

Industrie-Paläontologie zur Unterstützung von geothermischen Tiefbohrungen

Industry oriented palaeontological methods to support deep geothermal drilling projects

Torsten Steiger¹, Stephan Uhlig¹

¹ Geotec Consult Ingenieurbüro Uhlig + Partner, Markt Schwaben, Deutschland

Zusammenfassung

Paläontologische, sedimentologische und stratigraphische Untersuchungen sowie Mikrofazies-Analysen stellen einen wesentlichen Teil der geowissenschaftlichen Analytik in Bohrprojekten der Geothermie- und Kohlenwasserstoff-Industrie dar. Sie sind notwendig, um stratigraphische Abfolgen und Faziescharakteristika der erbohrten Gesteine zu erkennen und um bohrtechnische Entscheidungen, wie Meißelwahl und die Festlegung der Verrohrungs-Absetzteufen zu unterstützen. Die genannten Ziele erfordern funktionstüchtige Laborkapazitäten, die direkt auf dem Bohrplatz zur Verfügung stehen und verbesserte analytische und wissenschaftliche Methoden. Die Arbeitsabläufe müssen so angepasst sein, dass schnelle Dünnschliff-Präparation und Gesteinsaufbereitung zu sofortigen lithologischen und stratigraphischen Daten verhelfen. Die erforderlichen Methoden orientieren sich an Originalmaterial, das aus Bohrkernen oder aus Spülproben entnommenem Bohrklein gewonnen wird. Gesteinsscheiben oder Dünnschliffe werden hinsichtlich ihrer Fazies-Spektren oder biostratigraphisch signifikanter Biogene untersucht. Zusätzlich werden durch die Analysen Informationen über die Diagenese-Abläufe und das Reservoir-Potenzial der erbohrten Gesteine erwartet. In einem On-Site Labor können schnelle Faziesanalysen, insbesondere der Karbonate, innerhalb der Probenahme-Intervalle durchgeführt werden und stellen somit – in Kooperation mit den Mudlogging-Services – eine der effektivsten Teildisziplinen in den Tiefbohrungen der geologischen Rohstoff-Exploration dar.

Schlüsselworte: Paläontologie, Faziesanalysen, Dünnschliffe, On-Site-Labor, Tiefbohrungen

Abstract

Paleontological studies in economic geothermal and hydrocarbon drilling projects are an essential part in terms of recognizing stratigraphic sequences and facies characteristics of the drilled material and helping to take technical decisions such as to choose adequate drill bits and appropriate casing depths. The tasks require properly functioning laboratory facilities directly on the drill site and improved analytical and scientific methods. Workflows should be adjusted to fast thin section and rock preparation and immediate production of lithologic and stratigraphic data. These methods are based on the observation of original rock material taken as drilled cores or cuttings. Slabs or thin sections are analyzed in order to differentiate facies spectra and search for biostratigraphically significant fossil biota. Furthermore, analyses should also give informations about the diagenetic history and the reservoir potential of the drilled rock formations. In the on-site lab, rapid microfacies analyses especially of carbonate rock components can be performed within in a sample interval and represents – in cooperation with mudlogging services – one of the most efficient disciplines in geological exploration efforts.

Keywords: Paleontology, facies analyses, thin sections, on-site lab, deep drilling projects

1 Einleitung

Die Rolle der Paläontologie in den angewandten Geowissenschaften wurde in den letzten Jahrzehnten durch verschiedene Faktoren verändert. Während sich die „Angewandte Paläontologie“ seit dem 19. Jahrhundert, insbesondere aber in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts in der Nähe der Kohlenwasserstoff-Prospektion angesiedelt hat, ergeben sich seit etwa 10 Jahren zusätzliche Möglichkeiten in der Geothermie vor allem in Deutschland bei Bohrungen für die Tiefengeothermie. Hier werden, genauso wie in der Erdölindustrie, Tiefbohrungen bis zu 6000 m Tiefe durchgeführt, die wissenschaftlich begleitet werden müssen. Im Unterschied zu den Bohrungen der Erdölwirtschaft, werden Bohrungen in der Geothermie von Investoren finanziert, die in der Regel kaum etwas oder nichts mit der Erkundung

geowissenschaftlicher Ressourcen zu tun haben. Aufgrund limitierter Budgets sind Geothermiebohrungen auf die besondere Effizienz der Bohraktivitäten angewiesen. Dies betrifft nicht nur die technische Seite der Bohrungen, sondern auch deren geowissenschaftliche Begleitung. Bei der Erschließung geothermischer Reservoirs wurden in den letzten 20 Jahren kontinuierlich Verfahren und Werkzeuge der Kohlenwasserstoffindustrie übernommen und z.T. adaptiert. Dies betrifft die zunehmende Anwendung der 3D Seismik zur Vorbereitung der Projekte, verbesserte bohrtechnische Verfahren insbesondere im Bereich der Richtbohrtechnik und angepasste Methoden in der wissenschaftlichen Bearbeitung von Bohrkernen und Spülproben.

