




Die Kernbohrung Moosburg 4 – ein mineralogisch/ tonmineralogisches Richtprofil (Oberjura, Malm von Süd-Deutschland)

ROMAN KOCH¹, STEFAN KRUMM¹ & AXEL MUNNECKE¹ 



Geologische
Blätter, 2024, 71, 6

KOCH, R., KRUMM, S. & MUNNECKE, A., 2024: Die Kernbohrung Moosburg 4 – ein mineralogisch/tonmineralogisches Richtprofil (Oberjura, Malm von Süd-Deutschland). — Geologische Blätter, 71, 21 S., 3 Abb. 2 Taf.; Erlangen; doi:10.23689/figeo-6018

Manuscript submitted:
29.01.2024, manuscript
accepted: 12.03.2024

Copyright: © 2024 by the author(s). This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons

Attribution (CC BY) license
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



doi:10.23689/figeo-6018

¹Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Geozentrum Nordbayern, Paläontologie, Loewenichstraße 28, 91054 Erlangen. Email des korrespondierenden Autors: roman.koch@fau.de

Zusammenfassung: In der Bohrung Moosburg 4 wurden die Nichtkarbonate (HCl-Unlösliches; 45 Proben) der Karbonatgesteine vom Malm Alpha (Unteres Oxfordium) bis zum Malm Zeta (Oberes Tithonium) röntgendiffraktometrisch untersucht. Ziel war es, die bestehende lithostratigraphische Untergliederung genauer mineralogisch und tonmineralogisch zu untermauern, um diese in Malm-Bohrungen des Molasse-Untergrundes besser belegen zu können. Die Kombination von mineralogischen und tonmineralogischen röntgenographischen Untersuchungen der Nichtkarbonate ermöglichen es, unter Bezug zum Gamma-Log der Bohrung Moosburg SC4 eine Untergliederung in neun Einheiten (I – IX) zu definieren. Diese entspricht vom Malm Alpha bis Malm Zeta 3 weitgehend der lithostratigraphischen Unterteilung, wie sie von MEYER (1994) dokumentiert wird. Die von MEYER (1994) vorgenommene Positionierung des Malm Zeta 4-5 und die der als Purbeck definierten Schichtfolge müssen dagegen revidiert werden. Die Malm/Purbeck-Grenze ist um 99 m ins Hangende zu legen. Damit entspricht der dort im Malm analysierte Bereich dem Untertithon und dem Obertithon. Karbonatgesteine des Purbeck wurden in der vorliegenden Studie nicht untersucht. Die Zuordnung der Einheiten I-VI zu den lithostratigraphischen Einheiten von MEYER (1994) ist gut. Es ist nur der obere Teil der Bohrung Moosburg 4 als Unteres und als Oberes Tithon neu zu definieren. Allgemein kann festgestellt werden, dass eine lithostratigraphische Untergliederung des Malm auf der Basis mineralogisch/tonmineralogischer Analysen der Nichtkarbonate erstellt werden kann. Diese Methode kann daher auch in neuen Bohrungen im Molassebecken zur Untergliederung der oberjurassischen Schichtfolge erfolgreich angewendet werden.

▪ **Schlüsselwörter:** Ober-Jura, Tonmineral-Stratigraphie, Mineralostratigraphie

Abstract: In the Moosburg 4 borehole, the non-carbonates (HCl-insolubles; 45 samples) of carbonate rocks from the Malm Alpha (Lower Oxfordian) to the Malm Zeta (Upper Tithonian) were examined using X-ray diffraction. The goal was to more precisely support the existing lithostratigraphic subdivision, both mineralogically and clay mineralogically, in order to better document it in Malm drillings

www.gzn.fau.de/geologische-blaetter

in the Molasse substrate. The combination of mineralogical and clay mineralogical X-ray examinations of non-carbonates allows for the definition of a subdivision into nine units (I – IX) with reference to the gamma log of the Moosburg SC4 borehole. This subdivision corresponds largely to the lithostratigraphic division from Malm Alpha to Malm Zeta, as documented by Meyer (1994). However, the positioning of Malm Zeta 4-5 by Meyer (1994) and the layer sequence defined as Purbeck need to be revised. The Malm/Purbeck boundary should be shifted 99 m upwards. This places the analyzed section in the Malm as the Lower Tithonian and the Upper Tithonian. Carbonate rocks of the Purbeck were not investigated in the present study. The assignment of units I-VI to the lithostratigraphic units of Meyer (1994) is accurate. Only the upper part of the Moosburg 4 borehole needs to be redefined as Lower and Upper Tithonian. In general, it can be concluded that a lithostratigraphic subdivision of the Malm based on mineralogical/clay mineralogical analyses of non-carbonates can be established. This method can therefore be successfully applied in new drillings in the Molasse basin for the subdivision of the Upper Jurassic sequence.

▪ **Keywords:** Upper Jurassic, Clay-Mineral-Stratigraphy, Mineral-Stratigraphy

1. Einleitung und Problemstellung

Für den Oberjura (Malm) in S-Deutschland liegt bisher keine biostratigraphische Untergliederung mit hoher Auflösung vor. Die stratigraphische Untergliederung basiert nach wie vor auf einer Ammoniten-Stratigraphie, wie sie von QUENSTEDT (1878) etabliert und von ZEISS (1977) für den fränkischen Raum präzisiert wurde. Dabei wurden biostratigraphische Grenzen aufgrund neuer Ammoniten-Funde immer wieder genauer definiert (SCHWEIGERT 1993, 2007). Es wurde stets versucht, eine höhere Auflösung der oberjurassischen Schichtfolge mittels anderer Untersuchungsmethoden zu erreichen (Lithostratigraphie, Stromatometrie, Mineralostratigraphie, Tonmineralstratigraphie; BAUSCH 1987; OPPELT & BAUSCH 1989; BAUSCH 1994; KOCH & BAUSCH 1989, REFAI & BAUSCH 1996).

Die **Bohrung Moosburg 4** (Abb. 1), die erste Kernbohrung durch den Malm unter der bayerischen Molasse (MEYER 1994; BÖHM et al. 2010), bietet daher die einmalige Möglichkeit, ein **Mineral-stratigraphisches und Tonmineral-stratigraphisches Richtprofil** zu erstellen. Es ist davon auszugehen, dass es zu keiner Veränderung der primären Zusammensetzung des nichtkarbonatischen, detritischen Anteils kam. Wesentliche Veränderungen der tonmineralogischen Zusammensetzung erfolgen generell erst in einem Temperaturbereich von über 100°C, was einer Versenkungstiefe von etwa 3 km bei normalen geothermischen Gradienten entspricht.

Der Malm liegt in der Bohrung Moosburg 4 nach MEYER (1994) im Teufenbereich von 1115 m bis ca. 1569 m vor (454 m Mächtigkeit; Malm/Purbeck-Grenze bei 1115 m; Dogger/Malm-Grenze bei 1569 m; nach MEY-

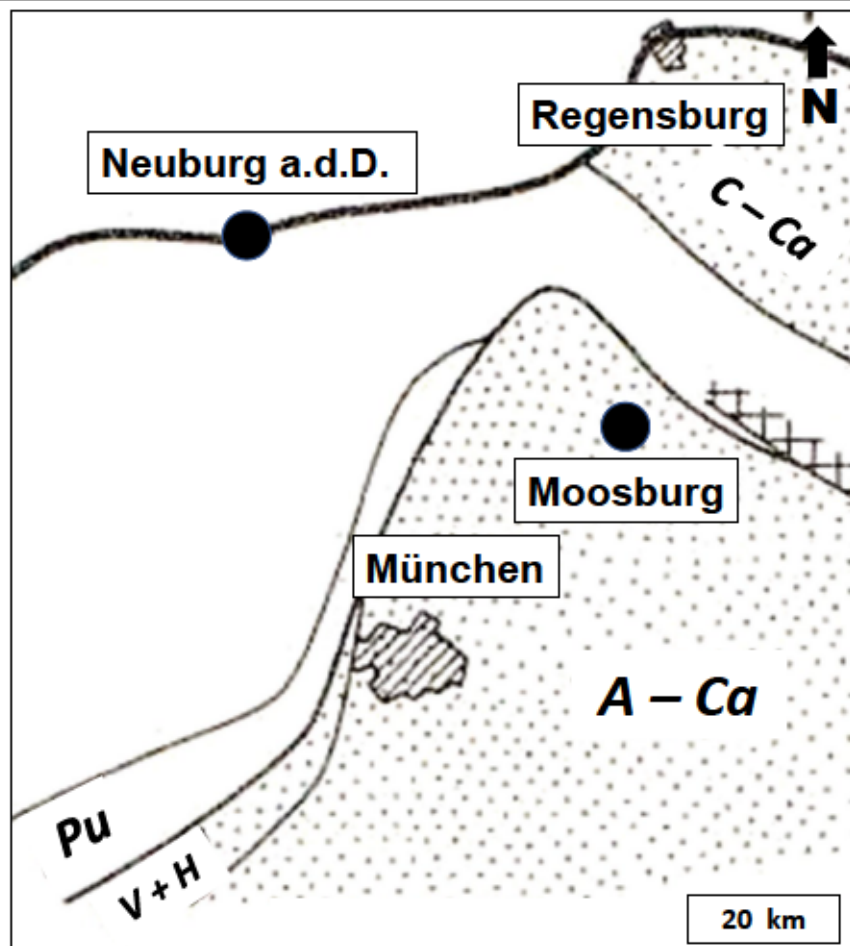


Abb. 1: Die Lage der Bohrung Moosburg 4 nordöstlich von München. Die Bohrung beinhaltet Purbeck Sedimente aus dem nördlichsten Gebiet der Purbeck-Verbreitung. Abgedeckte Karte der Molasse-Unterlage. Legende: Pu = Purbeck, A = Apt + Alb; V = Valangin (früher: Valendis); H = Hauterive; C = Cenoman; Ca = Campan (verändert nach LEMCKE 1988).

