

3D-Modellierung des Oberen Muschelkalks im Hohenloher Raum

Von DENIS PALERMO, Mailand

ZUSAMMENFASSUNG

GECO ist ein internationales wissenschaftliches Konsortium, das aus der italienischen Erdölgesellschaft Eni E&P, der Universität Tübingen und weiteren Partnern besteht und zur Erforschung der Geometrien von Karbonatkörpern gegründet wurde. Die innerhalb dieses Rahmens durchgeführte Studie befasst sich mit dem dreidimensionalen sedimentären und petrophysikalischen Aufbau der Karbonate des Oberen Muschelkalks im Hohenloher Raum. Dieser Artikel gibt in stark verkürzter Form einen Teil der Doktorarbeit *‘Anatomy of Carbonate Sandbodies: Reservoir Analog Study from an Epicontinental Basin (Triassic, Germany)’* wieder (PALERMO, D. & AIGNER T. et al. 2010).

Aufgrund der sedimentologischen Ähnlichkeit und der bemerkenswerten wissenschaftlichen Arbeit mehrerer Forschergenerationen eignet sich der Obere Muschelkalk in der Gegend um Crailsheim als hervorragendes Aufschlussanalogbeispiel zu den skeletalen und oolithischen Erdgasspeichergesteinen des Mittleren Ostens. Ähnlich diesen Speichergesteinen wurde der Obere Muschelkalk entlang einer epikontinentalen, sehr flach einfallenden Karbonatrampe am Rande des Thetys-Ozeans abgelagert.

Um die Studie direkt mit industrieüblichen Untergrunddaten vergleichen zu können, ist ein hoch auflösendes geologisches 3D-Modell erstellt worden, in das zusätzlich Bohrungsdaten und petrophysikalische Daten (z.B. GR-Logs, Bohrkerne, Poroperm-Messungen) einbezogen sind.

Zu den bisherigen sedimentologischen Aufschlussstudien und Korrelationen, die vergleichsweise einfache, durchgehende Schichtverhältnisse zwischen den bekannten Leithorizonten annahmen, konnte die Studie anhand der dreidimensionalen Modellierung des Datensatzes neue Einsichten in den detaillierten stratigraphischen Aufbau des Oberen Muschelkalkes gewinnen. Die auf den ersten Blick durchgehende „Layer-Cake“-Stratigraphie der Shoalkörper besteht bei genauerer Betrachtung mitunter aus subtilen Kliniformgeometrien („Pseudo-Layer-Cake“).

Die anschließende petrophysikalische Modellierung gibt Aufschluss über wichtige Kontrollfaktoren der Qualität und Quantität des Reservoirs. Im Untersuchungsgebiet sind die Reservoirereigenschaften des Oberen Muschelkalks überwiegend faziesabhängig, wobei sich die Porosität auf die Flachwasserfaziestypen der mittleren Rampe beschränkt. Alle beobachteten Ordnungen stratigraphischer Zyklen beeinflussen die räumliche Verteilung der Reservoirkörper maßgeblich. Interne Unterschiede innerhalb der einzelnen Körper werden dabei vorwiegend von Kleinzyklen gesteuert. Die räumliche Verteilung und die Dimension der Reservoirkörper ist wahrscheinlich das Resultat der Wechselwirkung zwischen zyklischen Meeresspiegelschwankungen und einem sanftem Paläorelief. Dabei

sind leicht erhöhte paläotektonische Positionen entscheidend für das Auftreten poröser Reservoirkörper.

Schlüsselwörter: Muschelkalk, Hohenlohe, Fazies, 3D-Modellierung, Trias, Oolithe, Karbonatsandbarren

ABSTRACT

Within the GECO-project, a joint ENI E&P-University research consortium on the „Geometry of Carbonate Objects“, Triassic carbonates in the South-German Basin were studied, as an analog to the economically important types of ‘non reefal’ skeletal and oolitic carbonate sand reservoirs of the Middle East. Similar to these reservoirs, Muschelkalk carbonates were deposited in an epicontinental, very gently inclined carbonate ramp. The reservoir facies consists of skeletal and oolitic carbonate packstones and grainstones (Phi max. 23%, K max 700 mD), organised in a three-fold hierarchy of stratigraphic cycles. The purpose of this study is a detailed analysis of the evolution, anatomy, sedimentology and petrophysical characteristics of the reservoir bodies. The database consists of 50 measured sections supplemented by 6 cores and wireline logs as well as 568 poroperm plugs and covers an area at the scale of a Middle East giant gas-field (25x36 km). To link the study directly with the subsurface, all data have been compiled in a high-resolution 3D geological reservoir model.

The outcrop analog study demonstrated that the apparently ‘layer-cake’ stratigraphy shows in fact subtle clinoform geometries.

Key factors controlling the reservoir distribution and properties are:

a) *Facies and early diagenesis*: Porous facies types are restricted to the high-energy shoal facies, whereas both inner and outer ramp facies are tight in most cases.

b) *Cyclicity*: Volume and dimensions of the reservoir bodies seem to be mainly controlled by a hierarchy of stratigraphic cycles.

c) *Paleorelief*: subtle paleo-highs are important for the spatial distribution of reservoir facies.

In this particular epeiric setting it proved most useful to use a deterministic facies modelling approach, while for the petrophysical modelling several algorithms (e.g. Kriging, Sequential Gaussian Simulation) conditioned to facies and cyclicity provided reasonable results.

Key words: Muschelkalk, Hohenlohe, facies, 3D modelling, Trias, oolites, carbonate shoals

EINFÜHRUNG

Im Zuge der Verknappung von Erdöl und Erdgas werden in den letzten Jahren zunehmend Aufschlussanalogstudien durchgeführt um den internen Aufbau von Kohlenwasserstofflagerstätten besser zu verstehen und vorherzusagen. Allerdings konzentrieren sich diese Arbeiten überwiegend auf siliziklastische Sedimente (z. B. BRYANT & FLINT, 1993; MIALI & TYLER, 1991), wohingegen quantitative Datensätze von Karbonaten eher selten sind (z. B. BURCHETTE et al., 1990;

HARRIS & KOWALIK, 1994; RUF & AIGNER, 2004; RANKEY et al., 2006, AIGNER et al. 2007).

Da der Obere Muschelkalk im Hohenloher Raum eine über hundertjährige Forschungstradition aufweist, besteht für diesen ein bemerkenswertes litho- und biostratigraphisches Rahmenwerk (z. B. WAGNER, 1913; VOLLRATH, 1938, 1955, 1970; SKUPIN, 1969; GEYER & GWINNER, 1991; BACHMANN, 1973, AIGNER 1985; OCKERT, 1988; HAGDORN & SIMON, 1988, BRAUN, 2003, URLICHS, M. 2006). Außerdem stellt der Obere Muschelkalk aufgrund seiner zahlreichen Steinbrüche und natürlichen Aufschlüsse ein hervorragendes Aufschlussanalogeispiel zu einigen sedimentologisch ähnlich aufgebauten Kohlenwasserstofflagerstätten im Mittleren Osten dar.

Ziel dieser Studie ist es, Anatomie und petrophysikalische Eigenschaften (Porosität und Durchlässigkeit) der Karbonatkörper zu analysieren und dreidimensional zu modellieren. So sollen Kontrollfaktoren und Vorhersageregeln zu Verteilung, Aufbau und Volumen gefunden werden.

