

| | | | | |
|------------------------|---------------------|----------|--------|---------------------------|
| Geol. Bl. NO-Bayern | 60 (2010) | Heft 1-4 | Seite- | Erlangen Dezember 2010 |
|------------------------|---------------------|----------|--------|---------------------------|

Der Malm in der Geothermiebohrung Pullach Th2 – Faziesanalyse aus Spülproben (München, S-Deutschland)

Upper Jurassic of the Pullach Th2 geothermal well – Facies analysis using cuttings (Munich, S-Germany)

Franz Böhm¹, Roman Koch², Renate Höferle² & Ralph Baasch³

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 Th2 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 bis 3440 m (Vertikale Teufe, 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 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

¹Erdwerk GmbH, Bonner Platz 1, 80803 München; boehm@erdwerk.com; hoeflerle@erdwerk.com

²GeoZentrum N-Bayern (GZN), Inst. f. Paläontologie, Angewandte Sedimentologie und Bausteinfor-
schung, Loewenichstr. 28, 91054 Erlangen; rkoch@pal.uni-erlangen.de

³Initiative Energie für Pullach GmbH, Johann-Bader-Str. 21, 82049 Pullach i. Isartal;
ralph.baasch@iep.pullach.de

hängen dabei überwiegend von der Größe der Dolomithomboeder, den zwischen diesen befindlichen Interkristallporen und der im Wesentlichen aus beiden Parametern über die Weite der Porenhalsdurchmesser resultierenden Permeabilität ab. Hinzukommen lokal Gesteinslösungsporen (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 sein.

Das Purbeck (Einheit I; 2948 - 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 eine höhere Porosität auftreten. Das Purbeck sollte daher im Molasse-Untergrund auch 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 größerer, 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 größerer 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 – 3440 m ET angetroffen (Mächtigkeit 46 m + ? m). Er weist < 5 % sichtbare Porosität auf. Aufgrund der hier erreichten Endteufe von 3440 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 Th1 and Th2 wells were drilled as double wells from a single location at a distance of 7.5 m from each other. The Pullach Th2 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.

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.

1. Einleitung und Zielsetzung

Die fazielle Entwicklung des süddeutschen Oberen Jura (Malm) im Untergrund des Molasse-Beckens 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. 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 & 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). 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 kurzer 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 Gemeindeeinrichtungen und privaten Abnehmern der Gemeinde Pullach i. Isartal über das neu errichtete Nahwärmenetz sicherstellen. Die Bohrung Pullach Th 2 dient dabei als Reinjektionsbohrung.

2. Die Bohrung Pullach TH 2

Die Gemeinde Pullach i. Isartal (Abb. 1) legte bereits im Jahr 2001 mit einer geologischen Machbarkeitsstudie zur tiefen Geothermie die Grundlage 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

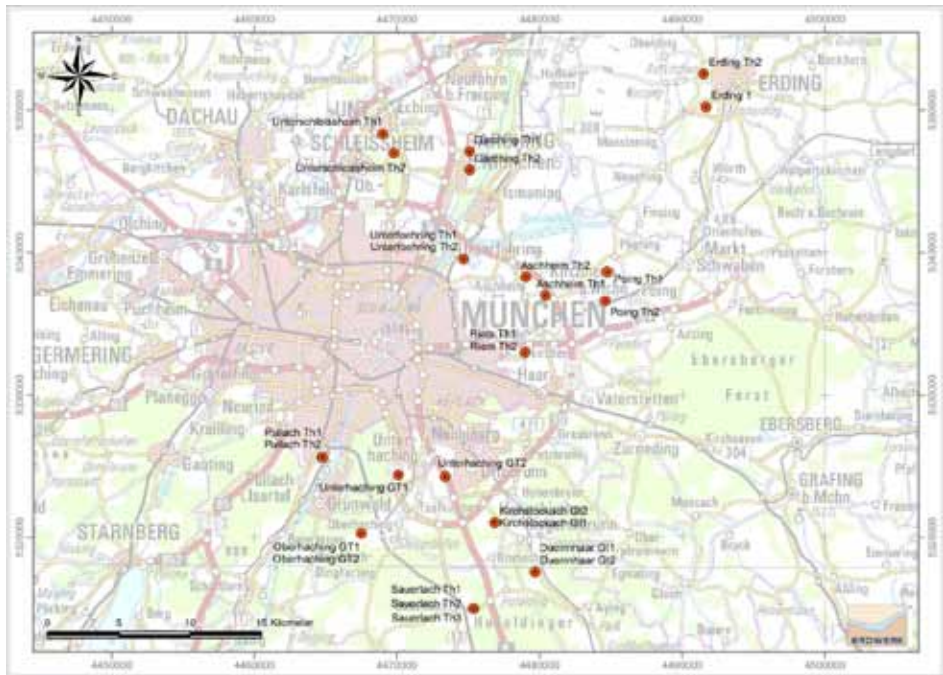


Abb. 1. Die Lage des Großprojektes Pullach und weiterer Geothermiebohrungen im Raum München.

Fig. 1. Location of the Pullach project and of other geothermal wells in the vicinity of Munich

Reinjektionsbohrung. Bohrbeginn der ersten Bohrung Pullach Th1 war der 4. Dezember 2004.

Die Bohrungen Pullach Th 1 und Th 2 wurden 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 (Th1) und Süden (Th2) 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.

Nach den ersten Fördertests hatte sich die Bohrung 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 geothermischen Fernwärmeversorgung durch private und öffentliche Abnehmer führte zu zunehmendem Bedarf an geothermischer Energie. Konsequenterweise läuft derzeit die Planung der dritten Bohrung Pullach Th3. Bohrbeginn ist für den Anfang des Jahres 2011 geplant.

| bis Bohr- teufe 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 Vollschotter-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 Ottngang, Kirchberger Schichten, Süßbrackwassermolasse | 53,0 |
| - 738,0 | - 738,0 | Mittleres Ottngang, Glaukonitsande, OMM | 70,0 |
| - 780,0 | - 780,0 | Mittleres Ottngang, Blättermergel | 45,0 |
| - 987,0 | - 983,0 | Unteres Ottngang, Neuhofener 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 | Unteroigozän | 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) Fischeschiefer | 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 |

Tab. 1. Geologisches Profil mit den stratigraphischen Grenzen in der Bohrung Pullach Th2 (Erdwerk 2008).

Tab. 1. Geologic profile with stratigraphic boundaries in the Pullach Th2 well (Erdwerk 2008).

| bis Bohrteufe MD [m] | bis vertikale Teufe TVD [m] | Lithologie | Mächtigkeit [m] |
|--|-----------------------------|--|-----------------|
| - 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 – Delta (?), Kalkstein, Dolomit | 497,2 |
| Tab. 1. Geologisches Profil mit den stratigraphischen Grenzen in der Bohrung Pullach Th2 (Erdwerk 2008). | | | |
| Tab. 1. Geologic profile with stratigraphic boundaries in the Pullach Th2 well (Erdwerk 2008). | | | |

2.1. Neigung und Ablenkung

Die Bohrung Pullach Thermal 2 wurde in der ersten Bohrphase (16") bis 765 m ungerichtet als Vertikalbohrung abgeteuft (Abb. 2). In verschiedenen Teufen wurden dabei Neigungsmessungen (single shots) durchgeführt. Die Inklinations betrug max. 0,6° in Richtung Südost. Eine Annäherung in Richtung der Bohrung Pullach Th 1 konnte somit ausgeschlossen werden.