Umfang und Intensität der wissenschaftlichen Auswertung hängt vom Verständnis und vom Budget der jeweiligen Auftraggeber ab. Durch anfänglichen Mangel an Erfahrung



haben sich in jüngerer Vergangenheit Meinungsschwerpunkte hinsichtlich der Relevanz geowissenschaftlicher Einflussfaktoren in der Geothermie herausgebildet. Teils wurde die Erkennung der tektonischen Verhältnisse, teils die Ausbildung fazieller Muster für eine erfolgreiche Reservoir-Erschließung als vorrangig betrachtet. Tatsache ist, dass die beteiligten Geowissenschaftler nicht nur geotechnische Aspekte, sondern auch rein geologische, fazielle und paläontologische Tatsachen überblicken sollten. Als Vorbild sind die integrierten Methoden- und Forschungskonzepte des erfolgreichen Tiefsee-Bohrprogramms (DSDP, www.deepseadrilling.org/i_reports.htm) und des Ozeanbohrprogramms (ODP bzw. IODP, www.odplegacy.org, www.iodp.org) anzusehen, in denen Spezialisten der einzelnen Fachgebiete beteiligt waren und sind. Die wissenschaftliche Begleitung von Geothermie-Projekten kann aus Kostengründen von nur wenigen Beteiligten realisiert werden, die einen sehr breit angelegten Wissenshintergrund besitzen. Dies betrifft die Kenntnis der lokalen geologischen Verhältnisse, der Möglichkeiten der Auswertungsmethoden und tieferreichender geowissenschaftlicher Kenntnisse in den Fachrichtungen Lithologie, Stratigraphie und Ökologie.

2 Angewandte Paläontologie auf dem Bohrplatz

Neben den Auswertungsverfahren von Bohrlochmessungen und üblichen Verfahren zur Bohrkleinanalyse können zusätzliche Arbeiten an Original-Material, wie z.B. Bohrkerne und Bohrklein erhebliche Erkenntnisgewinne bringen, die zu einer Minimierung der geologisch bedingten Projektrisiken und letztlich auch der -kosten führen. Der Bedarf an effizienten Arbeitsmethoden orientiert sich an den zeit- und kostenaufwändigen Bereichen der angewandten Geowissenschaften. Neben dem Erfahrungsschatz des Geowissenschaftlers haben sich in den letzten Jahrzehnten deutliche Verbesserungen in den paläontologischen, stratigraphischen, angewandten geologischen und methodischen Bereichen ergeben. Hoher Zeitaufwand ergab sich bei den genannten Teildisziplinen wie folgt:

Paläontologie: Wesentliches Problem der Paläontologie in den angewandten Geowissenschaften ist die Bestimmung der Fossilien in Anbetracht von Größe, Häufigkeit, Erhaltungszustand und Bedeutung. Durch die Tatsache, dass die Einarbeitungszeit in eine einzige Organismengruppe je nach Gruppenumfang mindestens fünf Jahre beträgt, ist der Bestand an notwendigen und ernstzunehmenden Spezialisten auf die Dauer kaum aufrechtzuerhalten. Die Lösung dieses Problems ist entweder die Auslagerung von Spezialisten in Service-Firmen oder aber die Anwendung von Computer-Programmen, bei denen die Bestimmung von Organismenresten auch dem nicht spezialisierten Geowissenschaftler ermöglicht wird. Zu diesem Zweck ist eine Vielzahl von Bestimmungsschlüsseln und „-maschinen“ theoretisch und praktisch entwickelt worden. Dies betrifft die als „numerische Systematik“ beschriebenen Versuche anstelle der binären Nomenklatur über Zahlencodes und Deskriptoren Objektivität und Schnelligkeit in die Bestimmung zu bringen sowie die graphische Bestimmung über Bildanalyse-Verfahren (RIEDEL 1978). Hier ist immer noch enormer Entwicklungsbedarf gegeben. Die geschichtliche Entwicklung der systematischen Paläontologie spielt hierbei auch

eine wichtige, meist hinderliche Rolle. Die meist unterschiedlichen Erhaltungszustände der Fossilien verursachen vielfach diskutierbare Bestimmungsergebnisse, so dass eine sichere ökologische oder biostratigraphische Aussage mitunter nicht eindeutig ist. Verantwortungsvolle systematische Paläontologie verlangt zumindest nach einer objektiven Einschätzung der Befunde hinsichtlich ihres geologischen Wertes.

