

Schwankende Umweltbedingungen des südwestdeutschen Oberjura dokumentiert in Kalk-Mergel-Wechselfolgen

AXEL MUNNECKE und HILDEGARD WESTPHAL, Erlangen

KURZFASSUNG

Die Entstehung von Kalk-Mergel-Wechselfolgen, wie man sie so auffallend im Oberjura („Malm“) von Südwestdeutschland findet, ist ein seit langem diskutiertes, jedoch immer noch kontroverses Thema. Sowohl die Entstehung des rhythmischen Wechsels von Kalken und Mergeln (die sog. „Couplets“), als auch die großmaßstäblichen Trends von mehr kalkigen und mehr mergeligen Abschnitten der Oberjura-Abfolge (Impressamergel-, Wohlgebankte Kalke- und Lacunosamergel-Formationen) wurde in zahlreichen Arbeiten thematisiert. Dagegen hat die Entstehung der Variabilität mittleren Maßstabes, d. h. von im Meterbereich wechselnden Kalk- und Mergel-dominierten Bereichen („Bündel“), bislang deutlich weniger Beachtung gefunden. Auf diesen mittleren Maßstab konzentrieren wir uns hier.

Ein Grundproblem bei der Entzifferung von Umweltinformation in Karbonatabfolgen ist in der Regel eine starke diagenetische Überprägung, die insbesondere von der Umwandlung metastabiler Karbonatphasen (z. B. Aragonit) in diagenetisch stabile (Calcit) herrührt. Dadurch wird unter anderem ein Verlust der Information über die ursprüngliche Mineralogie verursacht. Gerade in der mineralogischen Zusammensetzung der Ausgangssedimente, und insbesondere im primären Aragonitgehalt spiegeln sich jedoch die Umweltbedingungen zur Zeit der Ablagerung wider.

In der vorliegenden Arbeit stellen wir eine Methode vor, mit der die Ausgangsmineralogie rekonstruiert werden kann, und diskutieren die Paläoumwelt-Information, die in den Bündeln überliefert ist. Dazu bedienen wir uns eines neuen, von uns entwickelten Modells zur Rekonstruktion der primären mineralogischen Zusammensetzung solcher Abfolgen am Beispiel des Oberjura von SW-Deutschland (Steinbruch Neuffen). Mit diesem Ansatz werden Schwankungen des Eintrags von Karbonatmaterial aus angrenzenden flachmarinen Plattformen sichtbar, die bislang unbekannt waren, und die sich als Änderungen der biogenen Karbonat-Produktivität interpretieren lassen. Dadurch kann das Bild der schwankenden Umweltbedingungen im süddeutschen Jurameer zur Zeit der Ablagerung der Impressamergel-, Wohlgebankte Kalke- und Lacunosamergel-Formationen rekonstruiert werden.

ABSTRACT

The genesis of limestone-marl alternations such as those present in Upper Jurassic successions of SW Germany has a long history of controversial discussion. The origin of the rhythmic alternation of limestone beds and marl interlayers, the so-called couplets, has been addressed in numerous studies, and similarly the large-scale trends of limestone-dominated and marl-dominated intervals of

the Upper Jurassic (Impressamergel, Wohlgebankte Kalke, and Lacunosamergel Formations) have been thoroughly studied. The intermediate scale, in contrast, the so-called bundles, has received markedly less attention. Here we focus on this intermediate scale.

A general problem with deciphering of paleoenvironmental information recorded in calcareous successions is the usually pronounced diagenetic overprint that particularly affects mineralogically metastable primary constituents. Primary aragonite, for example, typically is transformed into diagenetically stable calcite. The mineralogical composition of the precursor sediment and the primary aragonite content in particular, however, reflect the environmental conditions under which the sediment was formed.

Reconstructing the primary mineralogy therefore would yield valuable information on the palaeo-environment. For this task we employ a new model that allows for assessing the mineralogical composition of the precursor sediment, and apply this model to the example of SW Germany (Neuffen quarry). With this approach, variations of influx of shallow-water carbonate platform sediment into the depositional basin become visible, and are interpreted as fluctuations in biogenic carbonate productivity. Thus, new insight is gained into the fluctuating environmental conditions in the Jurassic Sea of SW Germany during the time of deposition of the Impressamergel, Wohlgebankte Kalke, and Lacunosamergel Formations.

Key words: limestone-marl alternations, diagenesis, Upper Jurassic, Southwest Germany, Milankovitch, aragonite, bundles.

EINLEITUNG

Kalk-Mergel-Wechselfolgen sind im gesamten Phanerozoikum in verschiedenen Faziesbereichen weit verbreitet und stellen ein typisches fossiles Schelfsediment dar (EINSELE et al. 1991). Ein im württembergischen Raum bekanntes Beispiel sind die Abfolgen des oberen Jura. Kalk-Mergel-Wechselfolgen sind im Gelände leicht an der unterschiedlichen Verwitterung von Kalken und Mergeln zu erkennen. Viele Abfolgen zeigen darüber hinaus eine übergeordnete Rhythmik, die sich in einem Wechsel Kalk-dominiertes und Mergel-dominiertes Bereiche widerspiegelt (Bündel, oder auf englisch „Bundles“). Die Entstehung der untergeordneten Kalk-Mergel-Rhythmik ist seit langem umstritten. Während die meisten Bearbeiter davon ausgehen, daß die Lithologiewechsel auf einen rhythmischen Wechsel der Bildungs- oder Ablagerungsbedingungen zurückgehen, die z. B. durch orbital gesteuerte Klimawechsel verursacht wurden (siehe z. B. verschiedene Kapitel in EINSELE et al., 1991; DE BOER u. SMITH, 1994), halten andere Bearbeiter auch eine rein diagenetische Entstehung für möglich (z. B. HALLAM, 1986; EDER, 1982; MUNNECKE u. SAMTLEBEN, 1996). Die Gründe für diese sehr unterschiedlichen Auffassungen liegen darin, daß Kalke und Mergel jeweils eine komplett unterschiedliche Diagenese erfahren haben, die die primären Unterschiede zwischen beiden Gesteinen bis zur Unkenntlichkeit verschleiern kann. Das heißt, daß eine direkte Vergleichbarkeit der meßbaren Pa-

parameter in Kalken und Mergeln wegen diagenetischer Veränderungen nicht möglich ist. Ein Beispiel für diese verschiedenartige Diagenese ist das unterschiedliche Kompaktionsverhalten. Während die Kalke frühdiagenetisch durch Zufuhr von Karbonat-Zement lithifiziert wurden und somit gegen spätere Kompaktion geschützt sind, haben die Mergel Karbonat abgegeben und sind stark kompaktiert. Diese als „differentielle Diagenese“ (REINHARD et al. 2000, WESTPHAL et al. 2000) bezeichnete Eigenschaft von Kalk-Mergel-Wechselfolgen läßt sich am einfachsten am unterschiedlichen Kompaktionsgrad von Spurenfossilien in Kalken (weitgehend unkompaktiert) und Mergeln (stark kompaktiert) erkennen. Mittlerweile ist allgemein akzeptiert, daß das für die Lithifikation der Kalke benötigte Zementkarbonat aus der Lösung karbonatischer Bestandteile der Mergel stammt (SUJKOWSKI 1958, EDER 1982, WALTHER 1982, RICKEN 1986, 1987, 1992, RICKEN u. EDER 1991).