In der zweiten 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 dieser Bohrphase gehalten wurde (Abb. 2).

Auch in der dritten 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, measured depth; 2.946,2 m TVD, total vertical depth) beträgt 1.583,45 m nach Azimut 179,94°.

Die horizontale Gesamtabweichung bei Endteufe 4.120 m MD beträgt nach den Angaben des Richtbohrers 1.962,44 m nach Azimut 181,02°.

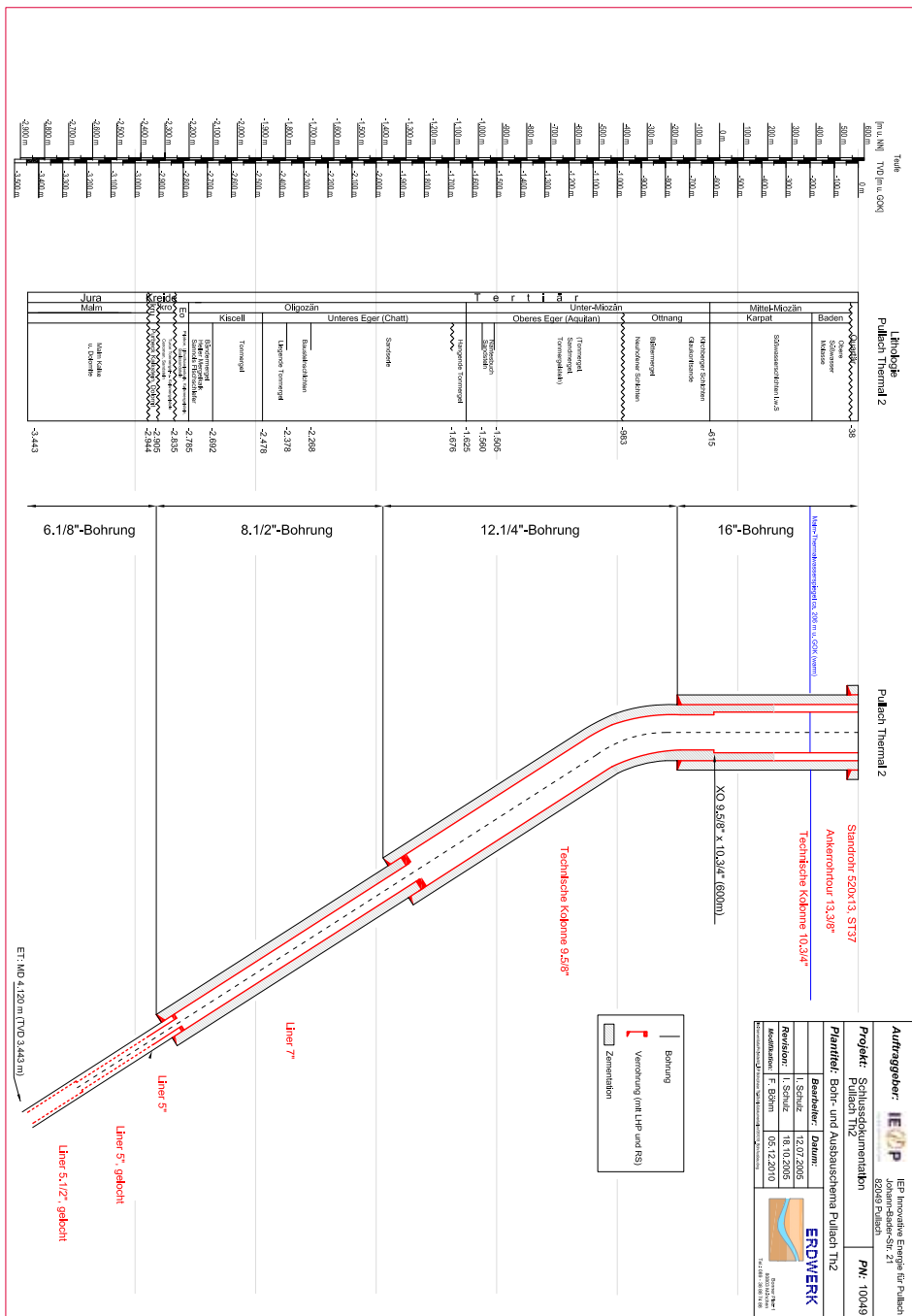


Abb. 2. Der Ausbau der Bohrungen Pullach Th2.
 Fig. 2. The drilling scheme of the Pullach Th2 well.

2.2. Das geologische Profil in der Bohrung Pullach Th 2

Das geologische Profil mit den stratigraphischen Grenzziehungen in der Bohrung Pullach Th2 (Tab. 1) 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.

3. Untersuchtes Material und Untersuchungsmethoden

Es standen Spülproben im Abstand von 10 m in den zwei Aufbereitungsformen (Grobfraktion und Feinfraktion) in abgepackten Röhrchen 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 erfolgte 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. 2). Diese Daten werden im Vergleich zu Spülungsverlusten in den verschiedenen Dolomit-Intervallen diskutiert, die Auskunft über die Ausbildung der Matrixporosität und Matrixpermeabilität geben können, sofern sie nicht auf Klüfte allein zurückzuführen sind.

Zur Ermittlung des Calcit/Dolomit-Anteils im bedeutenden Teufenbereich wurden ferner 23 Spülproben pauschal über den Winkelbereich $29\text{--}32^\circ 2\theta$ (Cu $K\alpha$) röntgenographisch untersucht.

4. 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.

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

Das untersuchte Intervall in der Bohrung Pullach Th2 (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 und nicht nur, wie im Bohrprofil angegeben, bis in den Malm zeta.

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. 3 und 4). 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 $< 4 \mu\text{m}$) 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)

Der hellgraue Kalk mit Echinodermenbruchstücken (Taf. 1B) und kantengrundeten 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 lateralen Transport gesehen werden kann. Echinodermenbruchstücke weisen nur dünne syntaxiale Anwachsäume auf; Glaukonit tritt ebenfalls auf. Die Einheit mit 10 m Mächtigkeit besteht aus zwei saubereren 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)

Graubrauner, überwiegend feinkristalliner Kalk und Dolomit (Abb. 3; Tab. 2) mit < 3 % Porosität und aufgrund der Partikelgröße vermutlich auch mit 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 Mirofaziestyp des Purbeck dar.

Das Gamma-Log des hier anstehenden Purbeck (Abb. 3) 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 auf, in denen gelegentlich die tangentialen Reliktstrukturen der Ooide (Durchmesser bis 0,6 mm) noch zu erkennen sind (Taf. 1F; Abb. 3). 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.