ER (1994). Die Malm/Purbeck-Grenze wird unter Berücksichtigung von Log-Daten aus neuen Geothermiebohrungen etwa 99 m höher definiert.

Daher kann davon ausgegangen werden, dass die Zusammensetzung des nichtkarbonatischen Anteils sowohl im primären Kalkstein als auch im Dolomit unverändert vorliegt. Ebenso sind laterale Korngrößenänderungen des Feinanteils aufgrund der relativ geringen Entfernung des Ablagerungsraumes von den Liefergebieten (maximal 100 km) für die Karbonate des Malm nicht zu erwarten, wie man sie z. B. aus dem Suspensionsaustrag von der Amazonas-Mündung in den Atlantik kennt (HELING 1988).

Die lithostratigraphische Untergliederung, die über Korrelationen auf engstem Raum stets verfeinert wurde (v. FREYBERG 1966, GWINNER 1976, GEYER 1980), basiert auf den unterschiedlichen Gehalten an nichtkarbo-

natischen Anteilen, die sie sich z. B. in Gamma- und Sonic-Log-Kurven widerspiegeln. BAUSCH & POLL (1976) und BAUSCH (1980) konnten nachweisen, dass sich die tonmineralogische Zusammensetzung des nichtkarbonatischen Anteils der Karbonatgesteine des Malm wahrscheinlich in klimatisch bedingten Veränderungen der Schwebfracht aus Tonmineralen und Siltanteilen in einem »stratigraphischen« Sinne in der Malm-Folge verändert. Daraus entwickelten sich die Tonmineralstratigraphie und weitere Parameter wie z. B. der Silt/Ton-Quotient (BAUSCH 1987; OPPELT & BAUSCH 1989) oder geochemische Datensätze (BAUSCH 1994; KOCH & BAUSCH 1989, REFAI & BAUSCH 1996), die lithostratigraphisch verwendet werden können. Doch basieren diese Analysen nur auf punktuellen Ergebnissen, da ein durchgehendes Profil bisher nicht untersucht wurde. Nur in der Bohrung Scherstetten-1 (BAUSCH 1987) stand Material aus Kernstücken zur Verfügung, die aber nur sehr kurze Abschnitte in dem gesamten Malm-Profil repräsentieren. In der Bohrung Dingolfing (KOCH 2016) wurde ebenfalls gezeigt, dass eine tonmineralogische Stratigraphie auch im Malm-Dolomit möglich ist. Die erhoffte Genauigkeit konnte aber aufgrund der schlecht positionierten Kernabschnitte nicht erreicht werden.

2. Stand der Forschung

2.1. Biostratigraphie des Oberjura

Die im Untergrund des Molasse Beckens bis zu etwa 450 m mächtige Malm-Serie kann biostratigraphisch nur mit Hilfe von Ammoniten (QUENSTEDT 1858; ZEISS 1977, ZIEGLER 1977) oder lithologisch (MEYER 1972, 1974, 1977; MEYER & SCHMIDT-KALER 1989, 1990, 1991, 1992; SCHMIDT-KALER & ZEISS 19783) untergliedert werden. Die Ammoniten-Biostratigraphie wird nur selten durch neue Funde verbessert (SCHWEIGERT 1993, 2007). Mittels der Ammoniten-Stratigraphie lassen sich nur relativ mächtige Bereiche aushalten. In Spülproben-Bohrungen ist diese Methode aber grundsätzlich nicht anwendbar.

Andere biostratigraphische Elemente sind nicht vorhanden, wie von KEUPP et al. (1990) und LEINFELDER et al. (1994) im Rahmen des DFG-Riffschwerpunktes festgestellt. Auch Foraminiferen (GROISS 1966; MUNK 1994), Ostracoden (OERTLI 1965) oder Calcisphären (KEUPP 1978), die gelegentlich auftreten, haben keinen biostratigraphischen Leitwert. Weiterführende biostratigraphische Untersuchungen liegen bisher nicht vor. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass für den gesamten Malm in S-Deutschland bisher keine biostratigraphische Untergliederung mit hoher Auflösung möglich ist (vgl. NIEHBUHR & PÜRNER 2014).

»Pseudobiostratigraphische Elemente«, z. B. das Auftreten von Tubiphyten und Filamenten, sind auf kurze Bereiche innerhalb der Malm-Folge be-

schränkt und stellen fazielle Indikatoren mit nur geringem stratigraphischem Wert dar (POMONI et al. 1989; KOCH et al. 2010; KOCH & MUNNECKE 2016, KOCH et al. 1994, KRÖNER et al. 2017). Mittels Log-Korrelation können diese Bereiche allerdings in vielen Bohrungen gut zugeordnet werden.

2.2. Stratigraphie des Malm in der Bohrung Moosburg 4

Die höchsten in Aufschlüssen untersuchten Schichtglieder des obersten Malm in der Südlichen Frankenalb werden von BARTHEL (1959, 1965) in der **Neuburger Folge** (Unteres Tithon) sowie von MEYER & SCHMIDT-KALLER (1994) von der Altmühlalb für die Aufschlüsse **Steinbrich Saal** (Malm Delta-Zeta; BARTHEL & SCHAIRER 1977), **Steinbruch Oberau** (Essing; Malm Delta-Zeta), **Steinbruch Marching** (Malm Zeta), **Steinbruch Kapfelberg** (Malm Zeta 2) und **Steinbruch Laisacker** (Malm Zeta 2-3; Barthel 1971) angegeben. Schichten, jünger als Malm Zeta 2, sind aufgrund der Kippung der Süddeutschen Großscholle erodiert worden. Daher stellt die Bohrung Moosburg 4, in welcher der Malm vollständig durchteuft und gekernt wurde, die Standardbohrung (Lithostratigraphie) für den Malm im Untergrund des Östlichen Molasse-Beckens dar. MEYER (1994) hat die Schichtfolge vom Malm Alpha bis zum hangenden Purbeck untergliedert und das Tithon, das hier erschlossen wurde, in Malm Zeta-1 bis Malm Zeta 4-5 eingestuft, was aber keine gesicherte biostratigraphische, sondern eine rein lithostratigraphische Gliederung bedeutet. Im Hangenden weist MEYER (1994) einen mächtigen Bereich als Purbeck aus, der sowohl aus liegenden Kalken mit »Breisteinen« und flachmariner Fauna (*Bankia striata*, *Clypeina jurassica* und benthische Foraminiferen) und einen obere, dolomitischen Teil mit *Favreina salevensis* besteht. In neueren Untersuchungen von Geothermie-Bohrungen im Östlichen Molasse-Becken wird jedoch nur der obere Bereich mit *Favreina salevensis* als Purbeck bezeichnet. Der liegende Bereich mit »Breisteinen« und flachmariner Fauna muss daher dem obersten Malm, also dem Oberen Tithon, zugeordnet. Im gesamten Tithon, das hier durchwegs aus flachmarinen Karbonatsedimenten besteht, gibt es keine biostratigraphisch indikative Fauna. Inzwischen wird das Tithon, von dem der obere Teil nicht in Tagesaufschlüssen vorhanden ist, nur noch in Unteres und Oberes Tithon international unterteilt. Daher dürfte dieser Teil in der Bohrung Moosburg 4, der sich im Liegenden des dolomitischen *Favreinen*-Purbeck befindet, das Obere Tithon repräsentieren. Die sich daraus ergebende höhere stratigraphische Positionierung der Malm/Purbeck-Grenze kann nach Log-Analyse in vielen neuen Bohrungen im Molasse-Beckens präzisiert werden (BÖHM et al. 2010; BEICHEL et al. 2014).

3. Material und Methoden

Für die Untersuchungen wurde die im Malm vollständig durch Kerne belegte Bohrung Moosburg 4 und die von MEYER (1994) dokumentierte lithostratigraphische Untergliederung verwendet (Abb. 2). Insgesamt 45 Proben wurden im Kernmagazin des Bayerischen Landesamtes für Umwelt in Hof aus charakteristischen Kernmarschen (KM) ausgewählt, an denen auch die Benennung der Proben orientiert ist.

3.1. Probenaufbereitung

Die Aufbereitung der insgesamt 45 Proben erfolgte am GeoZentrum Nordbayern in Erlangen nach folgendem Schema:

- Pulverisieren der Proben
- Einwaage von mindestens 100 g Rohgesteinspulver (abhängig vom Reinheitsgrad der Karbonate)
- Lösen des Karbonat-Anteils mittels Säure (10%-tige HCl)
- Mehrfaches Waschen (4 x Zentrifugieren) der Proben zum Entfernen von Cl-Ionen.
- Trocknen der Proben bei 70°C zur Vermeidung von temperaturbedingten Veränderungen bei höheren Temperaturen (Abgabe von Kristallwasser)
- Röntgen-Pulveranalyse der nichtkarbonatischen Probe (Unlöslicher Rückstand=UR)
- Erstellung von Tonmineral-Pipette-Präparaten
- Quantitative Röntgenographische Ermittlung der mineralogischen Zusammensetzung (Kaolinit, Illit, Montmorillonit, Chlorit, Wechselagerungs-Phasen) des nichtkarbonatischen Anteils mittels Riedveld-Analyse an Pulverproben
- Analyse der tonmineralogischen Zusammensetzung aus Tonmineral-Pipette-Präparaten nach einheitlicher Methodik (Flächenanteile), die einen relativen Vergleich ermöglichen und relative Änderungen der Zusammensetzung in der Malm-Folge dokumentieren.

