

3D-Faziesmodelle des Oberen Muschelkalks

Von MATTHIAS WARNECKE, Tübingen.

Mit 6 Abbildungen.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Ablagerungen des Oberen Muschelkalks (Mittlere Trias) bilden für Kohlenwasserstoff-Lagerstätten ein hervorragendes Aufschluss-Analogbeispiel im Labormaßstab. Sie ermöglichen innerhalb eines gut begrenzten bio- und sequenzstratigraphischen Rahmens eine detaillierte sedimentologische Analyse im Mikro- bis Beckenmaßstab. Dieser Artikel stellt, basierend auf einer detaillierten Fazies-Analyse, 1D-Sequenz-Stratigraphie und deren Korrelation, integrierte 3D-Faziesmodelle des Oberen Muschelkalks vor. Die Untersuchungen umfassen Aufschlüsse und Bohrkerne im südlichen Teil des Germanischen Beckens, welches in Luxemburg, Ostfrankreich, der Nordschweiz und in Südwestdeutschland aufgeschlossen ist. Der Obere Muschelkalk umfasst 21 Lithofaziestypen (LFT), die in acht verschiedene Lithofaziesassoziationen (LFA) gruppiert werden können. Ein sequenzstratigraphisches Rahmenwerk wurde für den Oberen Muschelkalk erstellt. Es umfasst die übergeordnete *Depositional Sequence* sowie untergeordnet 7 *Cycle-Sets* und 23 *Cycles*. Regionale 2D-Korrelationen zusammen mit der Biostratigraphie zeigen die zeitliche und räumliche Verteilung von Reservoir-Körpern und die morphologische Varianz der 1D-Zyklen innerhalb der Karbonatrampe. Sequenzstratigraphische Korrelationen orthogonal zur Paläo-Küstenlinie weisen subtile sigmoidale Geometrien auf, die auf „Pseudo-Layercake“-System hinweisen. Integrierte 3D-Faziesmodelle des östlichen Beckenrandes zeigen das landwärts gerichtete Retrogradieren der Faziesgürtel mit isolierten Shoals in der transgressiven Hemisequenz und das beckenwärts gerichtete Progradieren von Faziesgürteln mit gut verbundenen großen Shoals innerhalb der regressiven Hemisequenz.

Schlüsselwörter: Oberer Muschelkalk, 3D Modellierung, Karbonatgestein, Sequenz-Stratigraphie, Trias.

ABSTRACT

The Middle Triassic – Upper Muschelkalk deposits of Central Europe form an excellent, ‘laboratory-scale’ outcrop analog for sub-surface hydrocarbon reservoirs. This study provides a detailed sedimentological analysis at micro-to basin-wide scale within a well constrained bio- and sequence-stratigraphic framework. This study aims on extracting hierarchical, multi-scale concepts for epicontinental carbonates based on detailed facies and 1D sequence stratigraphic analysis, 2D correlations and integrated 3D facies models. Investigations cover outcrops and drilling cores in the southern part of the Germanic Basin, exposed in Luxembourg, eastern France, northern Switzerland and southwestern Germany. The Upper Muschelkalk comprises twenty-one lithofacies types (LFT) which are grouped

into eight distinct lithofacies associations (LFA) encompassing coastal sabkha, peritidal, backshoal, shoal, shoal fringe, foreshoal to offshoal environments. Several potential reservoirs are identified: barrier shoals, peritidal beach ridges or channels as well as peritidal algal boundstones. A 1D sequence stratigraphic framework was established on different cyclic scales, ranging from depositional sequences, cycle-sets, cycles to mini-cycles. Regional 2D correlations based on 1D cycle analysis and biostratigraphic conodont/ceratite zonations disclose the temporal and spatial distribution of reservoir bodies and the morphological variance of 1D cycles across the carbonate ramp. Cross-sections in dip direction reveal subtle, gently inclined clinofolds pointing to a 'pseudo layer-cake' system. Integrated 3D facies models of the eastern basin margin show landward facies retrogradation with patchy isolated shoal bodies in the transgressive hemisequence and basinward facies progradation with well-connected large shoals within the regressive hemisequence.

Keywords: Upper Muschelkalk, 3D modelling, carbonates, sequence stratigraphy, Triassic.

1. EINFÜHRUNG

Einige der weltweit größten Öl- und Gaslagerstätten befinden sich in sedimentären Ablagerungen epeirischer Karbonatbecken – z.B. das Ghawar Field (Saudi-Arabien) oder das North Field (Qatar). Entscheidend für die Erforschung und Nutzung solcher Lagerstätten ist ein fundiertes Wissen über die Verteilung der sedimentären Fazies, über die Geometrien der Gesteinskörper und über Faktoren, die ihre räumliche und zeitliche Entwicklung steuern. Das Germanische Muschelkalk-Becken der Mittleren Trias bietet ein exzellentes – wenn auch kleineres – Aufschluss-Analog für solch riesige Erdölbecken, da sie unter ähnlichen klimatischen und paläozeanographischen Bedingungen abgelagert worden sind.

Das Muschelkalk-Becken ermöglicht somit eine detaillierte Analyse in einem robusten sequenzstratigraphischen Rahmen. Der konzeptionelle Rahmen dieser Studie stellt eine Weiterentwicklung des „Dynamischen Stratigraphie“ Konzepts (AIGNER et al. 1999) dar. Die Charakterisierung und Vorhersage von Reservoirheterogenitäten erfordern ein prozessorientiertes Verständnis der sedimentären Architektur. Der Arbeitsablauf schlägt dabei eine einfache, prozessbasierte Methodik zur Analyse von Heterogenitäten auf Basis einer streng hierarchischen Weise vor, die von den kleinsten zu den größten sedimentären Einheiten (Kornbis Beckenskala) reicht. Ein prägendes Verständnis jeder einzelnen Skala erlaubt es, Regeln und Vorhersagen über die Verteilung von Heterogenitäten abzuleiten. Das Untersuchungsgebiet (Abbildung 2) umfasst den südlichen Teil des Germanischen Beckens. Die Ablagerungen des Oberen Muschelkalks (Mittlere Trias) befinden sich heute in natürlichen Aufschlüssen, Straßenschnitten, Steinbrüchen und im Untergrund von Südwestdeutschland, Ostfrankreich, der Nordschweiz und Luxemburg. In einigen Gebieten wie den Vogesen, dem Schwarzwald, dem Pfälzer Wald, dem Odenwald, fehlt der Obere Muschelkalk durch tertiäre Hebung und die einhergehende Erosion.

Die vorliegende Arbeit gibt in stark gekürzter Form einen Teil des Projekts zwischen der Universität Tübingen und Shell Global Solutions B.V., welches die Doktorarbeit *Carbonate concepts: reservoir patterns of the Upper Muschelkalk in the southern Germanic Basin* von WARNECKE (2018) hervorbrachte, wieder. Das Projekt zielte darauf ab, hierarchische und mehrskalige Konzepte für epikontinentale Karbonate zu extrahieren. Grundlegend für die Konzepterstellung waren die im Feld gewonnenen geologischen Daten und ihre Interpretation, sowie petrophysikalische Untersuchungen der Gesteine im Labor. Im Rahmen dieses Artikels sollen berechnete 3D-Modelle des Oberen Muschelkalks im Vordergrund stehen.

2. GEOLOGISCHER RAHMEN

2.1 Paläogeographie

Der Zerfall Pangäas begann während des späten Perms (FRISCH & KOCKEL 1997); dadurch kam es zur Bildung von intrakratonischen Becken innerhalb des Superkontinents. Eines dieser Becken war das Germanische Becken, welches zwischen 30°N und 43°N des Äquators lag (MARSAGLIA & KLEIN 1983; ZIEGLER 1990). Es wurde vom Vindelizisch-Böhmischen-Massiv im Süden, dem London-Brabant-Massiv im Westen und dem Fennoskandinavischen Land im Norden begrenzt. Zwischen diesen großen Landmassen befanden sich mehrere kleinere Inseln und strukturelle Höhen wie das Rheinische Massiv und das Malopolska-Massiv (ZIEGLER 1990). Während der gesamten Trias nahm die Größe des Germanischen Beckens entsprechend dem fortschreitenden Zerfall Pangäas zu (ZIEGLER 1990). Das Becken war durch drei Seewege, die Burgundische, die Schlesisch-Mährische und die Ostkarpaten Pforte vorübergehend mit dem Tethys-Ozean verbunden (ZIEGLER 1990; DERCOURT et al. 1993). Hier lagerte sich die Hauptgruppe der Germanischen Trias, bestehend aus Buntsandstein, Muschelkalk und Keuper, ab (ALBERTI 1834). Aufgrund eustatischer Meeresspiegelhochstände wurde das Becken immer wieder überflutet, was zur Entwicklung ausgedehnter epeirischer Meere führte. So drang während des frühen Anisiums Meerwasser über die Schlesisch-Mährische und die Ostkarpaten Pforte in das zuvor terrestrisch dominierte Becken, und flachmarine Karbonate des Unteren Muschelkalks überdeckten die kontinentalen Sedimente des Buntsandsteins (KOZUR 1974; GEYER et al. 2011). Im mittleren Anisium sorgte eine zeitweise Absenkung des Meeresspiegels für eine Ausdampfung des Beckens und zur Ablagerung der Evaporite des Mittleren Muschelkalks. Während der Ablagerung des Oberen Muschelkalks im späten Anisium und frühen Ladinium herrschten in Südwestdeutschland wieder vollmarine Verhältnisse (GEYER et al. 2011). Entlang der Küstenränder des Vindelizisch-Böhmischen-Massivs und des London-Brabant-Massivs entwickelten sich dabei flach einfallende Karbonatrampen.