Geologischer Rahmen

Während der Mittleren Trias (~ 230–231 MA, Abb. 1¹) war das Germanische Becken von einem flachen epikontinentalen Meer überflutet, welches sich zeitweilig von Süddeutschland bis Dänemark und von der Nordsee bis nach Polen erstreckte. Dieses halb abgeschlossene Randmeer des Oberen Muschelkalks wurde durch die Vindelizisch-Böhmische Schwelle von dem offenen Thetys-Ozean getrennt, mit dem es nur temporär über drei schmale, wechselnde Pforten in Verbindung stand (ZIEGLER, 1990; DERCOURT et al. 1993). Bei den vollmarinen Karbonaten des Oberen Muschelkalks handelt es sich um die Ablagerungen eines symmetrischen transgressiv-regressiven Meeresspiegelzyklus dritter Ordnung (AIGNER, 1985). Der transgressive untere Teil des Oberen Muschelkalks enthält unter anderem die charakteristischen crinoidal-skeletalen Karbonate der Crailsheim- und Hassmersheim-Schichten, wohingegen der regressive obere Teil vor allem in den Hohenlohe-Schichten durch einen höheren Anteil oolithischer Bestandteile (Kornsteine) und die Abwesenheit von Crinoiden gekennzeichnet ist. Die Sedimente wurden entlang einer äußerst flach einfallenden epeirischen Karbonatrampe abgelagert (AIGNER, 1985). Dieser flache Einfallwinkel bewirkte, dass sich die Wellen nicht am Ufer, sondern schon weit vor der Küste im Bereich der mittleren Rampe brachen und dort ein Großteil der Energie durch vorgelagerte Karbonatsandbarren (so genannte Shoals) absorbiert wurde.

Datenbasis und Methoden

Die Studie basiert größtenteils auf der detaillierten sedimentologischen Beschreibung von 25 Aufschlussprofilen (Abb. 2) und Bohrkernen (tot. 1076 m), die sich vor allem aus folgenden Schlüsselkriterien zusammensetzt: a) Lithologie,

¹ Die Abbildungen sind einer Veröffentlichung in englischer Sprache entnommen; deshalb ist die Beschriftung in Englisch.

<i>System Period</i>	<i>Series Epoch</i>	<i>Stage Age</i>	<i>Germanic Triassic</i>		
Triassic	Upper	Rhaetian	Upper		
		Norian			
		Karnian		Middle	
	Middle	Ladinian	Lower	Keuper	
		Anisian	Upper		Muschelkalk
			Middle		
	Lower	Buntsandstein			
	Olenekian		Upper		
	Induan		Middle		
			Lower		

Abb.1. Stratigraphische Gliederung der Germanischen Trias (PALERMO & AIGNER et al. 2010 – reprinted by permission of the AAPG whose permission is required for further use)

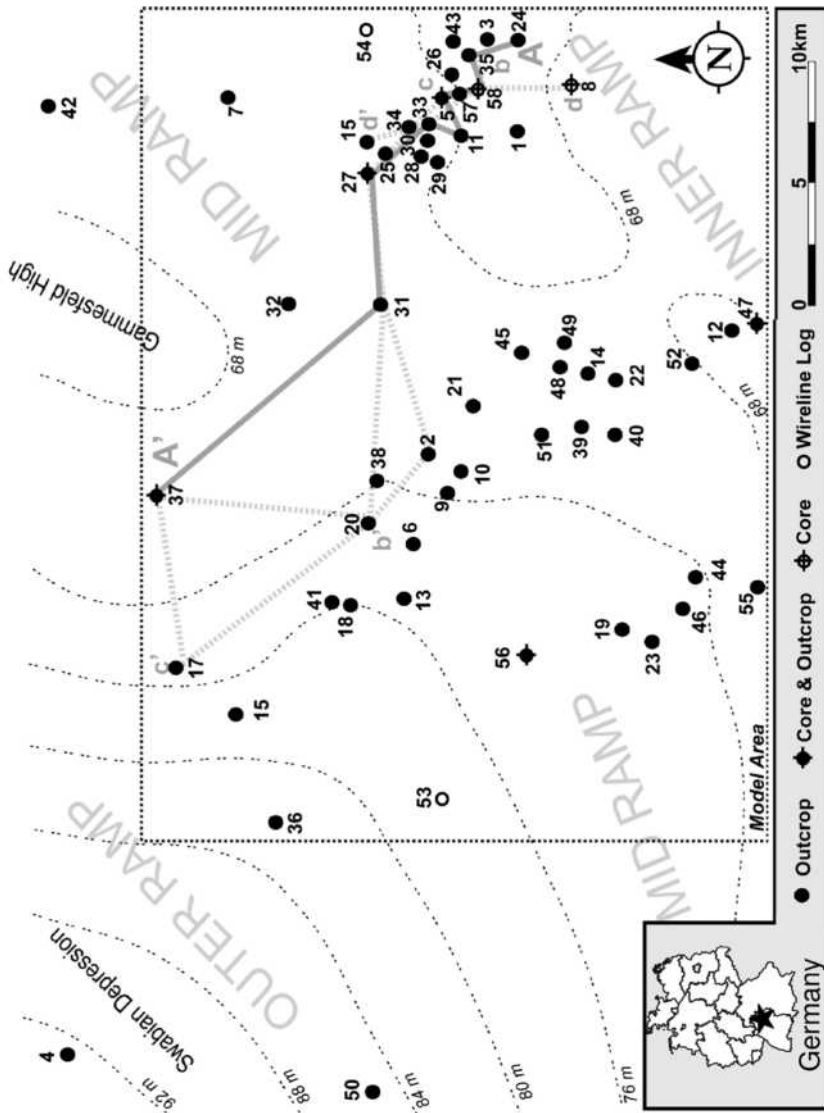


Abb. 2. Übersichtskarte des Untersuchungsgebiets mit Angabe der Probepunkte, der Mächtigkeit des Oberen Muschelkalks, der Paläotopographie und der Ablagerungszonen (innere, mittlere und äußere Rampe) (PALERMO & AIGNER et al. 2010 – reprinted by permission of the AAPG whose permission is required for further use)

b) Dunham-Textur, c) Partikelgröße, c) Komponenten, d) Sedimentäre Strukturen und e) Porosität. Außerdem wird die Studie durch einige hundert geschliffene Handstücke, 451 Dünnschliffe und Aufschluss- (bzw. Bohrloch-) Messkurven der natürlichen Radioaktivität (Gammastrahlung) ergänzt. Da im Hohenloher Muschelkalk schon zahlreiche Forschungsarbeiten durchgeführt wurden, konnten zusätzlich 31 Profile (tot. 711 m) vereinheitlicht, digitalisiert und integriert werden. Diese Daten reichen von detaillierten lithologischen Textprofilen (SIMON, 2003; HAGDORN & SIMON, 1988; OCKERT, 1988) zu sedimentologischen und petrophysikalischen Logs der Arbeitsgruppe Sedimentgeologie der Universität Tübingen (AIGNER, 1985; RUF, 2001; KOSTIC, 2001; BRAUN, 2003; SEYFANG, 2006; DMITRIEVA, 2006; LOOSER, 2006; ALLGÖWER, 2006).

Fazies

Das prozessorientierte sedimentologische Ablagerungsmodell einer flach einfallenden epeirischen Karbonatrampe und die dazugehörige Fazies-Klassifizierung wurde für den Oberen Muschelkalk erstmals von AIGNER (1985) entwickelt und von BRAUN (2003) für den regressiven Teil übernommen und erweitert. Innerhalb des Studienggebietes kann diese Rampe in drei lateral koexistierende Hauptablagerungsgürtel unterteilt werden, welche 16 verschiedene Faziestypen enthalten (Abb. 3, Abb. 4):

a) Innere Rampe: Sie bildet einen unregelmäßigen, lagunären Bereich, dessen Sedimente überwiegend aus nodulären peloidalen Wackestones bestehen.

b) Mittlere Rampe: Sie wird durch die Ablagerung von partikelreichen Shal-sedimenten charakterisiert. Diese skeletalen und oolitischen Hochenergie-Faziestypen absorbierten einen Großteil der Wellenbewegungen und sind durch charakteristische Pack-/ Grainstone-Texturen gekennzeichnet. Die vorhandene Matrixporosität beschränkt sich ausschließlich auf diese Faziesgruppe.

c) Äußere Rampe: Sie besteht hauptsächlich aus Niedrigenergie-Sedimenten des tiefern Beckens wie Mudstones und Mergel, zu den Rändern hin finden sich zunehmend eingeschaltete Sturmlagen.