DIAGENESEMODELL UND REKONSTRUKTION DER URSPRUNGSMINERALOGIE

Zur Zeit werden zwei verschiedene Modelle der differentiellen Diagenese diskutiert. Das eine Modell geht davon aus, daß es während der Versenkungsdiagenese unter einigen hundert Metern sedimentärer Auflast zur Drucklösung von Calcit in primär etwas karbonatärmeren (und damit tonreicheren) Bereichen kommt. Das durch Lösung freigesetzte Karbonat wandert in primär etwas kalkigere Bereiche und fällt dort als Zementkarbonat wieder aus (RICKEN 1986, 1987, 1992). Das andere, von uns entwickelte Modell geht davon aus, daß in den Mergeln bereits sehr dicht (einige Dezimeter bis einige Meter) unter dem damaligen Meeresboden eine selektive Lösung der aragonitischen Bestandteile stattfindet (MUNNECKE u. SAMTLEBEN 1996). Das gelöste Karbonat wandert entlang geochemischer Gradienten in nahegelegene Bereiche (die späteren Kalke) und fällt dort als Zementkarbonat wieder aus (Abb. 1). Diese Aragonit-basierte differentielle Diagenese kommt also ohne Drucklösung aus, da die Aragonitlösung in der frühen Versenkung durch mikrobielle Prozesse angetrieben wird. Der wichtigste Unterschied zwischen beiden Modellen ist die Verfügbarkeit des Zementkarbonates. Während im ersten (Calcit-basierten) Modell die Mergel – zumindest theoretisch – ihr gesamtes Karbonat abgeben können und somit zum Tonstein würden, ist im zweiten (Aragonit-basierten) Modell die Menge an Zementkarbonat durch die Menge an Aragonit im Ausgangssediment begrenzt. Wenn der Aragonit komplett aufgelöst und umverteilt ist, ist die Diagenese vorerst abgeschlossen.

Die limitierte Verfügbarkeit des Zementkarbonates im „Aragonit-Modell“ erlaubt Massenbilanzierungen, die im Umkehrschluß die Rekonstruktion der mineralogischen Zusammensetzung der jeweiligen Ausgangssedimente erlauben. Für diesen Zweck wurde ein Computerprogramm entwickelt, das nach Eingabe der Bankmächtigkeiten und der Karbonatgehalte von Kalken und Mergeln iterativ die Zusammensetzung der Ausgangssedimente ermittelt (MUNNECKE u. WESTPHAL 2004; online verfügbar unter <http://www.pal.uni-erlangen.de/lma/>). Die mathematischen Details der Modellierungen sind in MUNNECKE (1997),

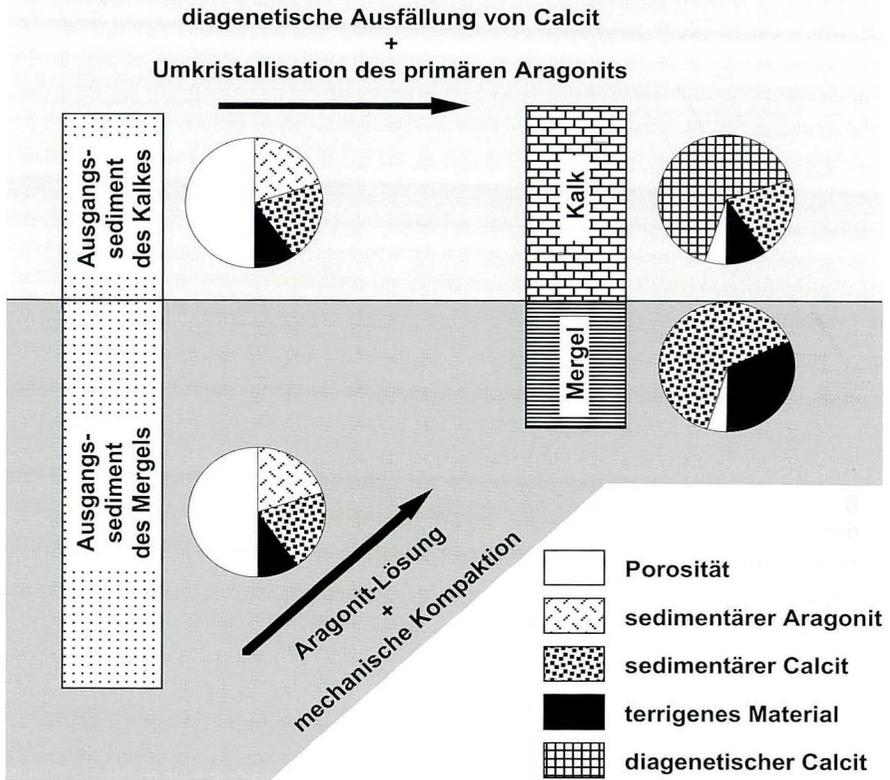


Abb. 1. Frühdiagenetische Karbonat-Umverteilung von den Kalken in die Mergel durch selektive Aragonitlösung in den Mergeln (leicht verändert aus MUNNECKE et al. 2001)

MUNNECKE et al. (2001) und MUNNECKE u. WESTPHAL (2004) ausführlich erläutert. Die frühdiagenetische Karbonat-Umverteilung (differentielle Diagenese) hat zur Folge, daß die heutigen Kalke einen höheren Karbonatgehalt als ihre Ausgangssedimente, und die Mergel dementsprechend einen niedrigeren Karbonatgehalt als ihre Ausgangssedimente aufweisen. Beide Lithologien waren also in ihrem primären Karbonatgehalt sehr viel ähnlicher als dies in der diagenetisch reifen Kalk-Mergel-Wechselfolge der Fall ist. Aufgrund von vereinfachenden Annahmen, die für die Kalkulation erforderlich sind, läßt sich mit Hilfe der neuen Methode jedoch nicht entscheiden, ob zwischen Kalken und Mergeln primär leichte Unterschiede (z. B. im Karbonatgehalt oder der primären Porosität) oder keine Unterschiede bestanden (MUNNECKE et al. 2001).