2.2 Paläoklima

Die riesige Landmasse Pangäa verursachte enorme saisonale Hochdruckgebiete über Eurasien und Indien, welche die damaligen Passatwinde beeinflussten. Trockene kontinentale Luftmassen, die vom nordöstlichen Passatwind transportiert wurden, dominierten das Klima im Winter, während im Sommer Luftmassen aus dem Inneren Pangäas vorherrschten und von einem sehr starken Südostmonsun transportiert wurden (KUTZBACH & GALLIMORE 1989; MUTTI & WEISSERT 1995; FEIST-BURKHARDT et al. 2008). Dies führte zu ariden bis semiariden, zum Teil subtropischen Bedingungen im Germanischen Becken (VISCHER & VAN DER ZWAN 1981; MARSAGLIA & KLEIN 1983) mit Wassertemperaturen der Muschelkalksee zwischen 25-35 °C (KORTE et al. 2005). AIGNER (1985), MARSAGLIA & KLEIN (1983) und PARRISH (1993) postulieren, dass saisonal riesige tropische Wirbelstürme über der Tethys erzeugt wurden und nach Nordosten drifteten.

2.3 Stratigraphie

Lithostratigraphisch wird der Obere Muschelkalk in Südwestdeutschland in die Trochitenkalk-Formation, die Meißner-Formation und die Rottweil-Formation untergliedert und ist Teil der Mittleren Trias (Abbildung 1). Sequenzstratigraphisch stellt der Obere Muschelkalk dabei eine übergeordnete transgressiv-regressive Ablagerungssequenz dar (AIGNER & BACHMANN 1992).

Der transgressive untere Teil des Oberen Muschelkalks (Trochitenkalk-Formation) überlagert intertidale mikrobielle Laminite des Mittleren Muschelkalks (Diemel-Formation). Er ist durch eine Fülle von Crinoiden (*Encrinurus liliiformis*) gekennzeichnet, welche sich auf markante Leitbänke und in massiven riffartigen Ablagerungen konzentrieren. Innerhalb der übergeordneten Transgression nimmt der Fossilgehalt kontinuierlich ab. Die maximale Überflutung (*flooding zone*) wird durch Ton/Mergel und mudstones angezeigt. In diesem Bereich ordnen sich zwei markante Leithorizonte ein: der Tonhorizont beta, welcher der markanteste Tonhorizont des Beckens ist und die Cycloidesbank (*Cycloides Coenothyris*), welche auf Sedimentationsmangel und eine Bodenbesiedlung auf einem Hartgrund hinweist (HAGDORN 1982; HAGDORN & SIMON 1993). Der regressive Hemizyklus ist durch das Fehlen von Crinoiden und einen höheren Anteil an oolithischen Kalksteinen gekennzeichnet (Meißner Formation). Im Laufe der Regression entwickelten sich parallel zur Küste Untiefen (Shoals) aus bioklastischem Material und z.T. Ooiden, die sich allmählich in Richtung Beckenmitte verlagerten. Diese vorgelagerten Shoals absorbierten einen Großteil der Brandungsenergie, weshalb sich in ihrem Rücken Lagunen entwickelten (Rottweil-Formation). WARNECKE & AIGNER (2019b) zeigten in der Kombination dieses Modells mit tektonischen Karten, dass die Ablagerung der Shoals von einem aus der zugrundeliegenden tektonischen Tiefenstruktur resultierenden subtilen Paläorelief gesteuert wurde. Die lagunären und peritidalen Ablagerungen sind stark dolomitisiert, was möglicherweise darauf zurückzuführen ist, dass 1) entsprechend dem Refluxmodell Mg-reiche Solen durch die peritidalen Karbonate wanderten (ZEEH & GENG 2001; AL-HELAL et al. 2012; GARCIA-FRESCA et al. 2012;

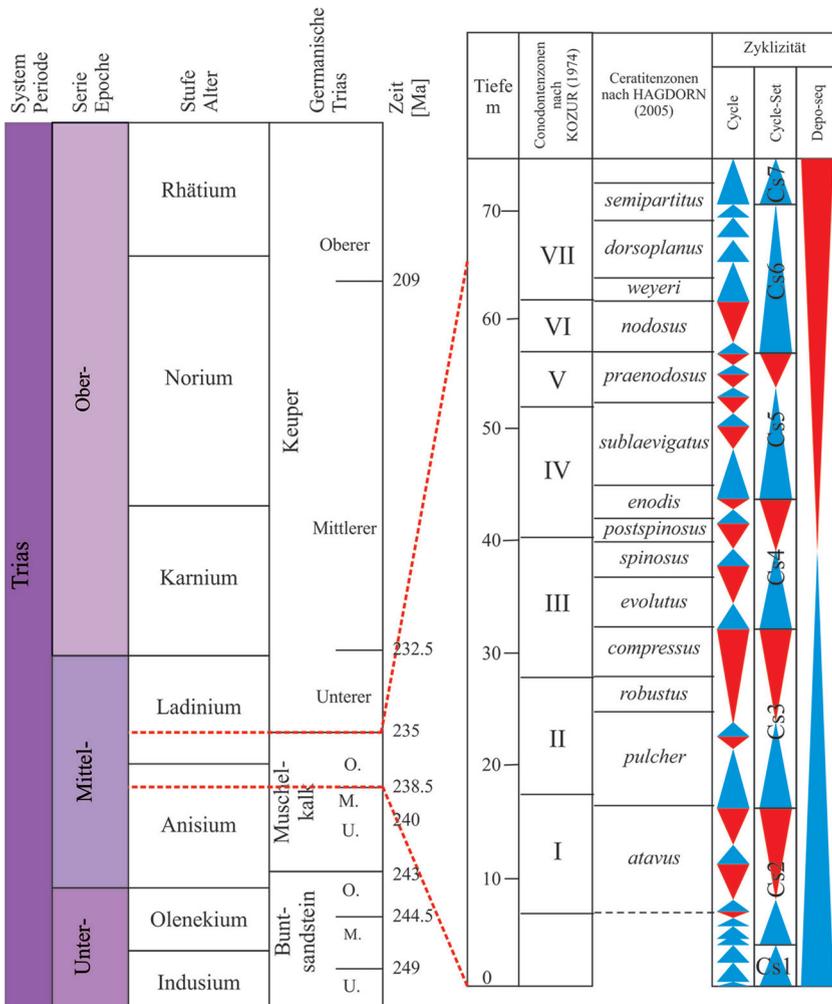


Abb. 1: Stratigraphie der Trias in Deutschland. Der Obere Muschelkalk wird rechts detailliert dargestellt, zusammen mit der biostratigraphischen Zonierung nach KOZUR (1974) und HAGDORN (2005). Die in dieser Studie herausgearbeiteten Zyklen sind am rechten Rand zu finden: blaue Dreiecke symbolisieren Transgressionen, rote Dreiecke Regressionen.