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. 3) 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 gering mächtigen Lagen auf. Die Kalke sind durch granularen Zement dicht verfestigt (Taf. 2B). Die Wechselfolge von reinen Peloid-Lithoklastkalcken mit mehr matrixreichen Kalcken 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. 3). 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 mikritischen 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.

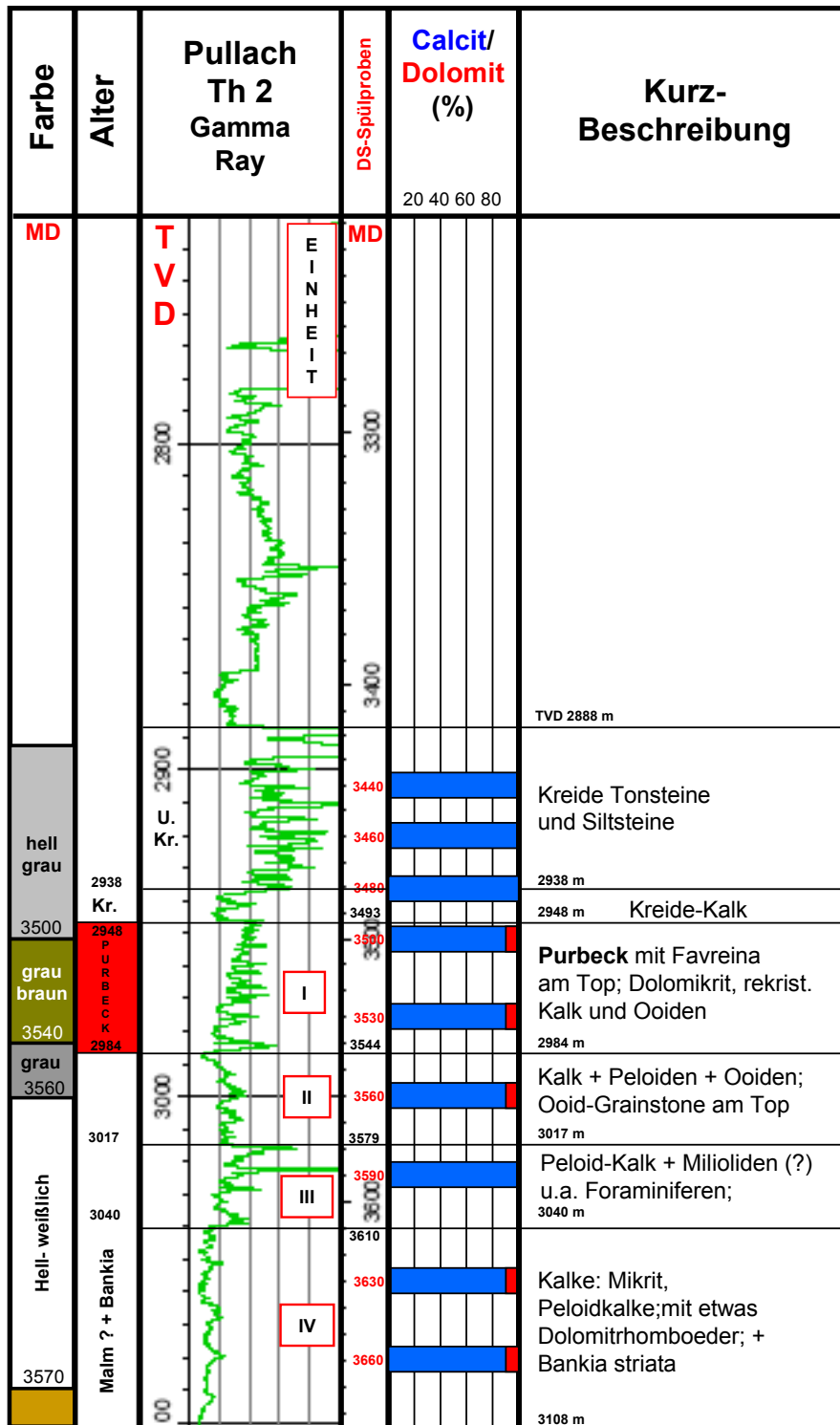
Einheit V: Reiner Feinpeloidkalk 3108 – 3154 m TVD:

M = 46 m (MD = 3689 – 3749 m)

In den hell- und dunkelbraunen, dichten Feinpeloidkalcken mit mikritischer Matrix sind nur sehr wenige Bruchstücke von biogenen Komponenten zu finden (Taf. 3A und B; Abb. 4). Dabei handelt es sich vorwiegend um feine Echinodermen-

Abb. 3. (gegenüber liegende Seite) Bohrung Pullach Th2, oberer Abschnitt: Lithologisch-fazielle Entwicklung im Purbeck und Malm. Farbe der Spülproben, stratigraphische Einstufung, Gamma ray log, Position der untersuchten Spülproben und der lithologischen Einheiten, Röntgendiffraktometer-Analyse auf Calcit/Dolomit, sowie fazielle Charakterisierung der Einheiten. MD = Bohrmeiselteufe (Measured Depth); TVD = Wahre, vertikale Teufe (Total Vertical Depth).

Fig. 3. (opposite page) Upper section of the interval studied: Lithologic/facial development in the Purbeckian and Malm of the Pullach Th2 well. Colour of cuttings, stratigraphic subdivision, gamma ray log, position of the cutting samples analyzed and lithologic units, X-ray diffraction analysis for calcite/dolomite, and facial characterization of the units. MD = measured depth; TVD = total vertical depth.



bruchstücke. Der Kalk ist mäßig rekristallisiert, wie von den hellen, granularen Calcitarenen 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 Kalk in diesem Intervall bestehen aus dichtem Mikrit (Mudstone) und Feinpeloidkalk (Taf. 3B, Abb. 4). Vereinzelt sprossen kleine, idiomorphe 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 Interkristallinporen 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 hervorsteht. Unmittelbar im Hangenden entwickelt sich ein sehr toniger, wahrscheinlich rein mikritischer Bereich mit hohen Zählraten, der von grauem Kalk überlagert wird.

Ab Einheit VIII zum Liegenden sind überwiegend reine Dolomitgesteine mit nur gering wechselnden Gehalten an Tonen (Nichtkarbonananteil) ausgebildet (Abb. 4). Die unterschiedlichen Tongehalte beeinflussen die Kristallitgröße der Dolomite beim Dolomitierungsprozeß während der tieferen Versenkungsdiagenese, wie anschließend erläutert wird.