Stratigraphie: Die Klärung der stratigraphischen Verhältnisse hat in den einzelnen Teildisziplinen unterschiedliche Fortschritte erfahren. Im Bereich der Lithostratigraphie stellt die Sequenzstratigraphie (CATUNEANU 2006, VAIL ET AL. 1984, LOUCKS & SARG 1993) und die Isolierung von Geobodies (MAHÉ 2007, JUNG & AIGNER 2012, PAL & TABERNER 2011) im Zusammenspiel von Lithologie und Geophysik eine ausschlaggebende Rolle. Ziel der Biostratigraphie ist es, mit Hilfe von Wahrscheinlichkeits-Stratigraphie (HAMMER ET AL. 2001), quantitativer Stratigraphie (GRADSTEIN ET AL. 1985, AGTERBERG & GRADSTEIN 1999) und Assoziationen-Stratigraphie (GUEX 1991) bedeutende Verbesserungen hinsichtlich der objektiven Nutzbarkeit erhalten. Diese Methoden sind jedoch immer noch sehr zeitaufwändig, da der Präparationsprozess und die Bestimmungsverfahren nicht schnell genug sind. Hierbei spielt der Unterschied zwischen Dünnschliff-Untersuchungen und den Bestimmungen an körperlich erhaltenen Formen eine wichtige Rolle.

Angewandte Geologie: Hierunter sind alle Untersuchungsmethoden und Verfahren zu verstehen, die einem „angewandten Ziel“, wie z.B. der geologischen Kontrolle einer Tiefbohrung dienen. Die wichtigsten Beispiele sind die Bohrlochmessungen, auch als Logging-while-drilling und bohrtechnische Parameter, wie Drehmoment, Meißelbelastung, Schleiflasten und andere mehr. In den vergangenen Jahren haben die kombinierten Methoden und die Anwendung spezieller Visualisierungs- und Simulationsprogramme (z.B. Petrel, GoCad etc.) zur Planungs- und Zielsicherheit von Bohrvorhaben beigetragen.

Die Auswertung von Gesteinsmaterial, das mit Hilfe von Kernen, Seiten-Bohrkernen und Spülproben gewonnen wird, ist in der Praxis in zwei Phasen aufgeteilt. Die erste Phase betrifft die Auswertung des während des Bohrvorgangs geförderten Materials, die zweite umfasst die wissenschaftliche Auswertung nach der Bohrung, in der entweder zur Erhebung überregionaler Daten (STEIGER & WAGNER 2006) oder zeitaufwendiger Messungen und Auswertung Dienstleistungsunternehmen oder Universitäts-Institute beauftragt werden. Eine wissenschaftliche Begleitung der Bohrung wurde bislang weniger intensiv betrieben, da einige Auswertungsprozesse im Rahmen der zur Verfügung stehenden Zeit nicht möglich waren. Dies betraf einerseits effiziente Biostratigraphie- und Fazies-Analysen, andererseits die schnelle Anfertigung von Gesteinsdünnschliffen und deren Auswertung, um wesentliche Informationen in zeitkritischen Prozessen (z.B. für Rohrabsetzteufen) zu erhalten. Im Wesentlichen lagen die Probleme an der Verfügbarkeit mobiler Präparationseinrichtungen, schnell aushärtender Einbettungsmittel und entsprechend eingearbeiteten Personals.

Auf Dünnschliff-Beobachtung basierende Fazies-Analysen haben sich in den vergangenen Jahren dahingehend verändert, dass aufgrund umfangreicher Erfahrungen in der Interpretation von Sedimentationsentwicklungen sowohl im siliziklastischen als auch im karbonatischen Bereich enorme Fortschritte erzielt worden sind. Die Kenntnis der Sedimentationsmuster definierter Ablagerungsräume wie beispielsweise mariner Schuttfächer, der Schelfe, Riffe und der Tiefsee haben dazu beigetragen, dass mit Hilfe der Faziesanalyse (FLÜGEL 2004) eine schnelle Charakterisierung der jeweiligen, immer wieder auftretenden Gesteinsentwicklungen (Standard-Mikrofazies-Typen, WILSON 1975) möglich wurde. Dies beinhaltet nicht nur die Auswertung von Gefügetypen und Sedimentstrukturen, sondern auch die Einschätzung der Biogen-Anteile am Sedimentaufbau und deren Diagenese. Diese kann von entscheidender Bedeutung für die Entwicklung von Porosität und Permeabilität im Reservoir-Gestein sein und sollte bereits während der Bohrung einen zentralen Bestandteil der Gesteinsauswertung darstellen.

