

Fazies, Sequenz-Analyse und stratigraphische Architektur im höheren Oberjura der Schwäbischen Alb (SW-Deutschland)

Von THOMAS PAWELLEK, Tübingen/Hamburg

Beitrag anlässlich der Verleihung des Walter-Schall-Preises am 17. Oktober 2002.

Zusammenfassung

Diese Studie umfaßt eine sedimentologische Neubearbeitung des höheren Malms der Schwäbischen Alb. Die Ziele sind (1) basierend auf einer umfassenden Faziesanalyse und einer Auswertung von Gamma-ray Logs sedimentäre Zyklen und deren Hierarchie zu dokumentieren und (2) die dynamisch-stratigraphische Entwicklung zu rekonstruieren. Dabei wurde die einmalige Gelegenheit genutzt, Explorationsbohrungen zu bearbeiten, die das Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg (LGRB) zur Erkundung neuer Vorkommen von Rohstoffen im Zeitraum von 1997 bis 2000 niedergebracht hat. Um an die oben genannten Aufgabenstellungen systematisch und schrittweise heranzugehen, wurde der konzeptionelle Ansatz der „Dynamischen Stratigraphie“ verwendet. Dabei zeigte sich, daß der Ablagerungsraum der Schwäbischen Alb als tieferer Abschnitt einer Karbonatrampe angesehen werden kann, entlang derer sich die Fazieszonen des distalen und proximalen Beckens, der Biohermränder, der thrombolithischen und der stromatolithischen Bioherme und der Partikelkalke unterscheiden lassen. Innerhalb dieser Fazieszonen konnten drei Hierarchien von sedimentären Zyklen (genetische Sequenzen, mittelskalige und großskalige Sequenzen) erkannt werden, die als Schwankungen des A/S-Verhältnisses interpretiert werden können. Diese Zyklizität spiegelt sich auch im Gamma-Ray Log wieder, wodurch dieses Log ein wichtiges Instrument zur Identifizierung der Zyklizität ist. Die A/S-Zyklen sind unabhängig von der lokalen Fazies und bilden daher ideale Korrelationseinheiten. Profile durch die Schwäbische Alb, die mit Hilfe der Zyklen- und Gamma-Ray-Korrelationen gelegt wurden, gewähren neue Einblicke in die stratigraphische Architektur des schwäbischen Oberjura und erlauben ein dynamisches Faziesmodell zu erstellen.

Abstract

This study comprises a sedimentological revision of the upper part of the Upper Jurassic of SW-Germany (Swabian Alb). The aims of this thesis are (1) the documentation of sedimentary cycles and their hierarchies based on an extensive facies analysis and on an evaluation of gamma-ray-logs and (2) to reconstruct the dynamic-stratigraphic development. The data base includes borehole cores drilled between 1997 and 2000 within the scope of a raw mineral evaluation program by the Geological Survey of Baden-Württemberg. To achieve these aims the concept of „dynamic stratigraphy“ was used, involving a systematic analysis of sedimentary rock sequence

along a hierarchy of spatial and temporal scales, moving from small to larger levels. The analysis revealed a deeper part of a carbonate ramp setting for the Swabian Alb. Along this ramp six main facies belts can be distinguished: the distal basin facies belt, the proximal basin facies belt, the bioherm margin facies belt, the sponge-thrombolite-bioherm facies belt, the sponge stromatolite facies belt and the particle-rich facies belt. Within the Upper Jurassic of SW-Germany three hierarchies of regional correlatable sedimentary cycles (genetic, medium-scale and large-scale sequences) can be recognised, which can be interpreted as variations of the A/S-ratio. The cyclicity and their hierarchy is also shown in the gamma-ray log. Therefore the gamma-ray is a useful tool to identify the cycles and their hierarchies. The A/S-cycles are independent from the local facies and thus form ideal correlation units. Cross-sections on the base of cycle and gamma-ray correlations allow new accesses into the stratigraphic architecture of the Upper Jurassic of the Swabian Alb and allow constructing a new dynamic facies model.

Key Words: Upper Jurassic, SW Germany, carbonate ramp, sequence stratigraphy, genetic sequence, gamma-ray.

Einführung

Die Gesteine des süddeutschen Oberjuras sind zwar hinsichtlich ihrer Petrographie, Paläontologie, Mikrofazies und Diagenese (Zitate bei PAWELLEK 2001) gut untersucht, jedoch gibt es weiterhin bei prinzipiellen Fazies- und sequenzstratigraphischen Modellen offene Fragen und erheblichen Forschungsbedarf. Ziel dieser Studie ist es, mit den Ansätzen und Methoden der „Dynamischen Stratigraphie“ (AIGNER 1985, AIGNER u. SCHAUER 1998, AIGNER et al. 1999) einen umfassenden Faziesatlas und ein Faziesmodell zu erstellen, sedimentäre-stratigraphische Zyklen und deren Hierarchien zu dokumentieren und die stratigraphische Architektur des süddeutschen Oberjura zu rekonstruieren. Das Konzept der „Dynamischen Stratigraphie“ (Abb. 1) beinhaltet eine systematische und Prozeß-orientierte Analyse von sedimentären Systemen auf verschiedenen räumlichen und zeitlichen Maßstäben:

1. Komponenten-Analyse: Sie stellt die kleinste Ebene innerhalb der Dynamischen Stratigraphie dar. Damit sollen Aussagen über die Biodynamik (welche Karbonat-produzierenden Organismen waren vorhanden?) und über die Hydrodynamik (welche Wasserenergie herrschte bei der Sedimentation?) gemacht werden.
2. Fazies-Analyse: Sie stellt die nächst höhere Ebene dar. Mit ihr sollen Einblicke in die Ablagerungsdynamik gewonnen werden.
3. Architektur-Analyse: In dieser nächst höheren Ebene sollen Vorstellungen über die Geometrien von Fazieskörpern (z. B. Bau- und Wachstums-Stile von Biohermen) gewonnen werden.
4. Sequenz-Analyse: In dieser Ebene sollen die sedimentären Zyklen und ihre Steuerungsfaktoren analysiert werden.
5. Stapelungs-Analyse: Dabei werden die einzelnen Hierarchie-Ebenen der Zyklen korreliert, um erstens ein stratigraphisches Gerüst zu erstellen und zweitens um Vorstellungen über die Beckendynamik zu erhalten.

Dynamische Stratigraphie

Malm-Karbonate

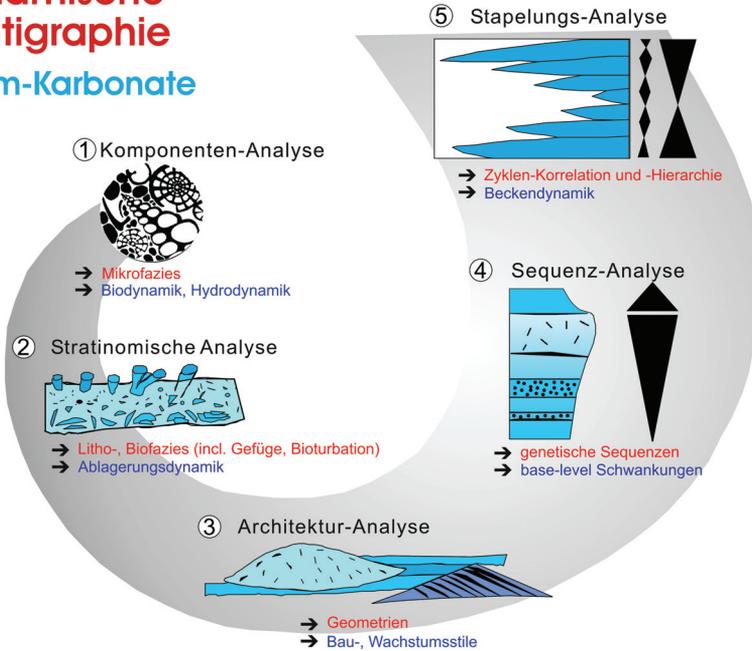


Abb. 1: Konzept der „Dynamischen Stratigraphie“ (nach AIGNER u. SCHAUER 1998).

2. Geologischer Rahmen

Während des Oberjuras waren weite Teile des Europäischen Kontinents von einem flachen Schelfmeer bedeckt (Abb. 2). Im N war dieses Schelfmeer durch einen Insel-Archipelago vom Nordmeer getrennt. Im S ging es in den Tethys-Ozean über. In dem südlicheren, tieferen Teil des Schelfmeeres war ein ausgedehnter Schwamm-Algen-Riffgürtel entwickelt. Nach MEYER u. SCHMIDT-KALER (1989, 1990) bildete die Schwäbische Fazies einen zentralen Teil dieses Riffgürtels und kann dabei als tieferer Bereich zwischen der flacheren Fränkisch-Südbayerischen Plattform im E und der Schweizer Plattform im W angesehen werden. Im S geht die Schwäbische Fazies in die Helvetische Fazies über. Innerhalb der Schwäbischen Fazies wurden während des Oberjuras zwischen 400–600 m mächtige Karbonatgesteine abgelagert. Innerhalb dieser können zwischen zwei Groß-Lithofaziestypen unterschieden werden (z. B. GWINNER 1976, GEYER u. GWINNER 1979):

(1) die sog. „Normal-Fazies“, die aus Bankkalken und Mergeln besteht und

(2) die sog. „Massen-Fazies“, in der Bankung fehlt oder undeutlich und unregelmäßig ausgebildet ist.

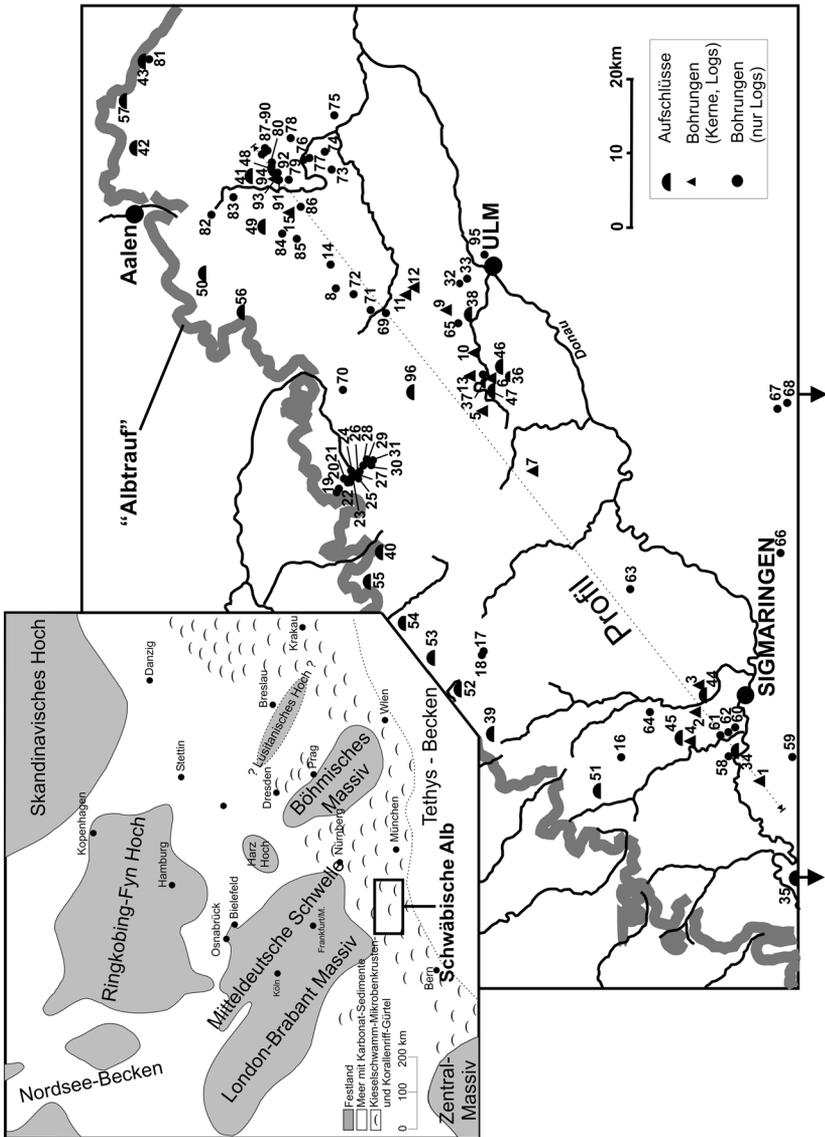


Abb. 2: Paläogeographie von Mitteleuropa während des Oberjuras (aus MEYER & SCHMIDT-KALER 1989, 1990) mit dem Studiengebiet der Schwäbischen Alb und der Lage der Bohrungen und Aufschlüsse (1: Ro 7920/B1, 2: Ro 7821/B1, 3: Ro 7821/B2, 4: Ro 7820/B1, 5: Ro 7624/B1, 6: Ro 7624/B2, 7: Ro 7623/B4, 8: Ro 7425/B1, 9: Ro 7525/B1, 10: Ro 7525/B2, 11: Ro 7525/B3, 12: Ro 7525/B4, 13: Ro 7524/B1, 14: Ro 7426/B1, 15: Ro 7326/B1, 16: Ro 7720/B1, 17: Ro 7621/B5, 18: Ro 7621/B2, 19: B 409, 20: B 410, 21: B 414, 22: B: 415, 23: B 416, 24: B 417, 25:

Die Massenkalken werden überwiegend aus Mikrobenkrusten (Stromatolithe und Thrombolithe) und Kieselschwämmen aufgebaut und wurden von verschiedenen Autoren als relativ Tief- und Stillwasser-„Riffe“, Bioherme oder Mounds interpretiert (z. B. GWINNER 1976, LEINFELDER et al. 1994, 1996). Die Normal-Fazies verzahnt sich entweder mit diesen Biohermen oder bildet „onlaps“ auf diesen (GWINNER 1976, PAWELLEK 2001). In den höheren Abschnitten des Oberjuras entwickelte sich stellenweise eine Korallen-Fazies auf den Schwamm-Mikrobenkrusten-Riffen.

Die Häufigkeit der Riff-Fazies ist in der stratigraphischen Abfolge häufigen Schwankungen unterzogen. Phasen von Riff-Ausbreitung wechseln mit Biohermrückzugs-Phasen. Eine Ausbreitung der Riffe ist mit einer Zunahme des Karbonatgehaltes in der Normal-Fazies gekennzeichnet, während ein Rückzug der Riffe mit einer Zunahme des Mergelgehaltes in der Normal-Fazies einhergeht (MEYER u. SCHMIDT-KALER 1989, 1990, PAWELLEK 2001).

3. Datenbasis und Methodik

Diese Studie basiert auf 16 Bohrkernen (Abb. 2, 3) mit einer durchschnittlichen Länge von 100–150 m und einer Gesamtlänge von ca. 2,5 km. Alle Bohrkern wurden der gesamten Länge nach durchgesägt um eine kontinuierliche und detaillierte Makrofazies-Aufnahme zu gewährleisten. Von allen Bohrungen standen Gamma-Ray Logs zur Verfügung. Zur Mikrofazies-Analyse wurde ungefähr jeder Meter ein Peel, Dünn- oder Anschliff hergestellt. Fazies-Proportions-Diagramme (KERANS u. TINKER 1997) wurden erstellt, um die Zyklizität auf einer quantitativen Weise zu dokumentieren. Zusätzlich zu den Bohrkernen wurden 53 Bohrloch-Gamma-Ray Logs ausgewertet (Abb. 2, 3). Daneben wurden 24 Steinbrüche (Abb. 2) und 4 Feld-Gamma-Ray Messungen ausgewertet, um die 1-dim. Bohrdaten mit den 2- und 3-dim. Aufschluß-Daten zu integrieren.

B 419, 26: B 420, 27: B 421, 28: B 423, 29: B 424, 30: B 425, 31: B 426, 32: B 324, 33: B 326, 34: Thiergarten, 35: Liptingen, 36: Allmendingen, 37: Gerhausen, 38: Herrlingen, 39: Willmandingen, 40: Schlattstall, 41: Waibertal, 42: Hülen, 43: Neresheim-Dehlingen, 44: Jungnau, 45: Storzinger Steige, 46: Vohenbrunnen, 47: Schelkingen, 48: Mergelstetten, 49: Söhnstetten, 50: Bartholomä, 51: Tailfingen, 52: Geningen, 53: Unterhausen, 54: Sirchingen, 55: Neuffen, 56: Weißenstein, 57: Aufhausen, 58: Gutenstein 1, 59: Meßkirch 1, 60: Unterschmeien 1, 61: Unterschmeien 2, 62: Unterschmeien 3, 63: Upflamör 1, 64: Veringerstadt 1, 65: KB 75, 66: Saulgau TB 3, 67: Bad Waldsee GB 1, 68: Bad Waldsee GB 2, 69: Hinterdenkental, 70: Nellingen, 71: Montenovio, 72: Weidenstetten, 73: Burgberg, 74: Hermaringen, 75: Weidenloch, 76: Heerstraße 1, 77: Heerstraße 2, 78: Hölltal, 79: Eichen, 80: Heintal, 81: Dehlingen, 82: Wental, 83: Siebter Fuß, 84: Steinheim, 85: Gerstetten, 86: Ugenhof, 87: Nattheim 1, 88: Nattheim 2, 89: Nattheim 3, 90: Nattheim 4, 91: Mergelstetten P1, 92: Mergelstetten P5, 93: Mergelstetten K24, 94: Mergelstetten K25, 95: Neu-Ulm, 96: Merklingen).

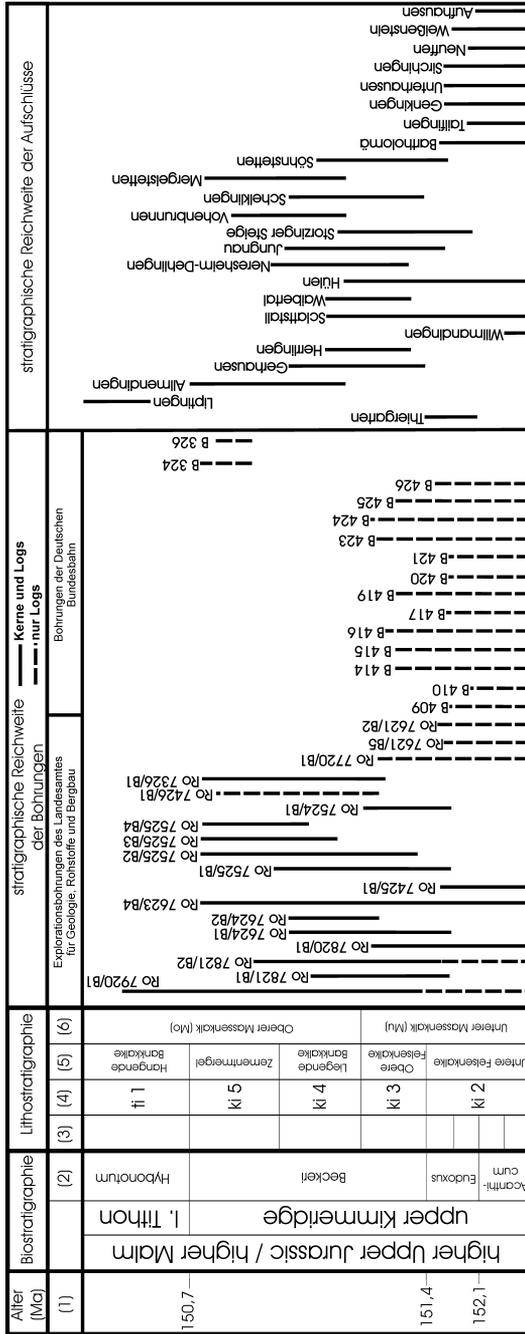


Abb. 3a/b: Stratigraphische Einteilung des höheren Malm der Schwäbischen Alb mit den Reichweiten der bearbeiteten Bohrungen und Aufschlüsse. (1) Zeitskala nach HARDENBOL et al. (1998); (2) subboreale Ammonitenzone nach HARDENBOL et al. (1998) und HANTZPERGUE et al. (1998); (3) klassische stratigraphische Einteilung begründet durch QUENSTEDT (1858); (4) Gliederung nach dem LGRB Baden Württemberg, VILLINGER u. FLECK (1995); (5, 6) Lithostratigraphie nach VILLINGER u. FLECK (1995). Die Nummern der Datenpunkte entsprechen der Karte in Abb. 2.