Sequenzanalyse und Korrelation

Der Obere Muschelkalk weist eine beachtliche litho- und biostratigraphische Gliederung auf, welche in seiner über hundert Jahre währenden Forschungsgeschichte stets verbessert und verfeinert wurde (e.g. WAGNER, 1913; VOLLRATH, 1938, 1955; BACHMANN & GWINNER, 1971; GEYER & GWINNER, 1991; HAGDORN & SIMON, 1988; URLICHS & MUNDLOS, 1990; BACHMANN & BRUNNER, 1998; URLICHS, 2007).

AIGNER (1985) beschrieb erstmals die markante hierarchisch aufgebaute sequenzstratigraphische Zyklizität der Abfolge. Der Obere Muschelkalk weist drei, sich gegenseitig überlagernde Baselevel-Zyklen unterschiedlicher Größenordnung auf, die überwiegend auf Meeresspiegelschwankungen und dadurch entstehende Änderung des verfügbaren Sedimentationsraumes (Akkomodation) zurückzuführen sind. Um die Geometrien der Fazieskörper bestmöglich zu er-

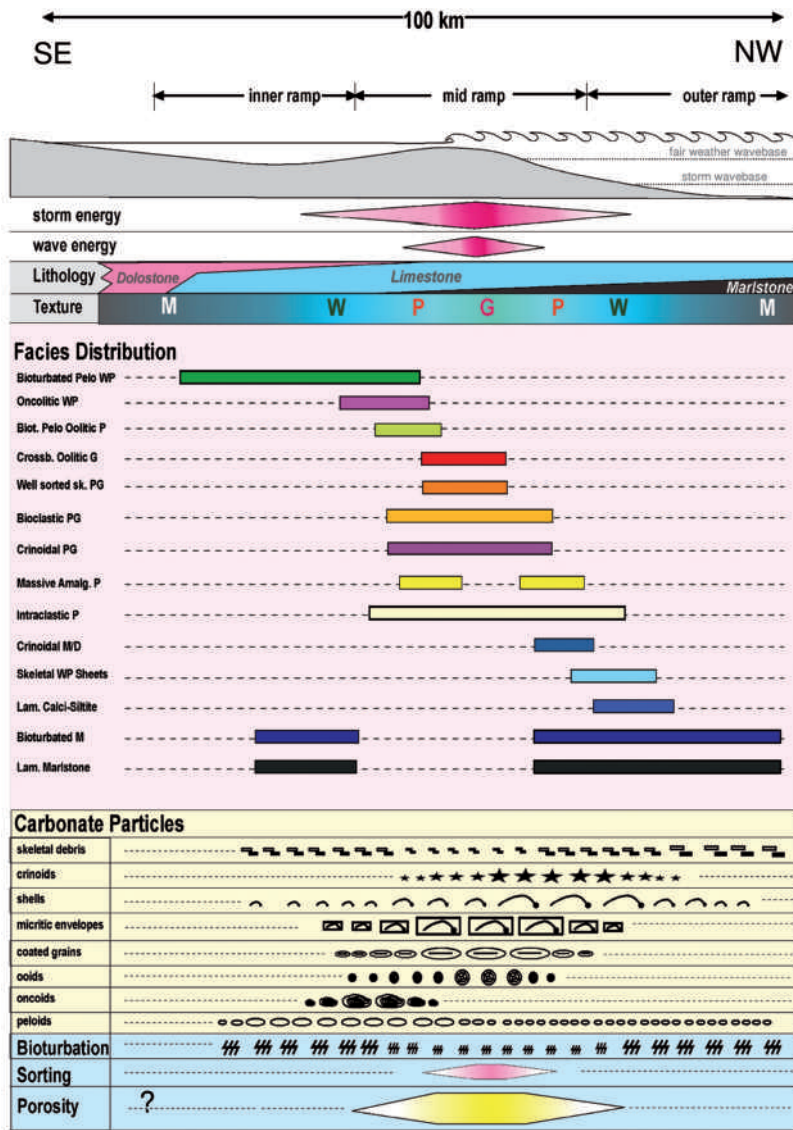


Abb. 3. Übersichtskarte: Modell für die Fazies-Verteilung entlang des Ablageungsgradienten einer leicht geneigten Karbonatrampe im Oberen Muschelkalk

M = mudstone (Kalkstein mit geringem Partikelanteil); W = wackestone (Kalkstein mit höherem Partikelanteil); P = packstone (hauptsächlich aus Partikeln bestehender Kalkstein); G = grainstone (rein partikulärer Kalkstein ohne Matrix); Pelo = peloidal (PALERMO & AIGNER ET AL. 2010 – reprinted by permission of the AAPG whose permission is required for further use)



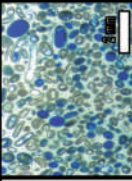


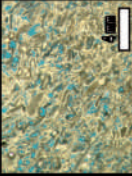


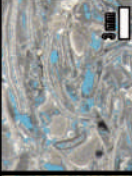

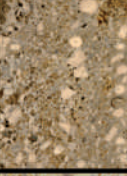
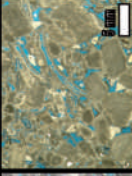


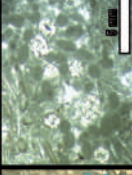


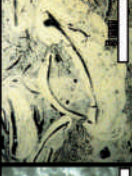


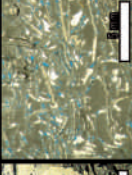
Midramp/Shoal facies types					
Texture	Facies	Key- attributes	Outcrop	Specimen	Thin-section
	Cross-bedded oolitic grainstone	Oolitic grainstone, oomoldic porosity, cross bedding			
	Well sorted skeletal pack- to grainstone	Well sorted, coarse arenitic skeletal debris, pack- to grainstone texture, bio- and oomoldic porosity			
	Bioclastic pack- to grainstone	Poorly sorted bioclastic debris, and shells, pack- to grainstone texture, oo- and biomoldic porosity			
	Crinoidal pack- to grainstone	Poorly sorted crinoidal debris, pack- to grainstone texture, oomoldic and primary interparticle porosity			
	Bioturbated oolitic packstone	Intense bioturbation yellowish colour, arenitic particle size, ooids, peloids and mouldic porosity			
	Oncolitic wacke- to packstone	Flat channels or massive bedding, oncolids, black pebbles, black debris and mouldic porosity			
	Massive amalgamated packstone	Amalgamated bedding, low angle lamination, shells, skeletal debris, mouldic porosity			

Abb. 4. Fazies-Atlas einer Muschelkalk-Mittelrampe vom Sandbarrentyp (PALERMO & AIGNER ET AL. 2010 – reprinted by permission of the AAPG whose permission is required for further use)

fassen, wurden die Wendepunkte dieser Zyklen korreliert (Abb. 7), welche den Zeitlinien der Paläolandschaft des Muschelkalkmeeres entsprechen. Die drei Baselevel-Zyklen lassen sich folgendermaßen charakterisieren:

a) Der gesamte Obere Muschelkalk wird von einem transgressiv-regressiven Großzyklus eingeschlossen, wobei sich die exakte Bestimmung des transgressiven Maximums (mfs) schwierig gestaltet. AIGNER & BACHMANN (1991) benannten das Intervall um die Cycloides-Bank mit der massenhaft auftretenden *Coenothyris cycloides*, als möglichen Kandidaten, wohingegen Hagdorn (pers Komm.) den etwas tiefer liegenden Tonhorizont Beta aufgrund der Ceratiten-Verbreitung als transgressives Maximum favorisiert. Gamma-Ray-Messkurven unterstützen letztere Vermutung und zeigen im Allgemeinen einen zyklischen Anstieg des Tongehalts bis zum Tonhorizont Beta₂, darüber wiederum sinkt der Tongehalt schrittweise mit einem ähnlichem Muster.

