, E. & KOCH, R. (1989): Depositional Environments and Diagenesis of Upper Jurassic Subsurface Sponge- and Tubiphytes Reef Limestones: Altensteig 1 well, Western Molasse Basin, Southern Germany. - Facies, **21**: 263-284; Erlangen.
- QUENSTEDT, F. A. (1858): Der Jura, 842 S.; Tübingen.
- RAJABI, M., SHERKATI, S., BOHLOLI, B., & TINGAY, M. (2010) Subsurface fracture analysis and determination of in-situ stress direction using FMI logs: An example from the Santonian carbonates (Ilam Formation) in the Abadan Plain, Iran. Tectonophysics, **492**: 192–200.
- REIFF, W. (1988): Die Korallenvorkommen von Gerstetten. Fazielle und stratigraphische Zuordnung im Oberen Weißen Jura der östlichen Schwäbischen Alb. - Jh. geol. Landesamt Baden-Württemberg, **30**: 357-371.
- REINHOLD, C. (1996): Prozesse und Produkte komplexer Diagenese-Sequenzen in süddeutschen Malm- Karbonaten: Die oberjurassische Massenkalk- und Bankfazies bei Geislingen/Steige (Oxford/Kimmeridge, Östliche Schwäbische Alb). - Dissertation, 255 S.; Univ. Berlin
- REINHOLD, C. & SCHROEDER, J.H. (1994): Investigation of cores in the Geislingen area. - In: Leinfelder (Hrsg.): The origin of Jurassic Reefs: Current Research Developments and Results. - Facies, **31**: 8-11; Erlangen.
- SCHLAF J., RANDEN T. & SØNNELAND L. (2005): Introduction to Seismic Texture. – In: ISKE, A. & RANDEN, T. (Hrsg.): Mathematics in Industry - Mathematical Methods and Modelling in Hydrocarbon Exploration and Production, **7**: 3-21.

Literatur

- SCHMIDT-KALER, H. (1985): das geologische Profil der Thermalwasserbohrung Bad Abbach südlich Regensburg (Grundgebirge bis Kreide): Stratigraphische Gliederung und paläogeographische Folgerungen. - Geol. Bl. NO-Bayern, **34/35**: 273-301; Erlangen.
- SCHNEIDER, M. SCHUBERT, A. BAUMANN, T., BÖHM, F., STEINER, U. & MAYER, C. (2009): Vorstellung eines aktuellen Forschungsvorhabens zur hydrogeologischen Charakterisierung des Malm als tiefer Grundwasserleiter. - „Der Geothermiekongress 2009“, 5 S., Bochum.
- SCHULZ, R. & THOMAS, R. (Hrsg.): Geothermische Charakterisierung von karstig-klüftigen Aquiferen im Großraum München – Endbericht. – LIAG-Bericht, Archiv-Nr. 0130392, Hannover.
- SEILER, K.-P., BEHRENS, H. & HARTMANN, J.-W. (1991): Das Grundwasser im Malm der südlichen Frankenalb und Aspekte seiner Gefährdung durch anthropogene Einflüsse. - DGM **35**: 171-179.
- SELG, M. & WAGENPLAST, P. (1990): Beckenarchitektur im süddeutschen Weißen Jura und die Bildung der Schwammriffe. – Jh. geol. Landesamt Baden-Württemberg, **32**: 171-206.
- SIBLEY, D.F. (1982): The origin of common dolomite fabrics: clues from the Pliocene. - J. Sed. Petrol., **52**: 1087-1100; Tulsa.
- SIBLEY, D.F. & GREGG, J.M. (1987): Classification of dolomite rock textures. - J. Sed. Res., **57**: 967-975; Tulsa.
- SIBLEY, D.F., NORDENG, S.H. & BORKOWSKI, M.L. (1994): Dolomitization kinetics in hydrothermal bombs and natural systems. - J. Sed. Res., **A64**: 630-637; Tulsa.
- STEINER, U. & BÖHM, F. (2011): Lithofacies and Structure Signatures of ImageLogs in Carbonates and their Implications for Reservoir Characterisation in Southern Germany. –1st Sustainable Earth Sciences Conference & Exhibition, 8-11 November 2011, Valencia, Spain.
- STEINER, U., BÖHM, F., SAVVATIS, A. & SCHNEIDER, M. (2011): Strukturgeologie und Zuflüsse in Geothermiebohrungen des Malm im Großraum München. Vortrag. – Der Geothermiekongress 2011; Bochum.
- 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 Bundesministeriums für Forschung und Technologie), 12 S.; München.
- STREIT, R. & MEYER, R. (1985): Malmprofile aus Bohrungen von Neuburg a. d. Donau und Eichstätt im Vergleich mit anderen Juraprofilen. - Geol. Bl. NO-Bayern, **34/35**: 347-368.
- THEIS C. V. (1935): The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. Am. Geophys. Union Trans. – **16**: 519-524.

Literatur

- THOMAS, R., & SCHULZ, R., (2005): Erhöhung der Erfolgswahrscheinlichkeit von geothermischen Bohrungen in den Malmkarst (Süddeutsches Molassebecken) durch Anwendung neuer seismischer Interpretationsstrategien, - Geothermische Jahrestagung 2005: Synergie und Effizienz, 134-141; Unterschleißheim.
- THOMPSON, L.B., (2009): Atlas of borehole imager. - American Association of Petroleum Geologists, Advanced Logic Technology, Geomechanics International, and Halliburton Company. AAPG/Datapages.
- TUCKER, M.E., & Wright, V.P., (1990): Carbonate Sedimentology, 482 S.; Oxford.
- USDOWSKI, E. (1967): Die Genese von Dolomit in Sedimenten. - 95 S., Springer, Berlin.
- USDOWSKI, E. (1974): Stabile und metastabile Reaktionen bei geochemischen Prozessen der Sedimentbildung und der Diagenese. - Fortschr. Miner., **52**: 81-93; Stuttgart.
- WAGENPLAST, P. (1972): Ökologische Untersuchungen der Fauna aus Bank- und Schwammfazies des Weißen Jura der Schwäbischen Alb. - Arb. geol. pal. Inst. Stuttgart, N.F., **67**: 1-99.
- WILSON, J.L. (1975): Carbonate facies in geologic history, 471 S., New York.
- WOLFGRAMM, M., OBST, K., BEICHEL, K., BRANDES, J., KOCH, R., RAUPPACH, K. & THORWART, K. (2009): Produktionsprognosen geothermischer Aquifere in Deutschland. - „Der Geothermiekongress 2009“. 13 S.; Bochum.