ADAMS & DIAMOND 2017; ALQATTAN & BUDD 2017; ADAMS et al. 2019), und 2) sie später in mehreren Phasen von Burial-Dolomitisierung betroffen waren (SCHAUER & AIGNER 1997; HASSLWANTER & SIMON 2016). Die Dolomitmächtigkeit nimmt zur Beckenmitte hin deutlich ab (ALESI 1984). Die Sequenzgrenze Muschelkalk/Keuper ist durch mehrere Bonebeds gekennzeichnet, darunter das markante

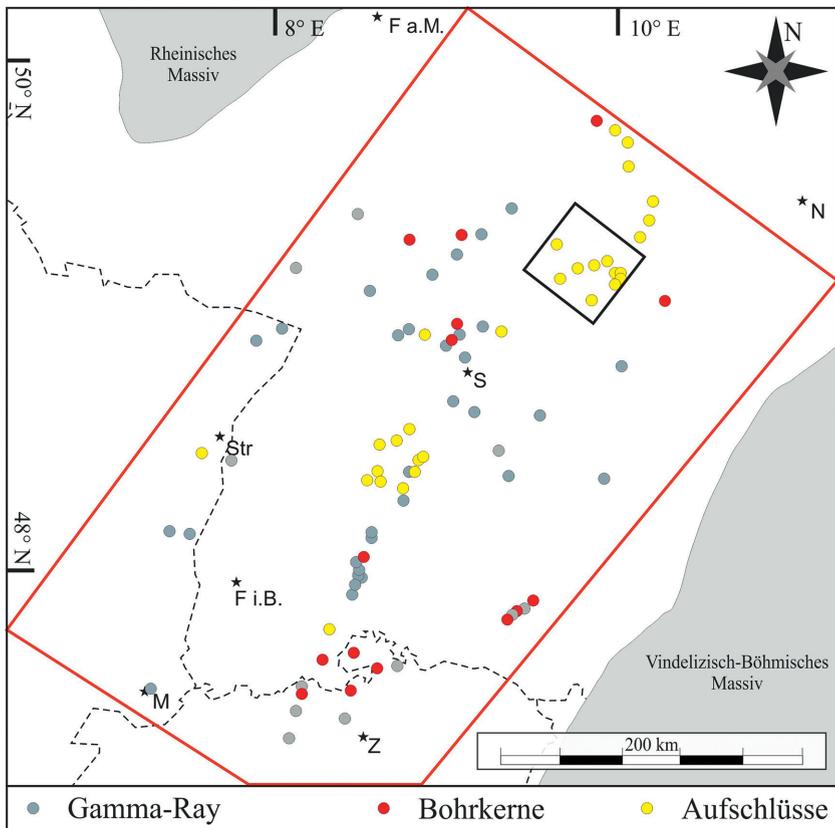


Abb. 2: Studiengebiet im südwestdeutschen Raum mit paläogeographischen Landmassen nach ZIEGLER (1990) in grauer Farbe. Das regionale TGS-LFA-Modell ist in roter Farbe gekennzeichnet, das lokale SIS-LFT-Modell in schwarzer. M: Mülhausen; Str: Straßburg; F i.B.: Freiburg im Breisgau; Z: Zürich; N: Nürnberg; S: Stuttgart; F a.M.: Frankfurt am Main.

Grenzbonebed, das den Übergang vom marin-dominierten Muschelkalk zu den weitgehend terrestrischen Keuperablagerungen darstellt.

3. METHODEN

Insgesamt wurden 41 Steinbrüche und Bohrkerne sedimentologisch (nach Dunhamtextur [DUNHAM (1962)], Lithologie, Partikelgröße, Sedimentstrukturen, Sortierung, Komponenten und Porosität) im Maßstab von 1:50 und ggfs. detaillierter aufgenommen. Alle Bohrkerne und Aufschlüsse wurden anschließend bezüglich ihrer Lithofazies untersucht (Abbildung 3). Darüber hinaus wurden Daten aus früheren Studien (BRAUN 2003; KOSTIC & AIGNER 2004; RUF & AIGNER 2004; KÖH-

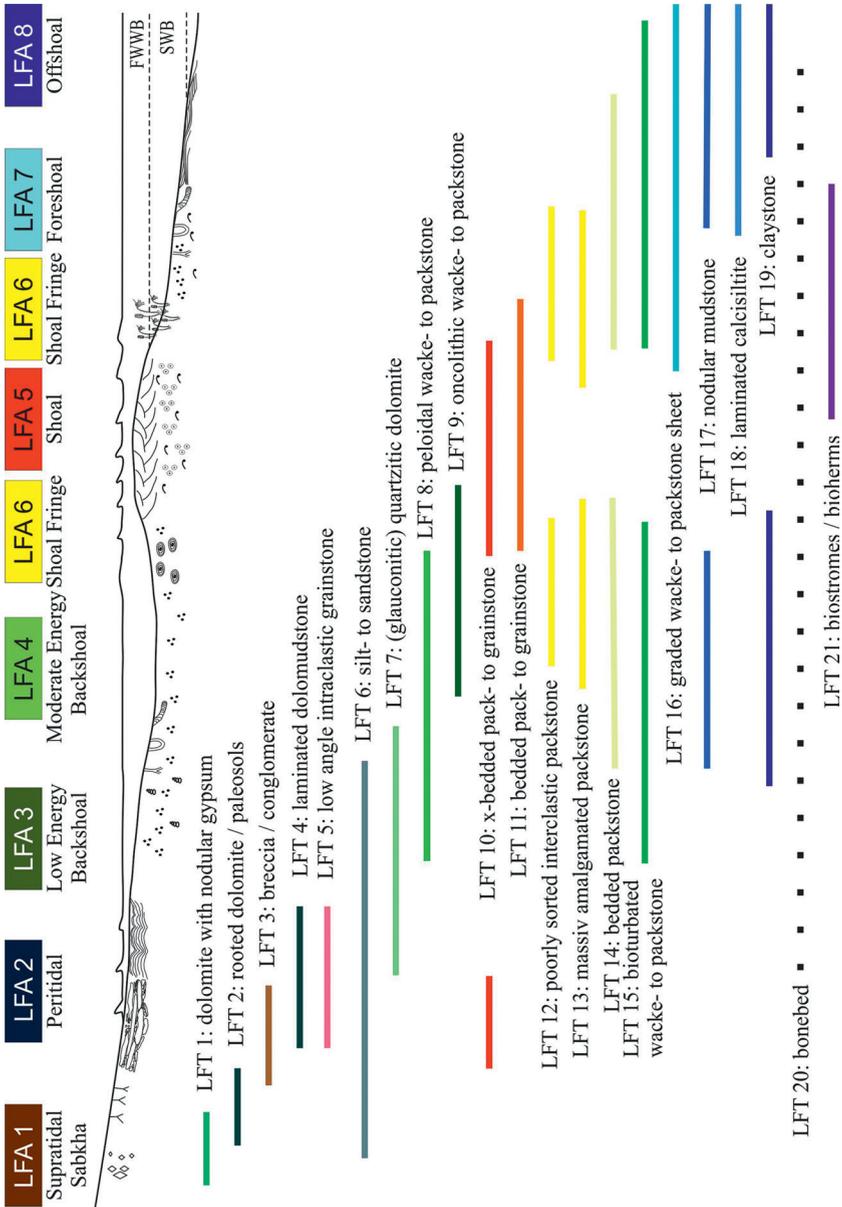


Abb. 3: Schematische Darstellung der Karbonatrampe des Oberen Muschelkalks nach WARNECKE & AIGNER (2019a). Die Rampe lässt sich in acht verschiedene Lithofaziesassoziationen einteilen, welche wiederum aus insgesamt 21 Lithofaziestypen bestehen. Jeder einzelne Lithofaziestyp stellt einen spezifischen Ablagerungsraum auf der Rampe dar. Der Farbcode gilt für alle folgenden Abbildungen.

REF et al. 2010; PALERMO et al. 2010; PETROVIC et al. 2018) neu bewertet und in diese Studie einbezogen. Alle Profile wurden zum Schluss in *WellCAD 5.0* digitalisiert.

Aus den im Feld entnommenen Proben und Kernen wurden insgesamt 526 Dünnschnitte erstellt und nach DUNHAM (1962) beschrieben. Sie wurden weiter nach Lithologie, Komponenten und sedimentären Merkmalen (Diagenese, Sortierung und Strukturen) sowie Lithofaziestypen klassifiziert. Zusätzlich wurden 1.170 Dünnschliffe aus früheren Studien (siehe oben) integriert und nach den oben beschriebenen Kriterien neu klassifiziert. Da sich mit Hilfe von *Gamma Ray* Signaturen leicht größere Sedimentationszyklen nachverfolgen lassen, wurde die natürliche Radioaktivität (Gammastrahlung/*Gamma Ray*) an allen Aufschlüssen gemessen und als Messkurven in die Profilbeschreibungen integriert.