3.2. Röntgenmethodik

Pauschale Pulver-Präparate der unlöslichen Rückstände wurden mit einem Siemens D5000 Theta/Theta-Diffraktometer untersucht. Die verwendete Strahlung (Cu- α bei 40 kV und 35 mA) wurde mit einem sekundären Graphitmonochromator gefiltert. Die bestrahlte Fläche war 20 mm lang, sie wurde durch variable Blenden über den Winkelbereich konstant gehalten. Die Aufnahmen wurden von 2-65° 2 θ mit einer Schrittweite von 0,02° und

einer Zählzeit von 1 sec pro Schritt gefahren. Die qualitative und quantitative Auswertung erfolgte mit der Rietveld Methode (Profex/BGMN-Software, DOEBELEIN & KLEEBERG 2015). Die Rietveld Methode errechnet aus den kristallographischen Parametern der beteiligten Minerale, der bevorzugten Teilchenorientierung und Domänengröße, dem Untergrundverlauf und der Geometrie des Diffraktometers ein synthetisches Diffraktogramm, das mit dem gemessenen verglichen wird. Der Algorithmus optimiert die Parameter, insbesondere die Mineralgehalte, so dass die Abweichung zwischen gemessenen und berechneten Kurven minimiert wird.

Vom unlöslichen Rückstand wurden auf poröse Keramikscheiben Suspensionen pipettiert und Texturpräparate hergestellt, die im lufttrockenen Zustand und nach 24-stündiger Bedampfung mit Ethylenglycol bei 60° gemessen wurden, um die Schichtsilikate genauer zu identifizieren. Wegen des variablen Chemismus und der sehr unterschiedlichen Teilchenorientierung der beteiligten Phasen, erfolgt die Rietveld-Modellierung hier nur qualitativ bis semiquantitativ.

Von den meisten Proben wurden zunächst XRD-Gesamtanalysen (Rietveld Methode) des HCl-unlöslichen Rückstandes (UR) durchgeführt. Daraus ergaben sich sowohl Daten zur gesamtmineralogischen Zusammensetzung des UR als auch Daten zu tonmineralogischen Anteilen. Auf der Basis dieser Ergebnisse wurden Proben für tonmineralogische Pipette-Präparate ausgewählt, die wir oben beschrieben hergestellt wurden. Verschiedene präparative Schwierigkeiten bei der Herstellung bewirkten, dass viele Proben mehrmals präpariert werden mussten, bevor verwertbare XRD-Diagramme vorlagen. Daraus wurde deutlich, dass für eine aussagekräftige Analyse der Vergleich der Ergebnisse der pauschalen XRD-Analyse des UR mit der tonmineralogischen XRD-Analyse die Voraussetzung ist. Nur mittels der Kombination beider Ergebnisse sind die hier vorgelegten Mineral- und Tonmineral-stratigraphischen Interpretationen spezifischer lithostratigraphischer Intervalle möglich.

Es wurde in Anlehnung an die klassischen Präparations-Methoden vorgegangen (Normalpräparat, Glykolisieren, Tempern bei 550°C wurde hingegen nicht durchgeführt). Zur Unterscheidung zwischen Kaolinit und Chlorit dienten in den Diagrammen der Pulverpräparate der 002-Reflex von Kaolinit und der 004-Reflex von Chlorit. Die Anteile der Peakflächen der verschiedenen Tonminerale wurden halbquantitativ unter der Annahme ermittelt, dass Kaolinit, Illit/Muscovit (Mica), Chlorit, Montmorillonit und Wechsellagerungsphasen (Mixed-Layers) 100% der analysierbaren Tonminerale ausmachen. Sogenannte »weighting-factors«, wie von BISCAYE (1964) vorgeschlagen, wurden nicht berücksichtigt. Die tonmineralogischen wurden gemäß den Angaben von CHEN (1977) und der dort dokumentierten Auswertung ermittelt. Obwohl die Berechnung der Peakflächen immer noch eine häufig angewandte Methode zur Quantifizierung von Tonmineralen

darstellt (VISCOSY-SHIREY et al. 2010; TANKERSLEY & BALANTYNE 2010), ist sie gelegentlich aufgrund verschiedener Faktoren, welche die Intensität der Reflexe stark beeinflussen können, ungenau. So weisen KRUMM & BUGGISCH (1991) nach, dass die Orientierung der Tonminerale (Schichtsilikate) die Intensität der Röntgen-Peaks stark beeinflusst, wobei hohe Orientierung auf dünnen Glasobjektträgern die Intensität der Basisreflexe von Tonmineralen stark erhöht. So kann z. B. der Reflex eines schlecht kristallisierten Illits einen Bereich von mehr als 10 Å überdecken, während der Reflex eines gut kristallinen Illits bei 10 Å konzentriert ist (MEUNIER & VELDE 2004). Eine Mischung aus etwas unterschiedlicher Partikelgröße und nicht bevorzugter Orientierung der Mineralphasen beeinflusst die Intensität der Reflexe ebenfalls.

4. Ergebnisse – Der Malm in der Bohrung Moosburg 4

Der Malm liegt in der Bohrung Moosburg 4 mit einer Mächtigkeit von 454 m vor. Untersuchungen von BÖHM et al. (2010) und WANG (2014) zur Überprüfung von Gamma-Log Readings (API-Units) zeigten, dass die Zusammensetzung der nichtkarbonatischen Anteile großen lithostratigraphischen Leitwert haben können. Für die vorliegenden Untersuchungen wurden 45 Proben für die gesamte Kernstrecke im Malm analysiert (viele wurden doppelt gemessen; im Schnitt alle 10 m eine Probe). So konnte eine gute Korrelation der Ergebnisse mit hoher Auflösung mit dem Gamma-Log erwartet werden, das, wie WANG (2014) zeigt, sehr sensibel auch auf geringe Tongehalte (< 5%) reagiert (PAWELLEK & AIGNER 2004), was sich deutlich in den API-Units widerspiegelt (Abb. 2).

Die von MEYER (1994) verwendeten stratigraphischen Einheiten können vom Malm Alpha bis zum Malm Zeta 3 übernommen werden. Die Definition des Malm Zeta 4-5 und die Positionierung des Purbeck müssen nach Daten aus neueren Geothermiebohrungen aufgrund von Log-Korrelationen revidiert werden (BÖHM et al. 2010; BEICHEL et al. 2014). Der Bereich von 1176 m bis 1075 m Teufe (Mächtigkeit 99 m) repräsentiert wahrscheinlich das Obere Tithon. In Tagesaufschlüssen der Südlichen Frankenalb in den Neuburger Bankkalken ist nach BARTHEL (1959, 1965) nur das Untere bis mittlere Tithon erschlossen.

Gemäß dieser Gliederung befindet sich die Basis des Purbeck bei 1075 m Teufe. Unmittelbar im Liegenden folgt ein etwa 10 m mächtiges Paket von Mudstones und Wackestones mit dichtem Mikrit und wenigen biogenen Bruchstücken (Taf. 1/A). Im Liegenden folgt ein Bereich von etwa 99 m Mächtigkeit (1075-1176 m Teufe), der überwiegend aus Packstones besteht, in denen *Bankia striata* und *Clypeina jurassica* neben benthischen Foraminiferen und anderen Dasycladaceen auftreten (Taf. 1/B-D). In Kalksteinen mit stark mikritisierten Allochemen ist z. B. *Bankia striata* nur schwer zu