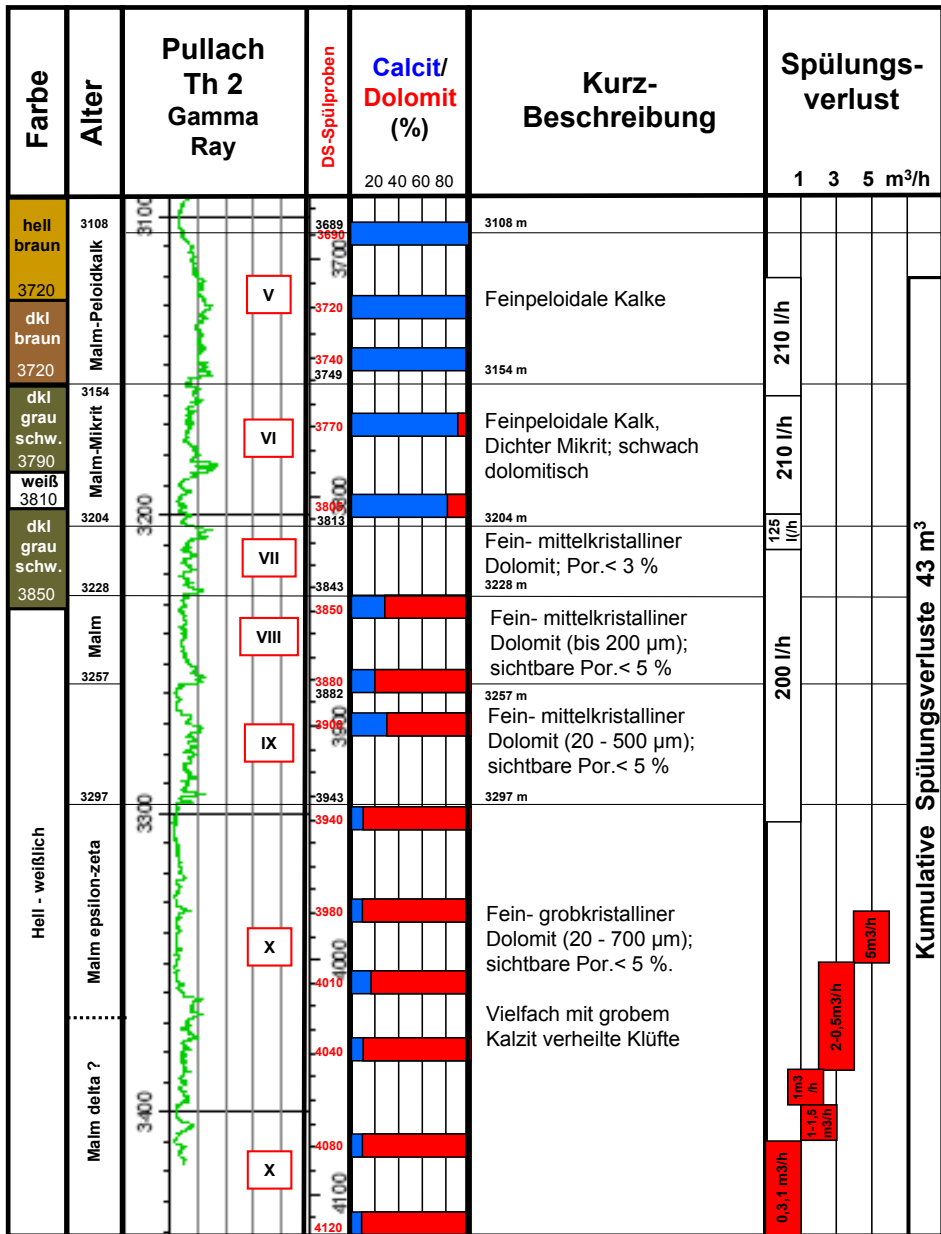
Einheit VII: Fein- bis mittelkristalliner Dolomit 3204-3228 m TVD:

M = 24 m (MD = 3813–3843 m)

Ein dunkelgrauer bis schwarzer, fein- bis mittelkristalline Dolomit tritt zwischen 3204 und 3228 m Teufe auf und ist durch die Spülprobe bei 3850 m MD erfasst (Taf. 4A; Abb. 4; Tab. 2). Er zeigt sichtbare Interkristallinporosität < 3 %, an der

Abb. 4. (gegenüber liegende Seite) Bohrung Pullach Th2, unterer Abschnitt: Lithologisch-fazielle Entwicklung im überwiegend dolomitischen Malm. Farbe der Spülproben, stratigraphische Einstufung, Gamma ray log, Position der untersuchten Spülproben und der lithologischen Einheiten, Röntgendiffraktometer-Analyse auf Calcit/Dolomit, sowie fazielle Charakterisierung der Einheiten und Spülungsverluste. MD = Bohrmeiselteufe (measured depth); TVD = Wahre, vertikale Teufe (total vertical depth).

Fig. 4. (opposite page) Lower section of the interval studied: Lithologic/facial development in the dolomitic Malm of the Pullach Th2 well. Colour of cuttings, stratigraphic subdivision, gamma ray log, position of the cutting samples analyzed and lithologic units, X-ray diffraction analysis for calcite/dolomite, and facial characterization of the units. MD = measured depth; TVD = total vertical depth.



Kumulative Spülungsverluste 43 m³

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. 4; Tab. 2) 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. 4; Tab. 2) 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 Interkristallinporen von bis zu 50 µm Größe aufweisen. Einige Dolomitkristalle weisen helle Anwachssäume auf, was auf ein Weiterwachstum in der tieferen Versenkungsphase schließen lässt. Auch hier sind ehemals vorhandene Risse mit grobblockigem Calcit unbekanntes Alters verfüllt.

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. 4; Tab. 2), der besonders in den oberen 60 m sehr rein und daher grobkristallin ist, 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 Intrakristallinporen (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. 4E

| 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-mittelkrist. 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. |
| <p>Tab. 2. Dolomitkristallgröße, Kristallmorphologie und Größe der im Dünnschliff sichtbaren Poren aus den für Zuflüsse in Frage kommenden Intervallen in der Bohrung Pullach Th2.</p> <p>Tab. 2. Dolomite crystal size, crystal morphology and size of pores visible in thin sections with flow rates from the intervals under consideration in the Pullach Th2 well.</p> | | | | | | |

und Taf. 5A), 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 ein verzahntes Kristallgefüge auf (Taf. 5B).

Andere Bereiche sind von zahlreichen interkristallinen Rissen durchzogen (Taf. 5C), die auf die Sprödigkeit des Dolomits deuten. Einschaltungen von sauberem, grobkristallinem Dolomit (Taf. 5D) 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. 5E).

4.2. 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 Th2 keine abschnittswise Zuflußraten vorliegen, werden diese Daten anschließend im Hinblick auf die Spülungsverluste diskutiert, die in einzelnen Bereichen deutliche Unterschiede aufweisen.

Die Bohrung Pullach Th2 weist in der erschlossenen Malm-Schichtfolge eine Zuflußrate von ca. 45 l/s auf. Diese Zuflußraten beschränken sich im Wesentlichen auf den dolomitischen Teil der lithologischen Einheiten VI – X.