Mit der 3D-Modellierungssoftware *Petrel 2014.2* wurden zwei geozelluläre Modelle des epikontinentalen Oberen Muschelkalkbeckens im Südwesten Deutschlands erzeugt. Lithofaziestypen (LFT) und -assoziationen (LFA) sowie *Gamma Rays* wurden in ASCII-Dateiformat (.asc) aus *WellCAD* importiert. Anschließend wurden alle Profile auf Grundlage der 1D-sequenzstratigraphischen Analyse korreliert, wobei jeder erstellte Korrelationspunkt im dreidimensionalen Koordinatensystem gespeichert wurde. Diese Punkte wurden dann zur Erzeugung von Horizonten/Oberflächen verwendet. Dadurch wurde das Modell in 37 Zonen unterteilt. Diese Zonen wurden anschließend weiter in einzelne Schichten unterteilt, um gleich große Geozellen für die Modellierung zu erhalten (siehe Unterabschnitt SIS-Modell und TGS-Modell für weitere Details). Importierte Well-Log-Daten, wie z.B. LFT, wurden im Zuge der Modellierung hochskaliert und hinsichtlich ihrer vertikalen Verteilung analysiert. Dabei können vertikale Fazies-Proportionen, ein einfaches Indikatorvariogramm und laterale 2D-Trendkarten auf Basis der bekannten Paläogeographie vorgegeben werden. In den Modellen wurden keine tektonisch strukturellen Merkmale – wie z.B. Antiklinalen oder Störungen – berücksichtigt.

a) Regionales TGS-LFA-MODELL

Die *Truncated-Gaussian-Simulation* (TGS) ist eine stochastische Methode, bei der großflächige Geometrien unter Einhaltung strenger Faziesbeziehungen erzeugt werden können (ZAKREVSKY 2011). Für das 201,5 x 325 km große Modellierungsgebiet wurde eine horizontale Zellengröße von 500 x 500 m gewählt. Diese liegt nahe an der minimalen lateralen Ausdehnung der Faziesassoziationen (LFA), die in Aufschlüssen zu beobachten ist. Um eine gute vertikale Auflösung zu erhalten, wurden die 37 Zykluszonen in 129 Layer unterteilt, was eine vertikale Auflösung von ca. 60 cm pro Layer ergibt. Das Grid enthält insgesamt 33.687.576 Zellen.

b) Lokales SIS-LFT-MODELL

Die *Sequential-Indicator-Simulation* (SIS) wurde als stochastischer Modellierungsalgorithmus für das kleinere LFT-Modell verwendet. Für das 50 x 50 km große Modellgebiet wurde eine horizontale Zellengröße von 250 x 250 m gewählt; dies entspricht in etwa der minimalen seitlichen Ausdehnung der in Aufschlüssen

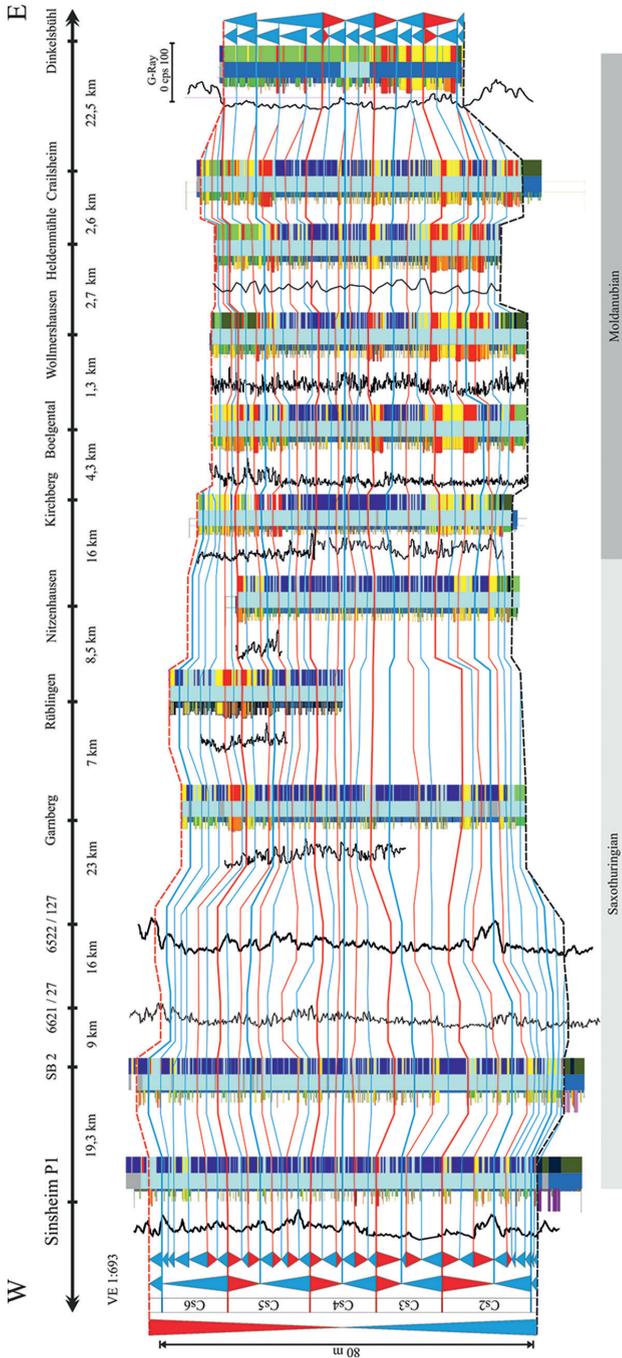


Abb. 4: Beispielhafte sequenzstratigraphische Korrelation der aufgenommenen Datenpunkte auf einer west-ost streichenden Linie von Sinsheim nach Dinkelsbühl. Aufgetragen sind pro Datenpunkt: LFA, Lithologie, Dunhamtextur und Gamma Ray. Rote Linien symbolisieren *peak regressions*, blaue *maximum floodings*. Erläuterungen zum Farbcode sind bei Abbildung 3 zu finden.

sen beobachteten LFT. Um die vertikale Auflösung zu erhöhen, wurden die 37 Zyklus-zonen weiter in 255 Layer unterteilt, was einer Auflösung von ca. 30 cm pro Layer entspricht. Das resultierende Grid enthält insgesamt 10.767.120 Zellen. Um eine stratigraphische Nivellierung zu simulieren und damit ein realitätsnäheres Untergrundmodell zu generieren, wurden 30 SIS-Realisierungen durchgeführt und anschließend gemittelt.

4. FAZIES ANALYSE

Ein umfassender Lithofazies-Atlas für den gesamten Oberen Muschelkalk des südlichen Germanischen Beckens einschließlich der Vorkommen in Frankreich, der Schweiz und in Luxemburg wird im Detail in WARNECKE & AIGNER (2019a) vorgestellt. Weitreichende Karbonatrampen existierten am östlichen und westlichen Rand des Beckens. Diese konnten in insgesamt acht Hauptablagerungsgürtel (Lithofaziesassoziationen – LFA) unterteilt werden, welche wiederum 21 verschiedene Lithofaziestypen (LFT) enthalten (Abbildung 3).

5. SEQUENZ-STRATIGRAPHIE & KORRELATION

Die vertikale Abfolge der LFT und der LFA zeigen in allen Profilen des Oberen Muschelkalks wiederkehrende zyklische Erscheinungsmuster (Abbildung 4). Dabei ist die sequenzstratigraphische Analyse dieser Studie in eine sehr detaillierte und über Jahrzehnte entwickelte biostratigraphische Gliederung von Ceratiten nach URLICHS & MUNDLOS (1990) und ökostratigraphische Leithorizonte nach HAGDORN & SIMON (1993) eingebettet. Insgesamt stellt der Obere Muschelkalk nach AIGNER & BACHMANN (1992) eine transgressiv-regressive Ablagerungssequenz (*Depositional Sequence*) dar, die weiter in *Cycle Sets* und *Cycles* unterteilt werden kann. Diese drei sich gegenseitig überlagernden „Baselevel“ Zyklen sind überwiegend auf Meeresspiegelschwankungen und dadurch entstehende Änderungen des verfügbaren Sedimentationsraums (Akkommodation) zurückzuführen.

Insgesamt wurden 23 *Cycles* über den gesamten Abschnitt des Oberen Muschelkalks identifiziert, die in der Regel regional nachvollziehbar sind (WARNECKE & AIGNER 2019a). Die Mächtigkeit einzelner *Cycles* reicht von einem Meter bis hin zu mehreren Metern (Durchschnitt: 2-5 m). Besonders im Hangenden und im Liegenden des Oberen Muschelkalks sind die *Cycles* sehr dünn und/oder können sogar fehlen. Die Mächtigkeit, Architektur sowie die laterale und vertikale Entwicklung der *Cycles* sind stark mit ihrer jeweiligen paläogeographischen Position verknüpft.

Basierend auf den wiederkehrenden lithofaziellen Stapelungsmustern lassen sich im Oberen Muschelkalk des südlichen Germanischen Beckens sechs idealisierte Grundtypen von Zyklen unterscheiden (WARNECKE & AIGNER 2019a):

1. *Offshoal to foreshoal cycle*: Dieser Zyklustyp ist zwischen zwei und zehn Metern mächtig. Er besteht überwiegend aus bioturbirten mudstones (LFT 17), die sich mit bioklastischen wacke- bis packstones abwechseln.