Bislang scheiterte eine schnelle Schliffherstellung, die für zeitkritische Entscheidungen auf Tiefbohrungen benötigt werden, an den langen Aushärtezeiten der Gießharze. Inzwischen stehen Spezialharze verschiedener Hersteller zu Verfügung, die eine Schliffherstellung innerhalb der Probenahme-Intervalle garantieren. Im Folgenden sollen einige Beispiele paläontologisch-stratigraphischer Probleme und der erfolgreichen Fazies-Ansprache mit nachfolgenden Ergebnissen präsentiert werden.

2.1 Beispiel 1: Die lithostratigraphische Eingrenzung der marinen Sandsteine der oberen Meeresmolasse in einer Bohrung südwestlich von München

Die Sedimentationscharakteristik der Bayerischen Vorland-Molasse ist durch sehr unterschiedlich kompetente Gesteine geprägt. Feinkörnige Siliziklastika reichen von weichen Tonen zur harten, teilweise verkieselten Tonsteinen, Sandsteine zeigen weiche und harte Bindemittel, Mergel sind mehr oder weniger kalkig beeinflusst, Kalkschotter und Kohlen runden das Bild ab. Dünnschliffe sind bei hohen Anteilen weicher Tone und tonig gebundener Sandsteine nur unter großen Zeitaufwand herstellbar, so dass die sog. Cutting-Blöcke ausreichen, um die Fazies-Spektren zu analysieren. Hierbei wird in Gießharz-Blöcken eingegossenes Bohrklein eingeschliffen, damit eine Ansicht geschnittenen Gesteinsmaterials erkennbar wird. Auf diese Art werden die Sediment-Texturen und die Interngefüge in der „Schnittansicht“ deutlich. Die Auswertung von Cutting-Blöcken stellt eine wichtige Ergänzung zur Gesteinsansprache der Mud-logging-Services dar. Die Analysen stehen bereits etwa 15 Minuten nach der Probenaufbereitung zur Verfügung. Die halbquantitative Analyse im gezeigten Profil (Abb. 1) lässt eindeutig das Vorkommen der Glauconit-Sandsteine der oberen Meeresmolasse im Südwesten der Molasse erkennen (STEIGER & UHLIG 2010a).

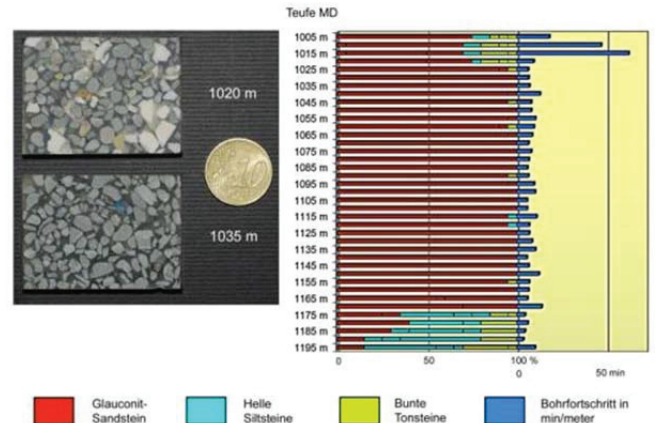


Abb. 1: Die farbliche Unterscheidung zwischen bunten Ton- und Siltsteinen und Glauconitsandsteinen innerhalb der oberen Meeresmolasse südwestlich von München

Fig. 1: Colour differences between multicoloured clay- and siltstones and glauconitic sandstones from the Upper Marine Molasse (OMM) southwest of Munich

2.2 Beispiel 2: Biostratigraphie im Alttertiär und in der Oberkreide aus Cutting-Schlamm-Material und Dünnschliffen.

In den Profilen der Tiefbohrungen in der Bayerischen Vorland-Molasse ist die Erkennung der Abfolge Oligozän-Fischschiefer – Lithothamnien-Kalk – Oberkreide-Mergel von großer stratigraphischer Bedeutung, da in diesem Bereich eine sog. Absetzstufe für den Rohr-Einbau festgelegt werden muss. Wichtig ist die Tatsache, dass die Kreide-Sedimentation regionale Unterschiede aufweist und im Wesentlichen von Ost nach West von oben her fortschreitend ausfällt. So sind der Übergang vom Lithothamnien-Kalk in die Oberkreide und der stratigraphische Internbau der Oberkreide von besonderer Bedeutung. Die Dünnschliff-Analysen konnten hier durch Untersuchungen von Mikrofossil-Funden aus Schlammproben ergänzt werden. Die Auswertung der Plankton-Foraminiferen (Abb. 2) ergab eine durchgehende biostratigraphische Abfolge von Turon bis Untercampan (NOÉ in STEIGER & UHLIG 2012b). Dabei konnte auch die lithologische Abfolge durch das Einsetzen von „Calcisphaeren-Mergeln“ an die Santon-Campan-Grenze gelegt werden. Die lithologische Analyse war noch während der Bohrung möglich, die biostratigraphische Zonierung geschah innerhalb von drei Tagen.