Anhang A: Tagungsbeiträge mit veröffentlichten Zusammenfassungen

SCHNEIDER, M., SCHUBERT, A., BAUMANN, T., BÖHM, F., STEINER, U. & MAYER, C. (2009):

Vorstellung eines aktuellen Forschungsvorhabens zur hydrogeologischen Charakterisierung des Malm als tiefer Grundwasserleiter. - Der Geothermiekongress 2009, 5 S., Bochum.

Zusammenfassung

Die Grundwasserdynamik tiefer Grundwasserleitersysteme wird insbesondere auch von thermischen, hydrogeochemischen und geologischen Parametern gesteuert.

Das vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) geförderte Verbundvorhaben „Wissenschaftliche und technische Grundlagen zur strukturgeologischen und hydrogeologischen Charakterisierung tiefer geothermisch genutzter Grundwasserleiter am Beispiel des süddeutschen Molassebeckens“ untersucht beispielhaft den Malm als tiefen Grundwasserleiter im süddeutschen Raum im Hinblick auf seine hydrothermale Erschließung. Für entsprechend angepasste Explorations-, Bohr- und Betriebskonzepte einzelner Anlagen sind fundierte Kenntnisse des tieferen Grundwassersystems ebenso Voraussetzung wie für die Bemessung von Erlaubnis- und Bewilligungsfeldern.

Unterschiedliche geowissenschaftliche Methoden und integrierte Untersuchungsstrategien werden in diesem Vorhaben im Hinblick auf ihre Anwendbarkeit bei der geothermischen Exploration untersucht und weiterentwickelt. Die Ergebnisse sollen einen methodischen Beitrag liefern für die Erstellung hydrogeologischer und numerischer Strömungsmodelle, zur standardisierten Erhebung hydrogeologischer und geothermischer Parameter und eine optimierte Bewertung des geologischen Fündigkeitsrisikos im Hinblick auf eine nachhaltige Nutzung tiefer hydrothermalen Ressourcen.

1. Einleitung

Die günstigen Bedingungen für die hydrothermale Exploration des Malm im Süddeutschen Molassebecken hat in den letzten Jahren dazu geführt, dass zahlreiche geothermische Bohrungen im Raum München abgeteuft wurden. Waren es im Jahr 2003 noch vier, sind es im Jahre 2009 bereits mehr als 24, die in Betrieb sind, zur Zeit niedergebracht werden oder sich konkret in Planung befinden. Die Intensivierung der Explorationsaktivitäten führt nicht nur dazu, dass zunehmend zur Verfügung stehende Daten neue hydrogeologische Kenntnisse liefern und damit sukzessive die Erschließungsstrategien überarbeitet werden, sondern dass der Malm zunehmend als großräumiges Reservoir mit einem entsprechenden Management betrachtet werden muss.

Der tiefe Malm stellt sich für die hydrothermale Erschließung als Grundwasserleitersystem mit einem komplexen Zusammenspiel aus Karst-, Poren- und Kluftgrundwasserleiter dar. Für eine bessere hydrogeologische Charakterisierung sind grundlegende geologische Kenntnisse wie Strukturgeologie (Störungsgenese, -geometrie, Schichtversatz), Lithologie und Fazies (Ablagerungsraum, Diagenese), Hydrogeochemie (Mineralisation, Gasgehalt, Ursprung der Wässer) sowie die Hydraulik (Durchlässigkeit und Schüttungsmenge) nötig.

Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) fördert im Rahmen eines F&E Projektes die Erarbeitung wissenschaftlicher und technischer Ansätze zur geothermischen Bewertung und Nutzung tiefer Grundwasserleiter am Beispiel des Malmaquifers des süddeutschen Molassebeckens.

Die Ergebnisse des Projektes sollen im Einzelnen dazu dienen,

- Grundlagen für numerisch-hydrogeologische Modelle bereitzustellen,
- hydrogeologische und geothermische Parametererhebung zu standardisieren,
- Grundlagen für eine verbesserte Bewertung des geologischen Fündigkeitsrisikos zu liefern, und
- die Bemessungsgrundlagen für eine investitionssichere, wirtschaftliche und nachhaltige Nutzung zu schaffen.

2. Modellansatz

Im Rahmen des Projektes werden zunächst Parameter aus verschiedenen Disziplinen erarbeitet und in einem numerischen geologischen Modell umgesetzt. Eine hydraulisch-thermische Simulation der durchgeführten Pumpversuche soll anschließend das geologische Modell verifizieren und ggf. in einem iterativen Prozess verbessert und angepasst werden.