Die Beziehungen zwischen Ausgangssediment und resultierender Kalk-Mergel-Wechselfolge lassen sich in Form von sogenannten ACT-Dreiecken (Aragonit-

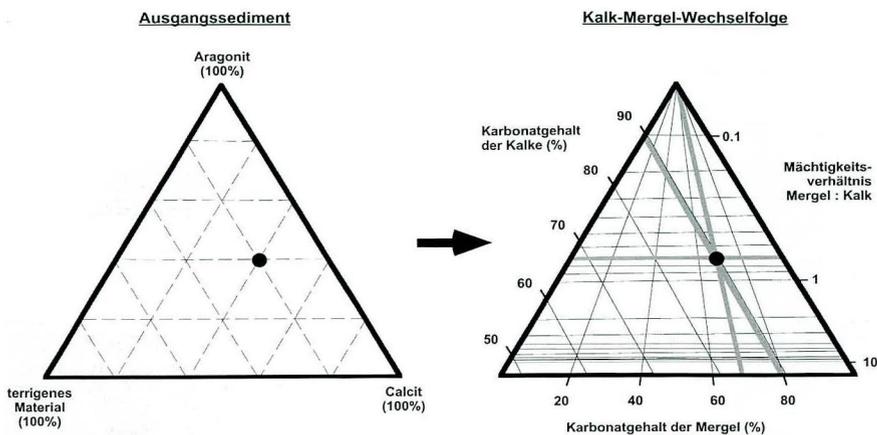


Abb. 2. ACT-Dreieck. Graphische Darstellung der mathematischen Beziehungen zwischen Ausgangssediment (Mischung aus Aragonit, Calcit und Ton) und daraus resultierender Kalk-Mergel-Wechselfolgen. Ein Ausgangssediment ohne (starke) primäre Unterschiede der Mineralogie für Kalke und Mergel wird angenommen. Jedes solche Ausgangssediment läßt sich als Punkt in dem linken Dreieck darstellen. Die Eigenschaften der aus diesem Sediment entstehenden (hypothetischen) Kalk-Mergel-Wechselfolge lassen sich dem rechten Dreieck entnehmen, indem die den Punkt durchlaufenden Isolinien zu den jeweiligen Schenkeln des Dreiecks verlängert werden (nach MUNNECKE 1997 und MUNNECKE et al. 2001)

Calcit-Ton bzw. terrigenes Material, also in das Meer eingetragene Verwitterungsmaterial) graphisch darstellen (Abb. 2) und folgendermaßen zusammenfassen:

- Der Karbonatgehalt der Mergel wird ausschließlich durch das Verhältnis von calcitischen zu terrigenen Bestandteilen im Ausgangssediment bestimmt und ist unabhängig vom primären Gehalt an Aragonit, da dieser gelöst und diffusiv (zu den späteren Kalken) fortgeführt wurde (Abb. 1, 2).
- Der Karbonatgehalt der Kalke wird sowohl durch den primären Gehalt des Ausgangssedimentes an karbonatischen Bestandteilen als auch durch dessen primäre Porosität bestimmt (Abb. 1,2).
- Das Mächtigkeitsverhältnis von Kalken zu Mergeln hängt in erster Linie vom Aragonitgehalt des Ausgangssedimentes ab und erst in zweiter Linie von seiner Porosität, da die Mergel in Aragonit-domierten Ausgangssedimenten einen großen Teil ihres Volumens bereits durch die Aragonit-Lösung verlieren. Dieses an Aragonit verarmte (Mergel-) Sediment wird später durch die sedimentäre Auflast weiter kompaktiert (Abb. 1).
- Die Kompaktion der Mergel (in den ACT-Dreiecken nicht dargestellt) steigt mit zunehmendem Aragonitgehalt des Ausgangssedimentes sowie mit zunehmender primärer Sedimentporosität.

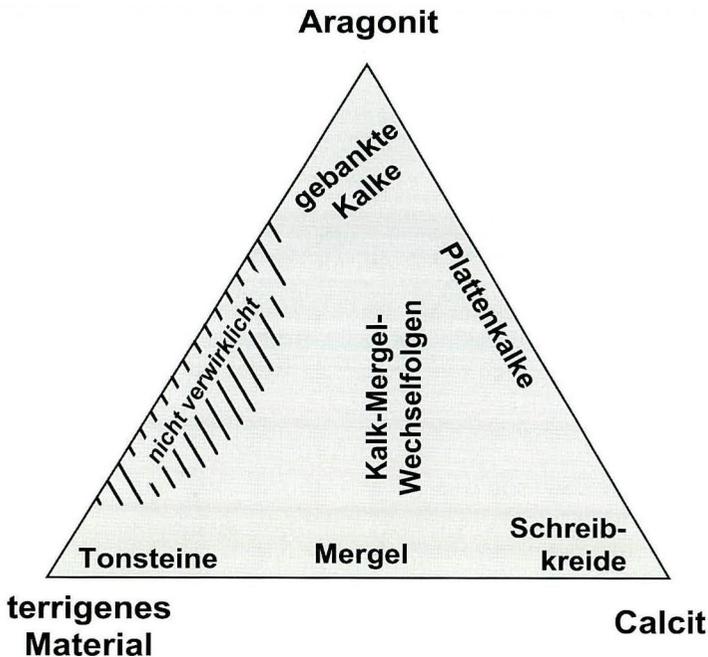


Abb. 3. Schematische Darstellung der Beziehungen zwischen Ausgangssedimenten und resultierenden Wechselfolgen (vgl. Abb. 2) (nach MUNNECKE u. WESTPHAL 2004). Der schraffiert hervorgehobene Bereich entspräche im diagenetisch unbeeinflussten Sediment einer Mischung aus Aragonit und Ton ohne nennenswerte Calcit-Anteile. Ein solches Sediment müßte als diagenetisch ausgereifte Wechselfolgen eine Kalk-Tonstein-Wechselfolge bilden. Solche Abfolgen sind nach unserem Wissen nicht bekannt.

Das bedeutet, daß Kalk-Mergel-Wechselfolgen das diagenetische Bindeglied zwischen Tonsteinen, Kreide und gebankten Kalken sind (Abb. 3). Aus reinen, homogenen Aragonitschlammern entstehen gebankte Kalke, da die Bereiche der Aragonitlösung nur noch als Bankungsfugen zu erkennen sind. Aus reinen Calcit-Schlammern entsteht reiner, aber nicht (bzw. erst spätdiagenetisch) zementierter Kalk (Kreide) und aus reinem Ton ein Tonstein. Aus Sedimenten, die aus einer Mischung von Aragonit, Calcit und terrigenem Detritus (Ton) bestehen, entstehen Kalk-Mergel-Wechselfolgen im weiteren Sinne.