Geht man davon aus, dass ein Großteil der Zuflußraten über Interkristallporen zwischen den Dolomitkristallen unterschiedlicher Größe erfolgt, müsste ein Zusammenhang zu den Spülungsverlusten bestehen, insofern diese auch überwiegend an Interkristallporen 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 Interkristallporen, und damit der Dolomitkristallgröße, erkennen lassen.

4.2.1. 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. 4).

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 einen geringen, jedoch zunehmenden Anteil an Dolomit in den Spülproben erkennen lassen.

Die stärksten Spülungsverluste im Malm waren im tieferen Malm, in den untersten ca. 150 Bohrm Metern (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

| Bohrmeistertiefe 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) | |

Tab. 3. Spülungsverluste in der Bohrung Pullach Th2.
Tab. 3. Loss of drilling fluid in the Pullach Th2 well.

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.

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. 2) zunehmen. So treten die höchsten, kontrollierten Spülungsverluste dort auf, wo die größten Dolomitkristalle (von 3980 – 4000 m TD; bis 700 µm) und gut sichtbare große Interkristallinporen 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. Bereiche mit höheren Gamma-Readings und demzufolge etwas erhöhten Anteilen 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.

5. 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 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

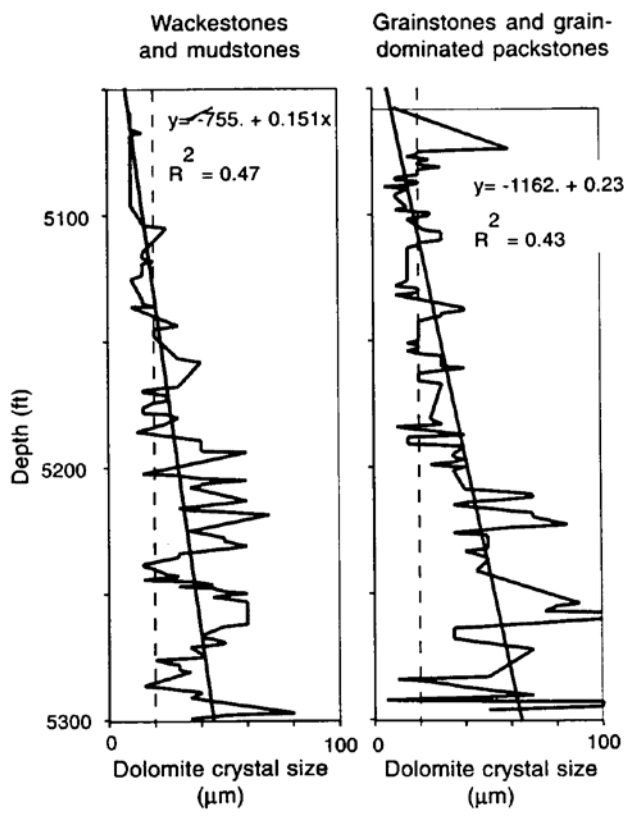


Abb. 5. Kristallgröße des Dolomits in Abhängigkeit vom Ausgangssediment und der Tiefe (aus LUCIA (1999)).
 Fig. 5. Crystal size of dolomite dependent on the primary limestone (from LUCIA, 1999).

als sekundäre Porosität weitere Zufussraten 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 Interkristallinopen 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 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 Interkristallinopen fast vollständig durch neu gebildeten Dolomit verschlossen wurden, der die Vorgänger-Kristalle als Kristallisationskeime genutzt hat. Diese Kristalle zeigen meist einen klaren, einschussfreien 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 beispielhaft beschrieben.

Kalke mit primär hohem Anteil an Nicht-Karbonat können nur fein- bis mittelkristallinen Dolomit bilden. Aufgrund der geringen Kristallgröße führt hier al-

lerdings selbst eine idiomorphe Ausbildung der Dolomitkristalle nicht zu großen Interkristallporen und damit auch nicht zu höheren Matrix-Zuflussraten (Matrix-Permeabilität).

Je größer und idiomorpher die Dolomitkristalle (ohne erhebliche Rekristallisation und/oder Weiterwachsen) ausgebildet sind desto größer werden die Interkristallporen und desto besser die Matrix-Permeabilität ausgebildet sein. Die Größe der Dolomitkristalle hängt dabei auch vom Reinheitsgrad (Anteil an Nicht-Karbonat) im primären Kalkstein ab, da die fein verteilten Tonpartikelchen das Wachstum größerer 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. 6). Dabei weisen aus Packstones und Grainstones entstandene Dolomite durchwegs größere Kristalle auf.

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 Kristallgefüge 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 eine sehr geringe Permeabilität aufweisen kann, da die Dolomitkristalle sehr klein und verzahnt sind und daher extrem kleine Porenhalsdurchmesser aufweisen. Mittelkristalline Dolomite mit vorwiegend großen Interkristallporen weisen dagegen größere Porenhalsdurchmesser und somit gute Permeabilitäten auf.

Grobkristalline Dolomite können häufig durch Weiterwachsen von mittelkristallinem Dolomit entstehen. Dadurch wurden die ehemals noch vorhandenen großen Interkristallporen fast vollständig verschlossen. Sie weisen daher nur noch eine geringe Permeabilität auf. 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-Untergund von LIEDMANN & KOCH (1990), LIEDMANN (1992), REINHOLD & SCHROEDER (1994), REINHOLD (1996), KOCH (2000), WOLFGRAF et al. (2009) und KOCH et al. (2010).

Wie in der Bohrung Pullach Th2 gezeigt, können allerdings auch späte Bildungen von Calcit die interkristallinen Porenräume und vorher gebildeten Kluftporen wieder teilweise oder sogar vollständig verschließen. In diesem Fall kommt es zur

Bildung von dichtem, kalkigem Dolomit, ohne dass der Dolomit eine Phase des Weiterwachstums durchgemacht hat.

Es zeigt sich ferner, dass die Primärfazies, d.h. die primären Bildungsbedingungen der Massenkalke 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 ausübt.

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.

6. Danksagung

Herr Prof. Dr. W. v. GOSEN (Erlangen) und einem ungenannten Gutachter danken wir für kritische Durchsicht des Manuskriptes und Korrekturen.