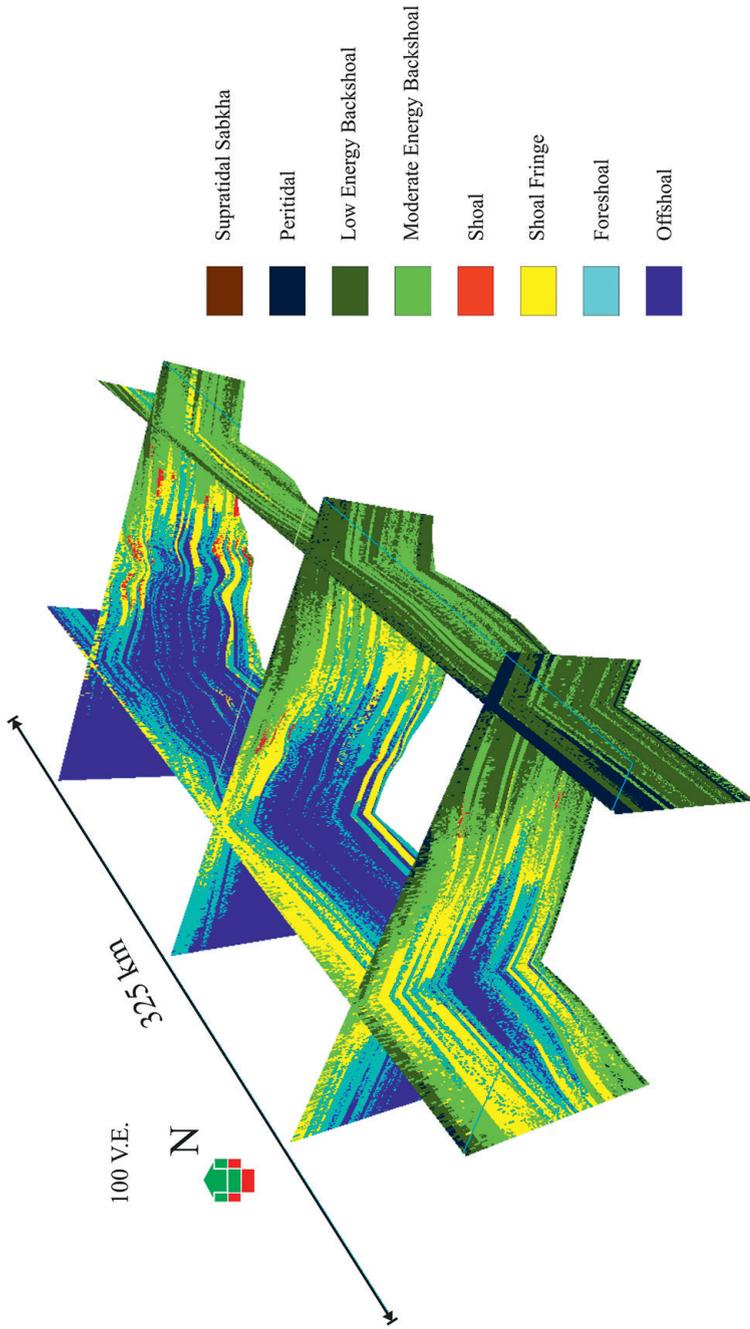


Abb. 5: Finales regionales TGS-LFA Modell des Oberen Muschelkalks mit 100-facher Überhöhung. Faziesretrogradation und anschließende Progradation sind gut zu erkennen. Erläuterungen zum Farbcode sind bei Abbildung 3 zu finden.

2. *Offshoal to shoal/shoal fringe cycle*: Dieser sehr häufig vorkommende Zyklustyp ist zwischen zwei und acht Metern mächtig. Bioturbierte mudstones gehen hier kontinuierlich in grobkörnige, schräggeschichtete grainstones über.
3. *Shoal fringe to shoal cycle*: Dieser Zyklus kommt lediglich im unteren Teil des Oberen Muschelkalks vor und besitzt eine Mächtigkeit zwischen vier und sechs Metern. Er ist durch sich amalgamierende bioklastische packstones gekennzeichnet, die in schräggeschichtete grainstones übergehen.
4. *Shoal to backshoal cycle*: Dieser Zyklus ist lediglich in den Randbereichen des Muschelkalkbeckens aufgeschlossen. Die Mächtigkeiten schwanken zwischen zwei und vier Metern. Schräggeschichtete grainstones gehen in dolomitisierete wacke- bis packstones über. Häufig finden sich Onkoide und peloidreiche Gesteine.
5. *Backshoal to intertidal cycle*: Die Mächtigkeit schwankt zwischen einem und drei Metern. Der Zyklus ist meistens stark dolomitisiert. Es finden sich Algenlaminite und mudstones. Die Fauna ist sehr limitiert.
6. *Peritidal cycle*: Dieser Zyklus tritt lediglich an der oberen Grenze des Oberen Muschelkalks auf und ist zwischen einem und zwei Metern mächtig. Charakteristisch sind die siliklastischen Gesteine, welche sich mit Dolomiten abwechseln.

Beckenweite Korrelationen wurden auf der Grundlage der Fazies-Analyse, von *Gamma Ray* Messkurven und der sequenzstratigraphischen Analyse auf Ebene der *Cycles* erstellt. Lithostratigraphische Korrelationen sowohl auf einer regionalen (GEYER et al. 2011) als auch auf einer lokalen Ebene wurden bereits ausführlich dokumentiert (PAUL 1936; VOLLRATH 1938; VOLLRATH 1955a, 1955b, 1955c; MERKI 1961a, 1961b; AUST 1969; BRÜDERLIN 1969; SKUPIN 1969; BRÜDERLIN 1970; GWINNER 1970; SKUPIN 1970; BRÜDERLIN 1971; GWINNER & HINKELBEIN 1972a, 1972b, 1974a, 1974b; GWINNER 1977; BRUNNER & SIMON 1985; STIER 1985) und bieten eine exzellente Basis für sequenzstratigraphische Korrelationen. Einige detaillierte Korrelationen wurden bereits für den östlichen Teil des schwäbischen und fränkischen Oberen Muschelkalks durchgeführt; sie sind jedoch nur in begrenzten lokalen Untersuchungsgebieten gültig (BRAUN 2003; KÖHRER et al. 2010; PALERMO et al. 2010; PETROVIC & AIGNER 2017).

6. 3D-MODELLIERUNG

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 Codierung der zu modellierenden Eigenschaften, beispielsweise der Fazies (siehe Methoden).

6.1 Regionales TGS-LFA-Modell

Das TGS-Beckenmodell zeigt die Verteilung der LFA während des Oberen Mu-

schelkalks im Bereich des südöstlichen Germanischen Beckens (Abbildung 5). Um Ablagerungsgeometrien hervorzuheben, wurden das Grenzbonebed (= übergeordnete Sequenzgrenze) als Datum gewählt. Das Modell zeigt folgende zeitlichen und räumlichen Trends:

- i. In Richtung der Paläoküste variiert die Mächtigkeit durch das erosive Einschneiden des Grenzbonebeds stark. Die räumlichen und zeitlichen Bewegungen der Faziesgürtel sind entsprechend des gesamten transgressiv-regressiven Ablagerungszyklus sichtbar. Im Proximalen überwiegen peritidale Fazies während im Distalen Offshoal-Fazies deutlich zu erkennen sind. Das spiegelt die generelle Beckenmorphologie wider.
- ii. Es ist ein nahezu symmetrisches Faziesverschiebungsmuster erkennbar, mit einer Retrogradation der Faziesgürtel während des transgressiven Hemizyklus und einer Progradation während des regressiven Hemizyklus.
- iii. Das Modell zeigt, dass es keine durchgehenden Barriere-Inseln (Shoals) während des Oberen Muschelkalks gab, sondern deren lückenhafte Verteilung.
- iv. Ökostratigraphische Leitbänke wie die Spiriferinabank (Top Cs₃, Abbildung 1) oder die „Cycloidesbank“ (Top Cs₄) sind im Modell gut sichtbar und haben eine hohe laterale Ausdehnung, teilweise fast über den gesamten Abschnitt.
- v. Cs₁ (siehe Abbildung 1) ist nur in Beckenabschnitten als dünne Shoalablagerung (Liegendoolith) mit hoher lateraler Ausdehnung vorhanden. Innerhalb von Cs₂ sind Shoals allgegenwärtig, mit Retrogradation in Richtung SE. Cs₃ und Cs₄ zeigen die distalen Fazies in jedem Abschnitt sowie die Zone um die maximale Transgression des Oberen Muschelkalks. Innerhalb von Cs₅ und Cs₆ sind Shoals wieder allgegenwärtig; diese nähern sich dem NW. Cs₇ ist nur im nordwestlichen Teil des Beckens vorhanden; es wird durch das Grenzbonebed im Osten und Süden erodiert.
- vi. In orthogonal zur Paläoküste orientierten Anschnitten sind leicht geneigte, zum Beckeninneren abtauchende Kliniformen sichtbar.