Mit Hilfe des oben zitierten Computerprogramms läßt sich jetzt recht einfach die mineralogische Entwicklung des Ausgangssedimentes im Verlauf eines Profils ermitteln, vorausgesetzt es liegen Meßwerte der Karbonatgehalte und Mächtigkeiten für jede einzelne Schicht der diagenetisch reifen Abfolge vor. Die erstmalige Anwendung dieser neuen Methode erfolgte an einem Datensatz, der

bereits 1952 von E. SEIBOLD im Rahmen seiner Dissertation über den südwestdeutschen Oberjura (Malm; Hörnlebruch bei Neuffen) publiziert wurde. Wie in den meisten fossilen Karbonatsedimenten ist auch in den Oberjura-Gesteinen der Schwäbischen Alb kein Aragonit erhalten geblieben (BAUSCH 1965). Durch den neuen rechnerischen Ansatz bieten sich völlig neue Interpretationsmöglichkeiten für die zeitliche Entwicklung dieser Abfolge, da es bislang nicht möglich war, den primären, also vordiagenetischen Aragonitgehalt zu rekonstruieren. Bislang konnte man lediglich über die Strontiumgehalte einer Abfolge auf das Vorhandensein von primärem Aragonit rückschließen ohne aber die primären Gehalte quantifizieren zu können (BAUSCH u. HUANG 1997). Der primäre Aragonitgehalt kann jedoch wertvolle Hinweise auf die Karbonatproduktion auf angrenzenden Flachwasser-Karbonatplattformen liefern. Die neue quantitative Abschätzung der primären Mineralogie öffnet damit einen bisher verschlossenen Blickwinkel.

DAS BEISPIEL SÜDWESTDEUTSCHER OBERJURA

Die Oberjura-Abfolge („Malm“ oder „Weißjura“) der Schwäbischen Alb (Südwestdeutschland) wurde in einem ausgedehnten Epikontinentalmeer in mäßigen Wassertiefen abgelagert (z. B. BRACHERT 1992, PITTET u. STRASSER 1998). Offenmarine Produktion wird hier durch häufige Coccolithen (PITTET u. MATTIOLI 2002) und durch Dinoflagellatenzysten (BRENNER 1988) repräsentiert. Zeitgleich mit der Ablagerung des Schwäbischen Oberjura fand im Schweizer und im Fränkischen Jura (südlich und östlich) des Arbeitsgebietes Flachwasser-Karbonatproduktion statt (z. B. PITTET u. STRASSER 1998).

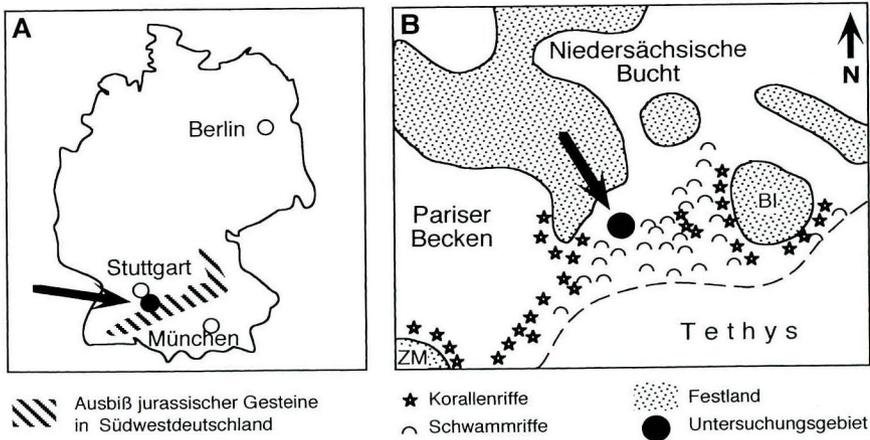


Abb. 4. A) Lage des Steinbruchs „Hörnlebruch“ bei Neuffen (Pfeil). B) Paläogeographische Situation zur Zeit des späten Jura (nach MEYER u. SCHMIDT-KALER, 1996). BI = Böhmisches Insel, ZM = Zentralmassiv.

Für die hier vorgestellte Studie wurde der obengenannte Datensatz von SEIBOLD (1952) mit unserer neuen Methode erneut untersucht. Dieser Datensatz umfaßt eine Detailaufnahme des ehemaligen Steinbruchs „Hörnlebruch“ bei Neuffen am Trauf der Schwäbischen Alb (Abb. 4) sowie die Dicken und Karbonatgehalte von jeder Kalkbank und jeder Mergellage für eine Abfolge von rund 120 m Mächtigkeit, die aus 196 Couplets besteht (Abb. 5). Die mikritischen Kalke und Mergel wurden unterhalb der Sturmwellenbasis abgelagert. Die Abfolge umfaßt eine Zeitspanne vom späten Oxfordium bis zum frühen Kimmeridgium. Die Impresamergel-Formation (IM-Formation; „Weißjura alpha“) ist Mergel-dominiert mit eingeschalteten bioturbierten grauen Kalkbänken. Die Mächtigkeiten schwanken um einen Durchschnitt von 20 cm für die Kalkbänke und 40 cm für die Mergellagen. Die Formation der Wohlgebankten Kalke (WK-Formation; „Weißjura beta“) ist durch aushaltende und regelmäßige Bankung charakterisiert und wird von Kalken dominiert. Die stark bioturbierten Kalkbänke zeigen eine durchschnittliche Mächtigkeit von 40 cm, während die Mergel nur durchschnittlich 10 cm mächtig sind. Die Lacunosamergel-Formation (LM-Formation; „Weißjura gamma“) ist der am stärksten Mergel-dominiert Abschnitt dieser Abfolge. Hier haben die Kalke eine durchschnittliche Dicke von 20 cm, während die Mergellagen auf durchschnittlich 50 cm kommen.

Innerhalb dieser drei Untereinheiten des Schwäbischen Oberjura bilden variable Mächtigkeiten von Kalkbänken und Mergellagen Bündel im 5- bis 10-Meter-Maßstab. Die Ausprägung der Bündel in den Mergel-dominiert Abschnitten (IM-Formation und LM-Formation) unterscheiden sich von den Bündeln im kalkdominierten Abschnitt (WK-Formation) darin, daß in ersteren die Mergelmächtigkeiten variabler sind als die Kalkmächtigkeiten, während in letzterem die Kalkmächtigkeiten variabler sind als die Mergelmächtigkeiten.

Die Malm-Abfolge des Hörnlebruchs eignet sich aus folgenden Gründen für die Rekonstruktion der Ausgangsmineralogie und damit der Paläo-Umweltbedingungen:

1. Eindeutige Unterschiede zwischen Kalken und Mergeln bezüglich der überlieferten Fossilgemeinschaften sind für diese Abfolge nicht bekannt, was darauf hindeutet, daß die Ausgangssedimente von Kalken und Mergeln keine großen Unterschiede aufgewiesen haben. Semiquantitative Untersuchungen im Hörnlebruch an organisch-wandigen Mikrofossilien (Palynomorphen), die zu den diagenetisch widerstandsfähigsten Fossilien zählen, zeigen keine systematischen qualitativen Unterschiede in den Vergesellschaftungen (BRENNER 1988: Abb. 4). Aber selbst die wenig deutlichen Unterschiede im karbonatischen Fossilgehalt von Kalken und Mergeln sind mit Vorsicht zu interpretieren, da beide Gesteinstypen auf Grund der differentiellen Diagenese unterschiedlich aufbereitet werden müssen, so daß ein methodischer Fehler stets mit in Betracht gezogen werden muß (SEIBOLD u. SEIBOLD 1953). Unterschiede in den Fossilgemeinschaften treten in der hier untersuchten Abfolge in größerem Maßstab, nämlich zwischen den IM-, LM- und WK-Formationen auf (SEIBOLD u. SEIBOLD 1953: Abb. 2, BRENNER 1988: Abb. 4). Ein entsprechendes Verhalten zeigen die