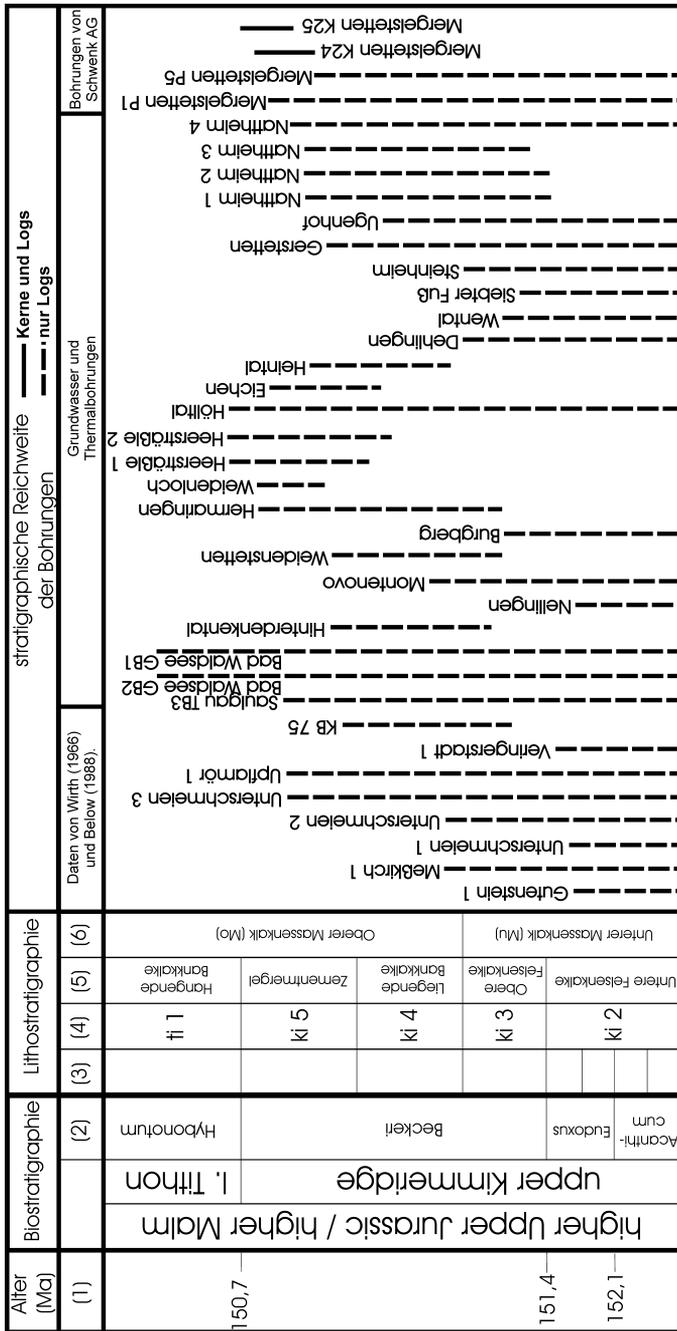


Abb. 3b

4. Komponenten-Analyse

Die Komponenten des schwäbischen Oberjura können in biogene und abiogene Komponenten unterteilt werden. Die wichtigsten gesteinsbildenden biogenen Komponenten sind Mikrobenkrusten, Kieselschwämme und Korallen. Diese drei Komponenten sind hauptsächlich am Aufbau der Bioherme beteiligt. Innerhalb der Mikrobenkrusten des schwäbischen Oberjura kommen zwei verschiedene Typen vor: (1) Thrombolithe, die eine klumpige Makrostruktur und einen mikropeloidalen Internaufbau aufweisen (AITKEN 1967, SCHMID 1996), und (2) Stromatolithe, die aus parallelen Laminae aufgebaut sind (KALKOWSKY 1908, SCHMID 1996). An abiogenen Komponenten finden sich hauptsächlich Intraklasten, Peloiden, Ooide und Tuberoide (FRITZ 1958). Die Komponenten sind im schwäbischen Oberjura nicht zufällig verteilt, sondern es finden sich stratigraphische Trends (Abb. 4). Auf eine ausführliche Komponenten-Analyse sei auf PAWELLEK (2001) verwiesen.

5. Fazies- und Architektur-Analyse

5.1. Fazies-Typen

Im höheren Oberjura der Schwäbischen Alb können 18 unterschiedliche Faziestypen unterschieden werden, die sich in die folgende sechs Makrofazies-Klassen einteilen lassen (Abb. 5, für Details siehe PAWELLEK 2001, PAWELLEK u. AIGNER 2002):

- (1) Mergel und mergelige Kalksteine. Graue Mergel und mergelige Kalksteine bilden Abfolgen von einigen dm bis einige 10er m.
- (2) Bankkalke. Cm bis dm mächtige Kalk-Mudstones wechseln mit dünnen Mergellagen.
- (3) Schuttkalke: Hauptkomponenten sind Bruchstücke von Schwämmen, Mikrobenkrusten und seltener von Korallen und aufgearbeiteten Intraklasten. Die Größe dieser Komponenten kann stark variieren.
- (4) Partikelkalke: Sie bestehen überwiegend aus gerundeten Intraklasten, Peloiden und Ooiden und weisen überwiegenden ein Packstone- und seltener ein Grainstone-Gefüge auf. In dieser Fazies können „tubular tempestites“ (WANLESS et al. 1988, 1995, TEDESCO u. WANLESS 1991) beobachtet werden.
- (5) Mikrobenkrusten- und Schwamm-Mikrobenkrusten-Kalke: Sie bestehen überwiegend aus stromatolithischen und thrombolithischen Boundstones.
- (6) Schwamm-Kalke und -Mergel, die aus schwammreichen Float- und Rudstones gebildet werden.

5.2. Fazies und Gamma-Ray Logs

Diese Hauptfazies-Klassen und ihre vertikale Faziesabfolgen zeigen typische Gamma-Ray Signaturen und können damit leicht im Log identifiziert werden (Abb. 6):

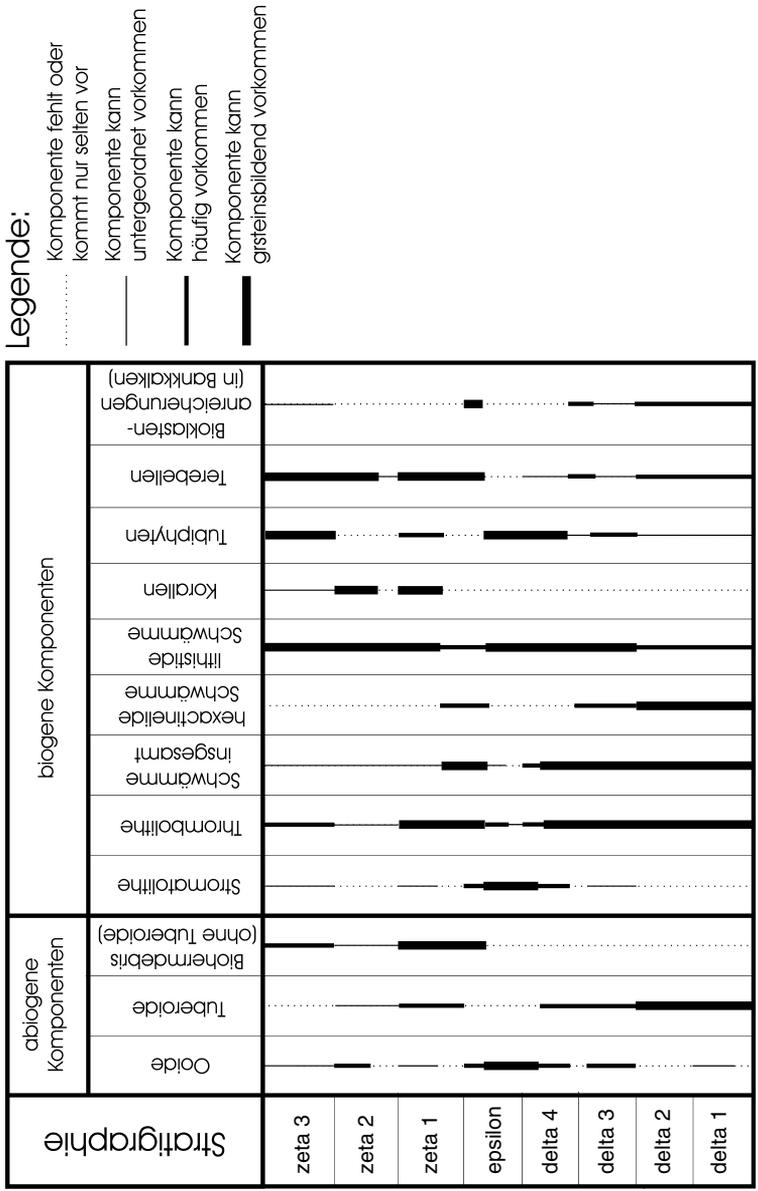


Abb. 4: Stratigraphischen Verteilung der wichtigsten Komponenten.

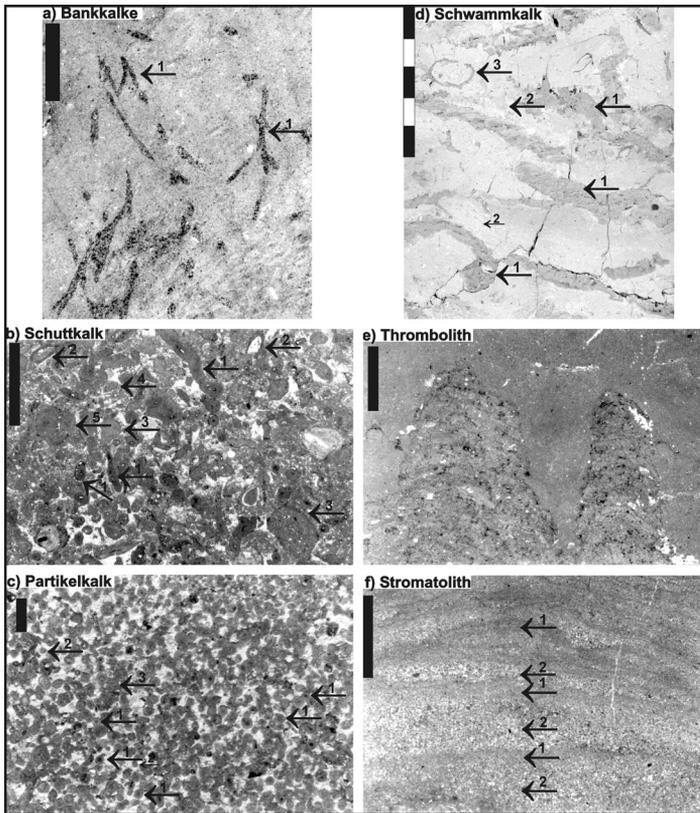


Abb. 5: Haupt Lithofazies-Klassen im höheren Oberjura SW-Deutschlands:

- a) Bankkalke: Mudstones, normalerweise bioturbiert, z.B. *Chondrites* (1) (Ro 7525/B2, 64 m. Alter: Malm ζ_1). Maßstab: 1 cm.
- b) Schuttalkalke: Wacke- bis Packstones oder Float- bis Rudstones, bestehend aus Mikrobenkrusten- und Schwammschutt (Tuberoiden) (5), Intraklasten (3), Peloiden (4) und Bioklasten (1: *Tubiphytes morronensis* CRESCENTI, 2: *Terebella* sp.). Dieses Beispiel stellt den Intraklast-Bioklast-Mikrofaziestyp dar (Ro 7821/B1, 21 m. Alter: Malm ζ_1). Maßstab: 1 cm.
- c) Partikelkalke: Packstones, sehr selten auch Grainstones, bestehend aus Ooiden (1), Peloiden (2) und gerundeten Intraklasten (3) (Ro 7525/B1, 93,5 m. Alter: Malm ϵ). Maßstab: 1 mm.
- d) Schwammkalke: Float- bis Rudstones, bestehend aus Schwämmen (1) und verschiedenen anderen Partikeln, die verschiedene Mikrofaziestypen bilden. Hier bestehen sie hauptsächlich aus Bioklasten (3: Echinodermaten) und Thrombolithen, die auf den Schwämmen wachsen (2) (Ro 7820/B1, 112 m. Alter: Malm δ_3). Maßstab: 5 cm.
- e) Thrombolithe: Mikrobenkrustenkalke (Boundstones). Thrombolithe können von Stromatolithen durch ihre klumpige und mikropeloidale Textur unterschieden werden. (Ro 7524/B1, 10,75 m. Alter: Malm ϵ). Maßstab: 1 cm.
- f) Stromatolithe: Mikrobenkrustenkalke (Boundstones). Im Gegensatz zu den Thrombolithen zeigen Stromatolithe eine periodische Abfolge von Laminae (1, 2) (Ro 7525/B1, 106,5 m. Alter: Malm ϵ). Maßstab: 1 cm.

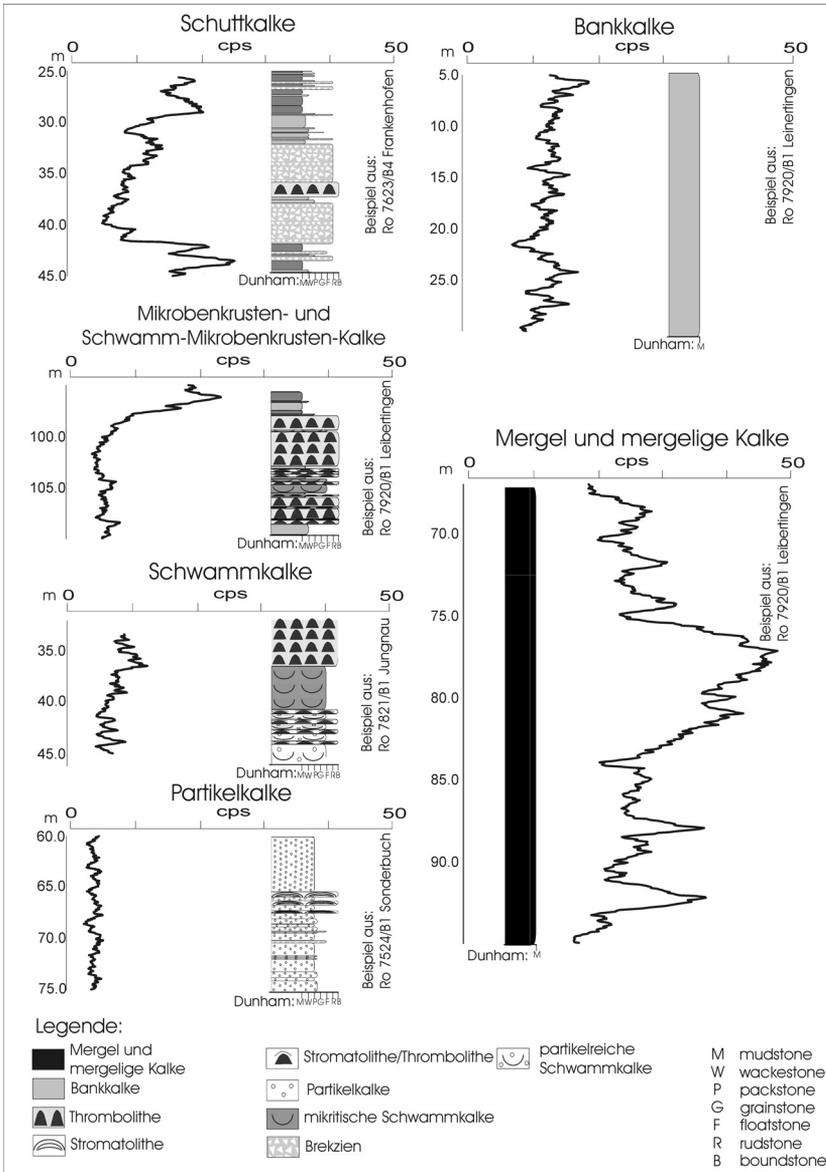


Abb. 6: Typische Gamma-Ray Signaturen von Fazies-Assoziationen und vertikalen Faziesabfolgen. Für weitere Informationen siehe Text.

- (1) Mergel und mergelige Kalke haben die höchsten Impulsraten (20–50 cps) und können damit leicht von allen anderen Faziestypen und -abfolgen unterschieden werden. Das Gamma-Ray Log von Mergeln mit einer Mächtigkeit von einigen m bis zu 10er m zeigt eine irregulär gesägte Kurve. Dünne Mergelfugen zwischen Kalken zeigen einen spitzen nadel-förmigen Peak.
- (2) Das Gamma-Ray Log von Bankkalken hat generell niedrigere Impulsraten (10–20 cps) und zeigt deutliche Kerben und Spitzen, welche die Mergelfugen repräsentieren.
- (3) Schuttkalke zeigen im Allgemeinen an ihrer Basis einen sehr scharfen Einschnitt im Gamma-Ray Log. Ins Hangende zu steigen die Impulsraten allmählich wieder an, was einen generellen „fining upward“ – Trend widerspiegelt. Diese Abfolge stellen einzelne „debris flow“ – Ereignisse dar.
- (4) Partikelkalke zeichnen sich durch generell niedrige Impulsraten (3–7 cps) aus und ihre Log-Signatur ist weniger gesägt als bei den Bankkalken.
- (5) Die Basis der Mikrobenkrusten- und Schwamm-Mikrobenkrusten-Kalke ist im Allgemeinen durch einen kleinen Peak im Gamma-Ray Log gekennzeichnet, das ein Mergelintervall darstellt (Bioherm-Initiierung). Danach nimmt die Impulsrate generell ab, was mit einer Biohermexpansion gekoppelt ist. Wenn sich die Mikrobenkrusten- und Schwamm-Mikrobenkrusten-Kalke nach oben hin wieder zurückziehen und wieder in Bankkalke oder Mergel übergehen, läßt sich eine Zunahme der Impulsraten erkennen.
- (6) Innerhalb einer Schwammkalk-Abfolge nimmt generell der Mergelgehalt zu. Deshalb zeigt das Gamma-Ray Log innerhalb der Schwammkalke normalerweise eine allmähliche Zunahme der Impulsrate.

In dieser Veröffentlichung wurden nur die häufigsten und wichtigsten Log-Typen beschrieben. Das gesamte Spektrum der Log-Typen ist in PAWELLEK (2001) beschrieben. An dieser Stelle soll auch darauf hingewiesen werden, daß Verkarstungen, dolomitisierte und dedolomitisierte Abschnitte das Gamma-Ray Log stark beeinflussen.