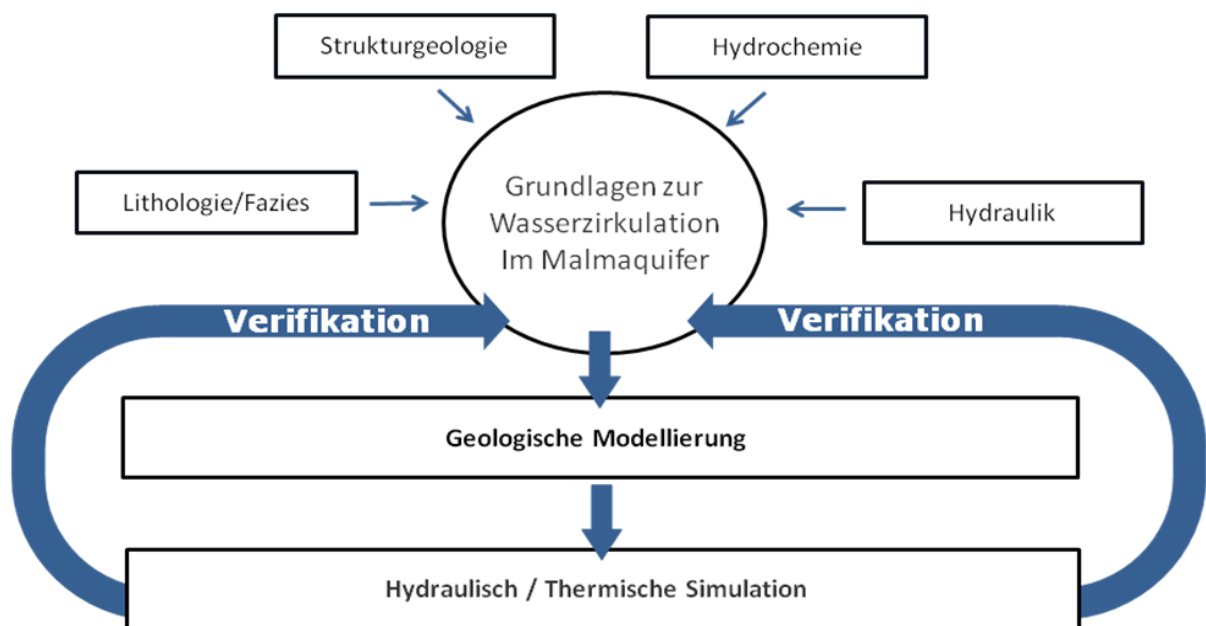


Abb. 1: Modellansatz zur Erfassung der Grundlagen zur Wasserzirkulation am Beispiel des Malmaquifers. Parameter aus den Disziplinen Strukturgeologie, Lithofazies, Hydrochemie und Hydraulik fließen in ein numerisches geologisches Modell ein, das in einem iterativen Prozess über hydraulisch-thermische Simulation verifiziert wird.

2.1 Strukturgeologie

Störungen gelten bisher im Malm als das primäre Erschließungsziel. Ob eine Bohrung eine Störung tatsächlich durchteuft hat, ist aber meist nur indirekt, nämlich über den Abgleich unterschiedlicher Bohrungsinformationen zu erkennen. Neben den direkten Indikationen wie Spülungsverluste können geophysikalische Daten wie Seismik und Imagelogs hinzugezogen werden.

Die Vektorplot-Darstellung basiert auf der Interpretation von Schichtflächen aus dem Imagelog und zeigt die Veränderung des Schichteinfallens (Azimut) über den Verlauf des Bohrlochs an, beginnend im Bohrlochtiefsten. Ein überwiegend gerader Verlauf zeigt

dementsprechend eine parallele Lagerung. Ein deutlicher Richtungswechsel dagegen wird generell als gestörte Lagerung gedeutet, der auf eine durchteufte Störung hinweist. Für Malmbohrungen sind Spülungsverluste charakteristisch, die sowohl an Störungsindikationen gebunden sind, als auch schichtparallel auftreten können.

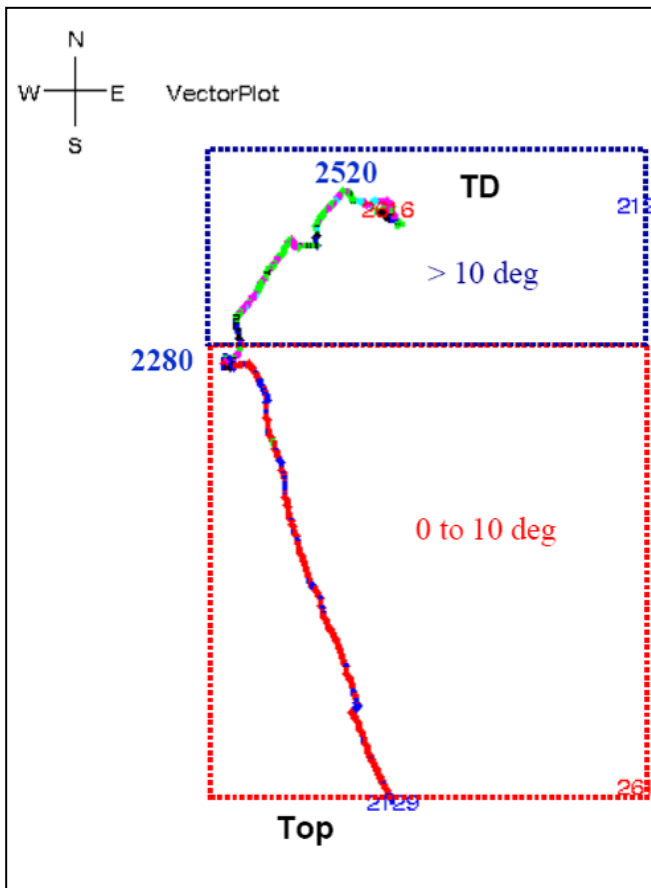


Abb. 2: Vektorplot einer Malmbohrung (vgl. Text); TD (Total Depth): Bohrlochtiefstes, Top: Oberkante Malm; Punkt 1 bezeichnet die Tiefe, in der Spülungsverluste schichtparallel aufgetreten sind; die Richtungswechsel der Kurve bei 2280 m und 2520 m sind Störungsindikationen; der Wechsel bei Punkt 2 ist aufgrund des Imaglogs auf eine lithofazielle Änderung zurückzuführen. Die Farbcodierung der Kurve zeigt die Klassifizierung der Einfall-Werte (Dip) zwischen 0° und 10° im Hangenden und größer 10° im Liegenden.

2.2 Lithologie/Fazies

In dem Zusammenspiel aus Karst-, Poren- und Kluftgrundwasserleiter kann die Matrixporosität eine zentrale, z.T. limitierende Größe in der Bereitstellung des benötigten Thermalwasservolumens darstellen. Ohne eine Anbindung von Störungs- bzw. Kluftsystemen oder Verkarstungen an entsprechend große Matrixporosität im Hintergrund ist die hydraulische Aktivität dieser als gering zu bewerten.