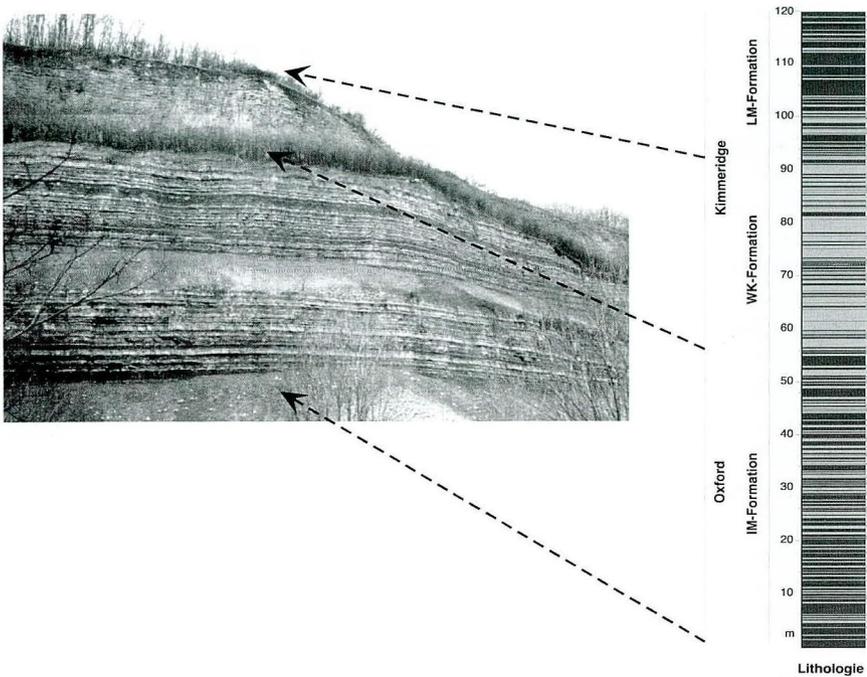


Abb. 5. Foto des mittlerweile nicht mehr aktiven Steinbruches „Hörnlebruch“ (links) sowie das dazugehörige lithologische Profil (nach Daten von SEIBOLD 1952).

zeitgleich abgelagerten Sedimente der Region Balingen-Tieringen (PITTET u. MATTIOLI 2002: Abb. 6).

2. Diagenetisch relativ stabile Fossilien wie z. B. Foraminiferen und die außerordentlich stabilen Palynomorphen sind in den Mergeln häufiger als in den Kalken (SEIBOLD u. SEIBOLD 1953, BRENNER 1988). Das gleiche gilt für die ebenfalls relativ diageneseresistenten Coccolithen in nahegelegenen, zeitgleich abgelagerten Abfolgen (PITTET u. MATTIOLI 2002). Das von uns postulierte Diagenesemodell bedingt zwangsläufig eine Anreicherung von nicht-aragonitischen Bestandteilen (und damit auch von nicht-aragonitischen Fossilien) in den Mergeln, so daß diese Beobachtung als Argument für die Gültigkeit unseres Modells betrachtet werden kann. Auch der Befund, daß Fossilien, die primär aus Hoch-Magnesium-Calcit bestehen (z. B. Seeigelstachel), sowohl in Kalken als auch in Mergeln erhalten sind (SEIBOLD u. SEIBOLD 1953), spricht dafür, daß ausschließlich aragonitische Bestandteile aufgelöst wurden.
3. Strontiumgehaltsmessungen aus zeitgleich abgelagerten Sedimenten der Urach-Neuffen-Region ergeben Werte im Mittel zwischen 500 und 800 ppm (BAUSCH 1965). Derartige Werte sind typisch für Gesteine, die aus aragonithaltigen Ausgangssedimenten entstanden sind (LASEMI u. SANDBERG 1993).

ERGEBNISSE DER MODELLIERUNG

Die mineralogische Zusammensetzung des Ausgangssedimentes zeigt eine deutliche vertikale Entwicklung entlang des Profils (Abb. 6). Aragonit tritt in der rekonstruierten Ausgangsmineralogie durch das gesamte Hörnlebruch-Profil hindurch auf. Der Ausgangsgehalt an Aragonit spiegelt sich im Verhältnis der Schichtdicken von Kalkbänken und Mergellagen der diagenetisch reifen Abfolge wider: Hohe rekonstruierte Aragonitgehalte entsprechen Abschnitten, die von Kalkbänken dominiert werden (d. h. das Verhältnis von Kalkbank-Mächtigkeiten zu Mergellagen-Mächtigkeiten ist groß), während Aragonit-arme Bereiche ein niedriges Verhältnis zeigen. Dieses Verhalten zeigt sich auf zwei Größenskalen, einerseits den Bündeln im Meter-Bereich und andererseits auf der Skala der IM-, LM- und WK-Formationen. Das Ausgangssediment der WK-Formation wird als Aragonit-dominiert rekonstruiert, während die IM- und LM-Formationen Calcit-dominiert waren.

Impressamergel-Formation (IM Formation; „Weißjura alpha“; oberes Oxfordium).

Die ursprüngliche mineralogische Zusammensetzung der Mergel-dominierten IM-Formation zeigt nach oben abnehmende Gehalte an terrigenem Material von ungefähr 35% an der Basis bis auf rund 20% am Top der Formation (Abb. 6). Calcit ist der dominante Bestandteil des Ausgangssedimentes mit rund 60% und einem leicht abnehmenden Trend nach oben hin. Aragonit im Ausgangssediment nimmt dagegen von ungefähr 10% an der Basis auf ca. 30% nach oben hin zu und zeigt einzelne Maxima von bis zu 40%. Diese Maxima treten in 5 bis 10 m-Abständen entlang des vertikalen Profils auf. Calcit und terrigene Anteile verhalten sich gegenläufig zu den Aragonitgehalten (Abb. 6). In der diagenetisch reifen Abfolge korrespondieren diese Aragonit-Maxima mit Kalk-dominierten Abschnitten der Bündel.

Wohlgebankte Kalke-Formation (WK-Formation; „Weißjura beta“, unteres Kimmeridgium).

Die WK-Formation ist das am stärksten Kalk-dominierte Intervall des untersuchten Profils und zeigt die höchsten Karbonatgehalte der diagenetisch reifen Abfolge. Die höchsten Aragonitgehalte im Ausgangssediment wurden für die WK-Formation berechnet und überschreiten zum Teil 70% (Abb. 6). Die Aragonitgehalte zeigen drei Maxima, die in rund 10 m Vertikalabstand auftreten. Das oberste Maximum ist durch ein untergeordnetes Minimum weiter unterteilt. Diese drei Maxima spiegeln drei im Aufschluß deutlich sichtbaren Bündel wider. Calcit-Gehalte des Ausgangssediments liegen bei 30–50%, während terrigenes Material auf 10–15% beschränkt ist. Wie auch in der IM-Formation zeigen die Aragonitgehalte gegenläufige Trends zu denen von Calcit und terrigenem Material (Abb. 6).