7. Literaturverzeichnis

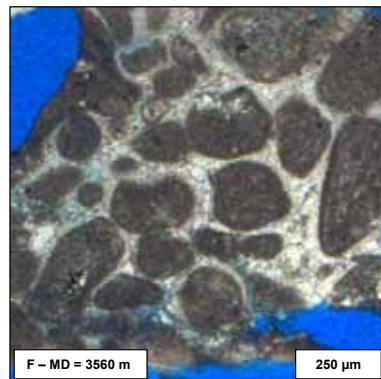
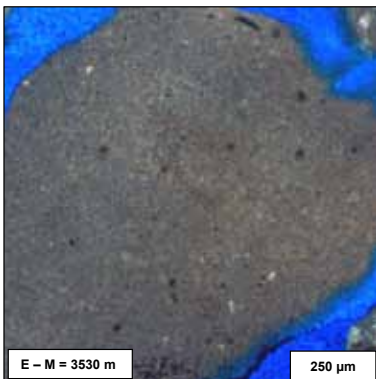
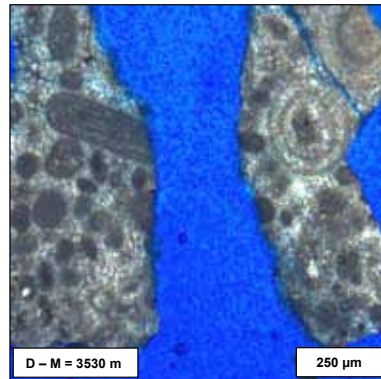
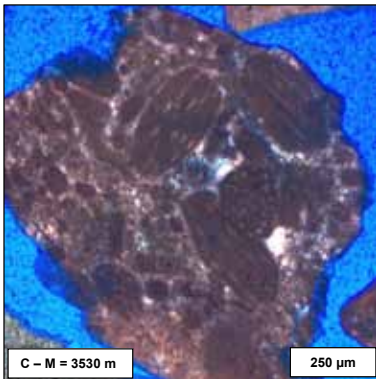
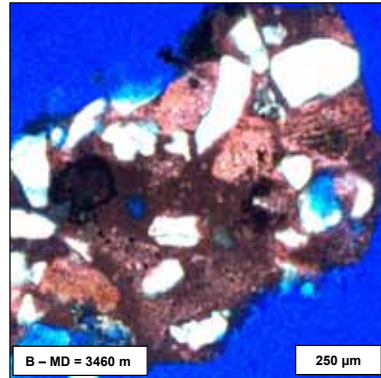
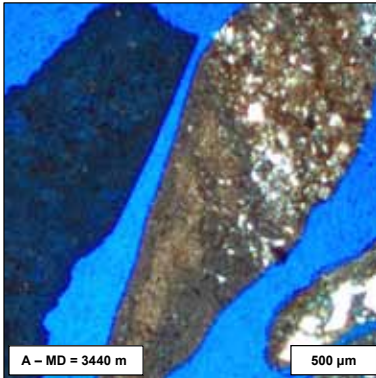
- BACHMANN, G. H., MÜLLER & M. WEGGEN, K. (1987): Evolution of the Molasse Basin (Germany, Switzerland).- In: P.A. ZIEGLER (ed.), *Compressional intra-plate deformations in the Alpine Foreland*, Tectonophysics, 137, 77-92, Amsterdam.
- BAUSCH, W. M. (1968): Clay content and calcite crystal size of limestones. – *Sedimentology*, 10, 71-75.
- CHOQUETTE, P. W. & PRAY, L. C. (1970): Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. - *AAPG Bull.*, 54, 207-250, Tulsa.
- DUNHAM, R. (1962): Classification of carbonate rocks according to depositional texture. - In: HAM, W. E. (ed.): *Classification of carbonate rocks*. - *AAPG Mem.* 1, 108-121, Tulsa.
- ERDWERK GMBH (2008): Schlussbericht Geothermiebohrung Pullach Thermal 2,?... S., unveröffentlicht, München.
- FOLK, R. L. (1959): Practical petrographical classification of limestones. - *AAPG Bull.*, 43, 1-38, Tulsa.
- GWINNER, M.P. (1976): Origin of the Upper Jurassic of the Swabian Alb (Southwest Germany).- *Contrib. Sedimentol.*, 5, 1-75, Stuttgart, Schweizerbart.

- 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. (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., FLÜGEL, E., DIMKE, M., HASSELMAYER, 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., 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.
- LIEDMANN, W. (1992): Diagenetische Entwicklung süddeutscher Malmkarbonate (unter Berücksichtigung Lumineszenz- petrographischer, fluid inclusion und geochemischer Untersuchungsmethoden).- *Diss. Univ. Heidelberg*. 307 S.
- LIEDMANN, W. & KOCH, R. (1990): Diagenesis and fluid inclusions of Upper Jurassic Sponge-Algal Reefs in SW Germany.- *Facies*, 23, 241-268, Erlangen.
- LUCIA, F.J. (1999): Carbonate reservoir characterization. - 226 p. , Berlin (Springer).
- 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. (1997): 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 1997 (Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung).
- 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).- *Diss. Univ. Berlin*, 255 S.
- REINHOLD, C. & SCHROEDER, J.H. (1994): Investigation of cores in the Geislingen area .- In: Leinfelder (cor.) *The origin of Jurassic Reefs: Current Research Developments and Results*.- *Facies*, 31, 8-11, Erlangen.
- 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. Petrol., 57, 967-975, Tulsa.
- TUCKER, M.E. & WRIGHT, V.P. (1990): Carbonate sedimentology. - 482 pp., Oxford Blackwell).
- 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, Stuttgart.
- WILSON, J.L. (1975): Carbonate facies in geologic history. - 471 pp., New York (Springer).
- WOLFGRAMM, M., OBST, K., BEICHEL, K., BRANDES, J., KOCH, R., RAUPPACH, K. & THORWART, K. (2009): Produktionsprognosen geothermischer Aquifere in Deutschland, 13 S., - Der Geothermiekongress 2009 Bochum, Germany, 17.-19. Nov. 2009

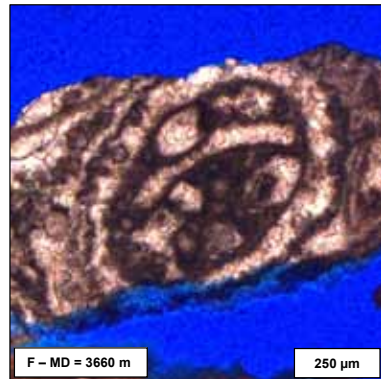
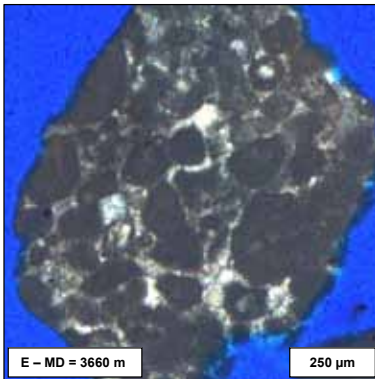
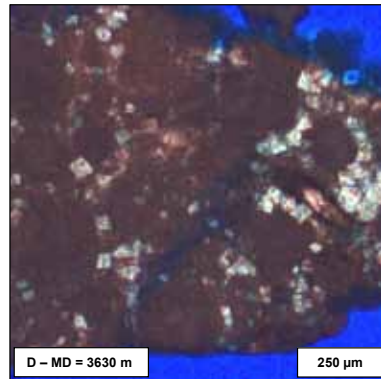
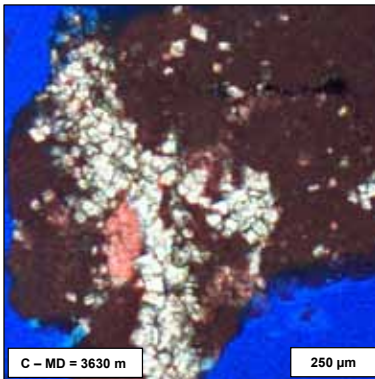
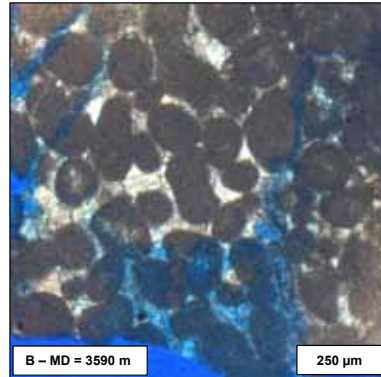
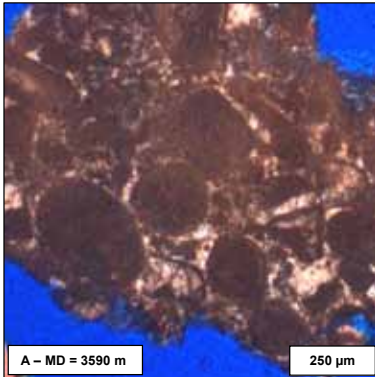
Taf. 1. A - Graubrauner Siltstein der basalen Unterkreide aus einer Wechselfolge von dünnen Kalk-/Mergelbänken mit mergelig-tonigen Partien; B - Hellgrauer Kalk mit Echinodermenbruchstücken und kantengrundeten Quarzkörnern (bis 250 µm). Die Echinodermenbruchstücke weisen nur vereinzelt dünne, syntaxiale Anwachssäume auf; C – (Einheit I; Purbeck) Favreinen-reicher Lithoklast-Peloid-Packstone mit kleinen Rest-Interpartikelporen (blau); D – (Einheit I; Purbeck) Ooid-Grainstone mit Ooiden bis zu 0,3 mm Durchmesser 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.