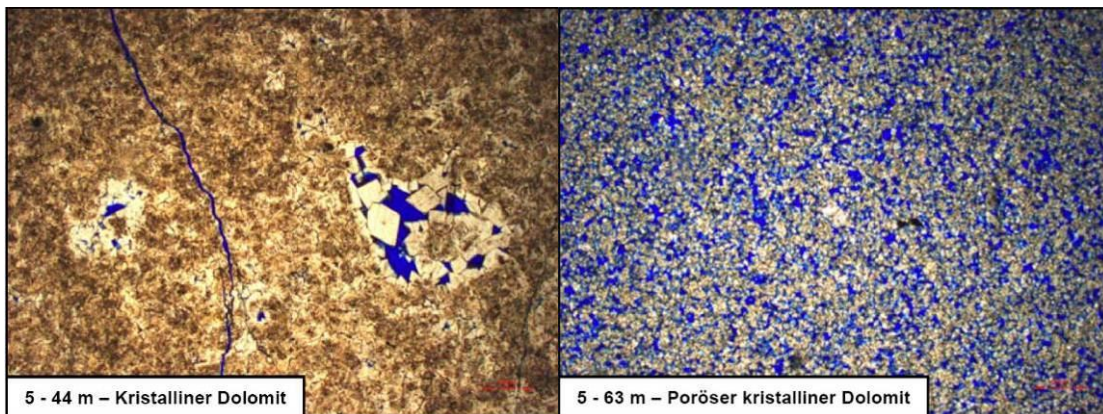


Abb. 3: Dünnschliffe aus Kernproben des Malm. Die offenen Poren wurden blau eingefärbt. Links ist ein kristalliner Dolomit mit Drusen und Kluft mit sehr geringer Porosität dargestellt, rechts dagegen ein Dolomit mit deutlich erhöhter Porosität.

Ein entscheidender diagenetischer Prozess zur Generierung von Porosität der Malmkarbonate ist die Dolomitisierung. Für die hydrothermale Nutzung empfiehlt sich eine Unterteilung des Malm in zwei Grossfaziesbereiche mit einer geringer dolomitisierten Bankfazies und einer stärker dolomitisierten Massen-/Rifffazies.

2.3 Hydrochemie

Die Hydrochemie kann zur Beschreibung der Tiefenwasserzirkulation des Malm wesentlich beitragen. Mit ca. 60 Thermalwasseranalysen, ca. 20 quantitativen Gasanalysen und ca. 15 Bestimmungen stabiler Isotopen sind Aussagen zur Genese des Thermalwassers sowie der Quellgase und die Quantifizierung der Entgasungsprozesse möglich. Neben der Erweiterung der Datengrundlage zielen die Untersuchungen auf eine Verbesserung des Systemverständnisses hydrogeochemischer Prozesse und eine Prognose des Auftretens von Schwefelwasserstoff im Quellgas im Hinblick auf Sicherheit und Korrosion.

Anhang A

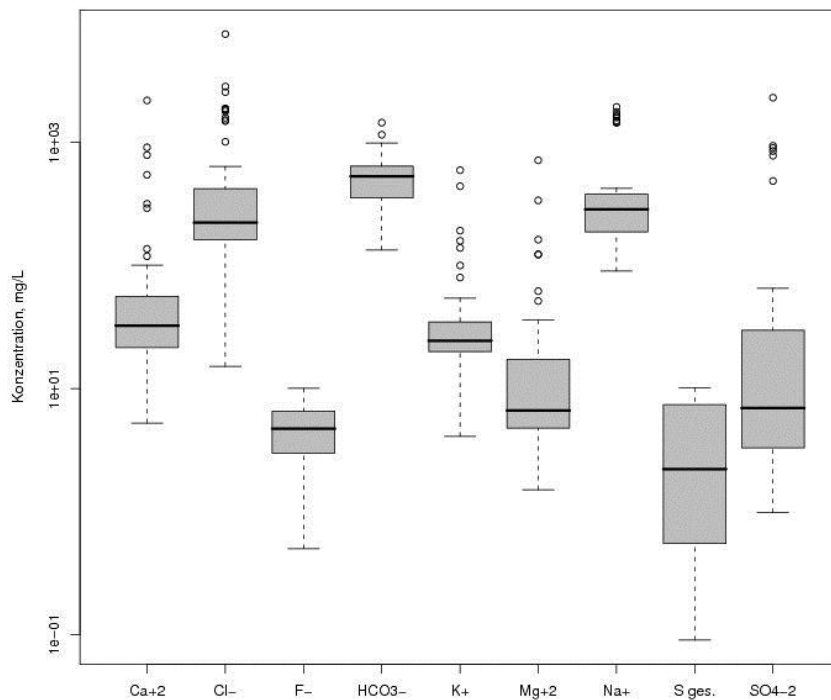


Abb. 4: Varianz der Hauptinhaltsstoffe des Thermalwassers in den untersuchten Proben.

Die Thermalwasserzusammensetzung zeichnet die geologische Position von reinen Malmwässern am Beckenrand, bzw. von einer Beeinflussung durch Infiltration von Wässern aus liegenden und hangenden Formationen im Beckenzentrum nach. Im Zentrum zeichnen sich die Wässer durch eine hohe Variabilität in der Zusammensetzung aus; Artefakte durch Stimulation der Bohrungen halten lange an. Gaszusammensetzung und -menge variieren regional und lokal stark; im Bohrloch sind Strip-Effekte zu erkennen. Die Schwefelisotopie deutet auf thermophile Sulfatreduktion oder Sulfatreduktion durch Methan hin.

3. Ausblick

Das Arbeitsprogramm des noch anderthalb Jahre finanzierten Projektes sieht die Umsetzung der bisherigen Erkenntnisse der einzelnen Disziplinen in Parameter vor, und deren Überführung in ein numerisches geologisches Modell mit anschließenden Simulationen. Die bisherigen Ergebnisse müssen gleichzeitig anhand von nicht vollständig gesichtetem Archivmaterial und neuen Bohrungen verifiziert und verfeinert, und gegebenenfalls revidiert werden.