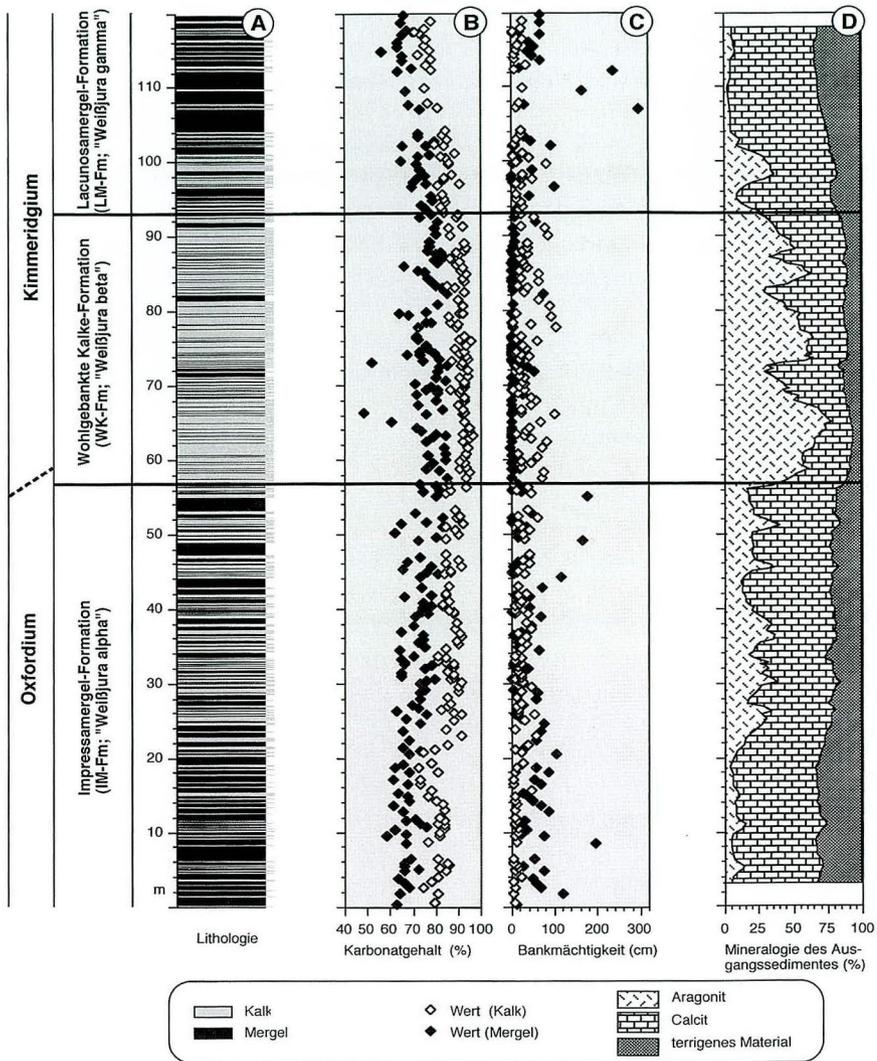


Abb. 6. Rekonstruktion der mineralogischen Zusammensetzung der Ausgangssedimente im Hörnlebruch bei Neuffen (IM-, WK- and LM-Formationen, entsprechend Weißjura alpha, beta und gamma). A) Lithologie, B) Karbonatgehalte, C) Bankmächtigkeiten, D) Zusammensetzung der Ausgangssedimente (aus MUNNECKE u. WESTPHAL 2004; A-C nach Daten von SEIBOLD 1952).

Lacunosamergel-Formation (LM-Fm; „Weißjura gamma“; unteres Kimmeridium).

Die stark Mergel-dominierte LM-Formation ist durch berechnete Aragonitanteile von maximal 35% an der Basis und nur rund 5% am Top charakterisiert (Abb. 6). Das Maximum an der Basis entspricht einem im Aufschluß sichtbaren Kalk-dominierten Intervall im unteren Teil der LM-Formation. Ursprüngliche Gehalte an terrigenem Material betragen rund 20–35%, während die an Calcit bis zu 65% erreichen. Ähnlich der IM-Formation zeigen die Terrigen- und Calcit-Gehalte ein gegenläufiges Verhalten gegenüber Aragonit (Abb. 6).

DISKUSSION

Die Ergebnisse der Berechnungen illustrieren, daß sich die klassische Gliederung des süddeutschen Ober-Jura in IM-, WK- und LM-Formation auch in der Zusammensetzung der Ausgangssedimente klar widerspiegelt (Abb. 6). So hat z. B. die WK-Formation deutlich höhere rekonstruierte primäre Aragonit- und niedrige primäre Tongehalte als die IM- und LM-Formationen. Darüber hinaus zeigen die Ausgangssedimente eine klare Rhythmik im 5–10 m Bereich, die den Bündeln im Aufschluß entspricht. D. h. Bereiche, in denen die Kalkbänke gegenüber den Mergeln überwiegen, enthielten primär deutlich mehr Aragonit als mergeldominierte Bereiche. Wenn man annimmt, daß Aragonit ganz überwiegend von angrenzenden Flachwasserbereichen in das Becken des schwäbischen Jura-meeres eingetragen wurde, dann kann diese übergeordnete Rhythmik als biogene Produktivitätsschwankungen der Flachwasserbereiche interpretiert werden.

Es fällt auf, daß Calcit- und Ton-Anteile gleichsinnig verlaufen, während sich Aragonit gegenläufig dazu verhält (Abb. 7). Für diesen Befund gibt es zwei mögliche Erklärungen.

- (1) Denkbar ist ein Szenario, in dem ein mehr oder weniger gleichmäßiger Aragoniteintrag durch gleichsinnig schwankende Calcit- und Ton-Einträge verdünnt wird, wo also der Calcit- und der Toneintrag auf die gleichen Umwelteinflüsse reagieren. Eine Kopplung von primärem Calcit- und Toneintrag wäre z. B. dadurch zu erklären, daß mit einem erhöhten Toneintrag (z. B. bei humiderem Klima) ein erhöhter Nährstoffgehalt im Meer einhergeht, was wiederum eine verstärkte (calcitische) Planktonproduktivität nach sich zieht. Durch den erhöhten Eintrag von terrigenem Material wird andererseits auch die (überwiegend aragonitische) Karbonatproduktion auf den flachen Karbonatplattformen reduziert.
- (2) Das andere denkbare Szenario ist, daß vor allem der Aragonitgehalt schwankt und den relativ konstanten Eintrag von Ton und Calcit verdünnt. Für diese zweite Möglichkeit spricht die Beobachtung, daß sich die Bündel-Rhythmik der Impressamergel-Formation mit erhöhten Mächtigkeiten in die Wohlgebankte Kalke-Formation hinein fortsetzt.