6.2 Lokales SIS-LFT-Modell

Das SIS-Modell stellt ein hochauflösendes „Zoom-In“-Feature des beckenweiten TGS-Modells dar, welches subregionale Trends auf Grund der hohen Datendichte dieses Modells sehr gut wiedergibt. Das SIS-Modell stellt die Verteilung der LFT des Oberen Muschelkalks dar und zeigt die folgenden zeitlichen und räumlichen Trends (Abbildung 6):

- i. Die einzelnen Schichten tauchen leicht in Richtung NW ab und werden vom erosiven Grenzbonebed abgeschnitten. Hochenergetische Fazies (LFT 9, 10, 11) entwickelten sich sowohl im transgressiven als auch im regressiven Hemizyklus, sind aber in letzterem stärker ausgeprägt.
- ii. Die Mächtigkeit des Oberen Muschelkalks nimmt von NW (beckenwärts) nach SE (landwärts) ab. Die gesamte transgressive/regressive Ablagerungssequenz ist mit basalen hochenergetischen Fazies (LFT 10 – 14), niederenergetischen Fazies (LFT 17 – 20) um die *maximum flooding zone* herum und wiederum hochenergetischen Fazies im Hangenden sehr gut abgebildet.

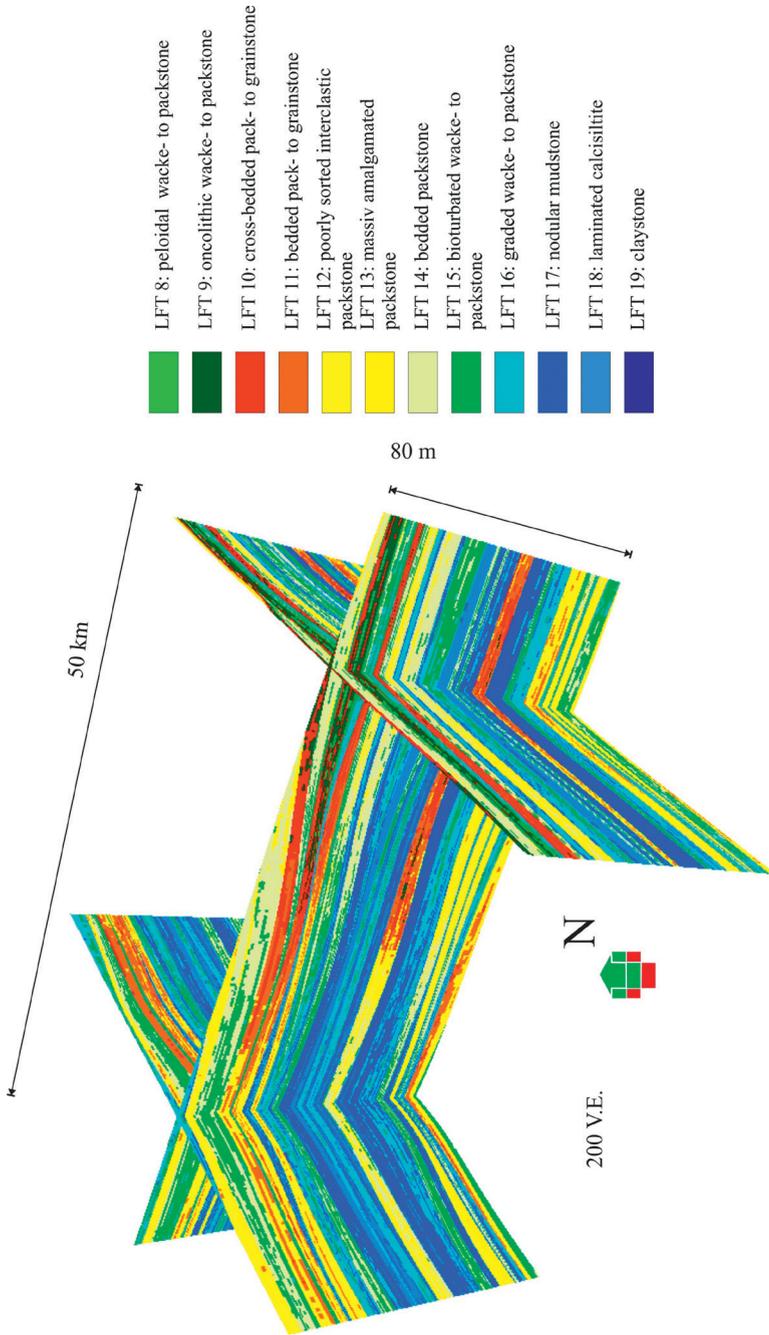


Abb. 6: Finales lokales SIS-LFT Modell des Oberen Muschelkalks mit 200-facher Überhöhung. Lagerungsverhältnisse und horizontale Faziesänderungen sind gut zu erkennen. Erläuterungen zum Farbcode sind bei Abbildung 3 zu finden.

- iii. Faziesübergänge sind in jedem Zyklus erkennbar und zeigen einen deutlichen proximal-distalen Trend von NW nach SE.
- iv. Wie im TGS-Modell erkennt man ein nahezu symmetrisches Faziesverschiebungsmuster mit Fazies-Retrogradation während des transgressiven Hemizyklus und Fazies-Progradation während des regressiven Hemizyklus.
- v. Die horizontale Verteilung der hochenergetischen Fazies (LFT 10, 11, assoziiert mit Shoals/möglichen Reservoirs) zeigt kleine isolierte Reservoirkörper im transgressiven Hemizyklus und große, weit verbreitete Körper, die sich während des regressiven Hemizyklus in Richtung NW verbauen.
- vi. Die Reservoirkörper des regressiven Hemizyklus zeigen innerhalb von Cs5 und Cs6 klinoförmige Geometrien, die in Richtung NW eintauchen.

7. SCHLUSSFOLGERUNG

Erstmals wurde das gesamte südwestliche Germanische Becken im Hinblick auf die Verteilung von Lithofaziesassoziationen (LFA) des Oberen Muschelkalks modelliert. Das TGS-Modell zeigt ein Pseudo-Layercake-System mit lateralen (proximal-distalen) Faziesübergängen innerhalb 10er km und eine sehr leicht geneigte Morphologie, entsprechend einer flach einfallenden Karbonatrampe. Die gesamte transgressiv-regressive Ablagerungssequenz ist im Modell deutlich sichtbar und zeigt die Retrogradation von Shoalkörpern während der Transgression und die Progradierung von Shoalkörpern während der Regression. Ein deutlicher Trend zu mehr proximalen Fazies im südlichen Teil des Beckens deutet auf eine Schließung oder Teilschließung der Burgundischen Pforte während eines Großteils des Oberen Muschelkalks hin.

Das hochauflösende lokale SIS-Modell stellt einen Teil der Muschelkalk-Karbonatrampe als Pseudo-Layercake-System mit sanft geneigten Klinoformen dar, die orthogonal zur Paläoküste in Richtung NW abtauchen. In parallel zur Paläoküste verlaufenden Schnitten zeigen sich bis auf die horizontale Schichtung keine übergeordneten Geometrien. Das Modell verdeutlicht große Unterschiede in der Ablagerungsart, der Größe und Verteilung der potenziellen Reservoirkörper innerhalb des transgressiven wie auch regressiven Hemizyklus: kleine isolierte retrogradierende Shoals innerhalb des transgressiven Zyklus und große verbundene progradierende Shoals während der übergeordneten Regression.

8. DANKSAGUNG

Der Autor dankt Shell International B.V. für das Sponsoring dieses Projekts und die Erlaubnis zur Veröffentlichung. Der Nagra (Nationale Genossenschaft für die Lagerung radioaktiver Abfälle), dem LGRB (Geologische Landesvermessung Baden-Württemberg), der GeoThermal GmbH, ENGIE E-P Deutschland GmbH, Geo Explorers LTD und der SGL (Geologische Landesvermessung Luxemburg) sei für die Bereitstellung von *Gamma Ray* Daten und den Zugang zu ihren Kernen gedankt. Große Unterstützung während dieser Studie erfolgte durch Mitglieder der Arbeitsgruppe Sedimentgeologie an der Universität Tübingen. P. JEISECKE gilt der Dank für die Präparation von Dünnschliffen. ALT Luxemburg wird für eine Lizenz

zur Nutzung von *WellCAD* gedankt, Schlumberger für eine Lizenz zur Nutzung von *Petrel*. Ein besonderer Dank gilt allen Steinbruchbesitzern und Unternehmen in Deutschland, Frankreich und Luxemburg für die freundliche Zusammenarbeit und den Zugang zu ihren Grundstücken.