b) Der Großzyklus besteht aus 18 mittelskaligen Zyklen, welche bis zu über zehn Meter Mächtigkeit erreichen können. Im untersten (Kraichgau-Schichten) wie auch im obersten Bereich (ab DM alpha) des Oberen Muschelkalks ist die Mächtigkeit der Zyklen aufgrund des äußerst geringen Ablagerungsplatzes stark reduziert und oftmals asymmetrisch. Die Grenzen der Ceratitenzonen stimmen oftmals mit den Wendepunkten der Zyklen überein, welche allerdings mehrere Halbzyklen umfassen können. Lateral lassen sich die mittelskaligen Zyklen durch das ganze Studiengebiet verfolgen.

c) Kleinzyklen bilden das kleinste auflösbare Element dieser Hierarchie und können bis zu wenige Meter mächtig werden. Sie lassen sich besonders im Mittelteil (Meissner- und Neckarwestheim-Schichten) über zehner Kilometer lateral verfolgen. Im unteren wie im oberen Bereich, aber auch in Richtung des Beckenrandes, sinkt jedoch die laterale Kontinuität der Kleinzyklen. Sie werden zunehmend asymmetrischer und amalgamieren schließlich. Besonders in den stark bioturbierten, eingeschränkt marinen Lagen der Kraichgau-Schichten an der Basis des Oberen Muschelkalks lassen sich die Kleinzyklen kaum differenzieren.

Geologische Modellierung

a) Datenaufbereitung und Konzept

Die Vorbereitung, Konvertierung und Visualisierung der Daten ist einer der wichtigsten, aber auch zeitaufwändigsten Schritte im Modellierungsprozess von Aufschlussanalogdaten. Die Vorbereitung umfasst die Erstellung des generellen Modellierungskonzepts und, falls es sich nicht um diskrete Messwerte handelt, eine konsistente numerische Kodierung der zu modellierenden Eigenschaften, beispielsweise der Fazies.

Die so entstandenen Fazies-Logs werden zusammen mit geophysikalischen Messkurven und petrophysikalischen Messwerten mit ihren entsprechenden Koordinaten als ‚Pseudo-Bohrungen‘ in das Modellierprogramm importiert. Zur Korrelation der Profile werden zusätzlich digital erstellte Composite-Logs als Bitmaps geladen, die alle wesentlichen Informationen übersichtlich darstellen.

b) Gridding

Die Korrelation der Zyklen erfolgt mithilfe der Composite-Logs, wobei jeder erstellte Korrelationspunkt im dreidimensionalen Koordinatensystem gespeichert wird. Anschließend werden die erstellten Korrelationspunkte in Korrelationsflächen umgewandelt, welche die Grundlage für die vertikale sequenzstratigraphische Zonierung des Modells darstellen. Diese Flächen sind größtenteils identisch oder parallel zu den etablierten Leithorizonten. Jede dieser so entstandenen Zonen wird daraufhin in acht konforme Schichten unterteilt.

Das modellierte Gesamtvolumen des Oberen Muschelkalks beträgt $26 \text{ km} \times 35 \text{ km} \times 70 \text{ m}$. Während des ‚Gridding‘-Prozesses wird das Modell in ein Gitter aus Zellen unterteilt, deren laterale Dimension $400 \text{ m} \times 400 \text{ m}$ beträgt, vertikal werden die Zellen durch die Schichtenflächen begrenzt, deren Auflösung sich im Dezimeterbereich befindet.

c) Faziesverteilung

Aufschlüsse und Korrelationen im Studiengebiet implizieren eine hohe laterale Kontinuität der Fazieskörper. Da sich diese entlang der einfallenden Rampe normalerweise über dem durchschnittlichen Datenpunktabstand befindet, wurde die Verteilung deterministisch durchgeführt.

Das heißt die Fazies wurden innerhalb der einzelnen Zonen von Datenpunkt zu Datenpunkt mit einem Algorithmus (Truncated Gaussian Simulation) interpoliert und anschließend manuell verfeinert. Im unüberhöhten Faziesmodell zeigt sich der grundlegende ‚Layercake‘-Character des Oberen Muschelkalks, laterale Fazieswechsel und Geometrien sind kaum wahrnehmbar. Dies ändert sich jedoch fundamental, wenn man das Modell stark überhöht. Bei 200-facher Überhöhung werden geregelte Geometrien und laterale Faziesübergänge sichtbar, die deutlich dem sequenzstratigraphischen Rahmen folgen (Abb. 8). Insgesamt kann man anhand des Modells vier verschieden organisierte Shoaltypen unterscheiden, die in so genannten ‚Cyclictystyles‘ zusammengefasst werden können.

a) **Transgressive Crinoidal Shoals** (Abb. 5) bilden den Mittelteil des transgressiven Großzyklus und beschreiben die Shoalkörper der Crailsheim-Schichten. Diese zeichnen sich durch hohe laterale Kontinuität und vergleichsweise geringe Fazies-Differenzierung aus. Bei den Körpern handelt es sich um dünne, relativ homogene Sheets, die als ausgedehnte, lateral verbundene Loben einen unregelmäßigen Faziesgürtel bilden, der sich durch das gesamte Studiengebiet erstreckt und eine klassische Layercake-Geometrie aufweist. Dominierende Faziestypen sind meist schlecht sortierte Crinoidale Pack- und Grainstones. Bemerkenswert sind vor allem die subtilen graduellen Fazieswechsel entlang des Ablagerungsgradienten, welcher sich in eine direkte Relation zur Gesamtmächtigkeit des Oberen Muschelkalks setzen lässt. Am wichtigsten sind hierbei subtile, sich lateral graduell ändernde Texturunterschiede. Poröse Grainstones finden sich bevorzugt an Stellen mit einer geringen Gesamtmächtigkeit der Abfolge, wohingegen mit zunehmender Gesamtmächtigkeit der Schlammgehalt in der Matrix steigt und den Rückgang der Porosität bewirkt. Diese Fakten lassen die Interpretation zu, dass der Rückgang der Gesamtmächtigkeit in Richtung des Beckenrandes auf ge-