Unter der Annahme, daß die Ursachen dieser Rhythmik in orbitalen Schwankungen der Insolation liegen (Milankovitch), d. h. die Dauer einer „Schwingung“

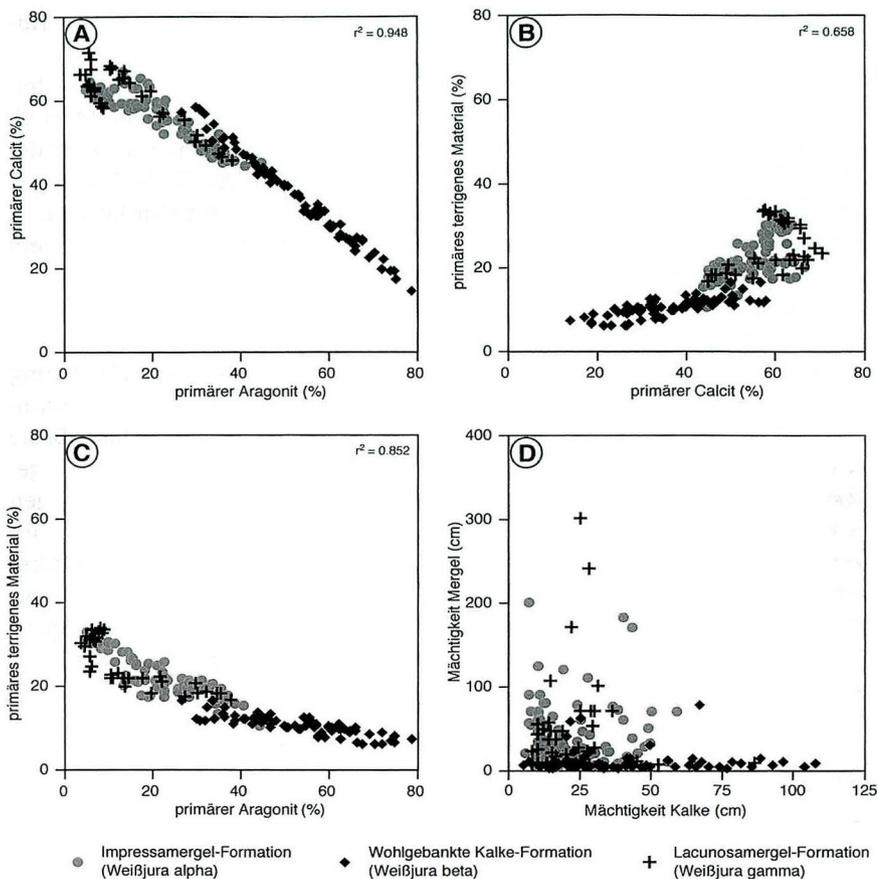


Abb. 7. A-C: Mineralogische Zusammensetzung der Ausgangssedimente in XY-Darstellung. D: Mächtigkeiten von Kalken und Mergeln.

im Verlaufe des Profils konstant ist, bedeutet das eine deutliche Erhöhung der Sedimentationsrate im Bereich der WK-Formation. Dieses wäre nur mit dem zweiten Szenario in Einklang zu bringen, denn das erstere würde für die WK-Formation mit ihren hohen Aragonitgehalten bedeuten, daß diese durch Rückgang des Calcit- und Ton-Eintrages entstanden sind, d.h. durch eine reduzierte Sedimentationsrate. Die erhöhten Bündelmächtigkeiten deuten also darauf hin, daß für die rhythmischen Schwankungen des Aragonitgehaltes vermutlich Schwankungen der Karbonatproduktion in angrenzenden Flachwasserbereichen verantwortlich sind.

Schwankungen der Aragonitproduktion sind sowohl durch Meeresspiegelschwankungen zu erklären (z. B. „highstand shedding“, also erhöhte Schüttungs-

raten während Meeresspiegelhochständen) als auch durch Humiditätszyklen (also reduzierte Produktion während humider und damit nährstoffreichen Zeiten). Demzufolge ist die WK-Formation mit ihren hohen Aragonitgehalten zu einer Zeit entstanden, die entweder durch erhöhten Meeresspiegel charakterisiert war, in der es durch die Überflutung flacher Karbonatplattformen zu einer Erhöhung der Aragonitproduktion kam, und/oder zu einer Zeit ariden Klimas, in der der verringerte terrigene Eintrag die Karbonatproduktion auf den Plattformen begünstigte. Unsere Interpretation ist in Übereinstimmung mit unabhängigen paläontologischen Daten. Untersuchungen an Palynomorphen (BRENNER, 1988) und Coccolithen (PITTEI und MATTIOLI, 2002) sprechen für sowohl wärmere als auch trockenere Bedingungen zur Zeit der WK-Formation im Vergleich zu den IM- und LM-Formationen.

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Mit Hilfe der hier beschriebenen neuen Methode ist es erstmals gelungen, die mineralogische Zusammensetzung der Ausgangssedimente von Kalk-Mergel-Wechselfolgen zu quantifizieren. Insbesondere die Quantifizierung von primärem Aragonit war bislang nicht möglich, da Aragonit unter Bedingungen der frühen marinen Versenkungsdiagenese instabil ist und daher fossil kaum überliefert werden kann. Aragonit wird vor allem auf flachen, tropisch/subtropischen Karbonatplattformen gebildet und ist damit ein Indikator für schwankende Umweltbedingungen wie zum Beispiel Meeresspiegelstand, Temperatur und Nährstoffgehalt. Mit dem neuen Modell bietet sich erstmals die Möglichkeit, den Einfluß von Flachwasser-Karbonatplattformen auf das Karbonatbudget vom pelagischen, überwiegend calcitischen Eintrag zu unterscheiden, und damit zu verbesserten Rekonstruktionen von Änderungen der Ablagerungsbedingungen (Klima, Meeresspiegel) zu gelangen.

Obgleich der strenge lithologische Wechsel von Kalken und Mergeln im Weißjura SW-Deutschlands starke Schwankungen der Umweltbedingungen auf dieser feinen Skala nahelegt, sind diese lithologischen Wechsel weitgehend diagenetischer Natur. Die Überlieferung der Umweltveränderungen auf der Skala der Bündel, aber auch auf der Skala der Dreiteilung in IM-, WK- und LM-Formation ist weniger augenfällig und tritt erst deutlich zutage, wenn die rekonstruierten Ausgangssedimente betrachtet werden. Auf diesen Skalen sind jedoch deutliche Schwankungen des Klimas und der Produktivität der nahegelegenen Flachwasser-Karbonatplattformen des Jurameeres überliefert. Erhöhter Aragoniteintrag zur Zeit der WK-Formation wird als Überlieferung von wärmeren und trockeneren Bedingungen gedeutet, und auf Bündelmaßstab lassen sich entsprechende Schwankungen höherer Frequenz erkennen.