5.3. Architektur-Analyse

Die 2- und 3-dim. Geometrien von Fazies-Assoziationen bilden bestimmte Gesteinskörper („geobodies“). Diese Körper sowie ihre Beziehungen zueinander wurden in Aufschluß-Untersuchungen analysiert. Drei unterschiedliche „geobodies“/Fazies-Assoziationen können dabei unterschieden werden:

- (1) Bioherme bestehen aus Massenkalken, die überwiegend aus Mikrobenkrusten-, Schwamm-Mikrobenkrusten und Schwammkalken aufgebaut werden. Bioherme treten in zwei unterschiedlichen Typen auf: Erstens als „Klein-Bioherme“ mit linsen- oder kissenförmigen, konischen oder teilweise auch völlig irregulären Bau (Beispiele in FRITZ 1958, HILLER 1964, GWINNER 1976). Die Ausdehnung dieser Bioherme schwankt zwischen

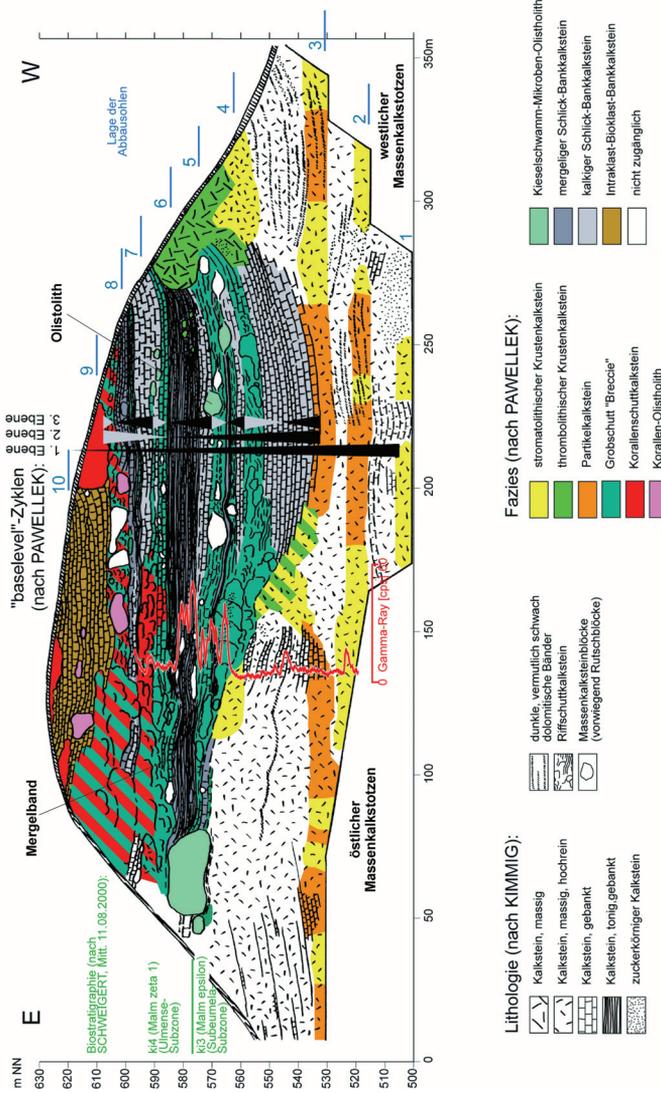


Abb. 7: Architektur und Geometrie von Fazieskörpern und Hierarchien von Sequenzen im Steinbruch Gerhausen. Das Gamma-Ray Log wurde in einem Bohloch gemessen, das ca. 10 m hinter der Steinbruchwand abgeteufert wurde. Das Profil zeigt eine allgemeine Retrogradation von Großhermen. Die Retrogradation geht nicht allmählich vor sich, sondern geht schrittweise in einzelnen Pro- und Retrogradations-Pulse vor sich. Diese untergeordneten Pulse werden durch die genetischen Sequenzen kontrolliert. Ebenfalls können mittelskalige Sequenzen mit mittelskaligen Retro- und Progradationen beobachtet werden. Die Bioherme werden überwiegend aus Mikrobenkrusten und Schwämmen aufgebaut, in oberen Abschnitt treten auch Korallen

einigen dm bis zu einigen m in Durchmesser und Höhe. Zweitens als „Groß-Bioherme“ (Abb. 7) mit dom- oder schildförmigen Bau. Diese Bioherme haben einen Durchmesser von über 100 m bis zu km und eine Höhe von bis zu 120 m (z.B. GWINNER 1958, 1976, ZIEGLER 1977, WENDT 1980, DIETL u. SCHWEIGERT 1999). In allen Biohermgrößen lassen sich Phasen von Expansionen, Rückzugs-Phasen und vertikalem Wachstum (analog zur Progradation, Retrogradation und Aggradation) erkennen.

- (2) Schuttkalk-Körper bilden Schuttschürzen (Abb. 8) aus Brekzien und Kalkareniten um die Bioherme. Schuttkalke verzahnen sich sowohl mit den Biohermen als auch mit den Beckensedimenten. Einzelne Schuttkalk-Lagen nehmen in ihrer Mächtigkeit vom Bioherm zum distalen Becken hin ab. In der Nähe von Biohermen erreichen diese einzelnen Lagen einige m bis zu 10er m. Ihre Länge schwankt zwischen mehr als 100 m bis zu einigen 100 m. Innerhalb dieser Schuttlagen können Olistolithe (Abb. 8) auftreten.
- (3) Beckenfüllungen. Die Becken zwischen den Biohermen sind mit Bankkalken, mergeligen Kalken und Mergeln gefüllt (Abb. 8), die stellenweise Rutschungen (z.B. GWINNER 1961, 1976) aufweisen, und teilweise können Kalkturbidite zwischengeschaltet sein. Beckensediment verzahnen sich entweder mit den Biohermen oder Schuttkalken oder bilden ein Anlagerungsgefüge („onlap“, Abb. 8) an die Bioherme. Im unteren Malm und im Malm δ_{1-3} sind die Bankkalk über die Schwäbische Alb weitverbreitet (MEYER u. SCHMIDT-KALER 1989, 1990). Im Malm δ_4 und ϵ existieren nur noch kleinere, lokale Becken („Linsenkalk“, MEYER u. SCHMIDT-KALER 1989) mit einem Durchmesser von einigen 10er m bis zu wenigen km zwischen den weit ausgedehnten Massenkalken und Massenkalk-ähnlichen Partikelkalken. Vom höheren Malm ϵ aufwärts ziehen sich die Massenkalk zurück. Die Morphologie der Becken vom höheren Malm ϵ bis in den Malm ζ_2 hinein ist von der Geometrie der sich zurückziehenden Bioherme abhängig, kann aber annäherungsweise als „Schüssel“ beschrieben werden. Im Malm ζ_2 kann der Durchmesser dieser Schüsseln einige 100 m bis mehrere km erreichen. Im Malm ζ_3 dominiert die gebankte Fazies wieder auf dem gesamten Gebiet der Schwäbischen Alb.

5.4. Sedimentologisches Fazies-Modell

Basierend auf fast 70 Bohrungen und 24 Aufschlüssen wurde ein allgemeines und vereinfachtes Fazies-Modell entwickelt. Der Ablagerungsraum des Oberjura der Schwäbischen Alb kann generell als tieferer Bereich einer Karbonatrampe (z.B. LEINFELDER 1993, LEINFELDER et al. 1994) beschrieben werden (Abb. 9). Die paläogeographischen Karten von MEYER u. SCHMIDT-KALER (1989, 1990) unterscheiden drei große Faziesbereiche: dickgebankte Kalke („Quaderkalke“), Schwammriff-Gürtel und tiefere Becken. Diese grobe Zonierung wurde in dieser Studie weiter verfeinert und es konnten insgesamt sechs Faziesgürtel ausgeschieden werden:

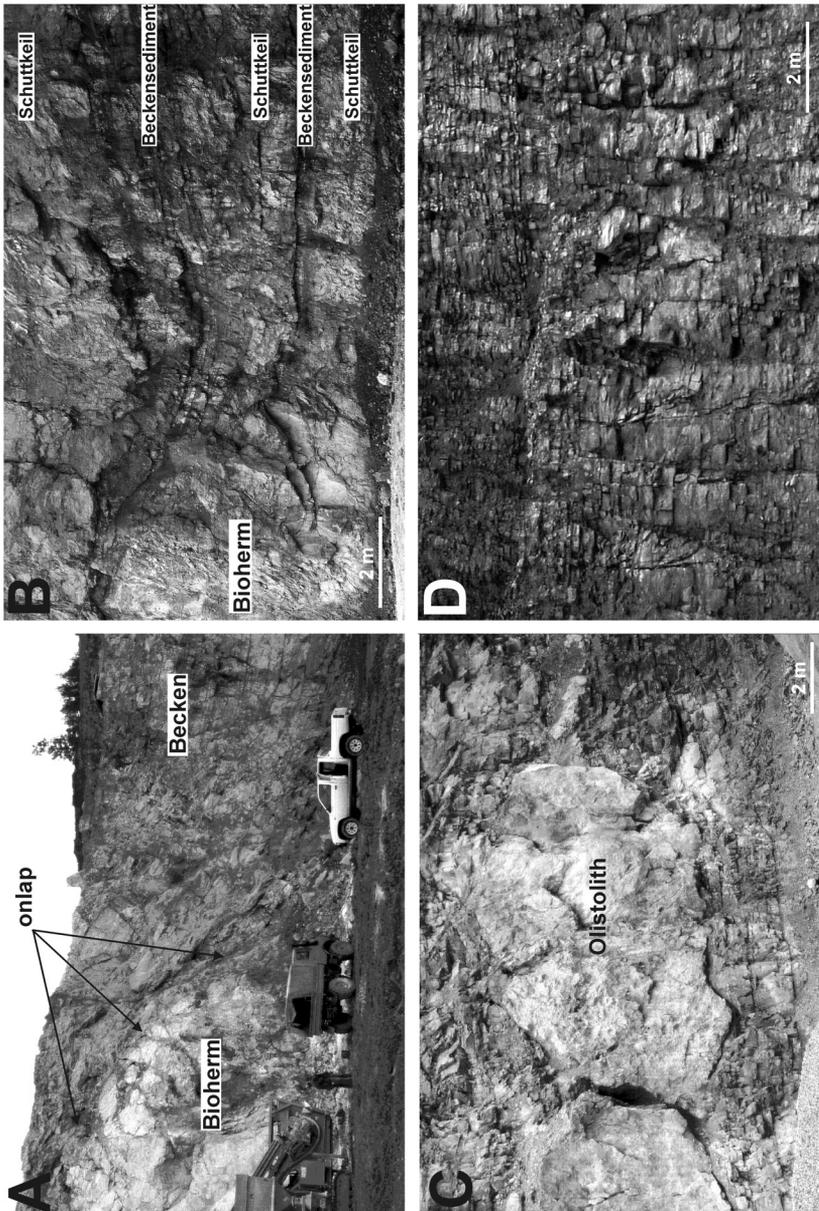


Abb. 8: Groß-Faziesassoziationen:

- A) Beckensedimente mit onlaps gegen ein Bioherm. Steinbruch Mergelstetten, Malm ζ_2 .
- B) Abfolge mit keilförmigen Schuttkalcken und Beckensedimenten, die sich mit einem Bioherm verzahnen. Steinbruch Gerhausen, Malm ζ_1 .
- C) Hausgroßer Olistolith, der ins Becken transportiert wurde. Steinbruch Liptingen, Malm ζ_3 .
- D) Bankkalke und mergelige Kalke des Malm ζ_1 . Steinbruch Böhmenkirchen.

Schwamm- Stromatolith- Fazieszone	Partikelkalk- Fazieszone	Schwamm- Thrombolith- Bioherm-Fazieszone	Biohermrand- Fazieszone	proximale Becken- Fazieszone	distale Becken- Fazieszone
---	-----------------------------	--	----------------------------	------------------------------------	-------------------------------

Meeresspiegel

nicht aufgeschlossen

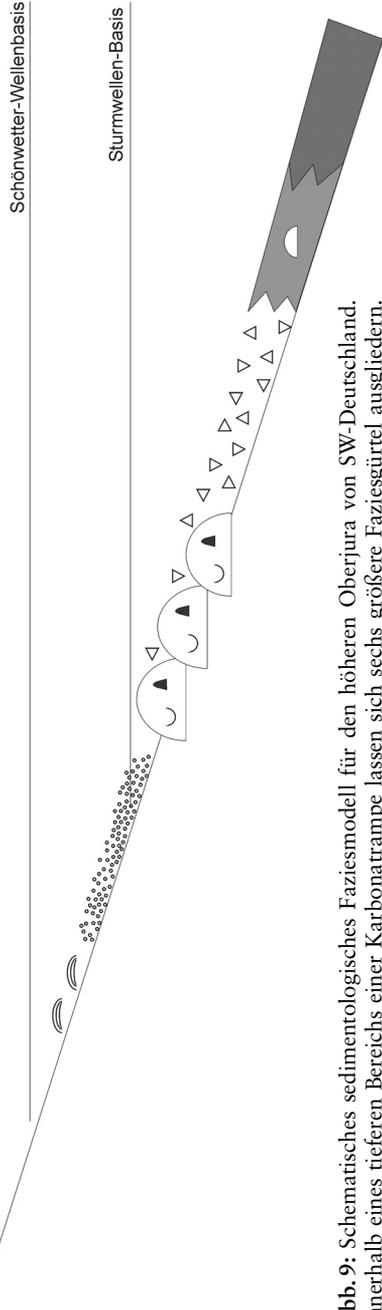


Abb. 9: Schematisches sedimentologisches Faziesmodell für den höheren Oberjura von SW-Deutschland. Innerhalb eines tieferen Bereichs einer Karbonatrampe lassen sich sechs größere Faziesgürtel ausgliedern. Die Partikelkalle wurden wahrscheinlich innerhalb der Sturmwellen-Basis sedimentiert. Der gesamte Ablagerungsraum lag unterhalb der Schönwetter-Wellenbasis. Die Abbildung ist nicht maßstabgetreu.

- (1) Der Faziesgürtel des distalen Beckens ist durch mergelige Sedimente gekennzeichnet. Nur distale Turbidite und dünne Kalkbänke unterbrechen mächtigen Mergelpakete.
- (2) Im Faziesgürtel des proximalen Beckens dominieren Bankkalke, feinkörnige Schuttkalke und Turbidite. Kleinere Bioherme, bestehend aus Thrombolithen und Kieselschwämmen treten gelegentlich auf.
Diese zwei Fazieszonen zeigen keinerlei Hinweise auf Sturmeinflüsse. Wahrscheinlich wurden sie sogar unterhalb der Reichweite von schweren Stürme sedimentiert.
- (3) Der Faziesgürtel des Biohermrandes besteht meist aus Schuttkalken, denen Bankkalke zwischengeschaltet sind. Die Schüttung von Biohermdebris in die umgebenden Becken könnte durch einzelne Strumereignisse verursacht worden sein.
- (4) Im Faziesgürtel der Schwamm-Thrombolith-Bioherme treten große Bioherme auf. Sie werden aus Kieselschwämmen und Thrombolithen mit gelegentlichen Stromatolithen aufgebaut. Interne Erosionsflächen und Aufarbeitungslagen lassen gelegentliche Strumereignisse vermuten (PAWELLEK u. AIGNER 2003a).
- (5) Im Faziesgürtel der Schwamm-Stromatolithe sind Stromatolithe der dominierende Mikrobenkrusten-Typ. Kieselschwämme können ebenfalls auftreten, sind jedoch deutlich weniger vorhanden als im Faziesgürtel der Schwamm-Thrombolith-Bioherme.
- (6) Der Faziesgürtel der Partikelkalke besteht aus Ooid-Peloid-Intraklast-Packstones mit seltenen Grainstone-Linsen. Normalerweise treten Lagen von Stromatolithe innerhalb der Partikelkalke auf. Häufig finden sich Bioturbationen die generell mit gröberen Partikeln gefüllt sind. In diesem Faziesgürtel finden sich häufig Anzeichen für Stürme (tabulare und tubulare Tempestite).

In allen Fazieszonen fehlen Anzeichen für eine ständige Welleneinfluß. Wahrscheinlich befand sich der Ablagerungsraum der Schwäbischen Alb unterhalb der Schönwetter-Wellenbasis.

6. Sequenz-Analyse

6.1. Allgemeines

Während der detaillierten und kontinuierlichen Kernaufnahmen und Log-Auswertungen fielen wiederkehrende vertikale sedimentäre Zyklen in verschiedenen Hierarchien auf. Eine ausführlichere Beschreibung der Sequenz-Analysen befindet sich in PAWELLEK (2001) und PAWELLEK u. AIGNER (2003b). Generell zeigen diese Zyklen einen Aufbau mit zwei Halbzyklen, von denen einer eine Verflachung, der andere eine Vertiefung anzeigt. Der Übergang zwischen den einzelnen Zyklen ist allmählich und wird deshalb als „turnaround“ bezeichnet. Aufgrund dieses Zyklenaufbaus werden die fundamentalen stratigraphischen Einheiten hier als „genetische Sequenzen“ bezeichnet (vgl. WHEELER 1964, BUSCH 1971, FRAZIER 1974, GALLOWAY 1989, HOMEWOOD et al. 1992, 2000, CROSS et al. 1993, GALLOWAY u. HOB-

DAY 1996, SONNENFELD 1996, CROSS u. LESSENGER 1998). Genetische Sequenzen werden im Allgemeinen die m-mächtigen, elementaren stratigraphischen Zyklen bezeichnet, die regional korreliert werden können und Verflachungs- gefolgt von Vertiefungs-Phasen aufweisen (z. B. HOMEWOOD et al. 1992, 2000, HOMEWOOD u. EBERLI 2000, KERANS u. TINKER 1997). Im höheren Oberjura SW-Deutschlands schwankt die Mächtigkeit der genetischen Sequenzen zwischen 4 und 10 m in den Becken und kann bis zu 20 m in den Biohermen erreichen. Sieben unterschiedliche Typen von genetischen Sequenzen können unterschieden werden. Im Allgemeinen gehen diese Zyklen auf Veränderungen des Akkomodationsraumes und des Sedimenteintrags bzw. -produktion zurück (z. B. SCHLAGER 1993). Jede Sequenz stellt ein Zyklus mit zunehmendem gefolgt von einem abnehmendem Verhältnis zwischen Akkomodationsraum (A) und dem Sedimenteintrag bzw. -produktion (S) dar. Vertiefungen sind das Ergebnis aus einem zunehmendem A und/oder eines abnehmendem S (zunehmendes A/S-Verhältnis). Verflachungen stellen hingegen das Ergebnis aus abnehmendem A und/oder einer Zunahme von S dar (abnehmendes A/S-Verhältnis). Veränderungen im A und S bestimmen die sedimentologische Faziesabfolge innerhalb der stratigraphischen Einheiten. Innerhalb einer vollständigen Sequenz kann eine Phase mit abnehmendem A/S-Verhältnis (Verflachungs-Halbzyklus) und eine Phase mit zunehmendem A/S-Verhältnis (Vertiefungs-Halbzyklus) unterschieden werden, die durch „turnarounds“ begrenzt werden (CROSS u. LESSENGER 1998). Diese Vertiefungs- bzw. Verflachungs-Halbzyklen werden mit Dreiecks-Symbolen dargestellt.

6.2. Beschreibung der genetischen Sequenzen

(1) Bioherm-Zyklen (Abb. 10):

Fazies: Dieser Zyklentyp findet sich nur innerhalb der Bioherme und ist durch folgende vertikale Faziesabfolge gekennzeichnet: Schwammkalke oder -mergel (an der Basis) – thrombolithische Schwammkalke – Thrombolithe – Stromatolithe und umgekehrt. Manchmal, besonders im Malm δ_{1-3} spielen Stromatolithe nur eine untergeordnete Rolle oder können in dieser Abfolge auch komplett fehlen. Im Aufschluß können Progradations- und Retrogradations-Phasen mit dieser Faziesabfolge korreliert werden: Die Abfolge von den Schwammkalken zu den Stromatolithen ist oft mit einer Expansion des Bioherms gekoppelt, während die umgekehrte Abfolge von den Stromatolithen zu den Schwammkalken mit einem Rückzug des Bioherms einhergeht.