2.3 Beispiel 3: Die Erkennung der Fazies-Vielfalt in der sog. Purbeck-Fazies am Übergang Unterkreide-Oberjura-Sedimentation in der Gegend südlich von München.

Für die letzte Verrohrung vor dem Open-Hole-Abschnitt einer Bohrung, die in den Submolasse-Jura reichen soll, ist die Festlegung der richtigen Absetzstufe von enormer Bedeutung. Das Auffinden der geeigneten Lithologie und die Einschätzung der Gefahren kompletten Spülungsverlustes im porösen Oberjura haben oberste Priorität. Ziel ist die Abfolge zwischen den unterschiedlich ausgebildeten Ablagerungen der Unterkreide und dem den Oberjura-Karbonaten (die auch von den Projekt-Betreibern als „Malm-Karst“) bezeichnet werden.

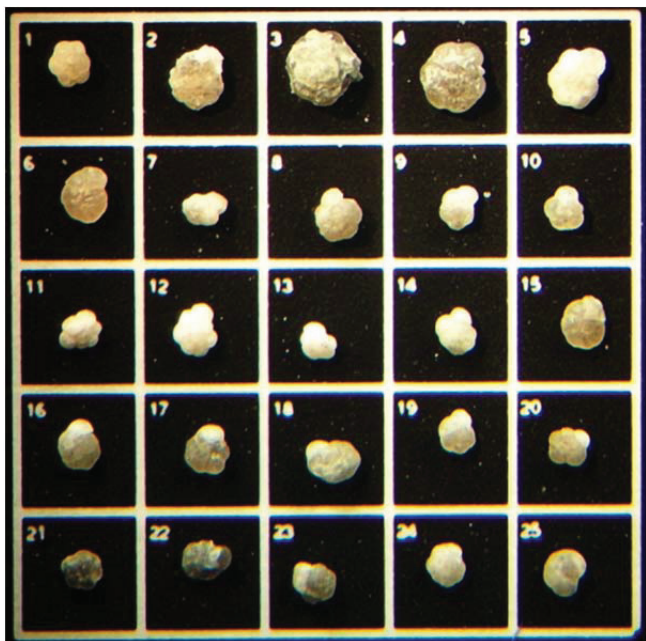


Abb. 2: Planktonische Foraminiferen aus der Oberkreide der Wasserburger Senke

Fig. 2: Planktonic foraminifera from the Upper Cretaceous of the Wasserburg trough

Schwierigkeiten bei der Festlegung der Absetzstufe ergeben sich dadurch, dass die Purbeck-Fazies extrem variabel ist und nur eine generelle Sedimentationsentwicklung und zwar vom annähernd kontinentalen bis in das lagunär-marine Milieu prognostiziert werden kann. Die wirkliche Faziesentwicklung ist regional gebunden und kann in Ausbildung und Mächtigkeit stark schwanken. Es handelt sich um Tone, Mergel, Sandsteine, Kalkbrekzien, Dolomit-Lagen, Stromatolithen (Algenmatten) und Kalke hypersaliner, limnischer (Abb. 3a) und mariner Verhältnisse (STEIGER & UHLIG 2012a). Organismenreste – vor allem Algen und Foraminiferen – und spezifische Komponenten, wie Ooide sind hier stark von Lösung und Neomorphismus geprägt.

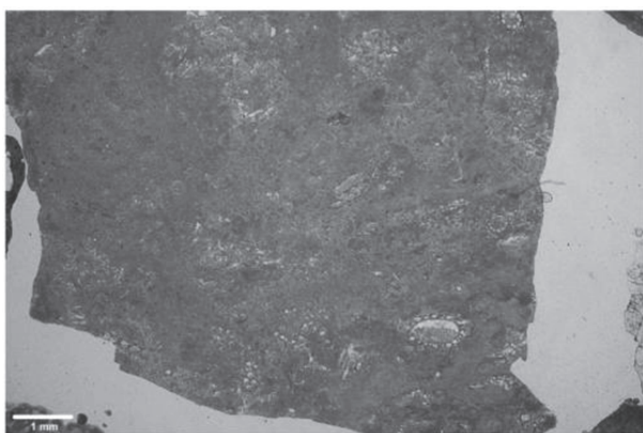


Abb. 3a: Characeen-führende Süßwasserkalke aus der Purbeck-Fazies des Submolasse-Jura des bayerischen Voralpen-Gebietes