STEINER, U. & BÖHM, F. (2011):

Lithofacies and Structure Signatures of Imagelogs in Carbonates and their Implications for Reservoir Characterisation in Southern Germany. –1st Sustainable Earth Sciences Conference & Exhibition, November 8-11, 2011, Valencia, Spain.

Introduction

The subsurface Upper Jurassic Malm carbonates form the most important reservoir rocks for hydrothermal exploration in Southern Germany. Overall they consist of up to 600 m marls and limestones, which can locally be dolomitized. The carbonates crop out in the Swabian and Franconian Alb and dip gently southwards under the North Alpine Foreland Basin, reaching a depth of more than 5,000 m at the boundary to the alpine orogeny (Bachmann et al. 1987).

Initially, the associated secondary porosity of fractures and karstification in the vicinity of prominent faults were assigned as the only exploration target. However, very successful and less successful drillings since 2004 and their hydrogeological evaluation have shown that this is a simplification and reservoir quality can vary strongly, depending on sedimentary facies, diagenesis, dolomitization, karstification, and tectonic impregnation. In fact, hydraulic formation test revealed soon that the matrix porosity, causing radial flow, dominates and superimposes in most cases any linear flow, indicating limited importance of fault related permeability. These observations forced to review the exploration concept and set up a new hydrogeological model.

Area of Investigation, Data and Method Applied

The area of investigation is located nearby the City of Munich, Germany and related to the hydrothermal favorable conditions of the subsurface Malm between 80° to 150°C, i.e. between 2.000 m up to 5.000 m b.s.l.

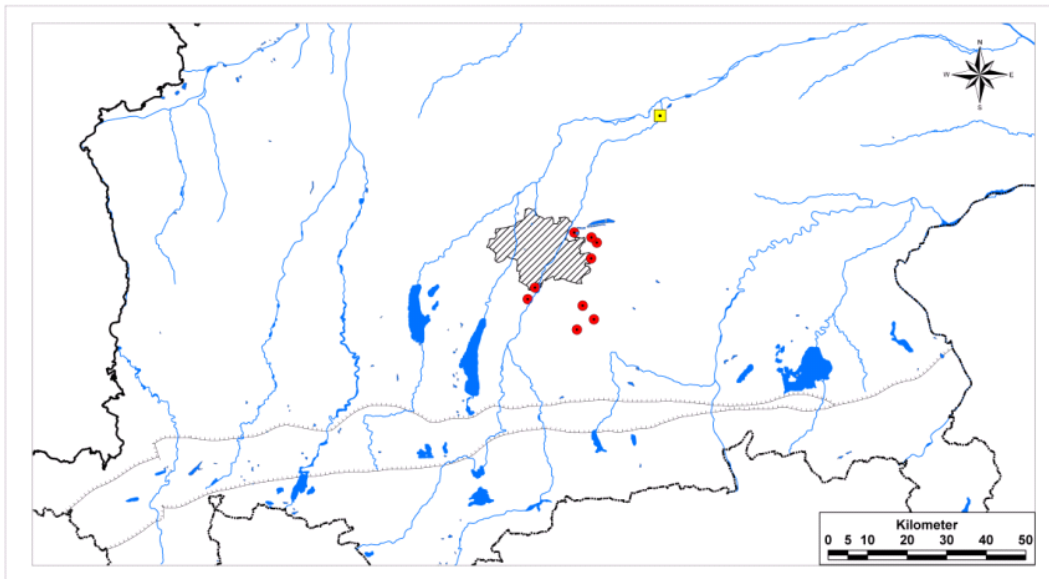


Figure 1 Location map with investigated well sites (red circles) nearby the city of Munich and the well Moosburg SC 4 (yellow rectangle).

Geothermal exploration in Southern Germany is still a young activity driven by a diverse industry and small, medium and few large investors. Research activity and available data are depending on the often limited resources and can by far not be related to longstanding and powerful oil and gas exploration. Respectively, no core material is yet available from geothermal drillings and also other important measurements (e.g. Neutron Density, Sonic, VSP) are sparse. On the other hand the acquisition of resistivity imagelogs has evolved to an almost standard measurement, thus providing by an adequate basis for borehole evaluation and correlation.

Imagelogs have often demonstrated its use for sedimentary facies description (e.g. Joubert & Maïtan 2010) or structural analysis (e.g. Rajabi et al. 1010). The present work describes a basic method to interpret imagelogs from a carbonate environment to classify lithofacies and structural elements. Several imagelogs from the deep Malm have been analyzed together with ancillary data as Gamma Ray, Dual-Latero-Log, Caliper, and Lithologs. However, the baseline for classification scheme is based on image texture, structure, and color, as e.g. shown in Thompson (2009).

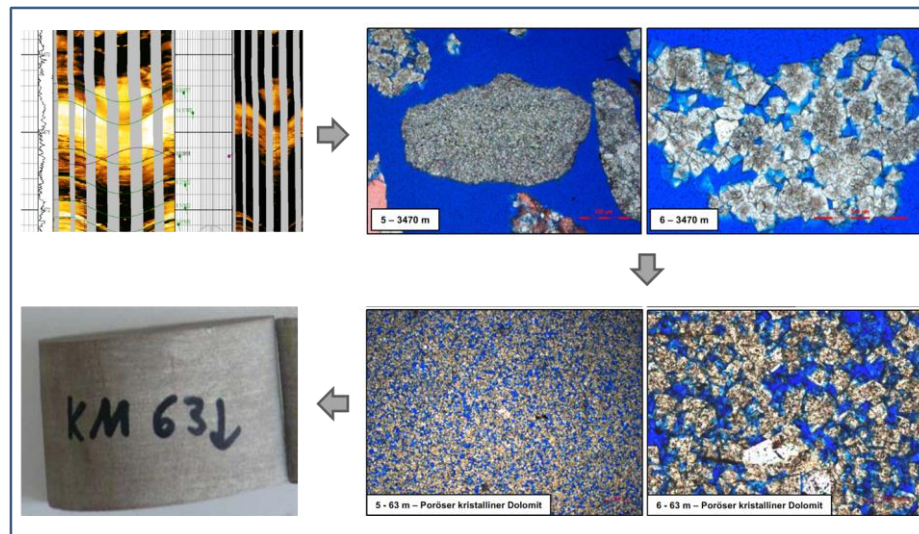


Figure 2 Illustrating scheme for the verification process of imagelogs via thin sections from cuttings (above) and Moosburg SC 4 core material (below), the blue color indicates open pores.