9. LITERATUR

- ADAMS, A. & L.W. DIAMOND (2017): Early diagenesis driven by widespread meteoric infiltration of a Central European carbonate ramp. A reinterpretation of the Upper Muschelkalk. – *Sedimentary Geology*, **362**: 37–52; doi: 10.1016/j.sedgeo.2017.10.002.
- ADAMS, A., DIAMOND, L.W. & L. ASCHWANDEN (2019): Dolomitization by hypersaline reflux into dense groundwaters as revealed by vertical trends in strontium and oxygen isotopes: Upper Muschelkalk, Switzerland. – *Sedimentology*, **66**: 362–390; doi: 10.1111/sed.12530.
- AIGNER, T. (1985): Storm depositional systems. Dynamic stratigraphy in modern and ancient shallow-marine sequences. – Berlin (Springer).
- AIGNER, T. & G. H. BACHMANN (1992): Sequence-stratigraphic framework of the German Triassic. – *Sedimentary Geology*, **80** (1-2): 115–135; doi: 10.1016/0037-0738(92)90035-P.
- AIGNER, T., HORNING, J., JUNGHANS, W.-D. & M. PÖPPELREITER (1999): Baselevel cycles in the Triassic of the South-German Basin. A short progress report. – *Zbl. Geol. Paläont.*, **1** (7-8): 537–544.
- ALBERTI, F.A. VON (1834): Beitrag zu einer Monographie des Bunten Sandsteins, Muschelkalks und Keupers. Die Verbindung dieser Gebilde zu einer Formation. – Stuttgart (Cotta).
- ALESÌ, E. (1984): Der Trigonodus-Dolomit im Oberen Muschelkalk von SW-Deutschland. – *Arb. Inst. Geol. Paläont. Univ. Stuttgart*, **79**: 1–55.
- AL-HELAL, A. B., WHITAKER, F.F. & Y. XIAO (2012): Reactive transport modeling of brine reflux: dolomitization, anhydrite precipitation, and porosity evolution. – *Journal of Sedimentary Research*, **82** (3): 196–215; doi: 10.2110/jsr.2012.14.
- ALQATTAN, M.A. & D.A. BUDD (2017): Dolomite and dolomitization of the Permian Khuff-C reservoir in Ghawar field, Saudi Arabia. – *AAPG Bulletin*, **101** (10): 1715–1745; doi: 10.1306/01111715015.
- AUST, H. (1969): Lithologie, Geochemie und Paläontologie des Grenzbereichs Muschelkalk-Keuper in Franken. – Würzburg (Naturwiss. Verein).
- BRAUN, S. (2003): Quantitative analysis of carbonate sandbodies. Outcrop analog study from an epicontinental basin (Triassic Germany). PhD-thesis. – Tübingen (Eberhard Karls Universität); unpublished.
- BRÜDERLIN, M. (1969): Beiträge zur Lithostratigraphie und Sedimentpetrographie des Oberen Muschelkalks im südwestlichen Baden-Württemberg. Teil I: Lithostratigraphie. – *Jahresberichte und Mitteilungen des Oberrheinischen Geologischen Vereins*, Neue Folge, **51**: 125–158.
- BRÜDERLIN, M. (1970): Beiträge zur Lithostratigraphie und Sedimentpetrographie des Oberen Muschelkalks im südwestlichen Baden-Württemberg. Teil II: Sedimentpetrographie. – *Jahresberichte und Mitteilungen des Oberrheinischen Geologischen Vereins*, Neue Folge, **52**: 175–209, doi: 10.1127/jmoggv/52/1970/175.

- BRÜDERLIN, M.** (1971): Lithostratigraphische Profilsereien durch den Oberen Muschelkalk im südwestlichen Baden-Württemberg. – Jahresberichte und Mitteilungen des Oberrheinischen Geologischen Vereins, Neue Folge, **53**: 195–199, doi: 10.1127/jm-gv/53/1971/195.
- BRUNNER, H. & T. SIMON** (1985): Lithologische Gliederung von Profilen aus dem Oberen Muschelkalk im nördlichen Baden-Württemberg anhand der natürlichen Gamma-Strahlungsintensität der Gesteine. – Jahresberichte und Mitteilungen des Oberrheinischen Geologischen Vereins, Neue Folge, **67**: 289–299, doi: 10.1127/jm-gv/67/1985/289.
- DERCOURT, J., RICOU, L.-E. & B. VRIELYNCK** (Hrsg.) (1993): Atlas Tethys Palaeoenvironmental Maps. – Paris, France (CCGM).
- DUNHAM, R.J.** (1962): Classification of carbonate rocks according to depositional texture. S. 108–121. – In: **HAM, W.E.** (Hrsg.): Classification of carbonate rocks. A symposium. GeoScienceWorld, McLean, Va.
- FEIST-BURKHARDT, S., GÖTZ, A., SZULC, J., BORKHATARIA, R., GELUK, M., HAAS, J., HORNUNG, J., JORDAN, P., KEMPF, O., MICHALÍK, J., NAWROCKI, J., REINHARDT, L., RICKEN, W., RÖHLING, H.-G., RÜFFER, T., TÖRÖK, A. & R. ZÜHLKE** (2008): Triassic. – In: **MCCANN, T.** (Hrsg.) (2008): The geology of Central Europe. Mesozoic and Cenozoic. – London (Geological Society).
- FRISCH, U. & F. KOCKEL** (1997): Altkimmerische Bewegungen in Nordwestdeutschland. – Brandenburg. Geowiss. Beitr., **4** (1): 19–29.
- GARCIA-FRESCA, B., LUCIA, F.J., SHARP, J.M. & C. KERANS** (2012): Outcrop-constrained hydrogeological simulations of brine reflux and early dolomitization of the Permian San Andres Formation. – AAPG Bulletin, **96** (9): 1757–1781, doi: 10.1306/02071210123.
- GEYER, O.F., GWINNER, M.P. & M. GEYER** (2011): Geologie von Baden-Württemberg. – Stuttgart (E. Schweizerbart).
- GWINNER, M.P.** (1970): Profile aus dem Hauptmuschelkalk der Umgebung von Bad Friedrichshall und Gundelsheim (Baden-Württemberg). – Jh. Ges. Naturkde. Württemberg, **125**: 87–93.
- GWINNER, M.P.** (1977): Zur Geologie der weiteren Umgebung von Heilbronn (Daten zur 98. Tagung des Oberrheinischen Geologischen Vereins in Heilbronn, April 1977). – Jahresberichte und Mitteilungen des Oberrheinischen Geologischen Vereins, Neue Folge, **59**: 1–12.
- GWINNER, M.P. & K. HINKELBEIN** (1972a): Profile des Hauptmuschelkalkes aus dem mittleren Neckarraum. – Jahresberichte und Mitteilungen des Oberrheinischen Geologischen Vereins, Neue Folge, **54**: 101–121.
- GWINNER, M.P. & K. HINKELBEIN** (1972b): Zur Lithostratigraphie des Oberen Hauptmuschelkalks im Murr- und Rems-Gebiet (Baden-Württemberg). – N. Jb. Geol. Paläont. Mh., **2**: 78–84.
- GWINNER, M.P. & K. HINKELBEIN** (1974a): Profile aus dem Hauptmuschelkalk an Murr und mittlerem Neckar. – Jh. Ges. Naturkde. Württemberg, **129**: 45–54.
- GWINNER, M.P. & K. HINKELBEIN** (1974b): Profile aus dem Hauptmuschelkalk im Enztal und Strohgäu (Baden-Württemberg). – Jahresberichte und Mitteilungen des Oberrheinischen Geologischen Vereins, Neue Folge, **56**: 145–159, doi: 10.1127/jm-gv/56/1974/145.