Transgressive Crinoidal Shoal

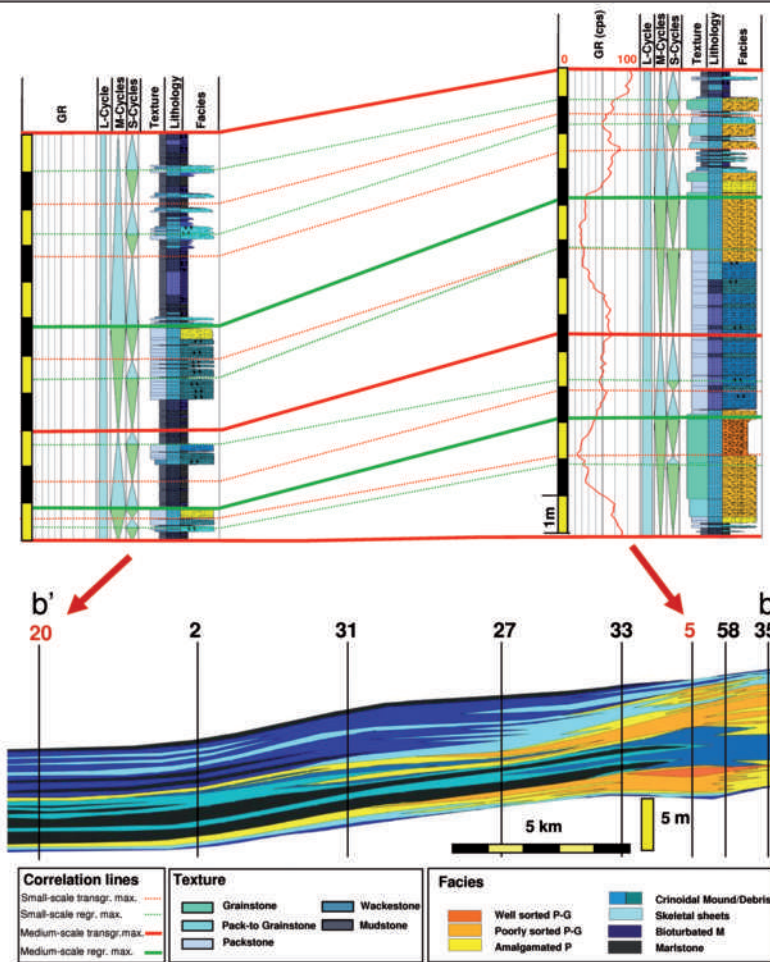


Abb. 5. Zyklizitätsstil transgressiv-crinoidaler Sandbarren: zwei mittelskalige Zyklen zweier typischer Datensätze (oben) und ein Querschnitt, der die horizontale Fazies-Verteilung zeigt (unten). Die Zyklen weisen horizontal wie vertikal starke Abweichungen auf, lassen sich aber in regionalem Maßstab korrelieren.

GR = gamma ray (Gammastrahlung der natürlichen Radioaktivität); cps = counts per second; W = wackestone; P = packstone; G = grainstone; M = mudstone (zur DUNHAMschen Terminologie der Kalkgesteine s. Abb. 3); L, M, S = large, medium, small scale.

(PALERMO & AIGNER et al. 2010 – reprinted by permission of the AAPG whose permission is required for further use)

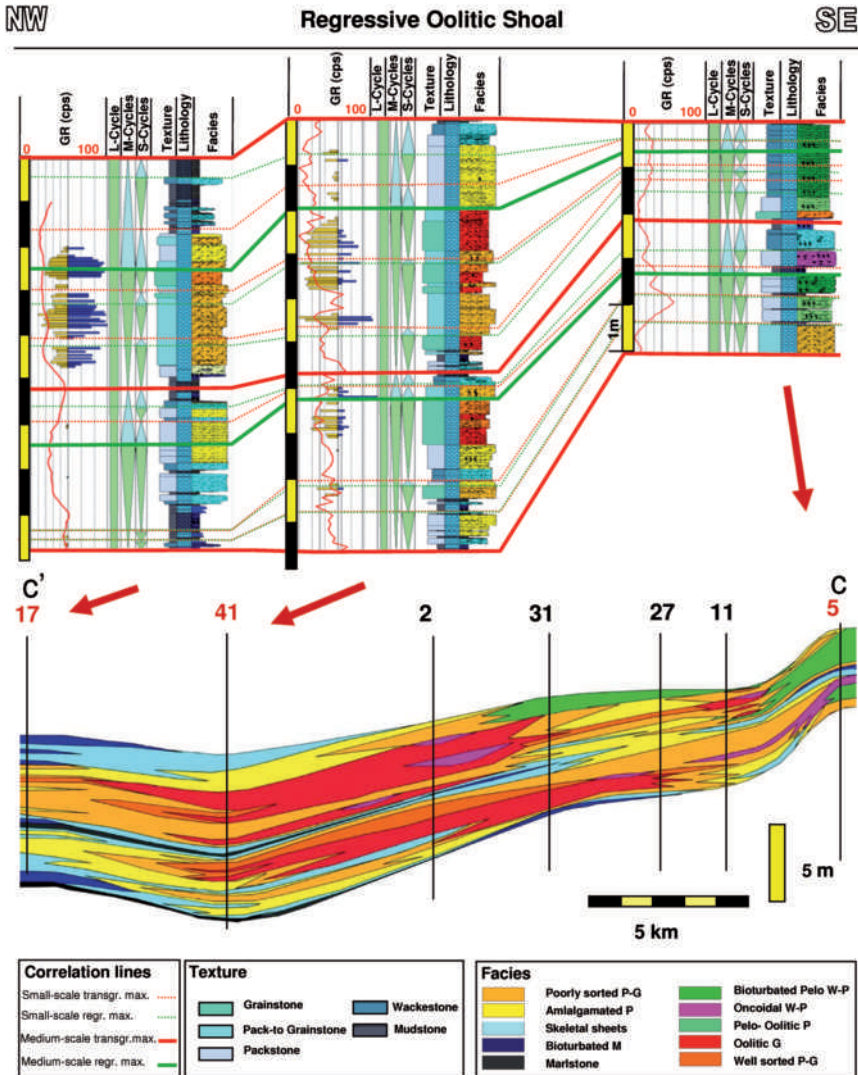


Abb. 6. Zyklizitätsstil regressiv-oolithischer Sandbarren dargestellt an zwei mittelskaligen Zyklen von drei typischen Datensätzen (oben) und einem Querschnitt, der die horizontale Fazies-Verteilung zeigt (unten).

Die Zyklen zeigen große Vielfalt und starke Fazies-Änderungen in horizontaler wie vertikaler Richtung. Hochenergie-Faziestypen werden in den Randbereichen zunehmend schmaler und dünner (rechts), was den abnehmenden Ablagerungsraum entlang des Ablagerungsgradienten widerspiegelt. Sandbarren-Körper der Außenbereiche (links) sind relativ mächtig und finden sich hauptsächlich zur Zeit maximaler Regression, während die flacheren Sandbarren

ringeren Ablagerungsplatz entlang eines subtilen Paläoreliefs zurückzuführen ist. Die Crinoidalen Grainstones wurden somit bevorzugt auf der Küste vorgelagerten, paläogeographischen Erhöhungen abgelagert, welche die Wellenenergie absorbierten.

b) **Skeletal Sheets** fassen den mittleren Teil des Oberen Muschelkalks im Bereich der Meissner- und Neckarwestheim-Schichten zusammen. Das Auftreten von Shoalkörpern beschränkt sich auf wenige dünne Lagen im Bereich der Spiriferina-Bank zwischen Satteldorf und Crailsheim. Die Körper lassen sich als schlecht sortierte, wenig differenzierte Sheets von geringer lateraler Ausdehnung beschreiben. Die Körper sind ausschließlich auf die Stellen beschränkt, an denen der Obere Muschelkalk seine geringste Mächtigkeit aufweist.

c) **Regressive Oolitic Shoals** (Abb.6) sind die Shoalkörper der Hohenlohe-Schichten unterhalb des Leithorizonts DM alpha, dem Mittelteil des regressiven Großzyklus. Die charakteristischen Shoalkörper sind frei von Crinoiden und weisen stattdessen einen höheren Anteil an körnigen Komponenten, wie Ooiden und Coated Grains, auf. Sie sind in der Regel komplex differenziert und setzen sich oftmals aus mehreren verschiedenen Faziestypen mit unterschiedlicher Sortierung, Textur und Komponentenanteil zusammen. Außerdem sind die Körper in subtilen, meist amalgamierten Shingles organisiert. Dabei handelt es sich um ausgedehnte Sheets, welche jedoch dachziegelartig gestapelt sind und in Richtung Beckenzentrum progradieren. Die Beziehung zur Gesamtmächtigkeit ist auch hier gegeben, allerdings befinden sich die Shoalkörper diesmal nicht im Bereich der geringsten Mächtigkeit, dem Paläohoch, sondern auf dessen Flanken. Auf dem Paläohoch finden sich dagegen Faziestypen der rückwärtigen Shoal und der inneren Rampe.

d) **Low Accommodation** beschreibt einen Shoaltypus, welcher an der Ober- und Untergrenze des Muschelkalks vorkommt. Im unteren Teil befinden sich die Körper in den Kraichgau-Schichten und wurden während der initialen Transgression sedimentiert. Im oberen Teil wurden sie während der späten Regression abgelagert, im Hangenden des DM alpha. In beiden Phasen stand dem Sediment nur wenig Ablagerungsraum zur Verfügung, was sich auch in der Geometrie und der Kontinuität der Körper widerspiegelt. Sie besitzen vorwiegend körnige Komponenten und formen mit lateral unregelmäßigen Körpern mittlerer Differenzierung eine schwer vorhersagbare ‚Jigsaw-Puzzle‘-Geometrie. Dabei handelt es sich um schmale Faziesgürtel, flache Kanäle, und fleckhaft verteilte Patches.

ren-Körper in lagunären Innenbereichen hauptsächlich in Zeiten maximaler Transgression abgelagert wurden.