Since no in-situ core material was available to calibrate the Imagelog classes an indirect verification process was established with core material from Moosburg SC 4 (see Figure 1), a drilled well for scientific purposes in 1990 with a complete core in the Malm section. In the present work thin sections from cutting have been described and compared with thin section of a similar sedimentary unit from the Moosburg SC 4 core. As further verification characteristic resistivity values from Dual Latero Log for each Imagelog class were related to direct resistivity measurements from core material. Finally poro-perm characteristics from the thin section were assigned to reference the Imagelog classes.

Results

The Malm is well known for its lateral and also vertical lithological heterogeneity. In general, a thick-bedded to massive platform facies can be distinguished from a thinner bedded basin facies in between (e.g. Gwinner 1976, Koch et al. 1994).

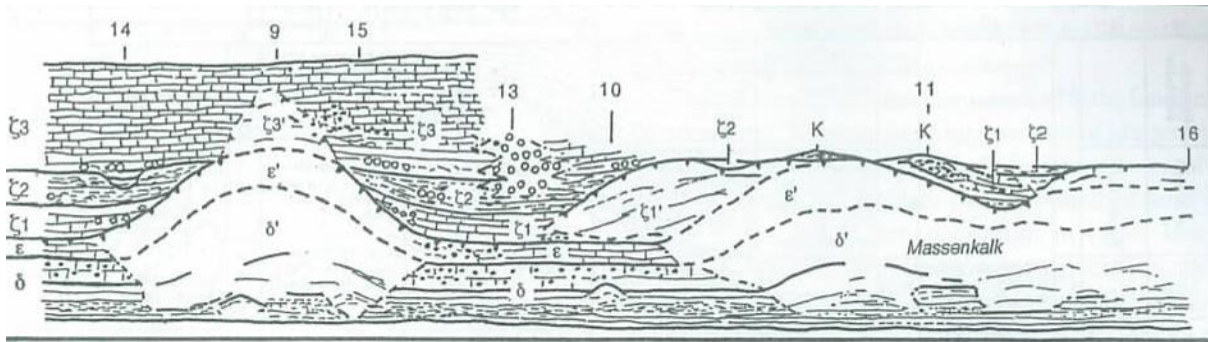


Figure 3 Generalized facies model of the Malm with thick bedded to massive reef/platform facies (“Massenkalk”) and a thinner bedded basin facies as derived from outcrop (from Gwinner, 1976).

In the subsurface the lithofacies also changes rapidly due to different diagenetic effects than on the surface. The Imagemlog interpretation however demonstrates a general concordance between surface and subsurface and confirms the lithostratigraphical units derived from outcrops (Figure 3).

From the available imagelogs, two superior, so named hyperfacies, and five major sedimentary facies, including several subdivisions, could be classified.

Often clearly identifiable as one hyperfacies is the “bedded facies” with thin to medium bedded limestone, marly limestones, and minor dolomites.

- Class A: platy or thin bedded, often appears at the top of the Malm (Upper Tithonian) with thicknesses from some ten to 100 meters, mainly consisting of limestones or marly limestones beds, separated by thin layers of clay or marl;
- Class B: medium bedded, may reach from the top to the basis through the whole Malm profile (Tithonian to Oxfordian), characterized by well bedded limestones, dolomites and marly limestones;

The other hyperfacies is the “mass facies” and is characterized by massive to thick bedded limestones and dolomites.

- Class C: homogeneous micritic limestones with different clay contents, up to some ten meters thickness and mainly occurring in the Lower Tithonian and Kimmeridgian;

- Class D: massive biogenetic limestones with biogenetic components as shell -, coral fragments, and brachiopods in a carbonatic matrix, appears mainly in the Tithonian and Kimmeridgian;
- Class E: massive dolomites with a homogeneous dolomitic facies of more than ten to up 100 m thickness, often present in the central and upper part of the lower Malm (Kimmeridgian to Oxfordian) in most of the wells, with a special characteristic of the so called vuggy dolomites;