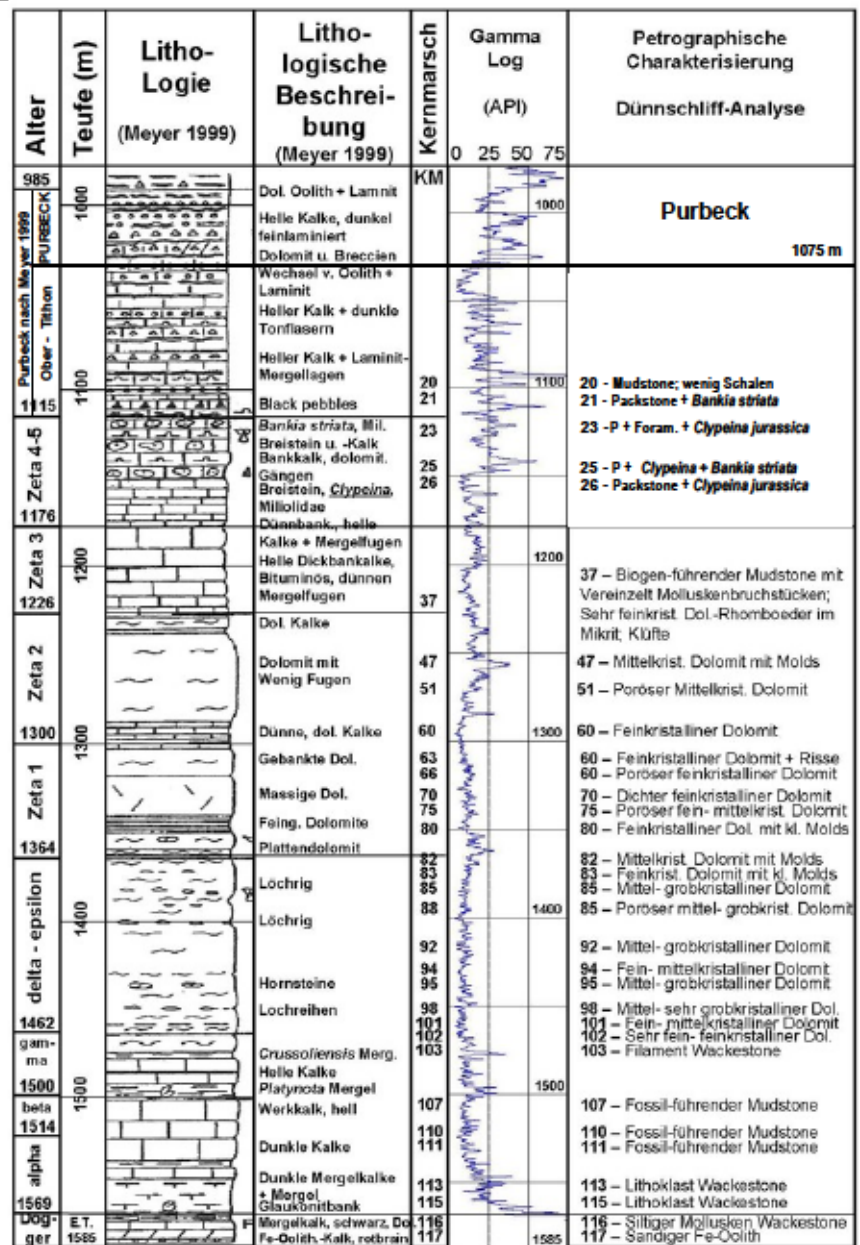


Abb. 2: Ausgangssituation für die Mineral- und Tonmineral-Stratigraphie. Die Bohrung Moosburg 4. Stratigraphie, Lithologie und lithologische Beschreibung nach MEYER (1994). Zusätzlich Gamma-Log sowie Position (KM-Angaben; Kernmarsch) und Kurzbeschreibung der vorliegenden petrographischen Dünnschliffe (aus Böhm et al. 2010). Die Probennummern (KM) entsprechen den Bezeichnungen in den Röntgendiagrammen.

erkennen (Taf. 1/B und C). In gut erhaltenen Packstones können Längs- und Querschnitte von *Bankia striata* gefunden werden (Taf. 1/D). *Clypeina jurassica* kommt oft nur in Bruchstücken in Foraminiferen-Packstones vor (Taf. 1/E).

Bemerkenswert ist, dass bereits in den Proben KM-20 und KM-21, die sich nach MEYER (1994) im Purbeck befinden, *Bankia* und *Clypeina* auftreten, was die Verlagerung der Purbeck/Malm-Grenze in einen höheren Be-

Tafel 1**Dünnschliffaufnahmen charakteristische Faziestypen aus dem Bohrkern Moosburg 4.**

Die stratigraphische Zuordnung der Proben erfolgt gemäß der überarbeiteten Stratigraphie (Abb. 3). Die Aufnahmen stammen von mit Porenraum-Blau getränkten Dünnschliffen; wenn nicht besonders erwähnt. Die Länge der Maßstabsbalken beträgt stets 500 μm .

A (KM 20): Im obersten Teil des Malm tritt ein etwa 10 m mächtiger dichter Mudstone auf. Er zeigt sich im Gamma-Log als markantes Paket mit sehr geringem Gamma-Reading. In dem Mud- bis Wackestone ist nur feiner Fossilbruch zu finden. Stylolithen mit Kanalporen sind häufig.

B (KM 21): Der *Bankia*-Lithoklast-Packstone entspricht dem von MEYER (1994) definierten »Breistein«, der einen Fossilshuttalk darstellt, in dem *Bankia striata* häufig zu finden ist. Unter den mikritisierten Komponenten ist der Querschnitt einer mikritisierten *Bankia striata* (B) an dem äußeren Ring heller Wandporen zu erkennen.

C (KM 23): Der Packstone mit Foraminiferen enthält vereinzelt Bruchstücke von *Clypeina jurassica* sowie kleine Dolomithromboeder in der Matrix.

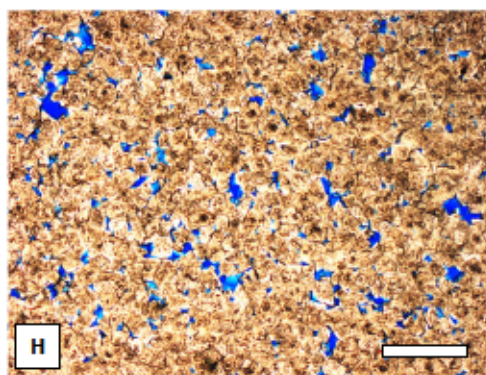
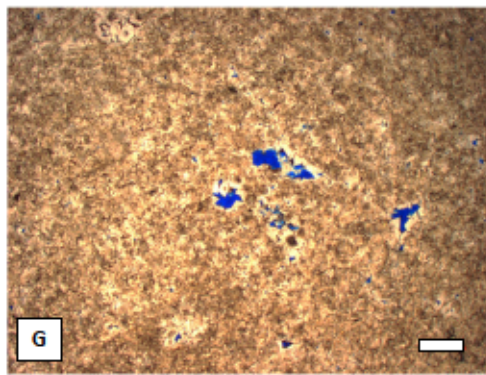
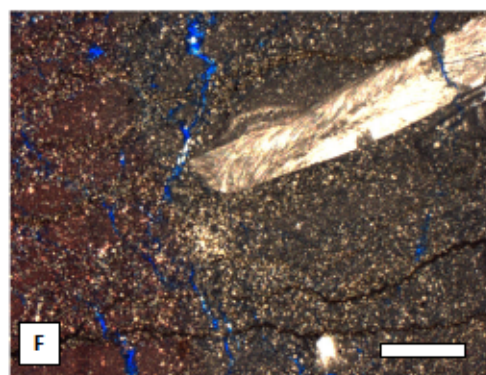
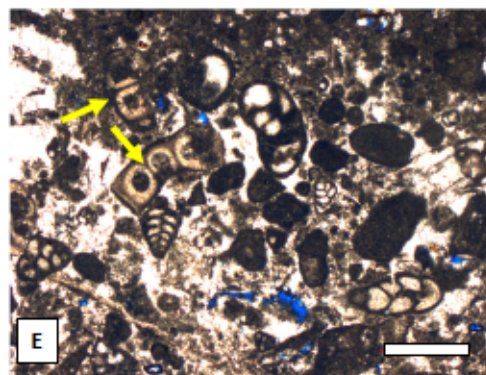
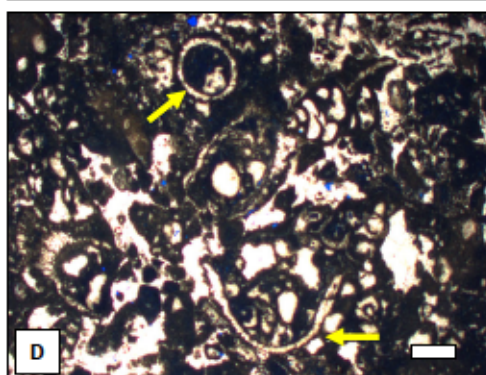
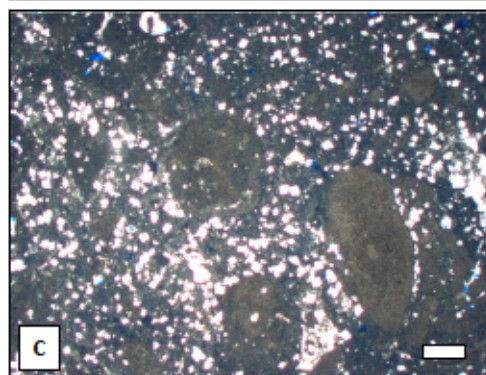
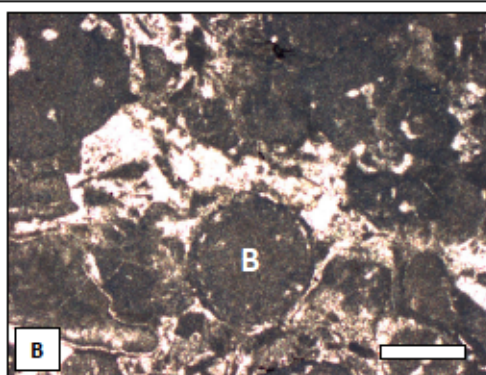
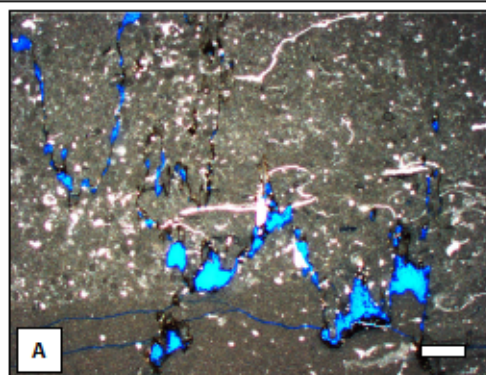
D (KM 25): Packstone mit Lithoklasten und *Bankia striata* im Längsschnitt (unterer Pfeil) und Querschnitt (oberer Pfeil). Das Gestein weist viele kleine Gesteinslösungsporen auf, die hier nicht mit Porenraum-Blau getränkt wurden.