GR = gamma ray (Gammastrahlung der natürlichen Radioaktivität); cps = counts per second; W = wackestone; P = packstone; G = grainstone; M = mudstone (zur DUNHAMschen Terminologie der Kalkgesteine s. Abb. 3); L, M, S = large, medium, small scale. (PALERMO & AIGNER et al. 2010 – reprinted by permission of the AAPG whose permission is required for further use)

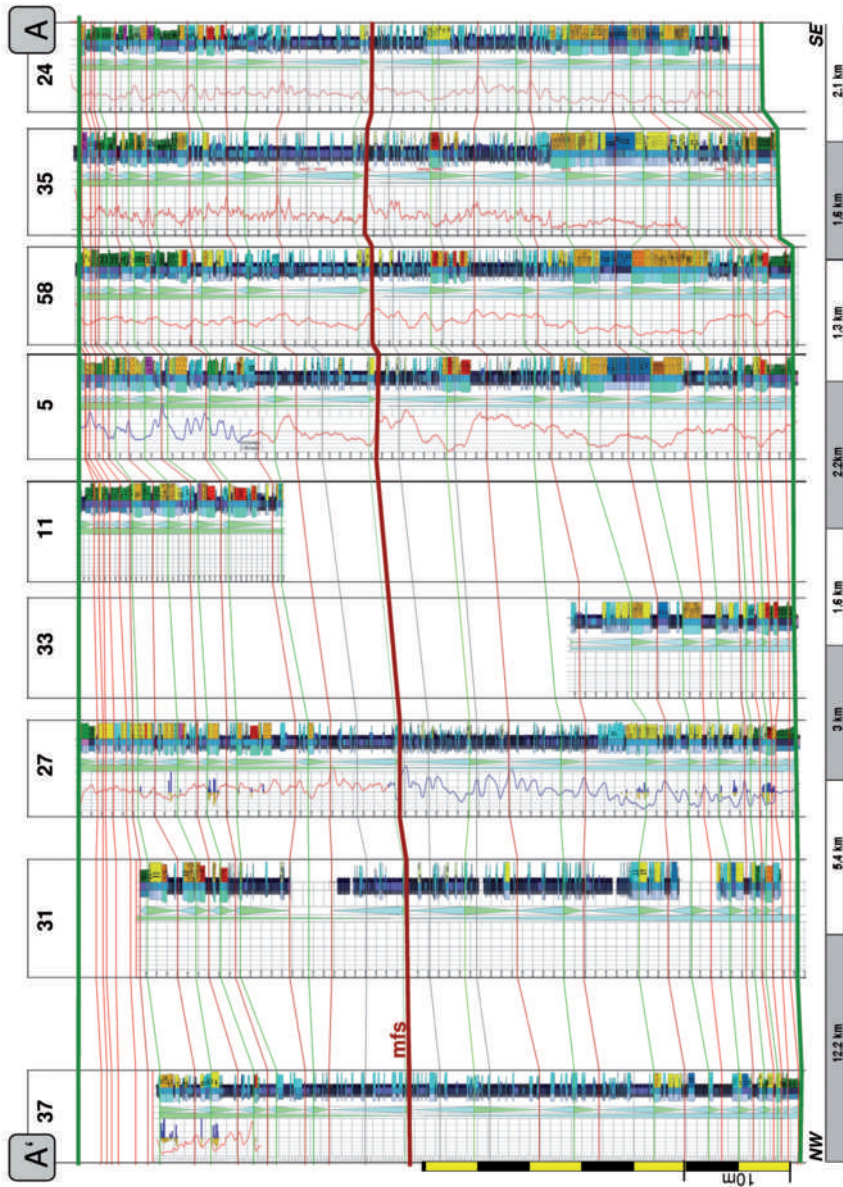


Abb. 7. Stratigraphischer Querschnitt A (zur Lage s. Abb. 3) von Nordwest nach Südost entlang des Ablagerungsgradienten ausgerichtet mit Zuordnung mittelskaliger Zyklen.

mfs = maximum flooding (maximale Überflutung)

(PALERMO & AIGNER et al. 2010 – reprinted by permission of the AAPG whose permission is required for further use)

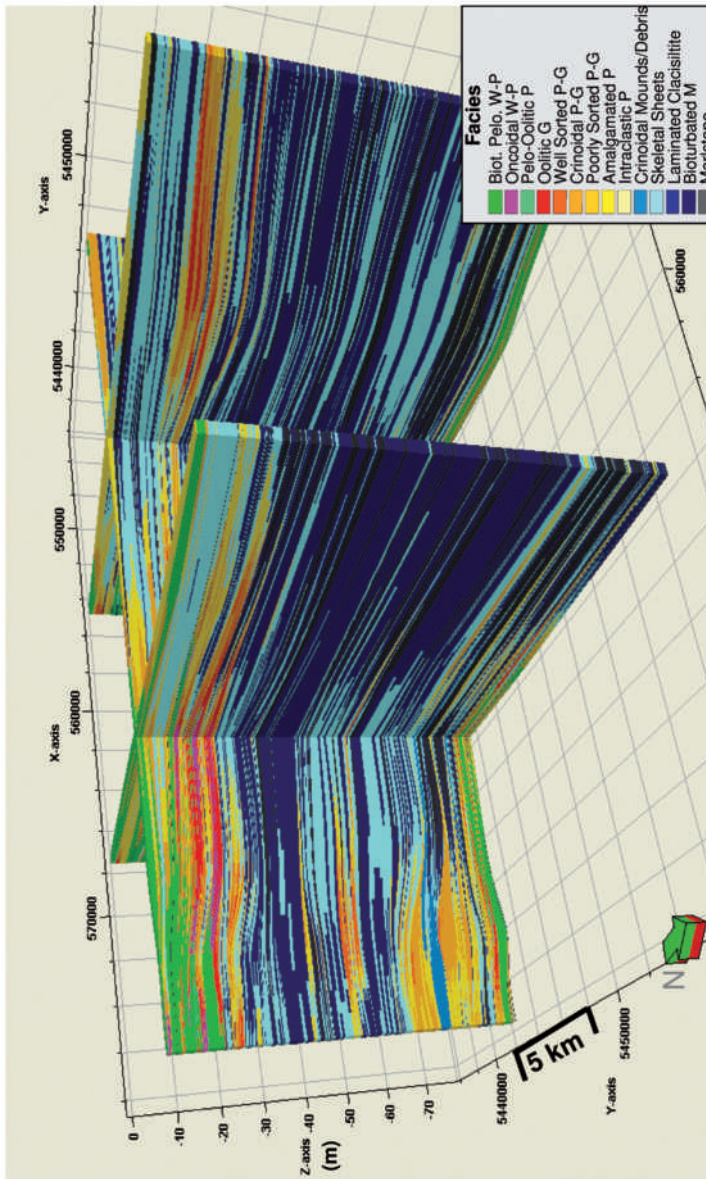


Abb. 8. Abschließendes 3D-Modell mit 200-facher Überhöhung: Lagerungsverhältnisse und horizontale Fazies-Änderungen sind gut zu erkennen
 W = wackestone; P = packstone; G = grainstone; M = mudstone (zur DUNHAMschen Terminologie der Kalkgesteine s. Abb. 3), Pelo = peloidal (PALERMO & AIGNER et al. 2010 – reprinted by permission of the AAPG whose permission is required for further use)

Die Modellierung dieser Körper ist schwierig und anfällig, allerdings ist der Anteil dieser Körper relativ gering.