Fig. 3a: Characean-bearing freshwater carbonates from the Purbeckian facies in the Bavarian prealpine region

Die Fazies-Spektren des Purbeck lassen sich am Besten und Schnellsten durch Dünnschliff-Analysen erkennen, wie z.B. die Favreinfazies (Abb. 3b). Für die Verrohrung ist die Ausbildung stabiler, nicht durchlässiger Lithologien mit hinreichender Mächtigkeit innerhalb der Purbeck-Fazies wichtig. Das „Herantasten“ an diese Wunschlithologien in Kooperation mit der Bohrleitung war mit Hilfe der Analyse von Schnelldünnschliffen erfolgreich.

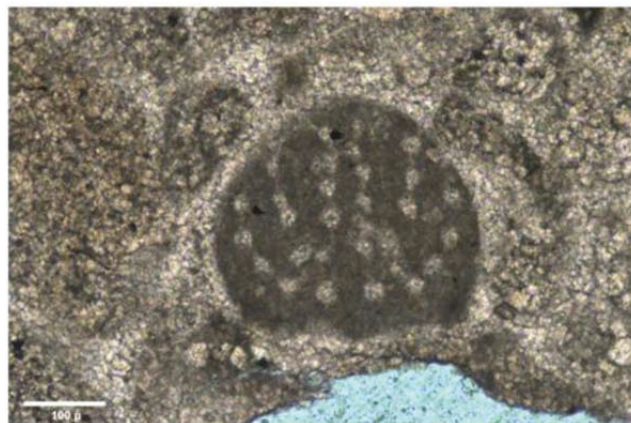


Abb. 3b: Favreina salevensis (Paréjas) aus der Purbeck-Fazies des Submolasse-Jura des bayerischen Voralpen-Gebietes

Fig. 3b: Favreina salevensis (Paréjas) from the Purbeckian facies in the Bavarian prealpine region

2.4 Beispiel 4: Die Abgrenzung der sog. „Top-Malm“-Fläche gegenüber ihrer Überlagerung

In den vorbereitenden Profilen der 3D-Seismik treten im Bereich des Übergangs Kreide-Jura Mehrfachreflektoren auf, die nicht eindeutig der Grenze Purbeck-Unterkreide oder der sog. Top-Malm-Fläche zugeordnet werden können. Es erhebt sich die Frage, in welchem Profilabschnitt das Reservoir von oben her erreicht wird und in welcher Lithologie es erwartet wird. Die Obergrenze der Massenfazies, die aus Riffkalken, „Treuchtlinger Marmor“ und massigem Dolomit bestehen kann, muss mit Hilfe der dünn-schliff-gebundenen Mikrofaziesanalyse festgelegt werden (Abb. 4). Dabei eröffnen sich zwei Möglichkeiten. Entweder die Grenze wird im sedimentären oder im diagenetischen Milieu gezogen. Eine mögliche sedimentäre Grenze wäre der Übergang nach unten von den extremen Ablagerungsmilieus der Purbeck-Fazies in die normalmarine Lagune der Oberjura-Riffe und -plattformen oder der Übergang von Purbeck-Dolomit in den zuckerkörnigen spätdiagenetischen Dolomit (Beginn der zonar gebauten planar-e und planar-s Dolomite (SIBLEY & GREGG 1987). In diesen Zonen ist die Interkristallporosität in Abhängigkeit von der Dimension und des Gefüges der Dolomitkristalle am größten.

Die Riff- und Massenfazies der Oberjura-Karbonate beinhaltet neben den Dolomiten auch verschiedene Kalk-Fazies-Typen, die einerseits in die Nähe der Kelheimer Riffkalk-Entwicklung, andererseits dem Treuchtlinger Marmor und den Kieselschwamm-Kalken zugeordnet werden können. Hiervon hängt die Einschätzung der möglichen Permeabilitäten ab. Diese werden in Kalken neben dem Primargefüge von Neomorphismus und Drucklösung gesteuert, was sich sofort aus der Mikrofazies-Analyse von Dünnschliffen entnehmen lässt.