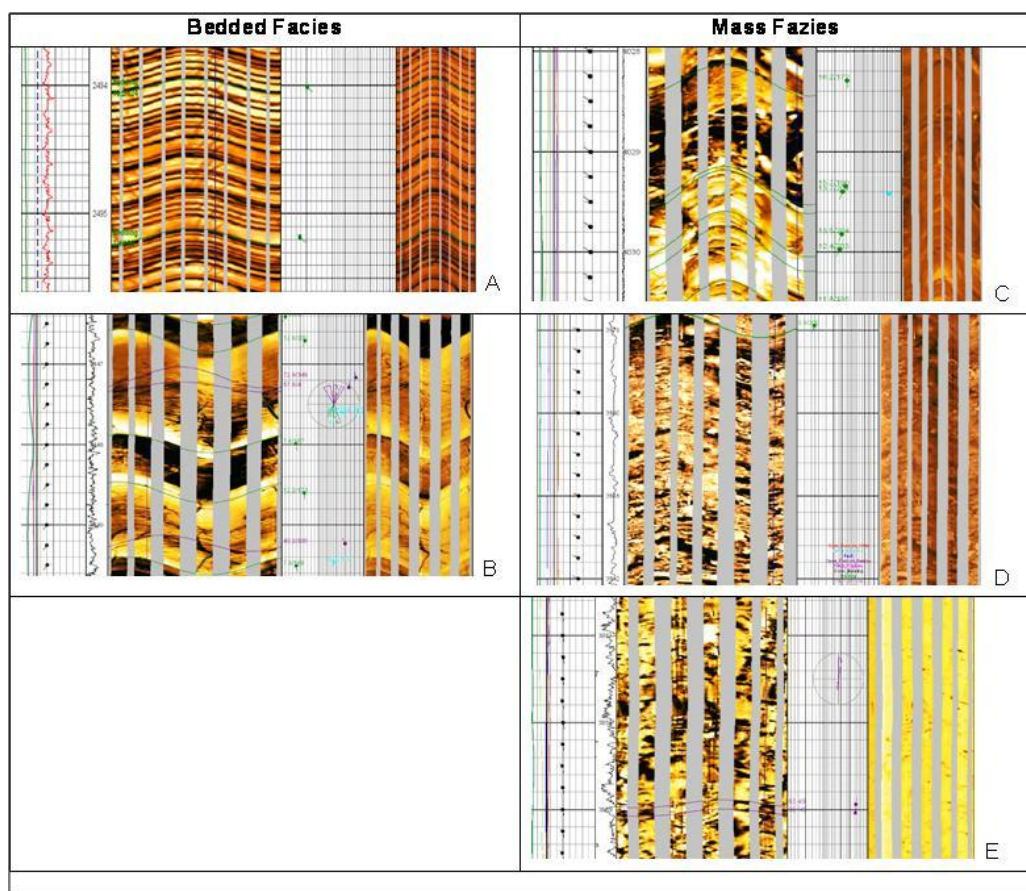


Figure 4 Overview on the five major Imagelog classes in accordance to the lithofacies and lithostratigraphical subdivision in the Malm (A to E, see text).

Conclusions

Recent work on the Malm shows, that the mass facies is more likely to be dolomitized, due to its primary facies, than the thinner bedded facies, which often contains more clayey material (Koch et al. 1994, Böhm et al. 2011). This observation is also supported by the coherency

between primary facies, dolomitization and carbonate petrophysics, as shown by Lucia (1999).

The presented classification scheme of imagelogs is the basis for further evaluation. The investigated geothermal wells show a good correlation between the thickness of drilled mass facies and productivity. It appears that the more mass facies is drilled, the higher is the transmissibility. This relation however, is only valid in cases where the major parts of the mass facies are dolomitized and providing secondary porosity.

Based on this observation and the correlation of Imagelog classes with seismic texture it is possible to predict the positioning of the boring in its paleogeographical context, a basin, transition or platform/reef. By this facies oriented exploration strategy the risk of failure will be reduce, even more if 3D seismic surveys become standard in the geothermal exploration (c.f. Lüschen et al. 2011).

Acknowledgements

This work was founded by the German Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety under the No. 0327671.

We want to thank Dr. Achim Schubert, Prof. Michael Schneider and Prof. Roman Koch for their support.

BÖHM, F., SAVVATIS, A. & STEINER, U. (2011):

Lithofazielle Reservoircharakterisierung als Schlüssel zur geothermischen Nutzung im Großraum München – Der Geothermiekongress 2011; Bochum.

Veröffentlichte Zusammenfassung:

Zwischen der Lithofazies des Malm und dessen Hydraulik besteht im Großraum München ein direkter Zusammenhang. Dieser wurde im Rahmen eines vom BMU geförderten Forschungsverbundvorhabens auf der Basis einer Evaluierung von 18 Malm-Geothermiebohrungen mit Bohrtiefen zwischen 2.124 m TVD (true vertical depth) und max. 4.480 m TVD / ca. 5.500 m MD (measured depth) herausgearbeitet.

Als Ergebnis können die bereits bekannten Gesetzmäßigkeiten zur Hydrogeologie des Malm auch für den tiefen Untergrund im Großraum München bestätigt werden:

- Die Lithofazies des Malm lässt sich auch in den Bohrungen in die beiden übergeordneten Faziesbereiche Massen- und Bankfazies gliedern. Die Massenfazies neigt dabei im Gegensatz zur Bankfazies verstärkt zur Dolomitisierung.
- Die Durchlässigkeit im Malm korreliert mit dem erbohrten Dolomitgehalt. Je mehr Dolomit erbohrt wird, umso höher ist die Transmissibilität. Die Art der Dolomitisierung spielt dabei ebenfalls eine wichtige Rolle.

Aus den Bohrdaten lässt sich nun folgende, vereinfachte hydrostratigraphische Gliederung des Malm ableiten, die im Zuge der Erstellung von hydrogeologischen Modellen im Großraum München angewendet werden kann.

Der liegende Malm Alpha bis Malm Gamma kann als Grundwasseringeleiter eingestuft werden. Der tiefere und mittlere Malm, stratigraphisch in etwa dem Malm Delta und Epsilon entsprechend, wird großräumig durch eine homogene dolomitische Massenfazies charakterisiert. Damit kommt dieser Abfolge als potentiell Reservoir eine Schlüsselrolle bei der geothermischen Exploration und späteren Nutzung zu. Im oberen Malm Zeta tritt eine lateral stark differenzierte Lithofazies in Erscheinung. Hier entscheidet sich letztendlich, ob eine Bohrung zu den „guten“, „mittleren“ oder „schlechten“ bzgl. der Hydraulik zu rechnen ist.

Anhang A

Die kleinräumige Faziesdifferenzierung, wie sie auch aus der fränkischen oder schwäbischen Alb bekannt ist, wird insbesondere bei geothermischen Dublettenbohrungen deutlich, die von einem gemeinsamen Sammelbohrplatz aus abgeteuft wurden und faziell sehr unterschiedliche Charakteristika und auch unterschiedliche Produktivitäten aufweisen.

Aus den Erkenntnissen lässt sich nun eine risikominimierte Explorationsstrategie ableiten, die eine Verbesserung der faziellen Differenzierung in seismischen Datensätzen zu einer der aktuellen Herausforderungen bei der Projektplanung von Geothermiebohrungen im süddeutschen Molassebecken werden lässt.

Neben den Ergebnissen zur Fazies und Hydrogeologie werden im Rahmen des Vortrags neue Methoden zur lithofaziellen Reservoircharakterisierung dargestellt. Insbesondere sind hier die sog. PAC-Analyse, eine Permeabilitätsabschätzung an Cuttings zur Entwicklung qualitativer Zuflussprofile sowie die fazielle Interpretation von Imagemlogs im Malm zu nennen.