Gamma-Ray Log: Das Log diesen Zyklentyps kann als Schüssel mit relativ hohen Impulsraten an der Basis und am Top beschrieben werden (hervorgerufen durch Schwammkalke mit relativ hohen Impulsraten) und mit sehr niedrigen Impulsraten in der Mitte des Zyklus (hervorgerufen durch Stromatolithe, die zusammen mit den Partikelkalcken die niedrigsten Impulsraten aller Faziestypen aufweisen).

(2) Bioherm-Schuttkalk-Zyklen (Abb. 11):

Fazies: Dieser Zyklentyp hat die typische Abfolge: (Schwammkalke oder

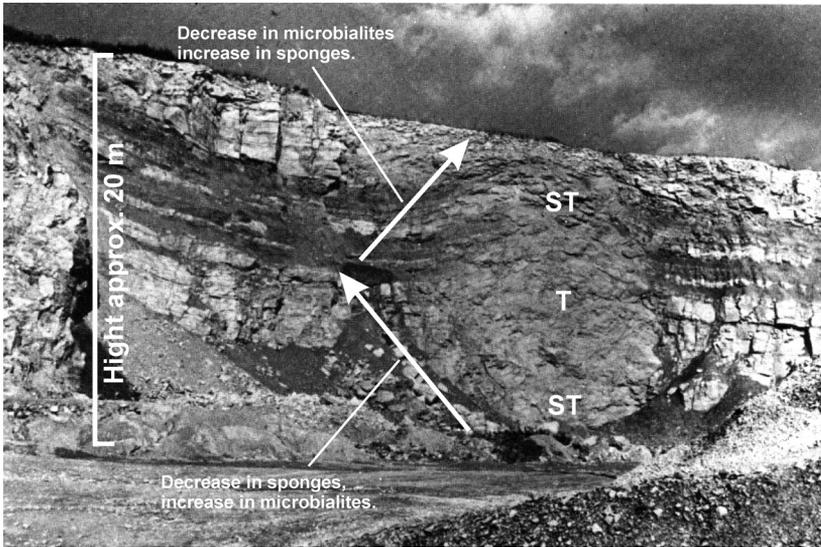


Abb. 10: Genetische Sequenz (Bioherm-Zyklus) im Aufschluß (Steinbruch Willmandingen), mit der Faziesabfolge Schwamm-Thrombolithe (ST) – Thrombolithe (T) – Schwamm-Thrombolithe. Die Abfolge von den Schwamm-Thrombolithen zu den Thrombolithen korreliert mit einer Biohermprogradation, während die Abfolge von den Thrombolithen zu den Schwamm-Thrombolithen korreliert mit einem Biohermrückzug.

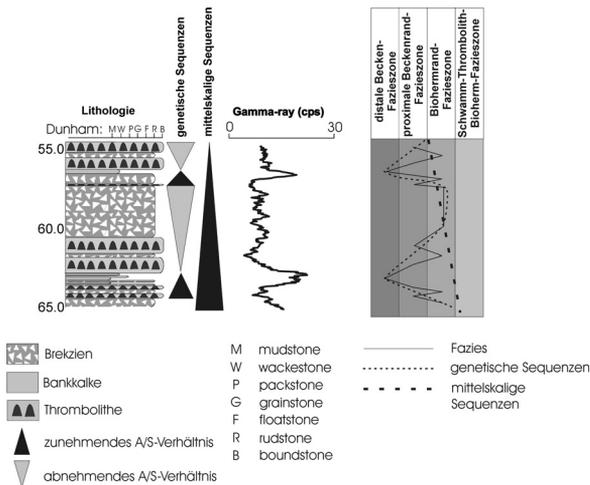


Abb. 11: Genetische Sequenzen vom Bioherm-Schuttalk-Typ. Das Beispiel stammt aus der Bohrung Ro 7623/B4, Malm ζ_1 .

-mergel an der Basis, die teilweise auch fehlen können) – thrombolithische Schwammkalke – Thrombolithe – Schuttkalke – Bankkalke oder Mergel und umgekehrt.

Gamma-Ray Log: Generell können zwei verschiedene Halbzyklen innerhalb des Log unterschieden werden. Ein Halbzyklus zeigt eine Abnahme der Impulsraten, die mit der Faziesabfolge (Schwammkalke oder -mergel mit relativ hohen Impulsraten) – Thrombolithe – Schuttkalke (mit relativ niedrigen Impulsraten) korreliert. Der zweite Halbzyklus ist durch einen relativ schnellen Anstieg in den Impulsraten gekennzeichnet, die mit der Abfolge Schuttkalke – Bankkalke und/oder Mergel zusammenhängt.

(3) Bioherm-Bankkalk-Zyklen (Abb. 12):

Fazies: Eine typische Faziesabfolge diesen Zyklentyps ist: Mergel oder Schwamm-Mergel und/oder Bankkalke oder Schwammkalke – Schwamm-

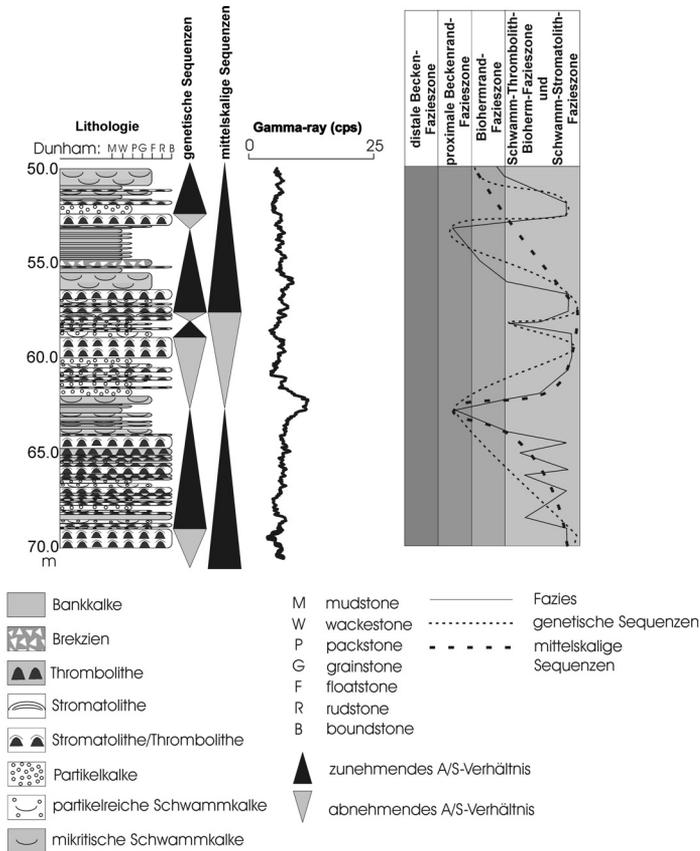


Abb. 12: Genetische Sequenz vom Bioherm-Bankkalk/Mergel-Typ. Das Beispiel stammt aus der Bohrung Ro 7525/B1, Malm ϵ .

Mikrobenkrustenkalke (Schwamm-Thrombolithe, Thrombolithe, Stromatolithe, etc.) und umgekehrt.

Gamma-Ray Log: Normalerweise kann dieses Log als symmetrische Schüssel mit höheren Impulsraten an den Rändern beschrieben werden (hervorgerufen durch Bankkalke oder Mergel) und mit den niedrigsten Impulsraten in der Mitte der Schüssel (hervorgerufen durch Stromatolithe mit den niedrigsten Impulsraten aller Faziestypen).

(4) Bioherm-Tuberoid-Zyklen (Abb. 13):

Fazies: Dieser Zyklentyp ist durch die Faziesabfolge Mergel und/oder Bankkalke – Tuberoidkalke – thrombolithische Schwammkalke – Thrombolithe – Schwammkalke oder -mergel und/oder Bankkalke oder Mergel, gekennzeichnet.

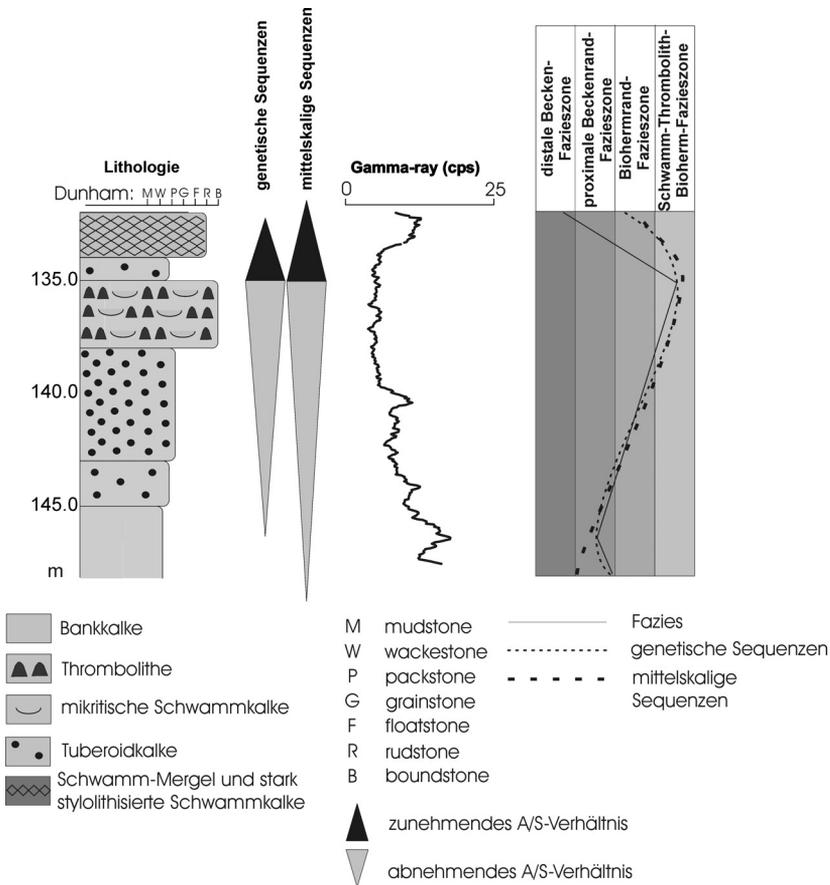


Abb. 13: Genetische Sequenz vom Bioherm-Tuberoid-Typ. Das Beispiel stammt aus der Bohrung Ro 7820/B1, Malm δ.

Gamma-Ray Log: Normalerweise zeigt dieser Zyklentyp eine trichterförmige Log Signatur. Der untere Halbzyklus ist durch eine langsame Abnahme der Impulsraten gekennzeichnet, die durch die Faziesabfolge Mergel und/oder Bankkalk – Tuberoïdkalke – thrombolithische Schwammkalke – Thrombolithe zurückzuführen ist. Der obere Halbzyklus ist durch eine schnelle Zunahme der Impulsraten gekennzeichnet, die durch die Schwammkalke oder -mergel und/oder Bankkalk oder Mergel hervorgerufen wird, welche die Thrombolithe überlagern.

(5) Partikelkalk-Zyklen (Abb. 14):

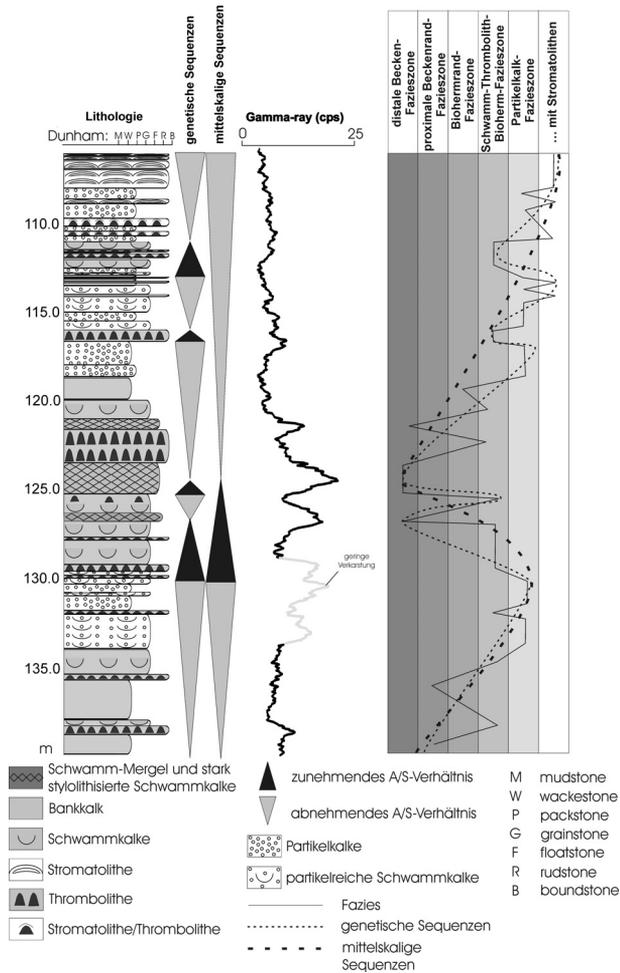


Abb. 14: Genetische Sequenz vom Partikelkalk-Typ. Auf Grund von Verkarstungen ist das Gamma-Ray Log im Bereich zwischen 130 und 135 m verändert. Das Beispiel stammt aus der Bohrung Ro 7623/B4, Malm δ_3 – Malm ϵ .

Fazies: Dieser Zyklentyp ist durch die Faziesabfolge Bankkalke – Intra-
 klast-Bioklast-Kalke oder Tuberoïdkalke (diese Faziestypen können ge-
 legentlich fehlen) – Partikelkalke und umgekehrt. Teilweise, besonders im
 unteren Malm ε tritt ein modifizierter Zyklentyp auf: Partikelkalke (Pack-
 stones) – Partikelkalke (Pack- bis Grainstones und Grainstones) –
 Partikelkalke, die durch Mikrobenkrusten fixiert werden und umgekehrt.
 Teilweise v.a. in den Bankkalken, den Intra-
 klast-Bioklast- und den Tuberoïdkalken können Lagen mit Thrombolithen auftreten.

Gamma-Ray Log: Es ist sehr schwierig diesen Zyklentyp allein im Log zu
 identifizieren. Nur wenn Bankkalke in diesem Zyklentyp auftreten, können
 einzelne Zyklen an den Peaks identifiziert werden, die durch Bankkalke her-
 vorgehoben werden.

(6) Schuttkalk-Zyklen (Abb. 15):

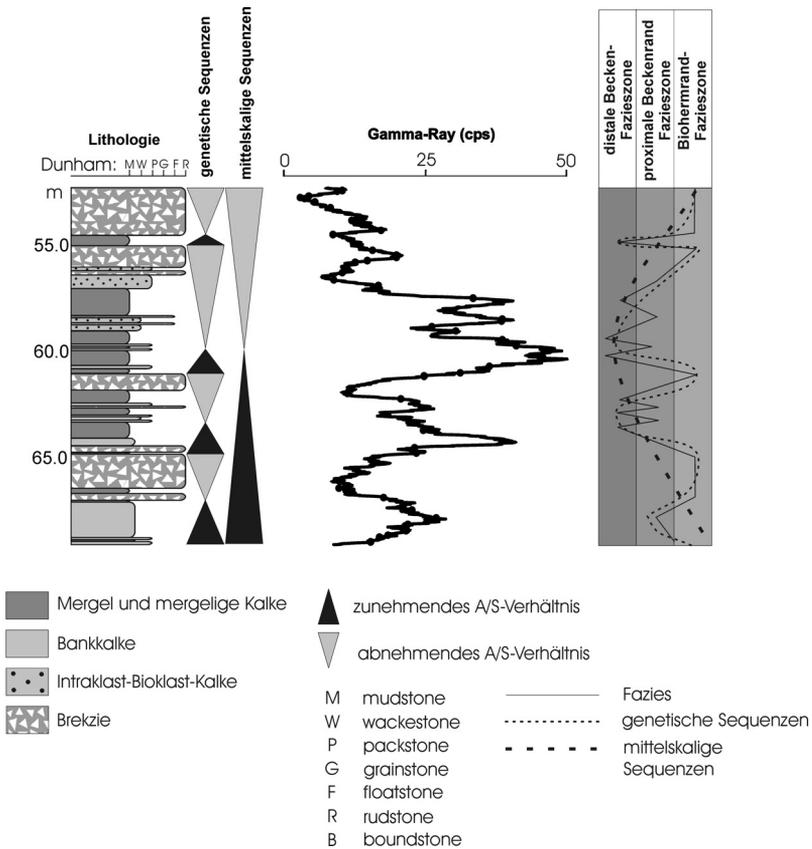


Abb. 15: Genetische Sequenz vom Schuttkalk-Typ. Das Beispiel stammt aus der Boh-
 rung from Ro 7525/B2, Malm ζ₁.

Fazies: Dieser Zyklentyp ist durch die Faziesabfolge Mergel und/oder Bankkalk – Intraklast-Bioklast-Kalke (können manchmal fehlen) – Brekzien und umgekehrt.

Gamma-Ray Log: Das Log diesen Zyklentyps zeigt eine ganz typische Log-Signatur. Der Übergang von den Mergeln und/oder Bankkalken zu den Schuttkalken ist normalerweise sehr scharf. Dieser scharfe Übergang ist durch einen plötzlichen Einschnitt im Gamma-Ray Log gekennzeichnet (Bankkalken und Mergel haben hohe Impulsraten, Schuttkalke niedrigere). Die Abfolge von den Schuttkalken zu den Bankkalken und Mergeln zeigt eine graduelle Zunahme der Impulsraten.

(7) Bankkalk-Zyklen (Abb. 16):

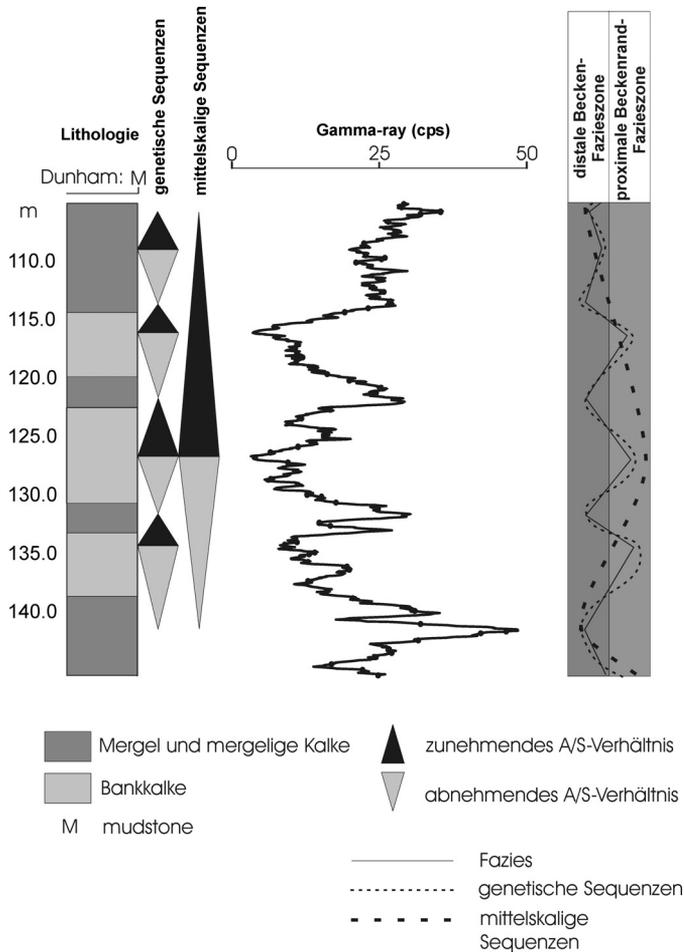


Abb. 16: Genetische Sequenz vom Mergel-Bankkalk-Typ. Das Beispiel stammt aus der Bohrung Ro 7525/B3, Malm ζ_{1-2} .