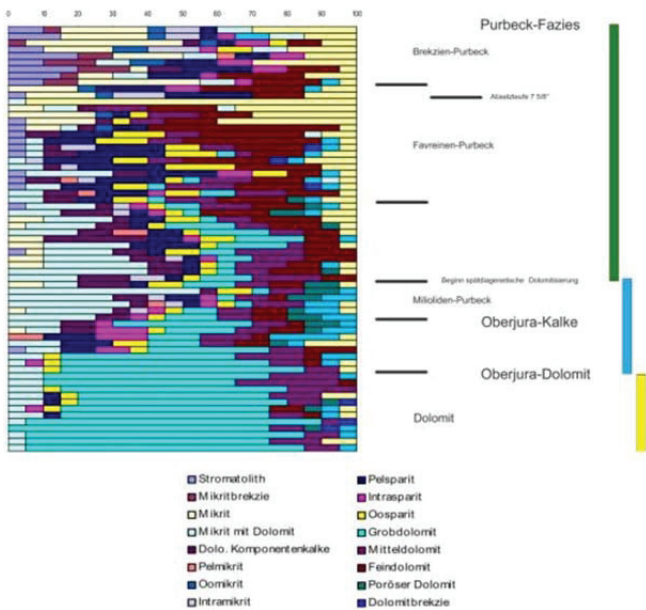


Abb. 4: Halbquantitative Darstellung der Fazies-Entwicklung am Übergang von der marinen Oberjura-Plattformfazies in die Purbeck-Fazies.

Fig. 4: Semiquantitative chart of the transition between Late Jurassic marine platform facies into the Purbeckian facies.

2.5 Beispiel 5: Faziesspektren von Störungszonen, Verkarstung und Pseudocuttings.

Neben der Festlegung der normalen Faziesabfolgen, lässt die Mikrofazies-Analyse auch die Erkennung von Faziesspektren innerhalb von Störungen und solche in verkarsteten Bereichen zu. Verkarstungstypische Faziesspektren sind aus dem Umgebungsgestein, Sinterresten, Residualtonen und Sandsteinen der Karstfüllungen zusammengesetzt (STEIGER & UHLIG 2010a).

Störungszonen lassen sich durch gemischte Zusammensetzung des Cutting-Materials identifizieren (STEIGER & UHLIG 2010a).

Eine besondere Schwierigkeit bei der Gesteinsanalyse des erbohrten Materials stellen sog. Pseudocuttings oder Artificial cuttings (Abb. 5) dar, die eine Neubildung von festen Bestandteilen durch Zusammenbacken von Spülungszusätzen und zerbohrtem Gesteinsmaterial repräsentieren (STEIGER & UHLIG 2010b). Auf diese Weise werden Falschanalysen provoziert, die eine objektive Gesteinsansprache gefährden. Bei der Verwendung von PDC-Meißeln in Weißjura-Gesteinen ist die Pseudocutting-Bildung besonders dramatisch, so dass das anfallende Gesteinsmehl durch Verfestigung bei Druck und Temperatur zu einem unidentifizierbaren Gebilde verklebt wird. Dünnschliff-Analysen lassen mitunter die Intensität der Pseudocutting-Bildung erkennen und Rückschlüsse auf die tatsächlich vorhandenen erbohrten Gesteine ziehen. Dies ist aus dem Bereich Fisch-Schiefer, Lithothamnienkalk und Oberkreide-Mergel möglich.

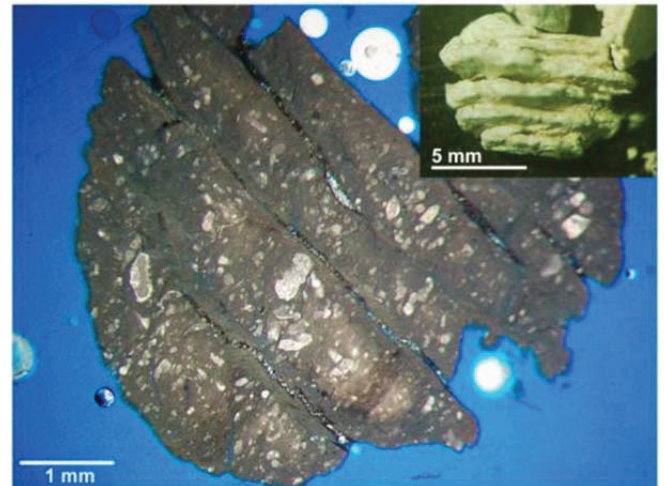


Abb. 5: Pseudocuttings von Tertiär- und Kreide-Mergeln aus oberbayerischen Tiefbohrungen

Fig 5: Artificial cuttings from Cretaceous to Tertiary marls drilled in upper Bavarian deep wells

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die im industriellen Bereich angewandte paläontologisch-fazielle Analytik mit Hilfe neuer Methoden und erhöhter Geschwindigkeit wichtige Anforderungen im bohrtechnischen Bereich erfüllt und zukünftig ein grundlegender Bestandteil bei der lithologischen und wissenschaftlichen Begleitung von Bohrvorhaben sein kann. Sie trägt dazu bei zusammen mit allen anderen Beteiligten eine vollständige Bohrloch-Kontrolle in geologischem Sinne zu garantieren.