E (KM 26): Packstone mit zahlreichen benthischen Foraminiferen und Bruchstücken von *Clypeina jurassica* (Pfeile). Ehemalige Hohlräume sind mit granulearem Calcit-Zement verfüllt.

F (KM 37): Biogenführender Mudstone mit wenig Fossilbruch (Mollusken-Bruchstücken) und kleinen Dolomithromboedern ($< 10\text{-}25 \mu\text{m}$), die in der mikritischen Grundmasse schwimmen.

G (KM 47): Sehr fein- bis mittelkristalliner Dolomit (Porosität 0,7%; Permeabilität 0,03 mD) mit noch erkennbaren kleinen Partikel-Lösungsporen (molds).

H (KM 51): Der makroskopisch dicht erscheinende feinkristalline Dolomit besteht aus 50-120 μm großen, idiomorphen bis hypidiomorphen Dolomitkristallen. Dolomitkristalle, die an Interkristallinporen grenzen, weisen dort teilweise helle, dünne Anwachssäume auf.



Tafel 2

A (KM 63): In einem sehr porösen, feinkristallinen Dolomit sind die kleinen Rhomboeder nur schwach verbunden. Dies deutet auf eine ehemalige, wahrscheinlich mikritische Matrix hin, die nach der Bildung der Dolomitrhomboeder gelöst wurde.

B (KM 75): Der feinkristalline, homogene Dolomit (Porosität 8%) besteht aus idiomorphen bis hypidiomorphen Kristallen und lässt rundliche größere Lösungsporen erkennen, die wahrscheinlich durch die Lösung von biogenen Komponenten entstanden sind.

C (KM 85): Der mittel – grobkristalline Dolomit besteht aus Kristallen von 80-300 µm Größe. Auffallend sind hier horizontale und vertikale Stylolithen mit mäßiger Amplitude, starker Tonanreicherung und offenen Kanalporen (channel porosity).

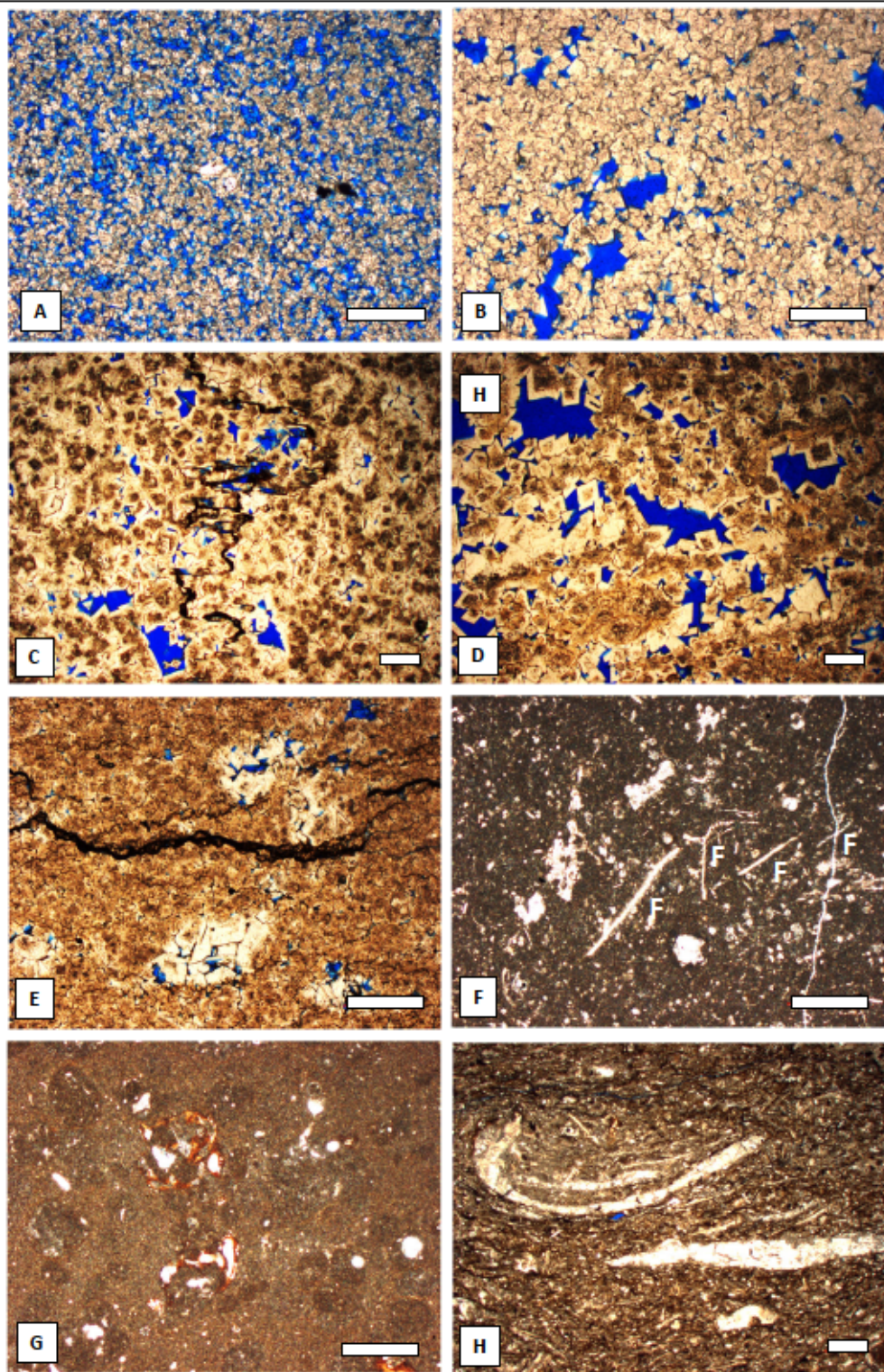
D (KM 94): Große Partikellösungsporen (möglicherweise ehemalige Molluskenbruchstücke) weisen große Dolomitkristalle mit hellen Anwachs säume an feinerem Matrix-Dolomit auf, die in den Hohlraum hineinragen. Sie konnten sich in den freien Porenraum der Lösungspore ungehindert idiomorph entwickeln.

E (KM 102): Dieser schwach laminierte feinkristalline Dolomit weist viele ausgeprägte schichtparallele Stylolithbahnen mit geringer Amplitude auf. Dies deutet auf die Dolomitisierung eines primären, tonreichen Wackestones hin, im dem auch rundliche Biogene enthalten waren, die gelöst wurden. In die freien Lösungsporen konnten helle, einschussfreie idiomorphe Dolomitkristalle ungehindert gebildet werden.

F (KM 13): Längliche, dünne Filamente (F) sind charakteristisch in Wackestones an der Basis des Malm Delta zu finden. Ferner sind Calcisphären (kleine, kreisrunde Elemente) und kleine Dolomitrhomboeder in der Matrix zu finden.

G (KM 115): In den Mud- bis Wackestones des Malm Alpha und Beta treten dichte, dunkel erscheinende mikritische Lithoklasten auf. Ihre Oberfläche wird oft von kleinen benthischen Foraminiferen besiedelt, die eine mikro-onkolithische Struktur erzeugen.

H (KM 116): Das Erreichen des Dogger in der Bohrung Moosburg 4 ist durch einen siltig-sandigen Mollusken-Rudstone charakterisiert.



reich unterstreicht. Das Liegende des von MEYER (1994) als Malm Zeta 4-5 definierten Intervalls zeichnet sich vor allem durch Mud- bis Wackstones mit wenigen Fossilbruchstücken und kleinen Dolomitrhomboedern aus (Taf. 1/F). Der Bereich wird von MEYER (1994) als Dickbankkalke mit dünnen Mergelfugen beschrieben.

Der etwa 240 m mächtige liegende Dolomit-Bereich (1226-1462 m) weist abwechselnd sehr fein- bis grobkristalline Dolomite auf, die durch dünnplattige Dolomite voneinander getrennt sein können. Es ist wahrscheinlich, dass die sehr fein- bis feinkristallinen Dolomite (Taf. 1/G und Taf. 2/E) aus primären Mudstones, laminierten Mudstones und Wackstones mit hohem Matrix-Anteil hervorgegangen sind. Darin befindliche größere Biogene wurden während der Dolomitisierung gelöst und die so entstandenen Partikel-Lösungsporen (Biomolds) mit hellen, meist idiomorphen Dolomitmikrokristallen partiell wieder gefüllt wurden (Taf. 2/D und E).

Primär gröbere Kalksteine (Pack- und Grainstones) erhielten durch die Dolomitisierung meist ein homogenes, überwiegend hypidiomorphes Kristallgefüge (Taf. 2/C und D). Bei andauerndem Kristallwachstum behinderten sich die Kristalle gegenseitig und es entstand ein sich verzahnendes Kristallgefüge, in dem auch Vertikal- und Horizontal-Stylolithen auftreten (Taf. 2/C). Lagenweise tritt hochporöser, feinkristalliner Dolomit auf, in dem die idiomorphen Dolomitrhomboeder nur schwach verbunden sind und ein poröses, offenes Kristallgefüge bilden (Taf. 2/A). Dies geht vermutlich auf das Herauslösen einer mikritischen Matrix zurück, in der die Rhomboeder primär nach unvollständiger Dolomitisierung des primären Kalksteins eingebettet waren. Die Liegend-Grenze des dolomitischen Bereiches ist scharf und führt zu einem Filament-Wackstone (Taf. 2/F), wie er in vielen Bohrungen an der Basis des Malm Delta auftritt.