Dieser Zyklentyp ist gekennzeichnet durch eine rhythmische Wechsellaagerung von Mergeln und Bankkalken. Dieser rhythmische Wechsel von Mergeln und Bankkalken spiegelt sich sehr deutlich im Log wieder. Die Mergel sind durch hohe Impulsraten gekennzeichnet, während Bankkalken niedrigere Impulsraten aufweisen.

6.3. Interpretation

Wie oben bereits erwähnt wurde, können die beobachteten Zyklen in zwei Halbzyklen unterteilt werden: einen Verflachungs- und einen Vertiefungs-Halbzyklus. Eine Vielzahl von sedimentologischen, palynologischen und palökologischen Kriterien wurde genutzt, um die Verflachungs- und Vertiefungstrends zu erkennen (Abb. 17). Jedes Kriterium allein betrachtet mag zwar für sich nicht eindeutig sein, jedoch bietet die Summe aller Beobachtungen eine gewisse Sicherheit um die Trends in der relativen Wassertiefe zu interpretieren. Änderungen im Ooidgehalt, in der Größe, Rundungsgrad und Sortierung aller Komponenten, das Auftreten von sparitischen und mikritischen Matrix und der Tongehalt innerhalb jedes Zyklus wird als Änderungen der hydrodynamischen Energie gedeutet. Ein nach oben zunehmender Ooidgehalt, Zunahme der sparitischen Matrix, zunehmende Größe, Rundungsgrad und Sortierung von Komponenten, die Hand in Hand mit der Abnahme des Mikrit- und Tongehaltes einhergeht, wird als Zunahme der hydrodynamischen Energie gedeutet. Umgekehrt wird eine Zunahme des Mikrit- und Tongehaltes und eine Abnahme des Ooidgehaltes, der sparitischen Matrix und der Größe, Rundungsgrad und Sortierung von Komponenten als Abnahme der hydrodynamischen Energie gedeutet. Bemerkenswert ist die Zunahme des Tongehaltes die parallel mit einer Abnahme der Flachwasseranzeiger wie Ooide und Stromatolithe läuft (PAWELLEK 2001). Diese Beobachtung steht im Gegensatz zum klassischen sequenzstratigraphischen Konzept von gemischten karbonat-siliziklastischen passiven Beckenrändern. Dort werden Intervalle mit den höchsten klastischen Input als „lowstands“ des relativen Meeresspiegel interpretiert (z.B. VAN WAGONER et al. 1988). Es ist fraglich ob dieses Konzept ohne weiteres auf alle Typen von Karbonatrampen übertragen werden kann. Die Palynologie wurde dazu genutzt, um die Frage zu klären, ob ein zunehmender Tongehalt eine Verflachung oder eine Vertiefung darstellt. Innerhalb Mergelabfolgen wurde eine Zunahme von marinen Phytoklasten gefunden, wogegen in kalkigeren Abfolgen kontinentale Phytoklasten zunehmen (Abb. 18). Dies läßt den Schluß zu, daß die Mergel des höheren Oberjura der Schwäbischen Alb „Beckenmergel“ darstellen, die als Hintergrundsedimentation in tieferen Wasserzonen abgelagert wurden, in der die Karbonatproduktion limitiert ist.

Parallel zu diesen sedimentologischen und palynologischen Veränderungen konnten auch Trends in den Biotas beobachtet werden, besonders im Kieselschwammgehalt und in den Wuchsformen, Typen und Häufigkeiten von Mikrobenkrusten. Die Interpretation dieser Abfolgen ist sehr schwierig und Bedarf einer gründlicheren Ausführung. Nach vielen Autoren haben

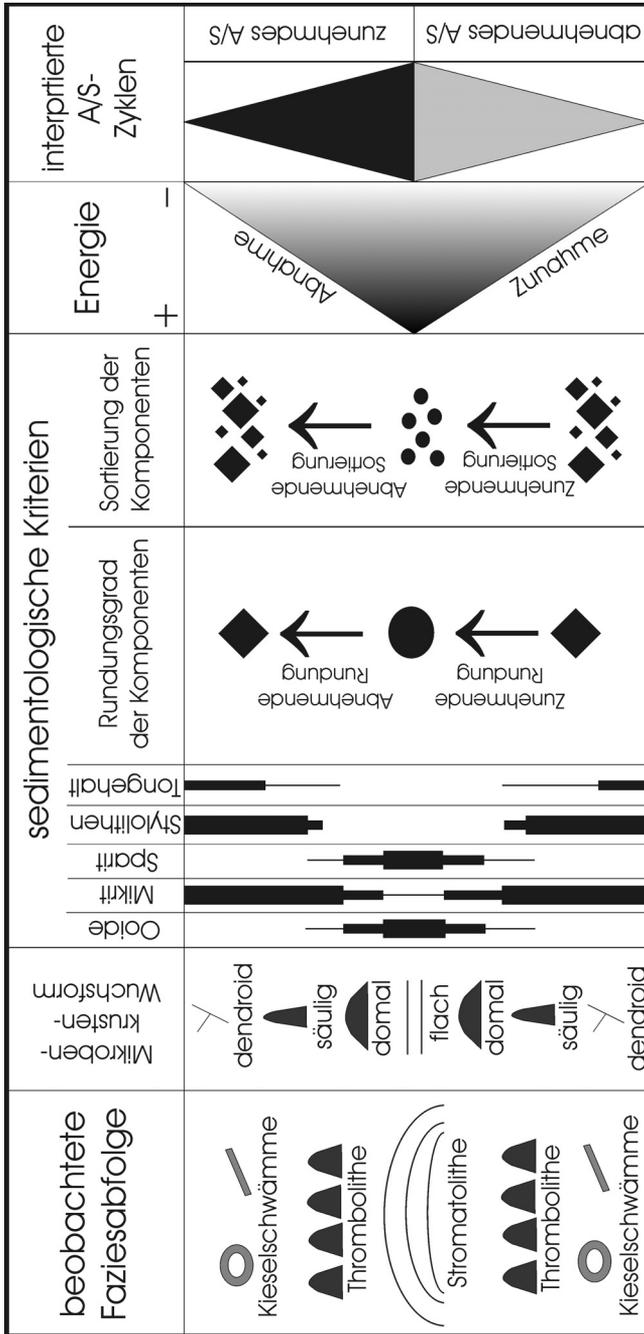


Abb. 17a/b: In den beobachteten Sequenzen können folgende Veränderungen in der Sedimentologie und in der Organismenabfolge beobachtet werden. In Abb. 17a sind die Veränderungen in den Biohermen, in Abb. 17b in den gebankten Faziestypen dargestellt.

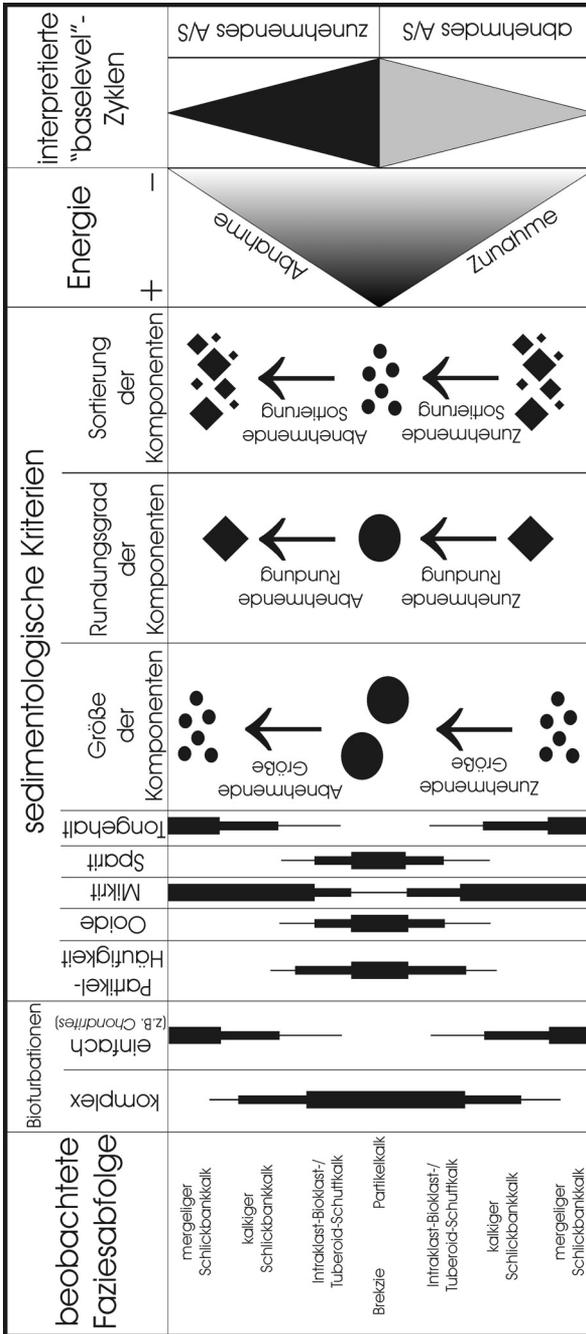


Abb. 17b

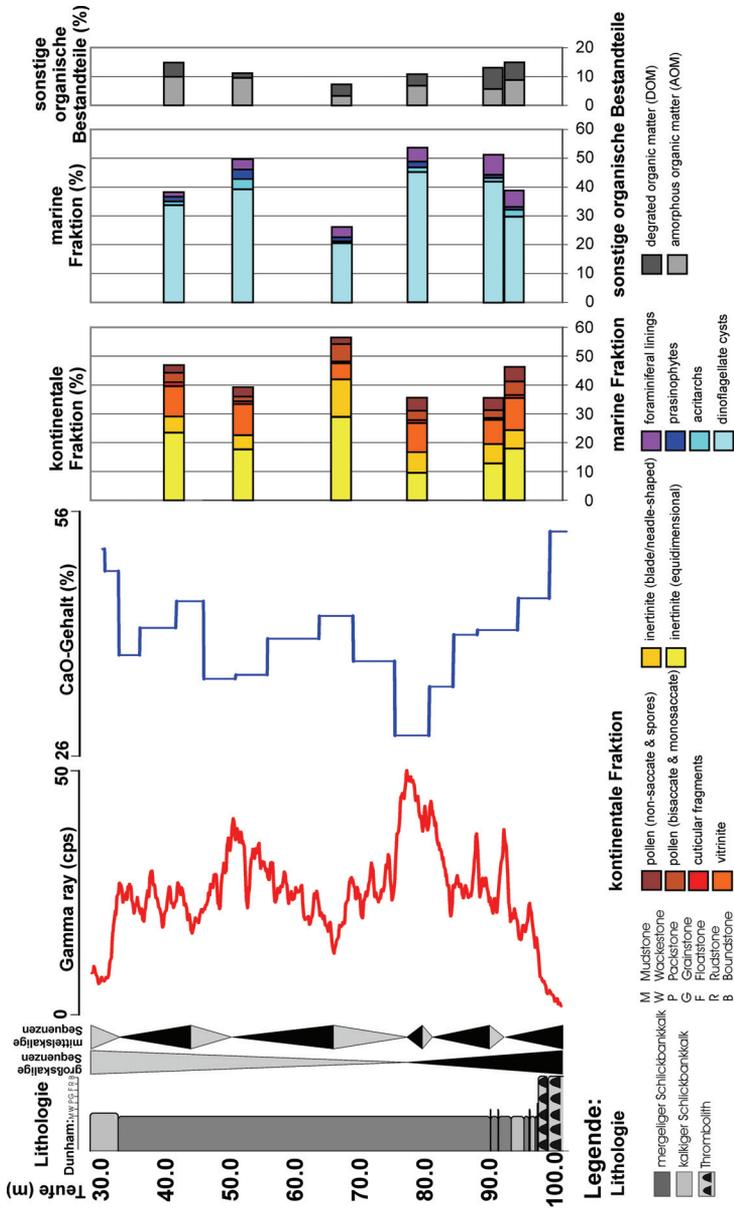


Abb. 18: Palynofazies-Analyse von Beckensedimenten. Die marine Fraktion (dominierte durch Dinoflagellaten-Zysten) hat ihr Maximum innerhalb der Abschnitte mit niedrigen CaO-Gehalten und hohen Tongehalten, während die kontinentale Fraktion innerhalb der Abschnitte mit höheren CaO-Gehalten und niedrigeren Tongehalten dominieren.

Thrombolithe ihre größte Verbreitung in tieferen Wasserzonen (z.B. KEUPP et al. 1993, 1996, LEINFELDER 1993, 1994, LEINFELDER et al. 1993, 1996, DROMART et al. 1994, HERRMANN 1996, SCHMID 1996, REHFELD 1996), da sie aus lichtunabhängigen Mikroben aufgebaut werden (z.B. SCHMID 1996) und oft in aphotischen Zonen gefunden werden (z.B. DROMART et al. 1994, TAYLOR u. PALMER 1994, REITNER et al., 1996). Ein wichtiger limitierender Faktor für das Wachstum von Thrombolithen ist die Sedimentationsrate. Sie können nur in Gebieten mit sehr geringer Sedimentationsrate wachsen, wie sie normalerweise in tieferen Wasserzonen herrschen (z.B. LEINFELDER 1993, LEINFELDER et al. 1996, 1994, SCHMID 1996). Ein weiterer wichtiger Faktor für das Wachstum von Mikrobialithen ist das Nährstoffangebot (z.B. SPRACHTA et al. 2001). Im Gegensatz dazu werden Stromatolithe überwiegend aus lichtabhängigen Cyanobakterien aufgebaut, die auf flachere Wassertiefen begrenzt sind. Auch können sie eine höhere Sedimentationsrate als die Thrombolithe tolerieren (z.B. GOLUBIC 1967, JONES u. HUNTER 1991, GOLUBIC u. KNOLL 1993, DEFRAGE et al. 1994, SCHMID 1996). Deshalb werden Stromatolithe generell als Indikatoren für flachere Wassertiefen, Thrombolithe hingegen als Indikatoren für tiefere Wassertiefen angesehen (z.B. SCHMID 1996). FELDMANN u. MCKENZIE (1997, 1998) berichten von einem allmählichen Übergang von Stromatolithen zu Thrombolithen während eines Meeresspiegelanstiegs. Kieselschwämme werden oft als Indikatoren für tiefere Wasserzonen angesehen (z.B. KRAUTTER 1995, 1997, LEINFELDER 1993, LEINFELDER et al. 1994, 1996).

Es gibt zahlreiche Indikatoren, daß die Fazies- und Organismenabfolgen z.B. von den Kieselschwämmen zu den Stromatolithen oder von den Mergeln zu den Partikelkalken als Zunahme der hydrodynamischen Energie und damit als Verflachungstrend interpretiert werden kann. Dies bedeutet, daß A abnimmt während S zunimmt ($A/S < 1$; „Verflachungs-Halbzyklus“). Der Verflachungs-/Vertiefungs-“turnaround“ befindet sich in demjenigen Abschnitt mit der höchsten Energie und am Top der flachsten Fazies. Für die Zyklen des schwäbischen Oberjura bedeutet dies, daß sich der Verflachungs-/Vertiefungs-“turnaround“ z.B. am Top der mächtigsten stromatolithischen Lage oder am Top der Partikelkalke mit dem höchsten Ooidgehalt befindet. Im Gegensatz dazu weisen zahlreiche Indikatoren darauf hin, daß die Fazies- und Organismenabfolge von den Stromatolithen zu den Kieselschwämmen oder von den Partikelkalken zu den Mergeln als Energieabnahme und damit als Vertiefung interpretiert werden kann. Dies bedeutet, daß A zunimmt während S abnimmt ($A/S > 1$, „Vertiefungs-Halbzyklus“). Der Vertiefungs-/Verflachungs-“turnaround“ befindet sich in dem Abschnitt mit der niedrigsten Energie und der tiefsten Fazies. Der Vertiefungs-/Verflachungs-“turnaround“ liegt am Top des Abschnitts mit dem höchsten Tongehalt und/oder mit dem höchsten Schwammgehalt (z.B. Mergel oder mergelige Kalke, Bankkalke, mergelige und mikritische Schwammkalke).

7. Stapelungsanalyse

7.1. Zyklenhierarchie

Kleinstskalige Sequenzen (Abb. 19)

Die Schwamm-Mikrobenkrusten-Bioherme im schwäbischen Oberjura werden oft kompakte, homogen aufgebaute Fazieskörper beschrieben (z. B. FRITZ 1958, GWINNER 1976, ZIEGLER 1977). Die kontinuierlichen Bohrkernaufnahmen zeigten aber einen systematischen Aufbau dieser Biohermen aus verschiedenen Zyklen-Hierarchien. Neben den Hierarchie-Ebenen, die weiter oben und unten beschrieben werden, können noch zwei weitere Hierarchie-Ebenen

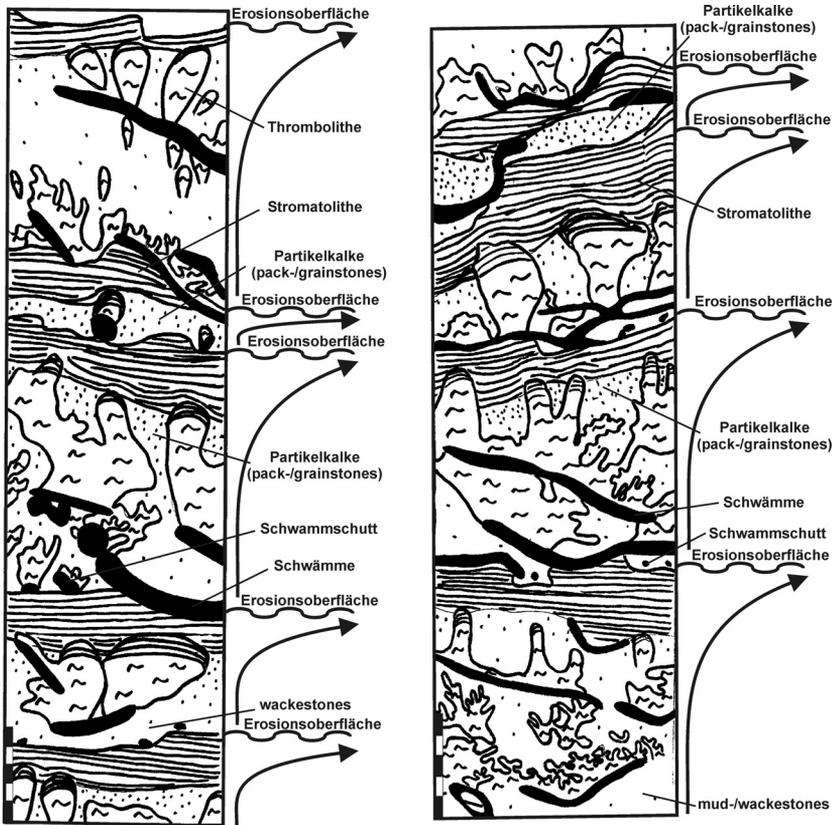


Abb. 19: Abfolge von kleinstskaligen Sequenzen aus der Bohrung Ro 7525/B1, Malm ϵ . Diese Sequenzen zeigen an der Basis eine wahrscheinlich sturmbedingten Erosionsoberflächen. Darüber folgen normalerweise eine Aufarbeitungslage (Schwamm-, Biodetritus, Intraklasten) und Schwammkalke, die von Thrombolithen und Stromatolithen überwachsen werden. Neben dieser Normalabfolge gibt es eine Reihe von Abweichungen.

archie-Ebenen von dm- bis m-mächtigen (0,1–4 m) kleinstskalige Zyklen unterschieden werden, die aber nur lokal korreliert werden können. Sie werden in PAWELLEK (2001) und in PAWELLEK u. AIGNER (2003a) im Detail beschrieben. Diese kleinstskaligen Zyklen zeigen normalerweise eine Erosionsoberfläche mit aufgearbeiteten Schwämmen, Schalen und Intraklasten, die als Sturmereignisse interpretiert werden können. Diese Lage wird von thrombolithischen und stromatolithischen Mikrobialithen besiedelt. Neben dieser „Normalabfolge“ gibt es eine Reihe von Abweichungen, die in den oben genannten Zitaten genauer beschrieben werden.