- HAGDORN, H. (1982): The Bank der kleinen Terebrateln (Upper Muschelkalk, Triassic). Near Schwäbisch Hall (SW-Germany) – a tempestite condensation horizon. – In: EINSELE, G. & A. SEILACHER (Hrsg.): Cyclic and event stratification. S. 263–285. – Berlin (Springer); 10.1007/978-3-642-75829-4.
- HAGDORN, H. & T. SIMON (1993): Ökostratigraphische Leitbänke im Oberen Muschelkalk. – In: HAGDORN, H. & A. SEILACHER (Hrsg.): Muschelkalk. Schöntaler Symposium 1991. S. 193–208. – Stuttgart/Korb (Goldschneck-Verl. Weidert).
- HASSLWANTER, S. & T. SIMON (2016): Porenzemente, Senkung und Hebung von Kalksteinen des Marbacher Ooliths, Oberer Muschelkalk. – Jh. Ges. Naturkde. Württemberg, 172: 109–127.
- KÖHRER, B.S., HEYMAN, C., PROUSA, F. & T. AIGNER (2010): Multiple-scale facies and reservoir quality variations within a dolomite body – Outcrop analog study from the Middle Triassic, SW German Basin. – Marine and Petroleum Geology, 27 (2): 386–411, doi: 10.1016/j.marpetgeo.2009.09.009.
- KORTE, C., KOZUR, H.W. & J. VEIZER (2005): $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values of Triassic brachiopods and carbonate rocks as proxies for coeval seawater and palaeotemperature. – Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 226 (3-4): 287–306, doi: 10.1016/j.palaeo.2005.05.018.
- KOSTIC, B. & T. AIGNER (2004): Sedimentary and poroperm anatomy of shoal-water carbonates (Muschelkalk, South-German Basin): an outcrop-analogue study of inter-well spacing scale. – Facies, 50 (1): 113–131, doi: 10.1007/s10347-004-0003-z.
- KOZUR, H. (1974): Biostratigraphie der germanischen Mitteltrias. – Leipzig (Dt. Verl. für Grundstoffindustrie).
- KUTZBACH, J.E. & R.G. GALLIMORE (1989): Pangaean climates. Megamonsoons of the megacontinent. – Journal of Geophysical Research, 94 (3): 3341–3357, doi: 10.1029/JD094iD03p03341.
- MARSAGLIA, K.M. & G.D. KLEIN (1983): The Paleogeography of paleozoic and mesozoic storm depositional systems. – The Journal of Geology, 91 (2): 117–142, doi: 10.1086/628752.
- MERKI, P.J. (1961a): Der Obere Muschelkalk im östlichen Schweizer Jura. Dissertation. – Zürich (ETH Zürich), unpublished.
- MERKI, P.J. (1961b): Palaeogeographische Betrachtungen und Faziesbild. – Eclogae Geologicae Helveticae, 54 (1): 206–213.
- MUTTI, M. & H. WEISSERT (1995): Triassic monsoonal climate and its signature in Ladinian-Carnian Carbonate Platforms (Southern Alps, Italy). – Journal of Sedimentary Research, 65 (3b): 357–367, doi: 10.1306/D4268252-2B26-11D7-8648000102C1865D.
- PALERMO, D., AIGNER, T., NARDON, S. & W. BLENDINGER (2010): Three-dimensional facies modeling of carbonate sand bodies. Outcrop analog study in an epicontinental basin (Triassic, southwest Germany). – AAPG Bulletin, 94 (4): 475–512, doi: 10.1306/o8180908168.
- PARRISH, J.T. (1993): Climate of the supercontinent Pangea. – The Journal of Geology, 101 (2): 215–233, doi: 10.1086/648217.
- PAUL, W. (1936): Der Hauptmuschelkalk am südöstlichen Schwarzwald. – Mitteilungen der badischen geologischen Landesanstalt, 11 (4): 125–146.

- PETROVIC, A. & T. AIGNER (2017): Are shoal reservoirs discrete bodies. A coquina shoal outcrop analogue from the mid Triassic Upper Muschelkalk, SW Germany. – *Journal of Petroleum Geology*, **40** (3): 249–275.
- PETROVIC, A., AIGNER, T. & M. PONTIGGIA (2018): Facies heterogeneities in a ramp Carbonate Reservoir analogue. A new high-resolution approach for 3D Facies Modelling. – *Journal of Petroleum Geology*, **41** (2): 155–174, doi: 10.1111/jpg.12698.
- RUF, M. & T. AIGNER (2004): Facies and poroperm characteristics of a carbonate shoal (Muschelkalk, South Germanic Basin). A reservoir analogue investigation. – *Journal of Petroleum Geology*, **27** (3): 215–239, doi: 10.1111/j.1747-5457.2004.tb00056.x.
- SCHAUER, M. & T. AIGNER (1997): Cycle stacking pattern, diagenesis and reservoir geology of peritidal dolostones, Trigonodus-Dolomite, Upper Muschelkalk (Middle Triassic, SW-Germany). – *Facies*, **37**: 23–25.
- SKUPIN, K. (1969): Lithostratigraphische Profile aus dem Trochitenkalk des Neckar-Jagst-Kocher-Gebietes. – *Jahresberichte und Mitteilungen des Oberrheinischen Geologischen Vereins, Neue Folge*, **51**: 87–118.
- SKUPIN, K. (1970): Feinstratigraphische und mikrofaziale Untersuchungen im Unteren Hauptmuschelkalk (Trochitenkalk) des Neckar-Jagst-Kocher-Gebietes. Dissertation. – *Arb. Inst. Geol. Paläont. Univ. Stuttgart*, **63**: 1–173.
- STIER, E.W. (1985): Lithostratigraphische Leithorizonte im Oberen Hauptmuschelkalk (Trias) in Südwestdeutschland. – *Arb. Inst. Geol. Paläont. Univ. Stuttgart*, **81**: 51–113.
- URLICHS, M. & R. MUNDLOS (1990): Zur Ceratiten-Stratigraphie im Oberen Muschelkalk (Mitteltrias) Nordwürttembergs. – *Jh. Ges. Naturkde. Württemberg*, **145**: 60–74.
- VISCHER, H. & C.J. VAN DER ZWAN (1981): Palynology of the circum-mediterranean Triassic phytogeographical and paleoclimatological implications. – *Geol. Rundsch.*, **70**: 625–634.
- VOLLRATH, A. (1938): Zur Stratigraphie und Bildung des Oberen Hauptmuschelkalles in Mittel- und Westwürttemberg. *Mitteilungen aus dem Mineralogisch-Geologischen Institut der Technischen Hochschule in Stuttgart*. – *Jahresberichte und Mitteilungen des Oberrheinischen Geologischen Vereins, Neue Folge*, **27**: 69–80, doi: 10.1127/jmoggv/27/1938/69.
- VOLLRATH, A. (1955a): Stratigraphie des Oberen Hauptmuschelkalks (Schichten zwischen Cycloides-Bank und Spiriferina-Bank) in Baden-Württemberg. – *Jahreshefte des Geologischen Landesamtes Baden-Württemberg*, **1**: 190–217.
- VOLLRATH, A. (1955b): Zur Stratigraphie des Hauptmuschelkalks in Württemberg. – *Jahreshefte des Geologischen Landesamtes Baden-Württemberg*, **1**: 79–169.
- VOLLRATH, A. (1955c): Zur Stratigraphie des Trochitenkalks in Baden-Württemberg. – *Jahreshefte des Geologischen Landesamtes Baden-Württemberg*, **1**: 169–190.
- WARNECKE, M. (2018): Carbonate concepts. Reservoir patterns of the Upper Muschelkalk in the Southern Germanic Basin. PhD-thesis. – Tübingen (Eberhard Karls Universität), unpublished.
- WARNECKE, M. & T. AIGNER (2019a): Asymmetry of an epicontinental basin – facies, cycles, tectonics & hydrodynamics. The middle Triassic Upper Muschelkalk, Southern Germanic Basin. – *The Depositional Record*, 2019:00: 1–41. doi: 10.1002/dep2.59.
- WARNECKE, M. & T. AIGNER (2019b): Influence of subtle Paleo-Tectonics on facies and

reservoir distribution in epeiric carbonates. Integrating stratigraphic analysis and modelling (U. Muschelkalk, SW Germany). – *Sedimentary Geology*. doi: 10.1016/j.sedgeo.2019.01.015.

ZAKREVSKY, K. E. (2011): Geological 3D modelling. – EAGE Publ., DB Houten.

ZEEH, S. & A. GENG (2001): Entstehung und Diagenese von Dolomit in der Muschelkalk-Gruppe (Mitteltrias) SW-Deutschlands. – *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie Abhandlungen*, **221**: 359–395, doi: 10.1127/njgpa/221/2001/359.

ZIEGLER, P. A. (1990): Geological atlas of Western and Central Europe, 1990. – The Hague (Shell Internationale Petroleum Maatschappij, B.V.).

Anschrift des Verfassers:

Dr. MATTHIAS WARNECKE

Fachbereich Geowissenschaften, Angewandte Geowissenschaften, Sedimentgeologie

Eberhard-Karls-Universität Tübingen

Hölderlinstraße 12

72072 Tübingen

Email: matthias.warnecke@uni-tuebingen.de