Plate 1. A – Grey brown siltstone of the lowermost Cretaceous from a sequence of thin-bedded limestone/marl beds alternating with marly-clayey layers; B – Light grey limestone with fragments of echinoids and subrounded quartz grains (< 250 µm). The echinoid fragments reveal local thin syntaxial overgrowths; C – (Unit I; Purbeckian) Favreina-rich lithoclast-peloid-packstone with small relic interparticle porosity (blue stained); D - (Unit I; Purbeckian) ooid-grainstone with ooids up to 0.3 mm in size revealing tangential relic textures; E - (Unit I; Purbeckian) tight, recrystallized micrite with some dolomite; F - (Unit II; Uppermost Malm) ooid-peloid-grainstone with tangential relic textures of ooids (up to 0.6 mm) and isopachous cement seams.



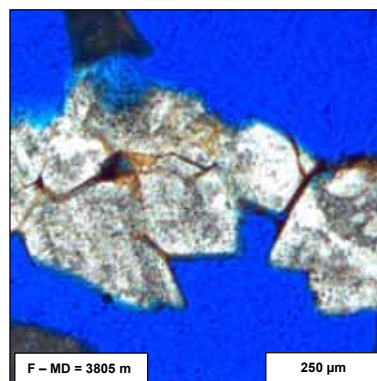
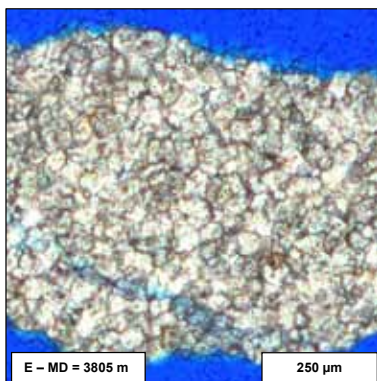
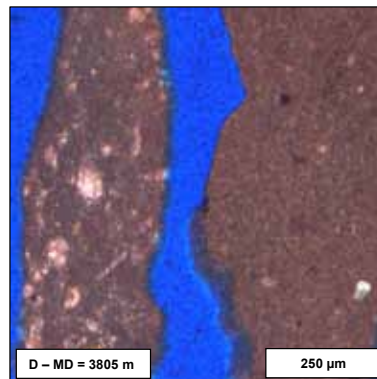
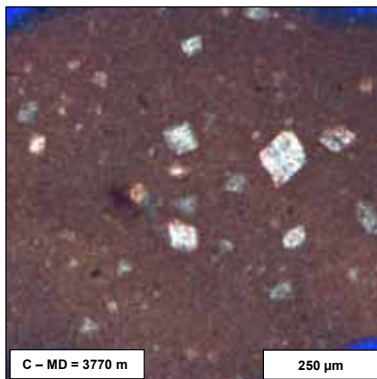
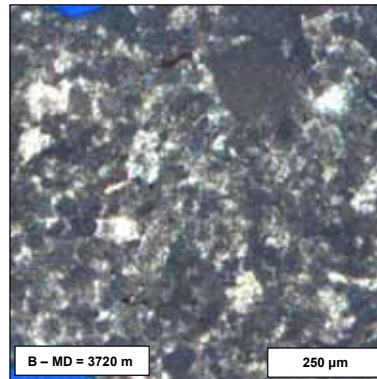
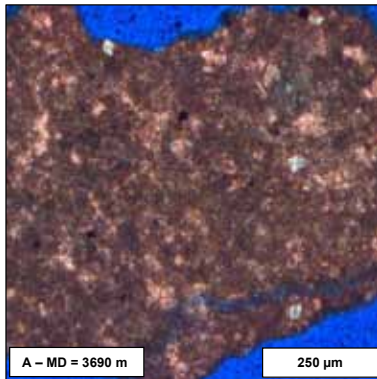
Taf. 2. A – (Einheit III; Oberster Malm) Heller, weißlicher Peloid-Lithoklastkalk mit mikritischen Lithoklasten, Peloiden und vereinzelt Milioliden und anderen benthischen Foraminiferen; B - (Einheit III; Oberster Malm) Reiner Lithoklast-Peloidkalk (Grainstone) mit völlig mikritisierten Ooiden (Größe bis 0,3 mm) und granularem Zement; C und D – (Einheit IV; Oberster Malm) Heller, weißlicher Peloidkalk mit wenigen mikritisierten Ooiden, 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 Allocheme; F - (Einheit IV; Oberster Malm) Packstone mit der stratigraphisch leitenden *Bankia striata*.

Plate 2. A - (Unit III; Uppermost Malm) light, whitish peloid-lithoclast limestone with micritic lithoclasts, peloids and a few miliolids along with other benthic foraminifera; B - (Unit III; Uppermost Malm) pure lithoclast-peloid-limestone (grainstone) with completely recrystallized ooids (up to 0.3 mm in size) and granular cements; C and D - (Unit IV; Uppermost Malm) light, whitish peloid-limestone with minor micritized ooids, microfossils, and micritic matrix; E - (Unit IV; Uppermost Malm) lithoclast-peloid-limestone (packstone-grainstone) with »itting« of allochems; F - (Unit III; Uppermost Malm) packstone revealing the stratigraphically important microfossil *Bankia striata*.