Mittel- und Großskalige Sequenzen

Normalerweise baut ein Stapel (in den analysierten Bohrkernen und Aufschluß-Analysen jeweils vier, vgl. Abb. 15, 16) genetischer Sequenzen eine mittelskalige Sequenz auf. Die Mächtigkeit dieser mittelskaligen Sequenzen schwankt zwischen 10 und einigen 10er von m. Ein Stapel mittelskaliger Sequenzen wiederum baut eine großskalige Sequenz auf (Abb. 20). Großskalige Sequenzen haben meist eine Mächtigkeit von weit über 100 m. In vielen Fällen ist das Gamma-Ray Log ein nützliches Hilfsmittel um die Zyklenstapelung zu identifizieren. Die übergeordneten Verflachungs- und Vertiefungs-Trends sind anhand ab- bzw. zunehmenden Impulsraten zu erkennen. Das in den Bohrungen festgestellte Stapelungsmuster fand sich auch in den Aufschlüssen (Abb. 7) wieder. In der gebankten Fazies ist die Zyklizität leicht an der Aufschlußwand und in dem Aufschluß-Gamma-Ray zu erkennen.

Aufschluß-Analysen zeigten, daß Bioherm-Geometrien direkt mit der Zyklizität korrelieren. Bioherm-Progradation und zunehmende Schuttproduktion sind an Verflachungs-Halbzyklen gebunden, während Bioherm-Retrogradationen mit Vertiefungen korrelieren (Abb. 7). Im höheren Oberjura SW-Deutschlands kontrollieren die großskaligen Zyklen (generelle Biohermexpansion vom Malm γ in den Malm ϵ und übergeordneter Biohermrückzug vom Malm ϵ bis in den Malm ζ_2 hinein). Die mittelskalige Zyklizität kontrolliert die Geometrie (Ausbreitung und Zurückziehen) einzelner Bioherme und die allgemeine Schuttproduktion. Schließlich kontrollieren die genetische Sequenzen einzelne Pro- und Retrogradations-Pulse der Bioherme und die Bildung einzelner Schuttlagen.

7.2. Zyklensymmetrie und Sedimentvolumenverteilung

Die Symmetrie beschreibt die Mächtigkeits-Differenzen zwischen den einzelnen Halbzyklen. Asymmetrische Zyklen (einer der Halbzyklen ist mächtiger als der andere) können von symmetrischen Zyklen (beide Halbzyklen sind ungefähr gleich mächtig) unterschieden werden. Die asymmetrischen Zyklen können weiterhin in „Verflachungs“-dominierte (der Verflachungs-Halbzyklus ist mächtiger) und „Vertiefungs“-dominierte Zyklen (der Vertiefungs-Halbzyklus ist mächtiger) eingeteilt werden. Innerhalb von Biohermen läßt sich folgendes Symmetriemuster erkennen (Abb. 21, 22): Die Mächtigkeit von genetischen Sequenzen nimmt innerhalb einer mittelskaligen Verflachungs-Halbzyklus erst zu, um dann aber zum mittelskaligen „turnaround“ wieder deutlich abzunehmen. Während eines mittelskaligen

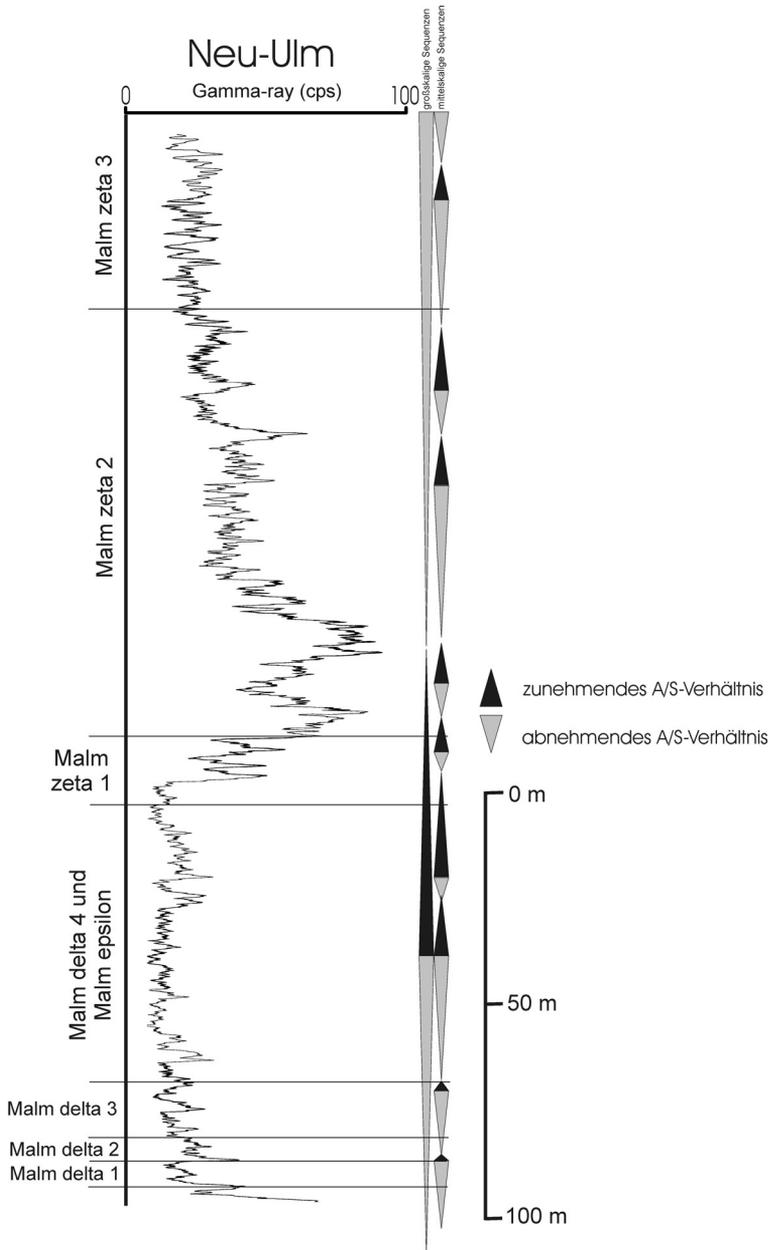


Abb. 20: Großskalige Sequenz, die durch eine Abfolge von mittelskaligen Sequenzen aufgebaut wird. In dieser Abbildung wurde eine Korrelation zwischen den mittel- und großskaligen Sequenzen und der konventionaler Lithostratigraphie versucht.

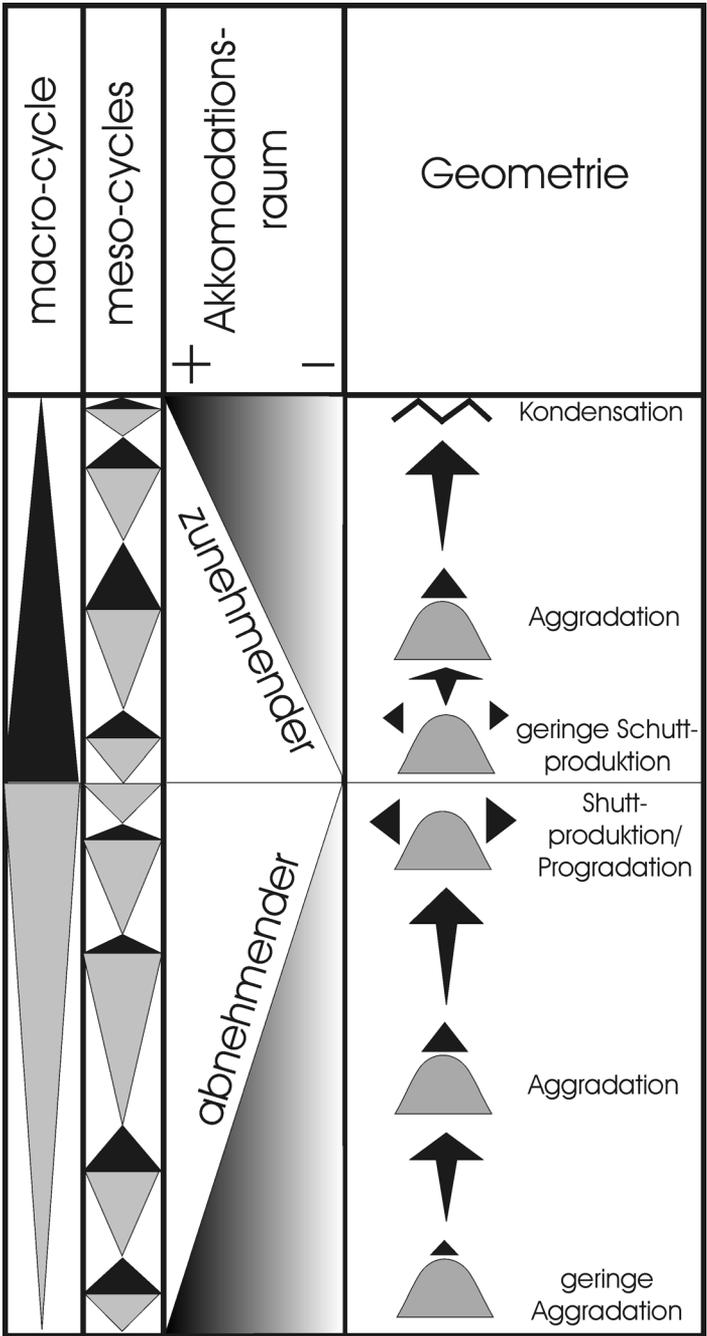


Abb. 21: Schematisches Diagramm um die Änderungen von Symmetrie und Mächtigkeit von kleinstskaligen Sequenzen innerhalb einer geologischen Sequenz zu dokumentieren. Nähere Erläuterung siehe Text.

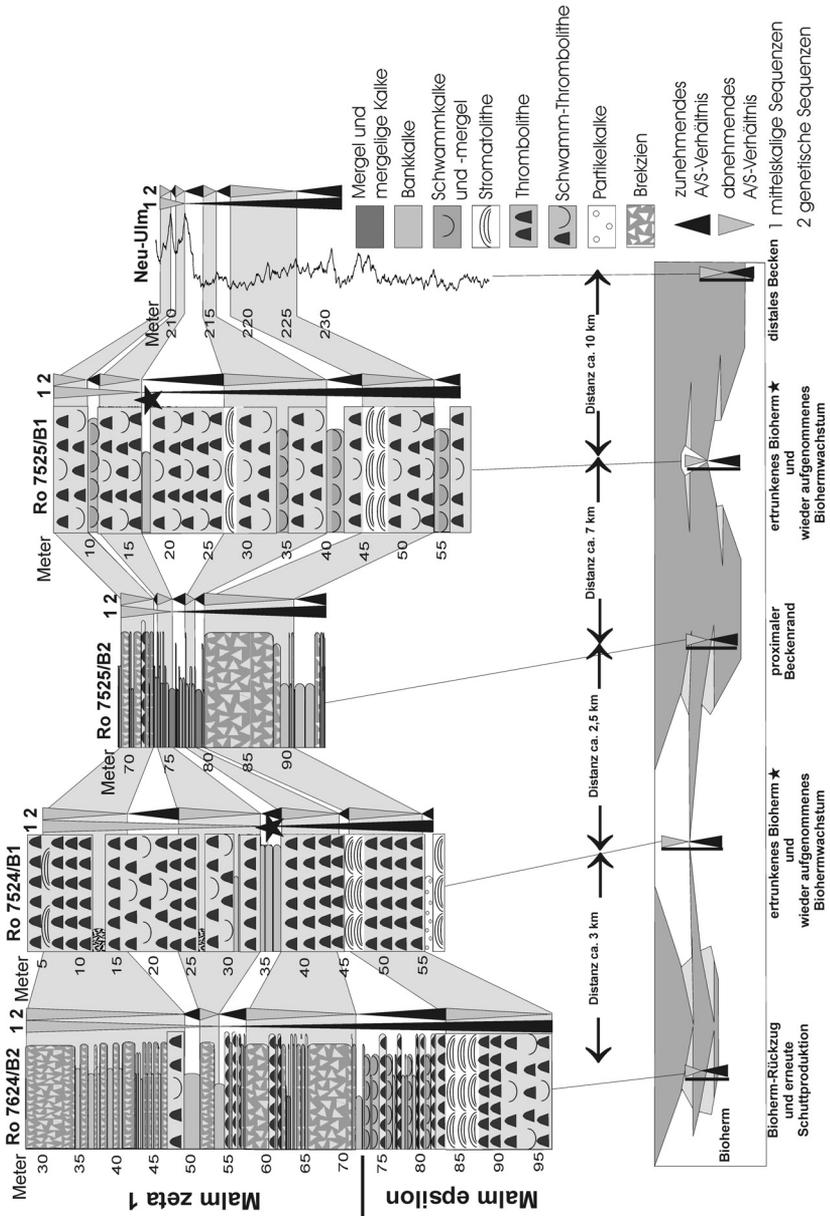


Abb. 22: Beispiel einer regionalen Korrelation von genetischen Sequenzen (2) während einer mittelskaligen Sequenz (1) über verschiedene Fazieszonen hinweg. Man beachte die Symmetrie- und Mächtigkeitsveränderungen der genetischen Sequenzen. Nähere Informationen siehe Text.

Vertiefungs-Halbzyklus sind die genetischen Sequenzen mehr symmetrischer und ihre Mächtigkeit nimmt erst zu, um dann wieder gegen den mittelskaligen „turnaround“ hin abzunehmen. Innerhalb der proximalen Beckenränder sind die genetischen Sequenzen generell stärker asymmetrisch („fall“-dominiert) aufgebaut (Abb. 22). Die Mächtigkeiten der genetischen Sequenzen innerhalb eines mittelskaligen Verflachungs-Halbzyklus nehmen zu, während sie innerhalb eines Vertiefungs-Halbzyklus wieder abnehmen. In den distalen Becken finden sich nur symmetrische Zyklen (Abb. 22). Eine schematische Abbildung dieses Konzeptes ist in Abb. 23 abgebildet.

Eine mögliche Erklärung für die Mächtigkeits- und Symmetrie-Veränderungen innerhalb der Stapelungsabfolge bietet das Verhältnis zwischen A (und damit assoziiertem Energielevel) und S:

- (1) Während größerskaligen Verflachungs-Halbzyklen nimmt A ab, und damit nimmt automatisch die Ablagerungsenergie zu. Vielleicht waren in den unteren Abschnitten dieser Halbzyklen die Bedingungen für die Karbonatproduktion (Licht, Wassertemperatur, etc.) noch nicht optimal. A war noch groß, und die Energie reichte nicht aus, um Schutt von den Biohermen in die umgebenden Becken zu schütten. Als Folge daraus aggradieren die Bioherme und die Mächtigkeiten der genetischen Sequenzen nehmen zu. Während dieser frühen Aggradationsphase ist das Erhaltungspotential für Schlamm-dominierte Halbzyklen auf den Biohermen am höchsten. In den Becken findet überwiegend eine gleichmäßige, feinkörnige Hintergrundsedimentation statt. Die Zyklen sind daher symmetrisch aufgebaut.
- (2) Während der späteren Phase der größerskaligen Verflachungs-Halbzyklen nimmt A ab, was zu einer Zunahme der Ablagerungsenergie und zu einer Zunahme der Karbonatproduktion (durch verbesserte Bedingung wie z.B. bessere Durchlichtung, höhere Wassertemperatur, etc.) führt. Die Energie erreicht nun einen Level, bei dem signifikante Mengen von Schutt in die benachbarten Becken geschüttet werden. Dadurch nimmt die Mächtigkeiten der genetischen Sequenzen auf den Biohermen ab, während sie in den proximalen Becken zunehmen. In den distalen Becken herrscht weiterhin eine gleichmäßige Hintergrundsedimentation, und die genetischen Sequenzen sind symmetrisch aufgebaut.
- (3) Während größer-skaligen Vertiefungs-Halbzyklen nimmt A wieder zu, während die Energie und die Karbonatproduktion (weniger Durchlichtung, niedrigere Wassertemperaturen, etc.) abnehmen. Anfangs, in den unteren Abschnitten des Vertiefungs-Halbzyklus, ist die Karbonatproduktion allerdings noch hoch, so daß die Mächtigkeiten der genetischen Sequenzen zunehmen (zunehmendes Erhaltungspotential auf den Biohermen). Mit zunehmendem A tendieren die Bioherme zur Aggradation und die Schuttproduktion nimmt ab. Dadurch nimmt die Mächtigkeit der genetischen Sequenzen in den proximalen Becken ab.
- (4) Mit weiter abnehmendem A verschlechtern sich die Bedingungen für die Karbonatproduktion weiter. Die Mächtigkeiten der genetischen Sequenzen in den Biohermen nimmt weiter ab, und die Symmetrie und Mäch-

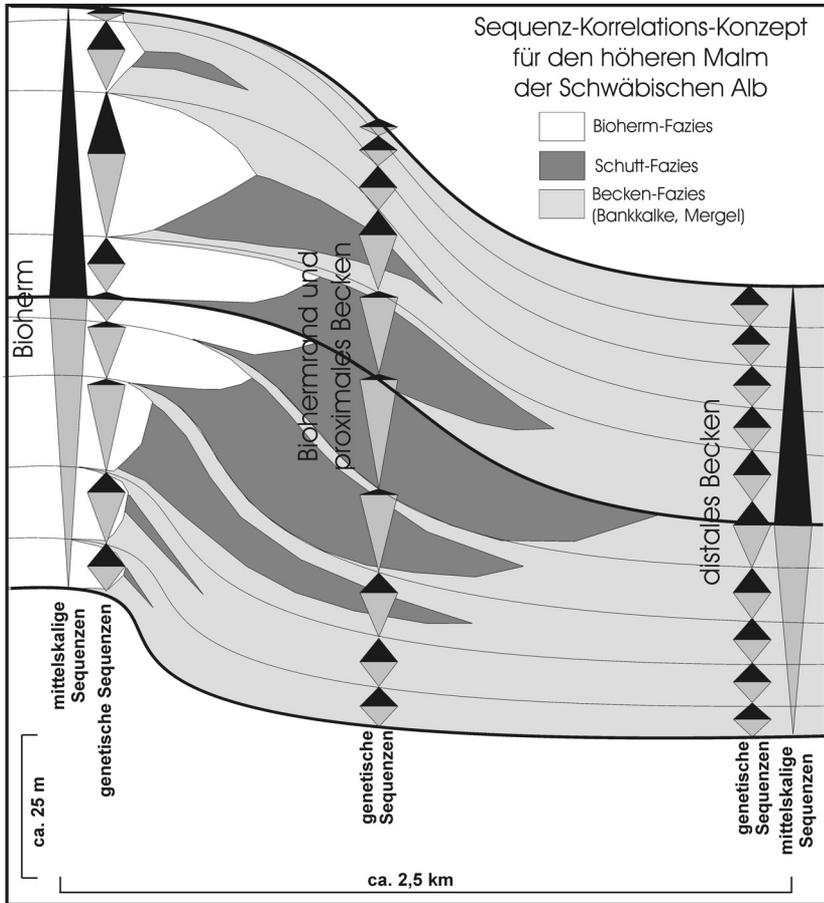


Abb. 23: Schematische Abbildung, die das Korrelationskonzept und die Sedimentvolumen-Verteilung im höheren Oberjura SW-Deutschlands erklärt. Genetische Sequenzen können in allen Fazieszonen identifiziert werden und können dadurch zur Korrelation genutzt werden. Zeitlinien werden durch die Verbindung der „turn-arounds“ generiert. Man beachte die Symmetrie- und Mächtigkeitsveränderungen der genetischen Sequenzen. Während eines übergeordneten abnehmendem A/S-Verhältnis wandert die Hauptakkumulation der Sedimente von den Massenkalken in die proximalen Beckenränder. Während eines übergeordneten zunehmendem A/S-Verhältnisses hingegen zieht sich die Hauptakkumulation der Sedimente wieder auf die Massenkalken zurück. Am maximalen A/S-Verhältnis ist auf den Massenkalken die Karbonatproduktion sehr niedrig und damit erhalten die proximalen Beckenränder keine Schuttlieferungen mehr.

tigkeit in den proximalen Becken nährt sich durch ausbleibende Schuttlieferungen von den Biohermen denjenigen des distalen Beckens an.