Literatur

- AGTERBERG, F.P. & GRADSTEIN, F.M. (1999): The RASC method for Ranking and Scaling of Biostratigraphic Events. In: Proceedings Conference 75th Birthday C.W. Drooger, Utrecht, November 1997. Earth Science Review, **46** (1-4): 1 - 25.
- CATUNEANU, O. (2006): Principles of Sequence Stratigraphy. – 375 S., New York (Elsevier).
- FLÜGEL, E. (2004): Microfacies of Carbonate Rocks. Analysis, Interpretation and Application. – 976 S., 330 Abb., 151 Taf., Berlin, Heidelberg, New York (Springer).
- GRADSTEIN, F.M., AGTERBERG, F.P., BROWER, J.C., AND SCHWARZACHER, W. (1985): Quantitative Stratigraphy. – 598 S., New York (Springer).
- GUEX, J. (1991): Biochronological Correlations. – 252 S., Berlin (Springer Verlag).
- HAMMER, Ø., HARPER, D.A.T., RYAN, P.D. (2001): PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. Palaeontologia Electronica, **4**(1): 1 - 9. http://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm
- JUNG, A. & AIGNER, T. (2012): Carbonate Geobodies: Hierarchical classification and database – a new workflow for 3D reservoir modelling. – Journal of Petroleum Geology, **35** (1): 49 – 66.



- LOUCKS, R.G. & SARG, J.F. ED. (1993): Carbonate sequence stratigraphy. – Tulsa, Oklahoma, American Association of Petroleum Geologists Memoir **57**, 545 p.
- MAHÉ, I. (2007): Solving a problem involving geobody extraction. – *The Leading Edge*, **26** (1): 22 - 23.
- PAL, M. & TABERNER, C. (2011): Simulation of Brine Reflux and Geothermal Circulation in Large Carbonate Platforms: An Attempt to Predict Dolomite Geo-Bodies. – Excerpt from the Proceedings of the 2011 COMSOL Conference Stuttgart, 1 – 11.
- RIEDEL, W. (1978): Systems of morphologic descriptors in Paleontology. – *Journal of Paleontology*, **52**, 1, 1-7.
- SIBLEY, D.F. & GREGG, J.M. (1987): Classification of dolomitic rock textures. – *J. Sed. Petrol.*, **57**: 957 - 965.
- STEIGER, T. & UHLIG, S. (2010b): Lithologisches Monitoring und Faziesanalyse mit Hilfe von Cutting-Analysen bei Geothermie-Bohrungen. – Abstract „Der Geothermiekongress 2010, Karlsruhe (Geothermische Vereinigung).
- STEIGER, T. & WAGNER, L. (2006): Die Jura-Fazies im voralpinen Molasse-Becken Oberösterreichs und Ostbayerns. – Interner Bericht RAG, 96 S., 131 Taf.
- STEIGER, T. & UHLIG, S. (2010a): Mauerstetten GT 1 und GT 1a, Abschlußbericht. – Interner Bericht für Geothermie Allgäu Betriebs- und Beteiligungs-GmbH & Co. KG. – 43 S., 7 Abb., 1 Tab., 6 Anl., Geotec Consult Ingenieurbüro Uhlig & Partner, Markt Schwaben.
- STEIGER, T. & UHLIG, S. (2012a): Geothermiebohrung Taufkirchen GT 3a – Faziesanalyse. Interner Bericht zur Mikrofaziesanalyse an Cuttingproben. – 16 S, 19 Taf., 3 Anl., Geotec Consult Ingenieurbüro Uhlig & Partner, Markt Schwaben.
- STEIGER, T. & UHLIG, S. (2012b): Geothermiebohrung Traunreut GT 1 - Faziesanalyse. Interner Bericht zur Mikrofaziesanalyse an Cuttingproben. – 61 S., 30 Taf., 5 Anl., Geotec Consult Ingenieurbüro Uhlig & Partner, Markt Schwaben
- VAIL, P.R., HARDENBOL J. & TODD, R.G. (1984): Jurassic unconformities, chronostratigraphy, and sea-level changes from seismic stratigraphy and biostratigraphy, in J.S. Schlee, ed., *Interregional unconformities and hydrocarbon accumulation*. – Tulsa, Oklahoma, American Association of Petroleum Geologists Memoir **36**: 129-144.
- WILSON, J. L. (1975): Carbonate Facies in Geologic History. – 471 S., New York (Springer).