Im tonigen Malm Gamma werden die beiden Leithorizonte der *Platynota*-Zone und der *Crussoliensis*-Mergel von MEYER (1994) als deutlich Peaks im Gamma-Log definiert (Abb. 2). Die mikritischen Kalke des Malm Beta und des Malm Alpha weisen nur kleine biogene Komponenten auf (Taf. 2/G). Mikritische Lithoklasten zeigen kleine benthische Foraminiferen. Der liegende Dogger, der noch erbohrt wurde, zeigt siltig-sandigen Mollusken-Rudstone mit großen Molluskenbruchstücken (Taf. 2/H).

5. Interpretation und Diskussion – Mineralostratigraphie der Bohrung Moosburg SC4

Neun Einheiten, die sich jeweils durch spezifische mineralogische und tonmineralogische Charakteristika auszeichnen, können im Oberjura der Bohrung Moosburg 4 unterschieden werden. Diese werden auch unter Berücksichtigung des Gamma-Logs bestimmt, das fast tonfreie, mäßig tonige und stark tonige Abschnitte erkennen lässt. Sie werden daher sowohl

aufgrund des Gamma-Logs als auch ihrer mineralogischen und tonmineralogischen Zusammensetzung der Nichtkarbonate des HCl-Unlöslichen der Karbonatgesteine definiert. Die Grenzen der neun Einheiten werden mit den von MEYER (1994) angegebenen lithostratigraphischen Intervallen (Malm alpha – Malm zeta 4-5) für die Bohrung Moosburg 4 verglichen (Abb. 3). Es zeigt sich, dass manche Grenzen geringfügig verschoben werden sollten. Die von MEYER (1994) für den Malm zeta 4-5 und für das Purbeck angezeigten Grenzen sind dagegen vollständig zu revidieren. Beispiele der Untersuchungsergebnisse der (teils doppelt) analysierten 45 Proben sind im Anhang dokumentiert. Das Vorkommen der Dreischicht-Tonminerale Muscovit/Illit wird unter dem Begriff »Mica« zusammengefasst. In der vorliegenden Arbeit werden nur die stratigraphischen Implikationen der Untersuchungen dargestellt, Interpretationen zu eventuell durch Klimaänderungen bedingten unterschiedlichen Zusammensetzung der mineralogischen und tonmineralogischen Zusammensetzung der Nichtkarbonate der oberjurassischen Karbonatgesteine werden in einer weiteren Arbeit unter Berücksichtigung zusätzlicher Veröffentlichungen zu diesen Parametern verfasst.

Der kleine untersuchte Teil des **liegenden Dogger** weist hohe Quarz-Gehalte sowie Mikroklin und Sanidin auf. Tonmineralogisch sind wenig Kaolinit und Mica zu etwa gleichen Anteilen sowie Spuren von Chlorit vorhanden. Die Einheiten des Malm gliedern sich wie folgt:

Einheit-I entspricht dem **Malm Alpha** und **Malm Beta** MEYER (1994). Hier sind hohe Anteile an Quarz sowie das Vorkommen von Sanidin zu vermerken. Die etwas höheren Anteile von Mica im Vergleich zu Kaolinit sind durch Bereiche mit viel detritischem Muskovit (Schichtflächen; kompaktive Anreicherung) bedingt. Die liegende und hangende Grenze der Einheit-I können trotz geringer Probenzahl und fehlender Beprobung im Malm Gamma mit Hilfe des Gamma-Logs festgelegt werden.

Einheit-II umfasst den oberen Teil des **Malm Gamma** und den unteren Teil des **Malm Delta**. Deutlich höhere Anteile von Kaolinit im Vergleich zu Mica werden sowohl in der mineralogischen als auch in der tonmineralogischen Analyse abgebildet. Ferner treten geringe Anteile an Chlorit, Montmorillonit und Mixed-Layers auf.

Einheit-III entspricht dem oberen Teil des **Malm Delta**, dem **Malm Epsilon** und dem unteren Teil des **Malm Zeta-1**, der bis zur hangenden Grenze des von MEYER (1994) als feingeschichteter Dolomit beschrieben wird. Dabei sind besonders hohe Gehalte an Quarz durch das Vorkommen von Hornsteinknollen und sehr kleiner verkieselter Bereiche bedingt. Quarz kann hier nicht als rein detritisch angesehen werden. Verkieselung von Schwammbruchstücken und das Vorkommen von Pyrit ist für viele Bereiche des hier anzusiedelnden Treuchtlinger Kalksteins belegt.

Die Einheit-III kann in einen liegenden und einen hangenden Teil untergliedert werden. Der liegende Teil weist etwa gleiche Anteile von Kaolinit und Mica sowie hohe Gehalte an Pyrit auf. Der hangende Teil zeichnet sich durch eine konstante Zunahme von Kaolinit sowie durch das erhöhte Vorkommen von Montmorillonit und Mixed-Layers aus. Die Positionierung der oberen Grenze am Top des feingebankten Dolomits nach MEYER (1994) erscheint im Vergleich mit dem Gamma-Log problematisch, da das erhöhte Gamma-Reading im Bereich des von MEYER (1994) bezeichneten Plattendolomits auftritt und der feingebankte Dolomit sich vorwiegend durch geringe Gamma-Strahlung auszuzeichnen scheint. Dies könnte durch eine ungenaue Positionierung einzelner Kernabschnitte (und der daraus genommenen Proben) mit einer Teufen-Unschärfe von 2-3 m bedingt sein, wie von WANG (2014) festgestellt wurde. Dabei kann auch die Entnahme größerer Probenstücke aus den jeweils 1 m umfassenden Abschnitten jeder Kiste von Bedeutung sein. Die Positionen der *Platynota*-Zone und der *Crussoliensis*-Zone entsprechen dagegen dem Gamma-Log sehr genau. Hier wurden auch kaum Proben von weiteren Forschergruppen entnommen.

Einheit-IV kann als repräsentativ für dem **Malm Zeta 1** gesehen werden. Auch hier ist allerdings eine Höherlegung der hangenden Grenze an die Oberkante der dünnen dolomitischen Kalke (MEYER 1994) zu beachten. Hier treten wieder sehr hohe Quarzgehalte auf, die auf sekundäre Verrieselungen zurückzuführen sein dürften. Kaolinit weist hier sowohl in der mineralogischen als auch in der tonmineralogischen Analyse deutlich höhere Gehalte als Mica auf. Montmorillonit und Mixed-Layers sind nur vereinzelt in Spuren nachweisbar.

Einheit-V entspricht dem **Malm Zeta 2**. Mineralogisch wurde nur eine einzige Probe untersucht, die sehr hohen Quarzgehalte (Hornstein) zeigt. Für dieses Intervall liegen weitere drei tonmineralogische Analysen vor. Hier sind allgemein höhere Gehalte an Mica sowie punktuell geringe Gehalte an Montmorillonit oder Mixed-Layers zu finden.

Einheit-VI repräsentiert den **Malm Zeta 3**, wobei die hangende Grenze zum Malm 4-5 (MEYER 1994) aufgrund der tonmineralogischen Ergebnisse etwas angehoben werden muss. Neben zum Teil hohen Quarzgehalten ist vor allem das Einsetzen von Albit bemerkenswert. Charakteristisch ist die Abnahme des Kaolinit-Gehalte und die Zunahme der Gehalte von Montmorillonit und Mixed-Layers zum Hangenden.

Einheit VII entspricht dem von (MEYER 1994) als **Malm Zeta 4-5** bezeichneten Intervall, dass nach neueren Daten aus anderen Bohrungen eher als **Oberes Tithon** bezeichnet werden sollte. Hier sind die Zunahme von Kaolinit und die Abnahme an Montmorillonit und Mixed-Layers zum Hangenden der Einheit VII bis in die Basis der hangenden Einheit-VIII charakteristisch. In den **Einheiten-VI und VII** deuten das Vorkommen