- (5) Die distalen Becken bleiben von diesen Ereignissen unbeeinflusst und zeigen durch eine gleichmäßige Hintergrundsedimentation bedingte symmetrische genetische Sequenzen.

7.3. Dauer der Zyklen-Hierarchien

Um die Zeitspanne der verschiedenen Hierarchien abzuschätzen, wurden zwei Wege beschritten:

- (1) Die Zeitspanne der großskaligen Sequenzen wurde mit Hilfe der Zeitskalen von PONSOT u. VAIL (1991a, b) und HARDENBOL et al. (1998) abgeschätzt (Tab. 1). Die großskaligen Sequenzen reichen von der *hypsecyclum*-, *divisium*-, *acanthicum*-, *eudoxus*- bis zur *beckeri*-Zone, was ungefähr einer Zeitspanne von 2,7 Ma (Zeitskala von HARDENBOL et al. 1998) oder 2,8 Ma (Zeitskala von PONSOT u. VAIL 1991a, b) entspricht. Die Dauer der untergeordneten Sequenzen wurde durch Teilung der Anzahl der untergeordneten Zyklen abgeschätzt.

Tab. 1: Schätzung der Zeitspannen der Zyklen-Hierarchien anhand der Anzahl der Sequenzen und den Zeitskalen nach PONSOT u. VAIL (1991 a, b) und HARDENBOL et al. (1998) verglichen mit den tektonisch-eustatischen / eustatischen Sequenzordnungen nach GOLDHAMMER (1991), KERANS u. TINKER (1997).

Zyklen-Hierarchie	Zeitspanne (bestimmt mit Hilfe der Zeitskalen von PONSOT u. VAIL, 1991a, b (1) und HARDENBOL et al. (1998) (2))	Anzahl derjenigen Sequenzen, welche die nächst höhere Hierarchie aufbauen	Zeitspanne (geschätzt anhand der Anzahl der untergeordneten Sequenzen)	Tectonisch-eustatische/ Eustatische Sequenz-Ordungen (nach GOLDHAMMER et al., 1991, KERANS u. TINKER, 1997)
Großskalige Sequenzen	ca. 2,7 Ma ²⁾ – 2,8 Ma ¹⁾	/	/	Dritte Ordnung
Mittelskalige Sequenzen	/	7	ca. 0,39 – 0,4 Ma	Vierte Ordnung
Genetische Sequenzen	/	4	ca. 0,1 Ma	Fünfte Ordnung

- (2) Die Zeitspanne wurde mit Hilfe der Wachstumsraten von Biohermen abgeschätzt (Tab. 2). Diese Schätzung erscheint durch die frühe Lithifikation (wodurch eine Kompaktion verhindert wurde, z. B. GWINNER 1976, DIMKE 1997) der Bioherme zulässig. SCHMID (1996) berechnete für thrombolithische Riffe aus dem Oberjura eine Wachstumsrate von 60–70 mm/1000 a. Mit dieser Rate kann man die Hierarchien der Se-

Tab. 2: Schätzung der Zeitspanne der Zyklen-Hierarchien anhand der Wachstumsraten der Biohermen. Das Ergebnis stimmt gut mit den Zeitspannen überein, die aus den Zeitskalen von PONSOT u. VAIL (1991a, b) und HARDENBOL et al. (1998) ermittelt wurden.

Zyklen-Hierarchie	Durchschnittliche Mächtigkeiten der Sequenzen	Geschätzt anhand der Wachstumsraten von Biohermen (70 B)	Geschätzt anhand der Zeitskalen von PONSOT u. VAIL (1991a, b) und HARDENBOL et al. (1998)
Mittelskalige Sequenzen	30 – 40 m	0,4 – 0,6 Ma	ca. 0,39 – 0,4 Ma
Genetische Sequenzen	5 – 15 m	0,07 – 0,2 Ma	ca. 0,1 Ma

sequenzen abschätzen (Mächtigkeit/Wachstumsrate). Die Ergebnisse stimmen gut mit den Zeitspannen überein, die aus den Zeitskalen ermittelt wurden, zeigen sich aber insgesamt variabler. Der Hintergrund hierfür liegt zum einen darin, daß der Schuttexport in die Becken nicht berücksichtigt wurde. Zum anderen wurde die Wachstumsrate v.a. für Thrombolithe ermittelt. Wie aber oben gezeigt wurde, bestehen ein Teil der Bioherme aus Stromatolithe, die meist eine deutlich höhere Wachstumsrate haben (bis 14.000 mm/1000 a, z.B. KRUMBEIN u. COHEN 1977, LANIER 1986). Berücksichtigt man dies, wurde die Dauer der Zyklen mit einem hohen Anteil an Stromatolithe als zu hoch eingeschätzt. Und schließlich wurde Drucklösung, die durch Stylolithe dokumentiert werden, in den Schätzungen nicht berücksichtigt.

Mittelskalige Zyklen werden meist aus vier genetischen Sequenzen aufgebaut. Dieses ständig auftretende 1:4 Verhältnis läßt eine allozyklische Natur dieser Zyklen vermuten. Stimmen die oben durchgeführten groben Abschätzungen, so könnten die mittelskaligen Sequenzen die 400.000 Jahre und die genetischen Sequenzen die 100.000 Jahre MILANKOVITCH-Zyklen darstellen.

7.4. 2D-Korrelationen

Innerhalb einzelner Faziesgürtel z.B. innerhalb der Beckenfazies ist die Korrelation unkompliziert und oft allein mit Hilfe der Gamma-Ray Logs möglich (Abb. 24, subregionale Korrelation). Eine hochauflösende Korrelation zwischen unterschiedlichen Faziesgürtel war bislang kompliziert. In dieser Studie gelangen jedoch Korrelationen genetischer Sequenzen und ihrer Stapelungen zwischen einzelnen Bohrungen in unterschiedlichen paläogeographischen Positionen (z.B. Bioherme, proximale Becken mit Biohermschutt, distale Becken, Abb. 22). Genetische Sequenzen sind unabhängig von der lokalen Fazies und über das gesamte Ablagerungsprofil zu erkennen, und bilden damit ideale Korrelationseinheiten. Zeitlinien werden durch die

Gamma-ray-Korrelation

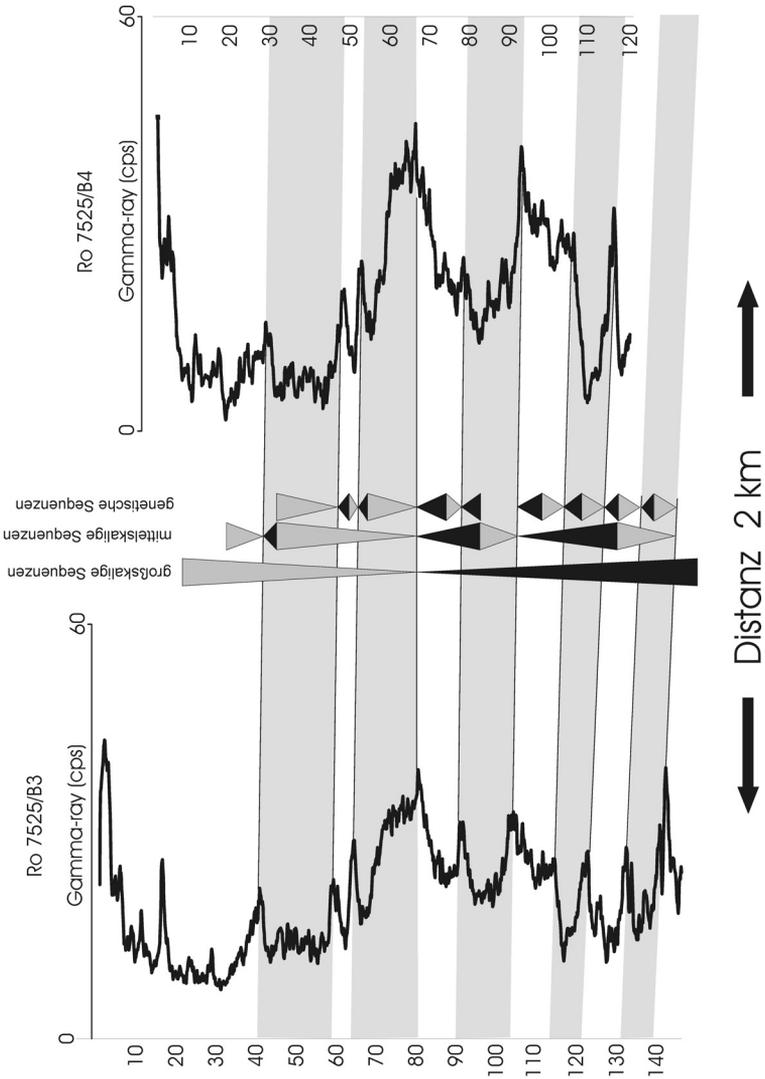


Abb. 24: Beispiel einer subregionalen Korrelation zwischen zwei Gamma-Ray Logs in Beckenfazies mit einer Distanz von 2 km (Bohrung Ro 7525/B3 and Ro 7525/B4).

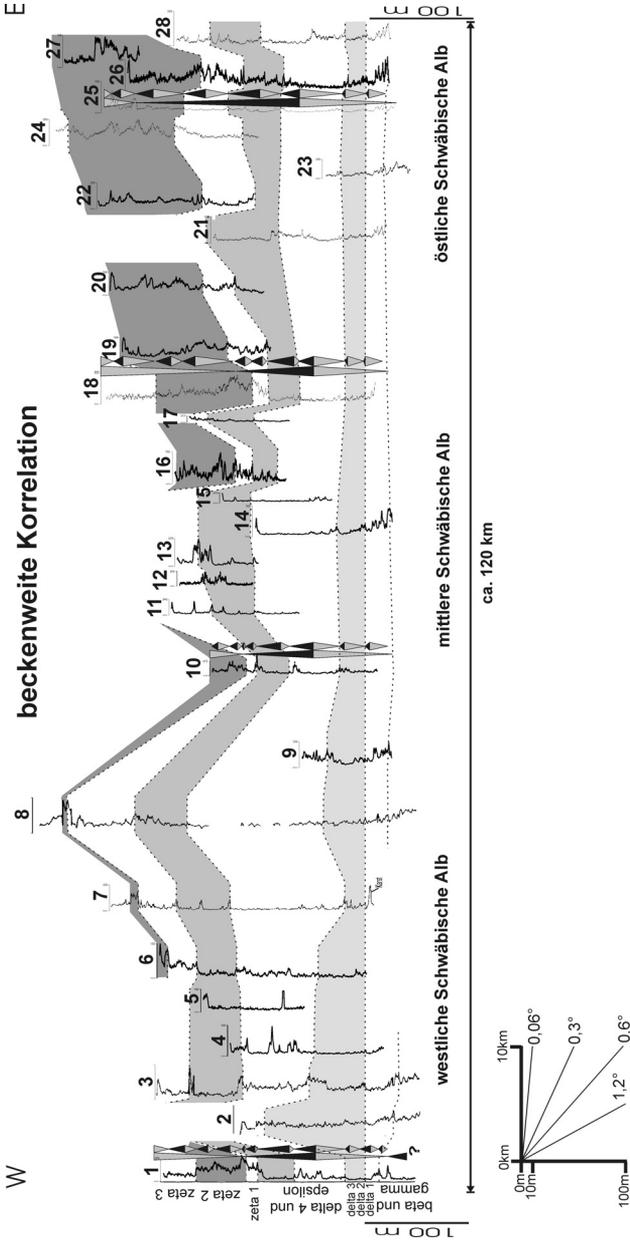


Abb. 25: W-E-Profil durch die Schwäbische Alb basierend auf der Verbindung der „turnarounds“. Depo-Zentren können beobachtet werden, die vom Malm δ bis in den Malm ζ hinein von W nach E migrieren. Die Architektur der Beckenfüllung stellt damit eine sehr flache, aber dennoch wahrnehmbare Progradation nach E dar (1: Ro 7920/B1; 2: Gutenstein 1; 3: Unterschmeien 3; 4: Ro 7820/B1; 5: Ro 7821/B1; 6: Ro 7821/B2; 7: Saulgau TB3; 8: Upflamör 1; 9: Ro 7621/B2; 10: Ro 7623/B4; 11: Ro 7624/B1; 12: Ro 7624/B2; 13: Gerhausen; 14: B 423; 15: Ro 7524/B1; 16: Ro 7525/B2; 17: Ro 7525/B1; 18: Neu-Ulm; 19: Ro 7525/B3; 20: Ro 7426/B1; 21: Steinheim-Stubental; 22: Ro 7326/B1; 23: Burgberg; 24: Heerstraße 2; 25: Mergelstetten P1; 26: Mergelstetten P5; 27: Mergelstetten K24; 28: Höllental).

Verbindung der „turnarounds“ zwischen den einzelnen Bohrungen generiert. Für eine regionale Korrelation wurden sowohl die genetischen als auch die mittelskaligen Sequenzen verwendet.

7.3. Stratigraphische Architektur

Normalerweise wird der Oberjura der Schwäbischen Alb als eine epikontinentale Abfolge mit einer „Schichtkuchen“-Stratigraphie angesehen (z.B. GWINNER 1976, MEYER u. SCHMIDT-KALER 1989, 1990). In dieser Studie wurden stratigraphische Profile (Abb. 25) auf der Basis zahlreicher Bohrungen erstellt. Diese zeigen, daß die Architektur der Beckenfüllung nicht den oben erwähnten einfachen Vorstellungen entspricht: Depo-Zentren können beobachtet werden, die durch die Zeit von W nach E wandern. Im Malm δ_{1-3} befand sich das Depo-Zentrum auf der westlichen Schwäbischen Alb. Im Malm δ_4 und unteren Malm ϵ wandert das Depo-Zentrum nach E und erreicht im oberen Malm ϵ und Malm ζ schließlich die östliche Schwäbische Alb. Diese stratigraphische Architektur zeigt eindeutig eine allgemeine Progradation von W nach E mit sehr flach nach E einfallende Klinoformen ($0,06-0,6^\circ$).

8. Ergebnisse

- (1) Der Oberjura der Schwäbische Alb stellt ein epikontinentales Karbonatsystem dar. Insgesamt lassen sich 18 Faziestypen unterscheiden, die sich in 6 Makrofazies-Klassen einteilen lassen. Die Faziesabfolgen zeigen typische Gamma-Ray Signaturen.
- (2) Die Makrofazies-Klassen bilden 3 Faziesassoziationen mit charakteristischen „geobodies“: (1) linsenförmige, konische, kissenförmige oder schild- bis domähnliche Bioherme, (2) keilförmige Schuttkörper und (3) Beckenfüllungen, die den Raum zwischen den Biohermen ausfüllen.
- (3) Das Faziesmodell für den Oberjura der Schwäbischen Alb zeigt einen tieferen Abschnitt einer Karbonatrampe. Entlang dieser Rampe lassen sich die 6 Faziesgürtel erkennen: (1) distales Becken, (2) proximales Becken, (3) Biohermränder, (4) Bioherme mit überwiegend Kiesel-schwämmen und Thrombolithen, (5) Bioherme mit überwiegend Stromatolithen und (6) Partikelkalke.
- (4) Die detaillierte Bohrkern- und Aufschluß-Aufnahmen zeigten bislang unbekannte sedimentäre Zyklen verschiedener Hierarchien. Diese können in zwei Halbzyklen aufgeteilt werden: Ein Halbzyklus zeigt eine Zunahme der hydrodynamischen Energie und einen Verflachungstrend, der andere zeigt eine Abnahme der hydrodynamischen Energie und einen Vertiefungstrend.
- (5) Die fundamentalen stratigraphischen Baueinheiten werden in dieser Studie als „genetische Sequenzen“ bezeichnet. Sie werden als Veränderungen des A/S-Verhältnisses interpretiert. Der untere Halbzyklus kann als Zeit mit abnehmendem Akkomodationsraum bzw. möglicher zunehmender Sedimentproduktion ($A/S < 1$, Verflachungs-Halbzyklus)

angesehen werden. Der obere Halbzyklus dagegen entspricht einer Zeit mit zunehmendem Akkomodationsraum bzw. möglichen abnehmender Sedimentproduktion ($A/S > 1$, Vertiefungs-Halbzyklus). Der Verflachungs-/Vertiefungs-“turnaround“ befindet sich in dem Abschnitt mit der höchsten Energie und am Top der flachsten Fazies. Der Vertiefungs-/Verflachungs-“turnaround“ hingegen befindet sich im Abschnitt mit der niedrigsten Energie und am Top der tiefsten Fazies.

- (6) Ein Stapel von genetischen Sequenzen bauen mittelskalige und großskalige Sequenzen auf. Normalerweise bilden 4 genetische Sequenzen eine mittelskalige Sequenz, die vielleicht 100.000 und 400.000 MILANKOVITCH-Signale repräsentieren.
- (7) Die Schwamm-Mikrobenkrusten-Bioherme des SW-deutschen Oberjura sind nicht homogen, sondern sind systematisch aus Zyklen unterschiedlicher Hierarchien aufgebaut. Die gefundenen kleinstskaligen Sequenzen überliefern wahrscheinlich episodische Sturmereignisse.
- (8) Das Gamma-Ray Log ist ein nützliches Hilfsmittel bei der Identifizierung der vertikalen Faziesabfolgen, Zyklen und Zyklen-Hierarchien. Vertiefungs-Halbzyklen zeigen eine Zunahme der Impulsrate während Verflachungs-Halbzyklen durch eine Abnahme der Impulsrate gekennzeichnet sind. Verkarstete, dolomitisierte und dedolomitisierte Abschnitte verändern den Log-Charakter nachhaltig.
- (9) Basierend auf der Zyklen-Architektur und dem Gamma-Ray war es möglich, Bohrungen zwischen verschiedenen paläogeographischen Positionen (z. B. Bioherme, proximale und distale Becken) zu korrelieren. Zeitlinien wurden durch die Verbindung der „turnarounds“ generiert.
- (10) Regionale stratigraphische Profile zeigen, im Gegensatz zu der bislang angenommenen „Schichtkuchen“-Stratigraphie, Depo-Zentren, die durch den höheren Oberjura der Schwäbischen Alb von W nach E wandern (Progradation mit sehr flach nach E einfallenden Winkeln).