STEINER, U., BÖHM, F., SAVVATIS, A. & SCHNEIDER, M. (2011):

Strukturgeologie und Zuflüsse in Geothermiebohrungen des Malm im Großraum München – Der Geothermiekongress 2011; Bochum.

Veröffentlichte Zusammenfassung:

Störungen werden als bevorzugte geothermische Bohrziele im Malm gesehen, da sie in stark zerrütteten Bereichen eine sekundäre Porosität liefern, und zudem häufig als verkarstet gelten. Die Auswertung von mehreren Imagelogs im Großraum München zeigt jedoch, dass eine deutliche Verkarstung eher an lithofazielle Grenzen gebunden ist, und Störungen nur untergeordnet betroffen sind. Diese Beobachtungen werden durch Untersuchungen in Aufschlüssen der südlichen Fränkischen Alb gestützt.

Der erste Teil des Vortrages stellt eine Methode vor, die die störungsgebundene von der lithofaziell gesteuerten Verkarstung unterscheiden lässt, um so - zusammen mit hydraulischen Informationen - die Zuflüsse geologisch besser zu charakterisieren und stratigraphisch einzuordnen. Im zweiten Teil werden die Beobachtungen und Bohrlochinformationen am Beispiel von Bohrungen vorgestellt und mit den Interpretationen aus seismischen Daten verglichen, um schließlich neue Erkenntnisse für die Explorationsstrategie abzuleiten.

Anhang B: Weitere Publikationen, Vorträge und Poster

Publikationen:

BÖHM, F., SCHWARZ, F., KRAUS, O. (2007): 2D-seismische Untersuchungen für das Geothermieprojekt Unterföhring bei München. Interpretation einer Riffstruktur im Malm als bevorzugtes Erschließungsziel für Thermalwasser. – Geothermische Energie, **55**, 14-16, Geeste.

SAVVATIS, A., BÖHM, F., DORSCH, K. (2012): Vom Bauchgefühl zum Reservoirmanagement - Entwicklungen in der Tiefengeothermie. – bbr – Sonderheft Geothermie, 63 – 69.

STEINER, U., BÖHM, F., SAVVATIS, A., SCHUBERT, A. & SCHNEIDER, M. (2012): Drei Jahre F&E zur Reservoircharakterisierung des Malm – Ein Überblick. Geothermische Energie, **72**, 8-11, Berlin.

Vorträge:

SCHUBERT, A., HÖFERLE, R. & BÖHM, F. (2005): Geothermische Dubletten München Riem und Pullach i. Isartal im Vergleich: Geologische und bohrtechnische Konzepte zur Minimierung des geologischen Risikos im Malmtiefengrundwasserleiter. – Der Geothermiekongress 2005; Unterschleißheim.

STOYKE, R., SCHUBERT, A., VATER, H., BÖHM, F., DORSCH, K., & HANKE, K. (2006): Neue Erkenntnisse zum Malm-Tiefengrundwasserleiter in der Westmolasse aus der Tiefbohrung Bad Wörishofen GT 2 und ihre Bedeutung für die Geothermie. – Der Geothermiekongress 2006; Karlsruhe.

BÖHM, F. & STEINER, U (2009): Wissenschaftliche und technische Grundlagen zur struktureologischen und hydrogeologischen Charakterisierung tiefer geothermisch genutzter Grundwasserleiter am Beispiel des Süddeutschen Molassebeckens. – Vortrag am Tag der offenen Tür im Bergamt Südbayern: 19 S.

STEINER, U., BÖHM, F. & SAVVATIS, A. (2010): Characterizing deep groundwater flow systems used for geothermal energy supply in the Molasse Basin (South Germany). – 1st European Geothermal PhD-Day 2010.

BÖHM, F., SAVVATIS, A. & STEINER, U. (2010): Thermische Charakterisierung des Malm im Großraum München in Hinblick auf Fördertemperaturprognosen. – Der Geothermiekongress 2010; 11 S.; Karlsruhe.

SCHUBERT, A. SAVVATIS, A., BÖHM F. & STAHL, L. (2010): Reservoirmanagement und Betriebssicherheit. – Der Geothermiekongress 2010; 11 S.; Karlsruhe

Poster:

BÖHM, F., SCHUBERT, A. & KRAUS, O. (2007): 2D-seismic analysis of the geothermal energy project Unterföhring – Seismic interpretation of a reef structure – target of thermal water exploration in Jurassic Malm-aquifer – European Geothermal Congress; Unterhaching. Poster

STOYKE, R., SCHUBERT, BÖHM, F. & A., VATER, H. (2007): Neue Erkenntnisse zum Malm-Tiefengrundwasserleiter in der Westmolasse aus der Tiefbohrung Bad Wörishofen GT 2 – European Geothermal Congress; Unterhaching. Poster

M. SCHNEIDER, A. SCHUBERT, T. BAUMANN, F. BÖHM, U. STEINER, C. MAYR & C. KOFAHL (2008): Vorstellung eines aktuellen Forschungsvorhabens zur Charakterisierung tiefer Grundwasserfließsysteme für geothermale Energie am Beispiel des Malmaquifers im süddeutschen Molassebecken, Geothermiekongress 2008, 11.-13.11.2008, Karlsruhe. Poster

SCHNEIDER, M., SCHUBERT, A., BAUMANN, T., BÖHM, F., STEINER, U. & MAYR, C. (2009): Wissenschaftliche und technische Grundlagen zur Charakterisierung tiefer Grundwasserfließsysteme – Ein aktuelles Forschungsvorhaben am Beispiel des Malm-Grundwasserleiters im Süddeutschen Molassebecken. – Der Geothermiekongress 2009, 5 S., Bochum. Poster

STEINER, U., BÖHM, F. & SAVVATIS, A. (2010): Characterizing deep groundwater flow systems used for geothermal energy supply in the Molasse Basin (South Germany). – 1st European Geothermal PhD-Day 2010. Poster Präsentation.

Anhang C: Lebenslauf

Franz Böhm

Der Lebenslauf ist in der Online-Version aus Gründen des Datenschutzes nicht enthalten

Lebenslauf

Der Lebenslauf ist in der Online-Version aus Gründen des Datenschutzes nicht enthalten