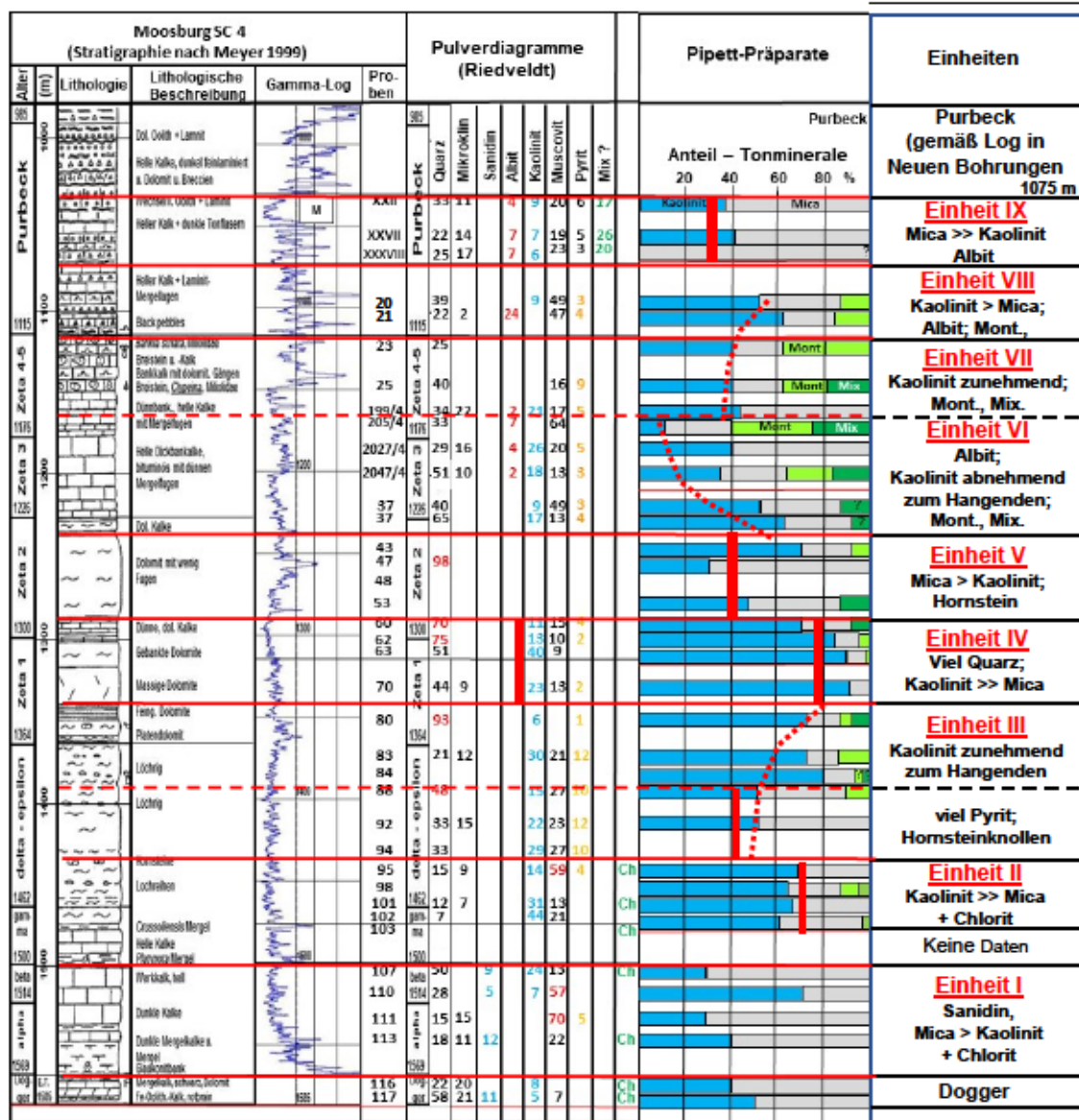


Abb. 3: Ergebnisse der mineralogischen und tonmineralogischen Untersuchungen im Oberjura der Bohrung Moosburg 4. Neben den grundlegenden Daten von Meyer (1994) sind das Gamma-Log und die definierten neun Einheiten dokumentiert. Die roten Balken markieren graphisch dargestellte Mittelwerte des Vorkommens von Kaolinit. Die gestrichelten Linien markieren Trends im Kaolinit-Gehalt.

von Kaolinit, Mica und besonders die Anteile an Montmorillonit sowie an Wechsellagerungsphasen wahrscheinlich auf einen sedimentologischen/klimatologischen Umschwung hin, der semiaride Klimabedingungen mit geringem Niederschlag dokumentiert, die für die Bildung von quellfähigen

Tonmineralen günstig waren. Die sehr geringen Gehalte an Quarz unterstreichen diese Interpretation.

Einheit VIII, die von (MEYER 1994) bereits der Basis des hangenden **Purbeck** zugeordnet wurde, ist nur mit zwei Proben belegt. Sie weisen geringe Kaolinit-Anteile in der Gesamtmineralogie und hohe Kaolinit-Anteile und dagegen in der Tonmineralogie auf. Das Vorkommen von *Bankia striata* in der Probe 21 weist darauf hin, dass dieser Bereich als **Oberes Tithon** und nicht als basaler Teil des Purbeck anzusprechen ist (vgl. Fig. 2).

Einheit-IX, die von (MEYER 1994) ebenfalls als **Purbeck** angesprochen wurde, ist ebenfalls dem **Oberen Tithon** zuzuordnen. Das Vorkommen von Mikroklin und Albit sowie geringe Gehalte von Kaolinit zeichnen diesen Bereich aus und machen ihn für eine Abgrenzung der lithologischen Einheiten im obersten Malm besonders indikativ.

Proben des hangenden Purbeck wurden nicht untersucht.

6. Schlussfolgerungen

In der Bohrung Moosburg 4 wurden die Nichtkarbonate (HCl-Unlösliches) vom Malm Alpha bis zum Malm Zeta röntgenographisch (Diffraktometer-Analysen) untersucht. Die Kombination von mineralogischen und tonmineralogischen röntgenographischen Untersuchungen der Nichtkarbonate ermöglicht die Untergliederung in neun Einheiten (I – IX, die vom Malm Alpha bis Malm Zeta 3 weitgehend der lithostratigraphischen Unterteilung entspricht, wie sie von (MEYER 1994) dokumentiert wird. Die von (MEYER 1994) vorgenommene Positionierung des Malm Zeta 4-5 und die der als Purbeck definierten Schichtfolge müssen dagegen revidiert werden. Die Malm/Purbeck-Grenze ist um 99 m ins Hangende zu legen. Damit entspricht der dort im Malm analysierte Bereich dem Unteren Tithon und dem Oberen Tithon. Karbonatgesteine des Purbeck wurden in der vorliegenden Studie nicht untersucht. Die Zuordnung der Einheiten I-VI zu den lithostratigraphischen Einheiten von (MEYER 1994) ist sehr gut möglich.

7. Danksagung

Wir danken dem Forschungsbeirat der Geothermie-Allianz Bayern für die grosse finanzielle Unterstützung des Seedfunding-Antrags »Erarbeitung eines tonmineralogischen Richtprofils in der Kernbohrung Moosburg SC4 für den Malm S-Deutschland«.

Der Projektleitung der Geothermie-Allianz Bayern; Herrn Dr. M. Keim (TUM) danken wir für die große Hilfestellung, die er uns beim Antrag gewährt hat.

8. Literatur

- BARTHEL, K. W. (1959): Die Cephalopden des Korallenkalks aus dem Oberen Malm von Laisacker bei Neuburg a. d. Donau – I *Gravesia*, *Sutneria*, *Hybonoticerias*. – Neues Jb. Geol. u. Paläont. Abh., 108, 47-74, Stuttgart.
- BARTHEL, K. W. (1965): Die Untersuchung der Neuburger Bankkalke (Mittel-Tithon) – ein Zwischenbericht. – Mitt. Bayer. Staatssamml. Paläont. hist. Geol., 5, 185-188, München.
- BARTHEL, K. W., JANICKE, V. & SCHAIRER, G. (1971): Untersuchungen am Korallen-Riffkomplex von Laisacker bei Neuburg a. D. (unteres Untertithon, Bayern). – Neues Jb. Geol. u. Paläont. Mh., Jg. 1971/H.1, 4-23, Stuttgart.
- BARTHEL, K. W. & SCHAIRER, G. (1977): Die Cephalopoden des Korallenkalks aus dem Oberjura von Laisacker bei Neuburg a. d. Donau – *Glochicerias*, *Taramellicerias*, *Neochetoceras* (Ammonoidea). – Mitt. Bayer. Staatssamml. Paläont. hist. Geol., 17, 103-113, München.
- BAUSCH, W. M. (1980): Tonmineralprovinzen in Malmkalken. – Erlanger Forschungen, Reihe B, Naturwiss. und Medizin, Band 8, 78 S, Erlangen.
- BAUSCH, W. M. (1987): Significance and interpretation of the silt/clay ratio in insoluble residues of limestones. – Chem. Erde, 46, 329-335, Jena.
- BAUSCH, W. M. (1994): Geochemische Analyse von Karbonatgesteins-Sequenzen. – Abh. Geol. B. –A., Bd. 50, 25-29.
- BAUSCH, W. M. & POLL, K. G. (1976): Nichtkarbonatische Rückstände von Malmkalken der Ostalpen. – Geologische Rundschau, 65/2, 579-592, Stuttgart.
- BEICHEL, K., KOCH, R. & WOLFGGRAMM, M. (2014): Die Analyse von Spülproben zur Lokalisierung von Zuflusszonen in Geothermiebohrungen. Beispiel der Bohrungen GT Unterhaching 1/1a und 2. (Süddeutschland, Molassebecken, Malm). – Geol. Bl. NO-Bayern, 64, 43-65, Erlangen.
- BISCAYE, P. E. (1964): Distinction between kaolinite and chlorite in Recent sediments by X-ray diffraction. – The American Mineralogist, 49, 1282-128.
- BÖHM, E., BIRNER, J., STEINER, U., KOCH, R., SOBOTT, R., SCHNEIDER, M. & WANG, A. (2010): Tafelbankiger Dolomit in der Kernbohrung Moosburg SC4: Ein Schlüssel zum Verständnis der Zuflussraten in Geothermiebohrungen des Malm Aquifers (Östliches Molasse-Becken, Malm δ – ζ ; Süddeutschland). – Z. geol. Wiss., 39, 117-157, Berlin.
- CHEN, P. (1977): Table of key lines in X-ray powder diffraction patterns of minerals and clays and associated rocks. – Department of Natural Resources, Geological Survey Occasional Papers, 21, 1-67, Bloomington.
- DÖBELIN, N. & KLEEGERG, R. (2015): Profex: a graphical user interface for the Rietveld refinement program BGMN. – Journal of Applied Crystallography 48 (2015), 1573-1580. doi:10.1107/S1600576715014685
- FREYBERG, VON, B. (1966): Der Faziesverband im Unteren Malm Frankens. Ergebnisse der Stromatometrie. – Erlanger geol. Abh., 62, 112 S., Erlangen.
- GWINNER, M. P. (1976): Origin of the Upper Jurassic limestones of the Swabian Alb (Southwest Germany). – Contrib. Sedimentol., 5: 1-75, 66 Figs., Stuttgart (Schweizerbart).
- GEYER, O. F. (1980): Über stratigraphische Grenzen im schwäbischen Jura. – Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver., N.F. 62, 251-264, Stuttgart.
- GROSS, J. TH. (1966): Eine Foraminiferen-Fauna aus ÄtZRückständen von Massenkalken des süddeutschen Ober-Malm. – Geol. Bl. NO-Bayern, 16/III, 39-49, Erlangen.