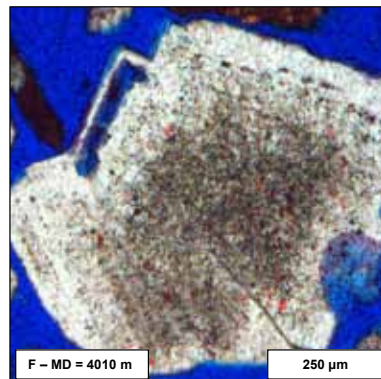
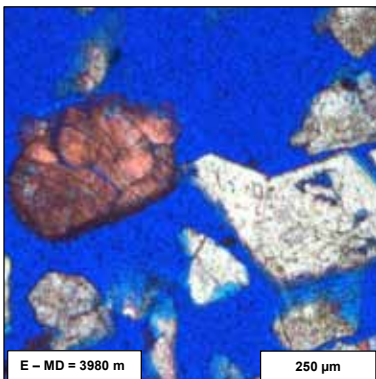
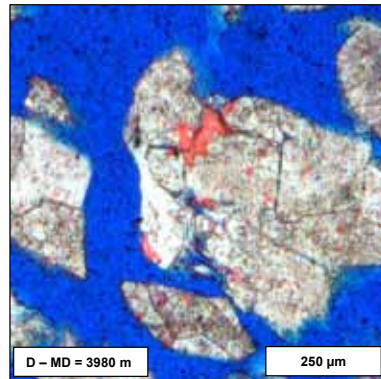
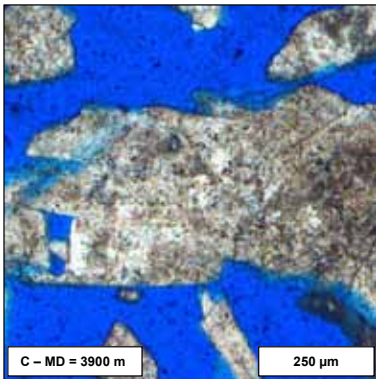
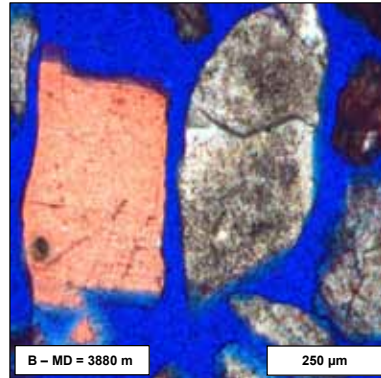
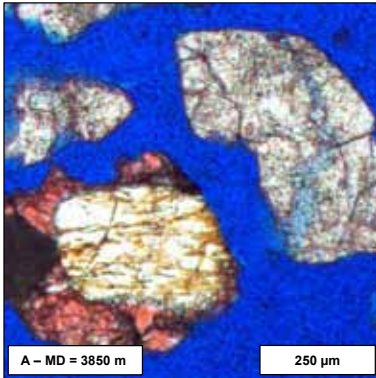
Taf. 3. A und B – (Einheit V; Oberster Malm) Hell- und dunkelbrauner, dichter Feinpeloidkalk mit mikritischer Matrix und nur sehr wenigen Bruchstücken von biogenen Komponenten (vorwiegend Bruchstücke von Echinodermen); C und D - (Einheit VI; Oberster Malm) Grauschwarzer, dichter Mudstone und Feinpeloidkalk mit vereinzelt kleinen, idiomorphen Dolomithomboedern (bis 100 µm Größe); E und F - (Einheit VI; Oberster Malm) Fein- bis mittelkristalliner 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 auftreten.

Plate 3. A and B (Unit V; Uppermost Malm) light-coloured and dark brown, dense limestone with small peloids, micritic matrix, and only traces of biogenic fragments (predominantly echinoids); C and D (Unit VI; Uppermost Malm) greyish to black, tight mudstone and fine-grained peloid limestone with single idiomorphic rhombohedra of dolomite (up to 100 µm in size); E and F (Unit VI; Uppermost Malm) fine- to –middle-crystalline dolomite composed of crystals 50 – 350 µm in size and intercrystalline porosity visible in thin section (< 5 %). larger pores up to 50 µm in size can occur locally between large idiomorphic dolomite crystals.



Taf. 4. A - (Einheit VII; Oberer Malm) Fein- bis mittelkristalliner Dolomit mit sichtbarer Interkristallinporosität und Kluftporen < 3 %. Grobgranulare Calcitkristalle, die an Dolomitkristallen in der Spülprobe anhaften, stammen aus zementierten Klüften; B - (Einheit VIII; Oberer Malm) Fein- bis mittelkristalliner Dolomit von bis 500 µm Kristallgröße und bis < 5 % sichtbarer Interkristallinporosität und Rissen. Große, einschlusreiche Kristalle, die einheitlich auslöschen, werden auf primäre Bruchstücke von Echinodermen zurückgeführt; grobe Calcitkristalle stammen aus zementierten Klüften; C - (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) Fein- bis grobkristalliner Dolomit (420 – 700 µm), der besonders in den oberen 60 m sehr rein und daher grobkristallin ausgebildet ist; einschlusreiche trübe Kerne, helle Anwachssäume und große Intrakristallinporen (Sekundärporosität) sind häufig; sichtbare Porosität bis 5 %.

Plate 4. A – Unit VII (Upper Malm) fine- to middle crystalline dolomite with intercrystalline and fracture porosity of < 3 % visible in thin section. Coarse-granular calcite crystals attached to dolomite crystals in the cutting sample originate from fractures cemented by calcite; B – (Unit VIII; Upper Malm) fine- to middle crystalline dolomite with crystals up to 500 µm in size and intercrystalline and fracture porosity up to 5 % visible in thin sections. Large inclusion-rich crystals exhibiting uniform extinction are interpreted as originally fragments of echinoids; coarse crystalline calcite crystals derive from fractures; C – (Unit IX; Upper Malm) this dolomite with whitish colour in cutting samples can reveal local large intercrystalline pores up to 50 µm in size; D, E and F (Unit X; Upper Malm) this fine- to coarse-crystalline dolomite (420 – 700 µm) is very pure and coarse especially in the uppermost 60 m of this unit; the cores of the dolomite crystals are commonly rich in inclusions and therefore appear dirty; the crystals reveal light overgrowth and locally large intracrystalline (secondary) porosity; visible porosity is under 5 % in thin section.



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.

Plate 5. A and B (Unit X; Upper Malm) in the middle zone of unit X the dolomite has a finer crystalline than above and reveals strongly interlocked, hypidiomorphic and xenomorphic crystals; C and D - (Unit X; Upper Malm) this middle- to coarse-crystalline dolomite is traversed by abundant fractures seaming crystals; very large idiomorphic dolomite crystals can be observed locally; E and F (Unit X; Upper Malm) in the lower part of unit X the dolomite is finely crystalline and exhibits fractures and intercrystalline pores filled in by calcite (red stained).