Petrophysikalische Eigenschaften und Verteilung

Die petrophysikalische Modellierung erfolgt mithilfe von Porositäts- und Permeabilitätsmesswerten von über 500 Proben. SEYFANG (2006) weist in seiner Studie an den Shoalkörpern des Trochitenkalks um Satteldorf die laterale Kontinuität und graduelle Wechsel der petrophysikalischen Eigenschaften im Meter- bis Kilometerbereich nach. Diese Beobachtungen sind ein wichtiger Baustein bei der Erstellung des geeigneten Modellierkonzepts und der Auswahl des richtigen Verteilungsalgorithmus. Des Weiteren zeigt sich recht schnell eine klare Faziesabhängigkeit der petrophysikalischen Eigenschaften: Matrixporosität und Durchlässigkeit sind ausschließlich auf die Hochenergie-Shoalfaziestypen beschränkt. Unterschiede innerhalb der einzelnen Shoalfaziestypen sind allerdings schwerer aufzulösen, da sich verschiedene Porositätsgenerationen mit unterschiedlichen Ursachen gegenseitig überlagern. Die Verteilung der Porosität im Modell erfolgt ebenfalls deterministisch (Sequential Gaussian Simulation), wobei der Algorithmus an Zyklen und Fazies konditioniert und die Messwerte arithmetisch gemittelt werden. Die Permeabilität wird ähnlich modelliert; die Messwerte erfordern allerdings eine geometrische Gewichtung.

Im Resultat zeigen die Reservoirkörper, wie in den Aufschlüssen beobachtet, dass Volumen und Auftreten überwiegend an die sequenzstratigraphisch und paläotopographisch kontrollierten Shoalkörper gebunden ist. Das Modell gibt jedoch zusätzlich Aufschluss über die Verteilung der Eigenschaften im Körper und dessen Aufbau. Dabei zeigt sich, dass die interne Verteilung der Reservoirereigenschaften größtenteils von den Kleinzyklen bestimmt wird. Die durchlässigsten und porösesten Lagen befinden sich in der Regel an den Maxima der kleinskaligen Regressionen, an denen Lösungsporosität die wichtigste Rolle spielt. Die transgressiven Maxima der Kleinzyklen sind dagegen aufgrund eines erhöhten Anteils an frühem Karbonatzement und weniger oder gar keiner Lösungsporosität oftmals weniger porös und manchmal sogar völlig undurchlässig.

Schlussfolgerungen

Bisherige sedimentologische Aufschlussstudien und Korrelationen nehmen im Oberen Muschelkalk vergleichsweise einfache, durchgehende Schichtverhältnisse an. Anhand der dreidimensionalen Modellierung des Datensatzes sind jedoch neue Einsichten in wichtige Details des stratigraphischen Aufbaus und der Verteilung der Shoalkörper im Oberen Muschelkalk gewonnen worden. Die räumliche Verteilung und die Dimension der Reservoirkörper ist vermutlich das Resultat der Wechselwirkung zwischen zyklischen Meeresspiegelschwankungen und einem schwach ausgeprägtem Paläorelief. Dabei sind leicht erhöhte paläotektonische Positionen entscheidend für das Auftreten poröser Reservoirkörper. Während transgressive Shoalkörper eine durchgehende „Layer-Cake“-Stratigraphie aufweisen, sind die regressiven Shoalkörper bei genauerer Betrachtung

größtenteils in subtilen Klinofomgeometrien („Pseudo-Layer-Cake“) organisiert, die mit äußerst flachem Winkel zum Beckenzentrum progradieren und erst bei starker Überhöhung sichtbar werden.

In der petrophysikalischen Modellierung sind Aufschlüsse über wichtige Kontrollfaktoren der Qualität und Quantität der Reservoireigenschaften gewonnen worden. Im Untersuchungsgebiet sind diese größtenteils faziesabhängig, wobei sich die Porosität auf die Flachwasser-Faziestypen der mittleren Rampe beschränkt. Alle beobachteten Ordnungen stratigraphischer Zyklen beeinflussen die räumliche Verteilung der Reservoirkörper maßgeblich. Interne Unterschiede innerhalb der einzelnen Körper werden dabei vorwiegend von Kleinzyklen gesteuert.

DANKSAGUNG

Diese Arbeit ist Teil eines Forschungs- und Entwicklungsprojekts finanziert von Eni E&P unter Aufsicht und in Zusammenarbeit mit Prof. T. Aigner und Prof. W. Blendinger. Ich möchte Ihnen für Ihre große Unterstützung und die Erlaubnis zur Veröffentlichung danken. Ich danke auch für die Diskussionen mit vielen Kollegen, die über den Germanischen Muschelkalk arbeiten, insbesondere H. Hagdorn, T. Simon, M. Urlichs und R. Borkhataria. Unterstützt wurde ich auch von Mitgliedern der Sedimentary Geology Group an der Universität Tübingen (A. Allgöwer, E. Dmitrieva, M. Looser, B. Seyfang, C. Schneider und M. Zeller) und von A. Satterley von Eni E&P. P. Jeiseke hat Dünnschnitte angefertigt und die Steinbruch-Betreiber Schön & Hippelein, Hohenloher Schotterwerke, Schotterwerk Schumann und J. Heumann, Schotterwerke Hohenlohe Bauland GmbH, haben mir großzügig Zugang zu ihren Steinbrüchen gewährt. Die Geologischen Dienste von Baden-Württemberg und Bayern haben uns mit Daten aus Bohrungen versorgt. Wir danken A. Glocke und Schlumberger für den Zugang zu Petrel (Warenzeichen von Schlumberger) und A. Henriette für den Zugang zu WellCAD.

LITERATUR

- AIGNER, T. (1985): Storm Depositional Systems. Dynamic stratigraphy in modern and ancient shallow marine sequences. Lecture Notes in Earth Sciences, v. 3. Berlin, Springer, 174 S.
- AIGNER, T., S. BRAUN, D. PALERMO & W. BLENDINGER (2007): 3D geological modeling of a carbonate shoal complex: reservoir analogue study using outcrop data, First Break, vol. 25: S. 65–72.
- AIGNER, T. & G. H. BACHMANN (1993): Sequence Stratigraphy of the German Muschelkalk. – In H. Hagdorn and A. Seilacher, eds., Muschelkalk: Schöntaler Symposium 1991. Sonderbände der Gesellschaft für Naturkunde in Württemberg, Bd. 2, S. 15–18.
- ALLGÖWER, A. (2006): Stratigraphy, petrophysics and facies analysis of epeiric carbonates in the Upper Muschelkalk. An outcrop analogue study for skeletal/oolitic carbonate sand bodies in the Middle East (Upper Muschelkalk, South German Basin). Diplomarbeit Universität Tübingen, 94 S.