- HELING, D. (1988): Ton- und Siltsteine, 185-231; in Füchtbauer, H. Hrsg. (1988): Sedimente und Sedimentgesteine, 1141 S., Schweizerbart, Stuttgart.
- KEUPP, H. (1978): Calcisphären des Untertithon der Südlichen Frankenalb und die systematische Stellung von *Pithonella* Lorenz 1901. – N. J. Geol. Paläont. Mh., 1978/2, 87-98, Stuttgart.
- KEUPP, H., KOCH, R. & LEINFELDER, R. (1990): Steuerungsprozesse der Entwicklung von Oberjura-Spongolithen Süddeutschlands: Kenntnisstand, Probleme und Perspektiven. – Facies, 23, 141-174, Erlangen.
- KNOBLAUCH, U. & KOCH, R. (2022): Mikrofazies und Tonmineral-Stratigraphie im Bereich der Unteren und Oberen Mergelplatten (Bayern, Südliche Frankenalb; Kimmeridge 2.1 und 2.2; Malm Delta 1 und 2). – Geologische Blätter, 70, 165-201, Erlangen.
- KOCH, R. (2016): Bohrung Dingolfing-1 - Interpretation der stratigraphischen Position der Kernstrecken 240-470 m TVD mittels Fazies-Biostratigraphie und Tonmineralstratigraphie. – Untersuchungsauftrag TUM.
- KOCH, R. & BAUSCH, W. M. (1989): Überblick über die stratigraphisch-palynologischen, sedimentologisch-mikrofaziellen und mineralogisch-geochemischen Untersuchungen am Kernmaterial der Bohrung Saugau GB 3. – Arb. Geol. Landesamt Bad.-Württ., 13, 181-198, Freiburg i. Br.
- KOCH, R. & MUNNECKE, A. (2016): Fazielle Entwicklung und Korrelation des Oberjura in den Bohrungen Bad Waldsee GB2 und Altensteig 1 (Süddeutschland; Molasse-Becken; Impressamergel- bis hangende Bankkalk-Formation). – Geol. Bl. NO-Bayer, 66, 165-203, Erlangen.
- 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.
- 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.
- KRÖNER, F., KOCH, R. & MUNNECKE, A. (2017): Aufschlussmodelle zur Fazies-Interpretation des Oberjura im östlichen Molasse-Becken (Workshop und Exkursion; 7. und 8. August 2017; Erlangen). – Geol. Bl. NO-Bayern, 67, 167-208, Erlangen.
- KRUMM, S. & BUGGISCH, W. (1991): Sample preparation effects on illite crystallinity measurement: Grain-size gradation and particle orientation: Journal of Metamorphic Geology, 9, 671-677.
- LEINFELDER, R., KRAUTTER, M., LATERNSER, R., NOSE, M., SCHMID, D. U., SCHWEIGERT, G., KEUPP, H., BRUGGER, H., HERRMANN, R., REHFELD-KIEFER, U., SCHROEDER, J. H., REINHOLD, C., KOCH, R., ZEISS, A., SCHWEIZER, V., CHRISTMANN, H., MENGES, G. & LUTERBACHER, H. (1994): The origin of Jurassic Reefs: Current research developments and results. – Facies, 31: 1-56, Erlangen.
- LEMCKE, K. (1988): Geologie von Bayern - Das bayerische Alpenvorland vor der Eiszeit. – Schweizerbart, 175 S., Stuttgart.
- 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. (1974): Stratigraphie und Fazies des Frankendolomits (Malm) - 2. Teil: Mittlere Frankenalb. – Erlanger geol. Abh., 96, 34 S., Erlangen.
- MEYER, R. K. F. (1977): Stratigraphie und Fazies des Frankendolomits und der Massenkalk (Malm) - 3. Teil: Südliche Frankenalb. – Erlanger geol. Abh., 104, 40 S., Erlangen.
- 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. (1989): Paläogeographischer Atlas des süddeutschen Oberjura (Malm). – Geol. Jb., A 115, 3-77, Hannover.
-

- MEYER, R. K. F. & SCHMIDT-KALER, H. (1990): Paläogeographie und Schwammriffentwicklung des süd-deutschen Malm - ein Überblick. – *Facies*, 24, 175-184, Erlangen.
- MEYER, R. K. F. & SCHMIDT-KALER, H. (1991): Wanderungen in die Erdgeschichte. Durchs Urdonautal nach Eichstätt. – 1. Aufl., 112 S., München (Pfeil).
- MEYER, R. K. F. & SCHMIDT-KALER, H. (1992): Wanderungen in die Erdgeschichte. Durch die Fränkische Schweiz. – 1. Aufl., 167 S., München (Pfeil).
- MEYER, R. K. F. & SCHMIDT-KALER, H. (1994): Fazieswandel und Probleme im Obermalm (Tithon) zwischen Solnhofen und Neuburg/D. (Bayern). – *Erlanger geol. Abh.*, 123, 1-49, Erlangen.
- MEUNIER, A. & VELDE, B. (2004): *Illite. Origins, Evolution and Metamorphism*. Springer Verlag, Berlin.
- MUNK, C. (1994): Agglutinierte Foraminiferen aus Schwammriffkalken des Oxfordium und Kimmeridgium der Nördlichen Frankenalb (Bayern). – *Abh. Geol. B. –A.*, 50, 353-368.
- NIEBUHR, B. & PÜRNER, TH. (2014): Plattenkalk und Frankendolomit – Lithostratigraphie der Weißjura-Gruppe der Frankenalb (außeralpiner Oberjura, Bayern). – In: Niebuhr (Red.), *Lithostratigraphie der Weißjura-Gruppe der Frankenalb (außeralpiner Oberjura) und der mittel- bis oberjurassischen Reliktorkommen zwischen Straubing und Passau (Bayern)*, Beitrag zur Stratigraphie von Deutschland, Schriftenreihe der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften SDGG, 83, 5-71.
- OERTLI, H. J. (1965): Ostrakoden der Neuburger Bankkalke (Mittl. Tithon) von Neuburg an der Donau, Südbayern. – *Mitt. Bayer. Staatssamml. Paläont. Hist. Geol.*, 5, 127-135, München.
- OPPELT, R. & BAUSCH, W. M. (1989): Nichtkarbonat-Analyse von Malm-Kalken der Bohrung Saulgau GB 3. – *Abh. geol. Landesamt Baden-Württemberg*, 13, 139-160, Freiburg i. Br. Pawellek & Aigner 2004),
- POMONI-PAPAIIOANNOU, 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, 263-184, Erlangen.
- QUENSTEDT, F. A. (1858): *Der Jura*. Verlag der H. Laupp'schen Buchhandlung, Tübingen.
- REFAI, R. T. & BAUSCH, W. M. (1996): Geochemisch-mineralogische Kennzeichnung von Malm-Zeta-Profilen der Fränkisch-Schwäbischen Alb. – *Erlanger Beitr. Petr. Min.*, 6, 23-56, Erlangen.
- SCHMIDT-KALER, H. & ZEISS, A. (1973): Die Juragliederung in Süddeutschland. – *Geologica Bavarica*, 67, 155-161, München.
- SCHWEIGERT, G. (1993): Die Ammonitengattungen *Gravesia* Salfeld und *Tolvericeras* Hantzpergue und ihre Bedeutung für den Grenzbereich Oberkimmeridgium/ Untertithonium im Schwäbischen Jura. – *Geol. Bl. NO-Bayern*, 43, 167-186, Erlangen.
- SCHWEIGERT, G. (2007): Ammonite biostratigraphy as a tool for dating Upper Jurassic lithographic limestones from South Germany – first results and open questions. – *N. Jb. Geol. Paläont. Abh.*, 245/1, 117-125, Stuttgart.
- TANKERSLEY K. B. & BALANTYNE M. R. (2010): X-ray powder diffraction analysis of late Holocene reservoir sediments. – *J. Archaeol. Sci.*, 37(1), 133-138.
- VISCOSI-SHIRLEY, C., MAMMONE, K., PISIAS, N. G. & DYMOND, J. R. (2003): Clay mineralogy and multi-element chemistry of surface sediments on the Siberian-Arctic Shelf. *PANGAEA*
- WANG, A. (2014): Combined microfacies-log-analysis of Cambrian and Ordovician carbonate rocks. – *Diss. Univ. Erlangen-Nürnberg*, 250 S., Erlangen.
- ZEISS, A. (1977): Jurassic stratigraphy of Franconia. – *Stuttgarter Beitr. Naturk.*, B 31, 32 S., 8 Abb., Stuttgart.
- ZIEGLER, B. (1977): The »White« (Upper) Jurassic in southern Germany. – *Stuttgarter Beitr. Naturk.*, B 26, 79 S., Stuttgart.
-