DANK

Unser Dank gilt Herrn Obergelogeologierat i.R. Dr. WALTER SCHALL für die Stiftung und der Gesellschaft für Naturkunde in Württemberg sowie ihrem Vorsitzenden Prof. Dr. U. KULL für die Verleihung des Walter-Schall-Preises 2003 und damit die

Möglichkeit, unsere Ideen zu einem klassischen Thema der Gesellschaft für Naturkunde hier vorzustellen. Prof. Dr. F. WESTPHAL danken wir für die kritische Durchsicht des Manuskriptes. Die Arbeit wurde finanziell durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft unterstützt (We-2492/1 und Fr-1134/4).

LITERATUR

- BAUSCH, W.M. (1965): Strontiumgehalte in süddeutschen Malmkalken. – Geologische Rundschau, 55: 86–96.
- BAUSCH, W.M. u. W. HUANG (1997): Das Strontium-Maximum in Karbonat-Sequenzen und die Abschätzung primärer Aragonit/Calcit-Verhältnisse. – Erlanger Beiträge zur Petrographischen Mineralogie, 7: 37–47.
- BRACHERT, T.C. (1992): Sequence stratigraphy and paleo-oceanography of an open-marine mixed carbonate/siliciclastic succession (Late Jurassic, Southern Germany). – Facies, 27: 191–216.
- BRENNER, W. (1988): Dinoflagellaten aus dem Unteren Malm (Oberer Jura) von Süddeutschland; Morphologie, Ökologie, Stratigraphie. – Tübinger Mikropaläontologische Mitteilungen, 6: 1–157.
- DE BOER, P. L. u. D.G. SMITH (Hrsg.) (1994): Orbital forcing and cyclic sequences. International Association of Sedimentologists Special Publication. Vol. 19. 559 S. Oxford (Blackwell).
- EDER, W. (1982): Diagenetic redistribution of carbonate, a process in forming limestone-marl alternations (Devonian and Carboniferous, Rheinisches Schiefergebirge, W. Germany). – In: EINSELE, G. u. A. SEILACHER (Hrsg.): Cyclic and Event Stratification: 98–112. Berlin (Springer).
- EINSELE, G., W. RICKEN u. A. SEILACHER (Hrsg.) (1991): Cycles and Events in Stratigraphy. 955 S. Berlin (Springer).
- HALLAM, A. (1986): Origin of minor limestone-shale cycles: climatically induced or diagenetic?. – Geology, 14: 609–612.
- LASEMI, Z. u. P.A. SANDBERG (1993): Microfabric and compositional clues to dominant mud mineralogy of micrite precursors. – In: REZAK, R. u. D. L. LAVOIE (Hrsg.): Carbonate Microfabrics: 173–185. New York (Springer).
- MEYER, R.K.F. u. H. SCHMIDT-KALER (1996): Jura. – In: Bayerisches Geologisches Landesamt, Erläuterungen zur Geologischen Karte von Bayern 1:50 000: 90–111, München.
- MUNNECKE, A. (1997): Bildung mikritischer Kalke im Silur auf Gotland. – Courier Forschungsinstitut Senckenberg, 198: 1–71.
- MUNNECKE, A. u. C. SAMTLEBEN (1996): The formation of micritic limestones and the development of limestone-marl alternations in the Silurian of Gotland, Sweden. – Facies, 34: 159–176.
- MUNNECKE, A. u. H. WESTPHAL (2004): Shallow-water aragonite recorded in bundles of limestone-marl alternations – the Upper Jurassic of SW Germany. – Sedimentary Geology, 164: 191–202.
- MUNNECKE, A., H. WESTPHAL, M. ELRICK u. J.J.G. REIJMER (2001): The mineralogical composition of precursor sediments of calcareous rhythmites – a new approach. – International Journal of Earth Sciences, 90: 795–812.

- PITTET, B. u. E. MATTIOLI (2002): The carbonate signal and calcareous nannofossil distribution in an Upper Jurassic section (Balingen-Tieringen, Late Oxfordian, southern Germany). – *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 179: 71–96.
- PITTET, B. u. A. STRASSER (1998): Depositional sequences in deep-shelf environments formed through carbonate-mud import from the shallow platform (Late Oxfordian, German Swabian Alb and eastern Swiss Jura). – *Eclogae Geologicae Helveticae*, 91: 149–169.
- REINHARDT, E.G., W. CAVAZZA, R.T. PATTERSON u. J. BLENKINSOP (2000): Differential diagenesis of sedimentary components and the implication for strontium isotope analysis of carbonate rocks. – *Chemical Geology*, 164: 331–343.
- RICKEN, W. (1986): Diagenetic Bedding – A Model for Marl-Limestone Alternations. – *Lecture Notes in Earth Sciences*. 210 S. Berlin (Springer).
- RICKEN, W. (1987): The carbonate compaction law: a new tool. – *Sedimentology*, 34: 571–584.
- RICKEN, W. (1992): A volume and mass approach to carbonate diagenesis: the role of compaction and cementation. – In: WOLF, K.H. u. G.V. CHILINGARIAN (Hrsg.): *Diagenesis, III*: 291–316. Amsterdam (Elsevier).
- RICKEN, W. u. W. EDER (1991): Diagenetic modification of calcareous beds – an overview. – In: EINSELE, G., W. RICKEN u. A. SEILACHER (Hrsg.): *Cycles and Events in Stratigraphy*: 430–449. Berlin (Springer).
- SEIBOLD, E. (1952): Chemische Untersuchungen zur Bankung im unteren Malm Schwabens. – *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Abhandlungen*, 95: 337–370.
- SEIBOLD, E. u. I. SEIBOLD (1953): Foraminiferenfauna und Kalkgehalt eines Profils im gebankten unteren Malm Schwabens. – *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Abhandlungen*, 98: 28–86.
- SUJKOWSKI, Z. L. (1958): Diagenesis. – *AAPG Bulletin*, 42(11): 2692–2717.
- WALTHER, M. (1982): A contribution to the origin of limestone-shale sequences. – In: EINSELE, G. u. A. SEILACHER (Hrsg.): *Cyclic and Event Stratification*: 113–120. Berlin (Springer).
- WESTPHAL, H., M. J. HEAD u. A. MUNNECKE (2000): Differential diagenesis of rhythmic limestone alternations supported by palynological evidence. – *Journal of Sedimentary Research*, 70: 715–725.

Anschriften der Autoren: Dr. AXEL MUNNECKE, Dr. HILDEGARD WESTPHAL
Institut für Paläontologie der Universität Erlangen-Nürnberg, Loewenichstr. 28,
91054 Erlangen, Fax: +49 – (0)9131 – 85 22690; Tel.: +49 – (0)9131 – 85 26957
munnecke@pal.uni-erlangen.de, westphal@pal.uni-erlangen.de