Dank

Besonders möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. AIGNER für die sehr gute Betreuung dieser Studie und für die fruchtbare Zusammenarbeit sehr herzlich bedanken. Die insgesamt etwas mehr als drei Jahre in Tübingen haben mir sehr gut gefallen und waren für mich sehr lehrreich. Herzlichen Dank an das LGRB Baden-Württemberg (besonders an Dipl.-Geol. B. KIMMIG, Dr. W. WERNER, Dr. W. SCHLOZ, Dr. M. FRANZ), an die Fa. Schwenk AG, der Deutschen Bahn AG und an das Bauamt der Stadt Ulm für die Bereitstellung der Bohrkerne und der Gamma-Ray Logs. Außerdem möchte ich mich bei den zahlreichen Steinbruchfirmen (KWV Jurasteinwerke, Fa. Teufel, Fa. Baur, Fa. Gbr. Leibfritz, SWS Steinwerke, Heidelberger Zement AG, Fa. Schneider, Fa. Wager, Fa. Grötzinger, Fa. Siegling, Fa. Schön u. Hippelein, Fa. Schneider, Fa. Rösch Konrad Söhne GmbH u. Co. KG, Fa. Ulmer Weiß, Fa. Merkle, Fa. Schwenk AG, Fa. Heinz Schotterwerke GmbH u. Co., Fa. Moeck KG) für die Möglichkeit in ihren Steinbrüchen zu arbeiten bedanken. Dank auch an Dr. A. GÖTZ (Darmstadt) für die Analyse der palynologischen Proben und an Dipl.-Geol. M. RUF (Tübingen) für die Herstellung der Peels. Der DFG (Deutsche Forschungsgemeinschaft) sei für die finanzielle Unterstützung des Projektes gedankt. Schließlich möchte ich mich noch bei der Gesellschaft für Naturkunde in Baden-Württemberg für die Verleihung des

Walter-Schall-Preises und für die Möglichkeit, dieses Paper zu veröffentlichen besonders bedanken.

Literatur

- AIGNER, T. (1985): Storm depositional Systems. – *Lecture Notes in Earth Science*, 3: 1–174. Berlin.
- AIGNER, T., J. HEINZ, J. HORNING u. U. ASPRION (1999): A hierarchical process-approach to reservoir heterogeneity: Examples from outcrop analogues. – *Bulletin des Centres de Recherches Exploration-Production Elf-Aquitaine*, 22: 1–11. Pau.
- AIGNER, T. u. M. SCHAUER (1998): Exploration for Industrial Minerals and Rocks Using „Dynamic Stratigraphy“: Example Ultra-Pure Limestones. – *Zeitschrift für angewandte Geologie*, 44/3: 159–163. Stuttgart.
- AITKEN, M. (1967): Classification and environmental significance of cryptalgal limestones and dolomites, with illustrations from the Cambrian and Ordovician of Southwestern Alberta. – *Journal of Sedimentary Petrology*, 37: 1163–1178. Tulsa.
- BUSCH, D.A. (1971): Genetic units in delta prospecting. – *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 55: 1137–1154. Tulsa.
- CROSS, T.A., M.R. BAKER, M.S. CHAPIN, M.S. CLARK, M.H. GARDNER, M.S. HANSON, M.A. LESSENGER, L.D. LITTLE, K.J. McDONOUGH, M.D. SONNENFELD, D.W. VALASEK, M.R. WILLIAMS u. D.N. WITTER (1993): Applications of high-resolution sequence stratigraphy to reservoir analysis. – *Edition Technip*, 1993: 11–33. Paris.
- CROSS, T.A. u. M.A. LESSENGER (1998): Sediment volume partitioning: rationale, stratigraphic model evaluation and high resolution stratigraphic correlation. – *Norwegian Petroleum Society Special Publication*, 8: 171–195. Amsterdam.
- DEFRAGE, C., J. TRICHET u. A. COUTE (1994): On the appearance of cyanobacterial calcification in modern stromatolites. – *Sedimentary Geology*, 94: 11–19. Amsterdam.
- DIETL, G. u. G. SCHWEIGERT (1999): Nusplinger Plattenkalk – Eine tropische Lagune der Jura-Zeit. – *Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde, Serie C*, 45: 1–62. Stuttgart.
- DIMKE, M. (1997): Fazies und Diagenese der „Tithon-Massenkalke“ und „Hangenden Bankkalke“ südöstlich von Tuttingen auf Blatt Neuhausen ob Eck (8019), nebst einigen angewandten Aspekten ihrer Nutzung als Rohstoff (Farbe, Brech- und Mahlverhalten). – 117 S. (unveröffentlichte Dissertation). Erlangen.
- DROMART, G., C. GAILLARD u. L.F. JANSÁ (1994): Deep-marine microbial structures in the Upper Jurassic of Western Tethys. In: BERTRAND-SARFATI, J. u. C.L.V. MONTY (Eds.): *Phanerozoic stromatolites II*: 295–318. Dordrecht.
- FELDMANN, M. u. J.A. MCKENZIE (1997): Messinian stromatolite – thrombolite associations, Santa Pola, SE Spain: an analogue for the Palaeozoic?. – *Sedimentology*, 44/5: 893–914. Oxford.
- FELDMANN, M. u. J.A. MCKENZIE (1998): Stromatolite – thrombolite associations in a modern environment, Lee Stocking Island, Bahamas. – *Palaios*, 13: 201–212. Tulsa.
- FRAZIER, D.E. (1974): Depositional episodes: their relationship to the Quaternary stratigraphic framework in the northwestern portion of the Gulf Basin. – *University of Texas, Austin, Bureau of Economic Geology Geological Circular*: 71–1. Austin.
- FRITZ, G.K. (1958): Schwammstotzen, Tuberolithe und Schuttbreccien im Weißen Jura der Schwäbischen Alb. Eine vergleichende petrogenetische Untersuchung. – *Arbeiten des geologisch-paläontologischen Institut der TH Stuttgart, Neue Folge* 13: 1–119. Stuttgart.
- GALLOWAY, W.E. (1989): Genetic stratigraphic sequences in basin analysis I: archi-

- ecture and genesis of flooding-surface bounded depositional units. – American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 73: 125–142. Tulsa.
- GALLOWAY, W.E. u. D.K. HOBDAY (1996): Terrigenous Clastic Depositional Systems. 489 S.; Berlin (Verlag Springer).
- GEYER, O.F. u. M.P. GWINNER (1979): Die Schwäbische Alb und ihr Vorland. Sammlung geologischer Führer, 67: 271 S.; Stuttgart (Verlag Schweizerbart).
- GOLDHAMMER, R.K., E.J. OSWALD u. P.A. DUNN (1991): Hierarchy of stratigraphic forcing: Example from Middle Pennsylvanian shelf carbonates of the Paradox Basin. In: FRANSEEN, E.K. et al. (Eds.): Sedimentary Modeling: Computer Simulations and Methods for Improved Parameter Definition. – Kansas Geological Survey Bulletin, 233: 361–413. Lawrence.
- GOLUBIC, S. (1976): Organisms that build stromatolites. In: Walter, M.R. (Ed.), Stromatolites. – Developments in Sedimentology, 20: 113–126. Amsterdam.
- GOLUBIC, S. u. A.H. KNOLL (1993): Prokaryotes. In: LIPPS, J.H. (Ed.): Fossil Prokaryotes and Protists: 51–76. Boston.
- GWINNER, M.P. (1958): Schwammänke, Riffe und submarines Relief im oberen weißen Jura der Schwäbischen Alb. – Geologische Rundschau, 47/1: 402–418. Stuttgart.
- GWINNER, M.P. (1961): Subaquatische Gleitungen und resedimentierte Breccien im Weißen Jura der Schwäbischen Alb (Württemberg). – Zeitschrift der deutschen Geologischen Gesellschaft, 113: 571–590. Hannover.
- GWINNER, M.P. (1976): Origin of the Upper Jurassic of the Swabian Alb. – Contribution in Sedimentology, 5: 1–75. Stuttgart.
- HANTZPERGUE, P., F. BAUDIN, V. MITTA, A. OLFERIEV u. V. ZAKHAROV (1998): The Upper Jurassic of the Volga basin: ammonite biostratigraphy and occurrence of organic-carbon rich facies. Correlations between boreal-subboreal and submediterranean provinces. – Memoires Museum Natn. Histoire Naturelle, 179: 9–33. Paris.
- HARDENBOL, J., J. THIERRY, M.B. FARLEY, T. JACQUIN, P.C. DE GARCIANSKY u. P.R. VAIL (1998): Mesozoic and Cenozoic Sequence Stratigraphic Framework of European Basins. – In: DE GARCIANSKY, P.C. et al. (Eds.): Mesozoic and Cenozoic Sequence Stratigraphy of European Basins, Society for Sedimentary Geology, Special Publication 60. Tulsa.
- HERRMANN, R. (1996): Entwicklung einer oberjurassischen Karbonatplattform: Biofazies, Riffe und Sedimentologie im Oxfordium der Zentralen Dobrogea (Ost-Rumänien). – Berliner geowissenschaftliche Abhandlungen E19: 1–101. Berlin.
- HILLER, K. (1964): Über die Bank- und Schwammfazies des Weißen Jura der Schwäbischen Alb (Württemberg). – Arbeiten des geologisch-paläontologischen Institut der TH Stuttgart, Neue Folge 40: 1–190. Stuttgart.
- HOMEWOOD, P. u. G.P. EBERLI (2000): Genetic stratigraphy on the exploration and production scales. Elf Exploration and Production Memoir, 24: 290 S. Pau.
- HOMEWOOD, P., F. GUILLOCHEAU, R. ESCHARD u. T.A. CROSS (1992): Correlations haute resolution et stratigraphie genetique: une demarche integree. – Bulletin des Centres de Recherches Exploration-Production Elf-Aquitaine, 16: 357–381. Pau.
- HOMEWOOD, P., P. MAURIAUD u. F. LAFONT (2000): Best Practices in Sequence Stratigraphy. – Elf Exploration and Production Memoir, 25: 81 S. Pau.
- JONES, B. u. I.G. HUNTER (1991): Corals to rhodolites to microbialites – a community replacement sequence indicative of regressive conditions. – Palaios, 6: 54–66. Tulsa.
- KALKOWSKY, A. (1908): Oolith und Stromatolith im norddeutschen Buntsandstein. – Zeitschrift der deutschen Geologischen Gesellschaft, 60: 68–125. Hannover.
- KERANS, C. u. S. TINKER (1997): Sequence Stratigraphy and Characterization of Car-

- bonate Reservoirs. – Society for Sedimentary Geology, Short Course 40: 130 S. Tulsa.
- KEUPP, H., H. BRUGGER, U. GALLING, J. HEFTER, R. HERRMANN, A. JENISCH, S. KEMPE, W. MICHAELIS, R. SEIFERT u. V. THIEL (1996): Paleobiological Controls of Jurassic Spongiolites. – Göttinger Arbeiten zur Geologie und Paläontologie, Sonderband 2: 209–214. Göttingen.
- KEUPP, H., A. JENISCH, R. HERRMANN, F. NEUWEILER u. J. REITNER (1993): Microbial Carbonate Crusts – a key to the Environmental Analysis of Fossil Spongiolites?. – Facies, 29: 41–54. Erlangen.
- KRAUTTER, M. (1995): Kieselschwämme als potentielle Indikatoren für Sedimentationsrate und Nährstoffangebot am Beispiel der Oxford-Schwammkalke von Spanien. – Profil, 8: 282–304. Stuttgart.
- KRAUTTER, M. (1997): Aspekte zur Paläoökologie postpaläozoischer Kieselschwämme. – Profil, 11: 199–324. Stuttgart.
- KRUMBEIN, W.E. u. Y. COHEN (1977): Primary production, mat formation and lithification: Contribution of oxygenic and facultative anoxygenic cyanobacteria. In: FÜGEL, E. (Ed.): Fossil algae: 37–56; Berlin (Springer).
- LANIER, W.P. (1986): Approximate growth rates of Early Proterozoic Microstromatolites as deduced by biomass productivity. – Palaios, 1: 525–542. Tulsa.
- LEINFELDER, R.R. (1993): Upper Jurassic reef types and controlling factors – A preliminary report. – Profil, 5: 1–45. Stuttgart.
- LEINFELDER, R.R. (1994): Karbonatplattformen und Korallenriffe innerhalb siliziklastischer Sedimentationsbereiche (Oberjura, Lusitanisches Becken, Portugal). – Profil, 6: 1–207. Stuttgart.
- LEINFELDER, R.R., M. KRAUTTER, R. LATERNER, M. NOSE, D.U. SCHMID, G. SCHWEIGERT, W. WERNER, H. KEUPP, H. BRUGGER, R. HERMMANN, U. REHFELD-KIEFER, J.H. SCHROEDER, C. REINHOLD, R. KOCH, A. ZEISS, V. SCHWEIZER, H. CHRISTMANN, G. MENGES u. H. LUTERBACHER (1994): The Origin of Jurassic Reefs: Current Research Developments and Results. – Facies, 31: 1–56. Erlangen.
- LEINFELDER, R.R., M. NOSE, D.U. SCHMID u. W. WERNER (1993): Microbial crusts of the Late Jurassic: Composition, palaeoecological significance and importance in reef construction. – Facies, 29: 195–230. Erlangen.
- LEINFELDER, R.R., W. WERNER, M. NOSE., D.U. SCHMID, M. KRAUTTER, R. LATERNER, M. TAKACS u. D. HARTMANN (1996): Paleoecology, Growth Parameters and Dynamics of Coral, Sponge and Microbolite Reefs from the Late Jurassic. – Göttinger Arbeiten zur Geologie und Paläontologie, Sonderband 2: 227–248. Göttingen.
- MEYER, R.K.F. u. H. SCHMIDT-KALER (1989): Paläogeographischer Atlas des süddeutschen Oberjura (Malm). – Geologisches Jahrbuch, A/115: 3–77. Hannover.
- MEYER, R.K.F. u. H. SCHMIDT-KALER (1990): Paläogeographie und Schwammriffentwicklung des süddeutschen Malm – ein Überblick. – Facies, 23: 175–184. Erlangen.
- PAWELLEK, T. (2001): Fazies-, Sequenz-, und Gamma-Ray-Analyse im höheren Malm der Schwäbischen Alb (SW-Deutschland) mit Bemerkungen zur Rohstoffgeologie (hochreine Kalke). – Tübinger Geologische Arbeiten, Reihe A 61: 1–246. Tübingen.
- PAWELLEK, T. u. T. AIGNER (2002): Fazies, Petrophysik und Rohstoffeigenschaften von Karbonatgesteinen des Schwäbischen Oberjura – ein Atlas. – Jahresbericht und Mitteilungen des oberrheinischen Geologischen Vereins, Neue Folge 84: 257–321. Stuttgart.
- PAWELLEK, T. u. T. AIGNER (2003a): Apparently homogenous „reef“-limestones built by high-frequency cycles: Upper Jurassic, SW-Germany. – Sedimentary Geology 160: 259–284. Amsterdam.

- PAWELLEK, T. u. T. AIGNER (2003b): Stratigraphic Architecture and Gamma-Ray-Logs of deeper ramp carbonates (Upper Jurassic, SW-Germany). – *Sedimentary Geology* 159: 203–240. Amsterdam.
- PONSOT, C.M. u. P.R. VAIL (1991a): Sequence stratigraphy of the Jurassic: New data from the Paris-London Basin. – *EUG VI-Congress, Terra Cognita*, 28: 48. Oxford.
- PONSOT, C.M. u. P.R. VAIL (1991b): Sequence stratigraphy of the Jurassic: New data from the Paris – London Basin compiled from well logs. – *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 75: 655. Tulsa.
- QUENSTEDT, F.A. (1858): *Der Jura*. 842 S.; Tübingen (Verlag Laupp).
- REHFELD, U. (1996): Mediating and Limitating Processes During the Development of Spongiolitic Bioconstructions in Jurassic and Cretaceous Strata – A Paleontological, Facial and Geochemical Analysis. – *Göttinger Arbeiten zur Geologie und Paläontologie, Sonderband 2*: 249–258. Göttingen.
- REITNER, J., G. WÖRHEIDE, V. THIEL u. P. GAUTRET (1996): Reef Caves and Cryptic Habitats of Indo-Pacific Reefs – Distribution Patterns of Coralline Sponges and Microbialites. – *Göttinger Arbeiten zur Geologie und Paläontologie, Sonderband 2*: 91–100. Göttingen.
- SCHLAGER, W. (1993): Accommodation and supply – a dual control on stratigraphic sequences. – *Sedimentary Geology*, 86: 111–136. Amsterdam.
- SCHMID, D.U. (1996): Marine Mikrobolithe und Mikroinkrustierer aus dem Oberjura. – *Profil*, 9: 101–251. Stuttgart.
- SONNENFELD, M.D. (1996): Sequence Evolution and Hierarchy within the Lower Mississippian Madison Limestone of Wyoming. In: LONGMAN, M.W. u. SONNENFELD, M.D. (1996): *Paleozoic Systems of the Rocky Mountain Section*. Society for Sedimentary Geology, 165–192. Tulsa.
- SPRACHTA, S., G. CAMOIN, S. GOLUBIC u. T. LE CAMPION (2001): Microbialites in a modern lagoonal environment: nature and distribution, Tikehau atoll (French Polynesia). – *Palaeogeography Palaeoecology Palaeoclimatology*, 175: 103–124. Amsterdam.
- TAYLOR, P.D. u. T.J. PALMER (1994): Submarine caves in a Jurassic reef (La Rochelle, France) and the evolution of cave biotas. – *Naturwissenschaften*, 81: 357–360. Berlin.
- TEDESCO, L.P. u. H.R. WANLESS (1991): Generation of Sedimentary Fabrics and Facies by Repetitive Excavation and Storm Infilling of Burrow Networks, Holocene of South Florida and Caicos Platform, B.W.I.. – *Palaios*, 6: 326–343. Tulsa.
- VAN WAGONER, J.C., H.W. POSAMENTIER, R.M. MITCHUM, P.R. VAIL, J.F. SARD, T.S. LOUITT u. J. HARDENBOL (1988): An overview of fundamentals of sequence stratigraphy and key definitions. In: WILGUS, C.K. et al. (Eds.): *Sea-level changes: an integrated approach*. – Society for Sedimentary Geology, Special Publication 42: 39–45. Tulsa.
- VILLINGER, E. u. E. FLECK (1995): *Symbolschlüssel Geologie (Teil 1) und Bodenkunde Baden – Württemberg*. – Informationen des geologischen Landesamt Baden-Württemberg, 5: 68 S. Freiburg i. Br.
- WANLESS, H.R., D.J. COTTRELL, M.G. TAGETT, L.P. TEDESCO u. E.R. WARZESKI (1995): Origin and growth of carbonate banks in south Florida. In: MONTY et al. (Eds.): *Carbonate Mud Mounds*. – International Association of Sedimentologists, Special Publication 23: 439–473. Oxford.
- WANLESS, H.R., L.P. TEDESCO u. K.M. TYRELL (1988): Production of subtidal tubular and surficial tempestites by Hurricane Kate, Caicos Platform, British West Indies. – *Journal of Sedimentary Petrology*, 58/4: 739–750. Tulsa.
- WENDT, J. (1980): Sponge reefs of the German Upper Jurassic. In: HARTMANN, W.D. et al. (Eds.): *Living and fossil Sponges*. – *Sedimenta*, 8: 122–130. Miami.

WHEELER, H.E. (1964): Baselevel, Lithosphere Surface, and Time Stratigraphy. – Geological Society of America Bulletin, 75: 599–610. Boulder.

Ziegler, B. (1977): The „White“ (Upper) Jurassic in Southern Germany. – Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde, Serie B 26: 1–79. Stuttgart.

Anschrift des Verfassers:

Dr. THOMAS PAWELLEK, Institut für Geowissenschaften, Sigwartstr. 10, Universität Tübingen, D-72076 Tübingen

Neue Adresse: RWE Dea AG, Überseering 40, 22297 Hamburg