- BACHMANN, G.H. (1973): Die karbonatischen Bestandteile des Oberen Muschelkalks (Mittlere Trias) in Südwest-Deutschland und ihre Diagenese. Arbeiten des Instituts für Geologie und Paläontologie der Universität Stuttgart, Bd. 68, S. 1–99.
- BACHMANN, G.H. & M.P. GWINNER (1971): Nordwürttemberg. Sammlung Geologischer Führer, Bd. 54, Gebr. Borntraeger, 168 S.
- BACHMANN, G.H. & H. BRUNNER (1998): Nordwürttemberg. Sammlung geologischer Führer, Bd. 90, Gebr. Borntraeger, 403 S.
- BRAUN, S. (2003): Quantitative analysis of carbonate sandbodies: outcrop analog study from an epicontinental basin (Triassic Germany). Doktorarbeit Universität Tübingen, 93 S.
- BRYANT, I.D. & S.S. FLINT (1993): The Geological Modeling of Hydrocarbon Reservoirs and Outcrop Analogues. International Association of Sedimentologists, Special Publication, v. 15, 269 S.
- BURCHETTE, T.P., V.P. WRIGHT & T.J. FAULKNER (1990): Oolitic sandbody depositional models and geometries, Mississippian of southwest Britain: implications for petroleum exploration in carbonate ramp settings. *Sedimentary Geology*, v. 68, S. 87–115.
- DERCOURT, J., L.E. RICOU AND B. VRIELYNCK, EDs. (1993): Atlas Tethys Paleoenvironmental maps. Paris, Gauthier-Villars, 307 S.
- DEUTSCHE STRATIGRAPHISCHE KOMMISSION (2002): Stratigraphische Tabelle von Deutschland. Deutsches GeoForschungszentrum, Potsdam.
- DMITRIEVA, E. (2006): Facies distribution, sequence stratigraphy and poroperm analysis of carbonate shoal bodies in the Upper Muschelkalk (middle Jagst valley, South German Basin). An outcrop analogue study for carbonate reservoirs in the Middle East. Diplomarbeit Universität Tübingen, 101.
- GEYER, O.F. & M.P. GWINNER (1991): Geologie von Baden-Württemberg. Stuttgart, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 482 S.
- HAGDORN, H. & A. SEILACHER (1991): Muschelkalk. Schöntaler Symposium 1991. Sonderbände der Gesellschaft für Naturkunde in Württemberg. Korb, Goldschneck, 288 S.
- HAGDORN, H. & T. SIMON (1988): Geologie und Landschaft des Hohenloher Landes. Sigmaringen, Thorbecke Verlag, 192 S.
- HARRIS, P.M. & W.S. KOWALIK (1994): Satellite Images of Carbonate Depositional Settings, Examples of Reservoir- and Exploration-Scale Geologic Facies Variation. AAPG Methods in Exploration Series, v. 11
- KOSTIC, B. (2001): Sedimentäre Strukturen, Fazies und Poroperm-Eigenschaften in ausgewählten „Karbonatsanden“: Quaderkalk, Oberer Muschelkalk. Diplomarbeit, Universität Tübingen, 104 S.
- KOZUR, H. (1974): Biostratigraphie der germanischen Mitteltrias. Freiburger Forschungshefte C, Bd. 280, S. 7–56.
- LOOSER, M. (2006): Facies and poroperm parameters of epeiric carbonates in the Upper Muschelkalk of the middle Kocher valley. Diplomarbeit Universität Tübingen, 89 S.
- MIALL, A.D. & N. TYLER (1991): The Three-Dimensional Facies Architecture of Terrigenous Clastic Sediments and Its Implications for Hydrocarbon Discovery and Recovery. *SEPM Concepts in Sedimentology and Paleontology*, v. 3, 309 p.

- OCKERT, W.** (1988): Lithostratigraphie und Fossilführung des Trochitenkalks (Unterer Hauptmuschelkalk, mo1) im Raum Hohenlohe. – In H. Hagdorn (ed.), *Neue Forschungen zur Erdgeschichte von Crailsheim*. Sonderbände der Gesellschaft für Naturkunde in Württemberg, Bd. 1, S. 43–69.
- PALERMO, D., T. AIGNER, S. NARDON & W. BLENDINGER** (2010): Three-dimensional facies modeling of carbonate sandbodies: Outcrop analog study in an epicontinental basin (Triassic, southwest Germany). *AAPG Bulletin*, v. 94, No. 4, S. 475–512
- RANKEY, E. C., B. RIEGL & K. STEFFEN** (2006): Form, function and feedbacks in a tidally dominated ooid shoal, Bahamas. *Sedimentology*, v. 53, S. 1191–1210.
- RUF, M.** (2001): Facies Distribution, Petrophysics and Mapping of Selected Carbonate Sand Bodies in the Upper Muschelkalk, South German Basin: A Reservoir Analogue Investigation. Diplomarbeit Universität Tübingen, 109 S.
- RUF, M. & T. AIGNER** (2004): Facies and poroperm characteristics of a carbonate shoal (Muschelkalk, South German Basin): A reservoir analogue investigation. *Journal of Petroleum Geology*, v. 27, S. 215–239.
- SEYFANG, B.** (2006): Sedimentary and Poroperm Heterogeneities of Carbonate Shoals from Centimetre- to Kilometre-Scales. An outcrop analogue study for skeletal/ oolitic carbonate sand reservoirs in the Middle East. Diplomarbeit Universität Tübingen, 90 S.
- SIMON, T.** (2003): Ergebnisse der Forschungsbohrung im Muschelkalk bei Kirchberg an der Jagst (Baden-Württemberg). *Jahrshefte Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau*, Bd. 39, S. 145–175.
- SKUPIN, K.** (1969): Lithostratigraphische Profile aus dem Trochitenkalk des Neckar-Jagst-Kocher-Gebietes. *Jahresberichte und Mitteilungen des Oberrheinischen Geologischen Vereins.*, Bd. 63, S. 1–173.
- TUCKER, M. E. & V. P. WRIGHT** (1990): *Carbonate sedimentology*. Oxford, Blackwell Science, 482 S.
- URLICHS, M.** (2006): Dimorphismus bei *Ceratites* aus dem Oberen Muschelkalk (Ammonoidea, Mitteltrias) mit Revision einiger Arten. *Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde*, B, Bd. 363, S. 1–84.
- URLICHS, M. & R. MUNDLOS** (1990): Zur *Ceratiten*-Stratigraphie im Oberen Muschelkalk (Mitteltrias) Nordwürttembergs. *Jahreshefte der Gesellschaft für Naturkunde in Württemberg*, Bd. 145, S. 59–74.
- VOLLRATH, A.** (1938): Zur Stratigraphie und Bildung des Oberen Hauptmuschelkalks in Mittel- und Westwürttemberg. *Mitteilungen aus dem Mineralogisch-Geologischen Institut der TH Stuttgart*, Bd. 33, S. 69–80.
- VOLLRATH, A.** (1955): Zur Stratigraphie des Hauptmuschelkalks in Württemberg. *Jahreshefte des Geologischen Landesamtes Baden-Württemberg*, Bd. 1, S. 79–168.
- VOLLRATH, A.** (1970): Ein vollständiges Profil des oberen Muschelkalks und ein neues Mineralwasser bei Ummenhofen, Gemeinde Untersontheim, Landkreis Schwäbisch Hall. *Jahresberichte und Mitteilungen des Oberrheinischen Geologischen Vereins*, Bd. 52, S. 133–148.
- WAGNER, G.** (1913): Beiträge zur Stratigraphie und Bildungsgeschichte des Oberen Hauptmuschelkalks und der Unteren Lettenkohle in Franken. *Geologische und Paläontologische Abhandlungen*, Bd. 12, S. 31–180.

ZIEGLER, P.A. (1990): Geological Atlas of Western and Central Europe. Shell International Petroleum Maatschappij, 2nd ed., Amsterdam, Elsevier, 239 S.

Anschrift des Verfassers:

Dr. DENIS PALERMO
Via Pier Lombardo
I-20135 Milano