# Lithologische Untersuchungen im Unteren Muschelkalk von Unterfranken

(Stratinomie und Geochemie)

Mit 26 Abbildungen, 2 Tafeln und 15 Tabellen

von

Martin Haltenhof, Würzburg

Selbstverlag des Naturwissenschaftlichen Vereins Würzburg

Druck: Verlagsdruckerei Heinrich Delp oHG., Bad Windsheim

Bei der vorliegenden Arbeit handelt es sich um eine von der Naturwissenschaftlichen Fakultät der Julius-Maximilians-Universität Würzburg genehmigte Dissertation.

Die Anregung zu diesem Thema erhielt ich von Herrn Prof. Dr. E. RUTTE, dem ich auch für seine wertvollen Hinweise während der Bearbeitung danken möchte.

Die Durchführung der Untersuchungen am Geologisch-Paläontologischen Institut der Universität Würzburg wurde durch Herrn Professor Dr. G. KNETSCH ermöglicht. Für sein stetes Interesse am Fortgang der Arbeit möchte ich auch ihm an dieser Stelle Dank sagen.

Herrn Dr. E. T. DEGENS habe ich für seine Einführung in die geochemischen Untersuchungen zu danken, die für die Arbeit wertvolle Ergänzungen ermöglichten.

Herrn BECK, Präparator am Geologischen Institut der Universität Würzburg, danke ich für die Anfertigung einiger Photos.

Ferner bin ich Herrn Dr. E. C. GOES, Direktor des Portland-Zementwerkes Lengfurt sowie Herrn Ing. RUPPERT und Herrn Laborleiter SCHÜLL zu Dank verpflichtet, die mir die Entnahme und Untersuchung von Bohrproben sowie die Einsichtnahme in Unterlagen von vorangegangenen Bohrungen gestatteten.

Mein besonderer Dank gilt schließlich der Portland-Zementwerke-Heidelberg AG, dem Bayrischen Ministerium für Unterricht und Kultus, dem Universitätsbund Würzburg und dem Naturwissenschaftlichen Verein Würzburg, welche die Finanzierung der Drucklegung dieser Arbeit übernommen haben

*Zusammenfassung:* Durch Anwendung feinstratigraphischer und geochemischer Untersuchungsmethoden konnte im Unteren Muschelkalk von Unterfranken ein zyklischer Sedimentationsverlauf nachgewiesen werden.

Es handelt sich meist um mehr oder weniger asymmetrisch ausgebildete Zyklotheme, die durch die Schwankungen der Karbonatgehalte kontinuierlicher Bohrprofile gut zu erfassen sind, während sich nach strukturell-texturellen Merkmalen nur schwer gesetzmäßige Abfolgen erkennen lassen.

Die fossilführenden Leitgesteine — intraformationelle Konglomeratlagen, Schill- bis Bruchschillkalke, Oolithkalke — treten im allgemeinen im letzten Drittel eines

asymmetrischen oder in der Mitte eines symmetrischen Zyklothems auf. Im Karbonatdiagramm sind sie meist durch Maxima kenntlich, in bezug auf das Ca/Mg-Verhältnis treten sie in markanten Änderungsbereichen auf. Die Ergebnisse lassen sich chemostratigraphisch und geotechnisch auswerten.

Das Ca/Mg-Verhältnis der HCl-löslichen Sedimentfraktion — teilweise im Zusammenhang mit den Bor- und Sulfatgehalten — wurde auf Grund der Beobachtungen in Gebieten rezenter Karbonatsedimentation mit Schwankung der Salinität und der Wassertiefe in Beziehung gesetzt. Niederes Ca/Mg (hoher B- und $SO_4$-Gehalt) sprechen für hohe Salinität, u. U. auch für geringe Wassertiefe, wobei Karbonatbildung durch Wassertemperatur und Salinität beeinflußt werden kann. In den Grenzbereichen so/mu, mu/mm und mm/mo wurde durch den Verlauf der Ca/Mg-Verhältnisse die Verbindung zum echten Salinarzyklus deutlich, da z. B. das Fallen von Ca/Mg innerhalb der karbonatischen Phase (Kalk — Dolomit) zur anhydritischen Phase überleitet.

Die zyklischen Schwankungen in der Karbonatsedimentation gehen aber im wesentlichen auf Schwankungen der terrestrischen Materialzufuhr zurück, da mit der Zunahme des Karbonatgehaltes nicht nur eine zwangsläufige Abnahme der allochthonen Sedimentfraktion verbunden ist, sondern eine gleichlaufende relative Abnahme des Quarzanteiles innerhalb der „Tonfraktion" zu konstatieren ist und umgekehrt.

Generell nimmt der Karbonatgehalt im Verlauf des Unteren Muschelkalkes zu, der Tonanteil ab. Diese Entwicklung hat auf die strukturell-texturelle Ausbildung der Wellenkalktypen keinen charakteristischen Einfluß. Das Verhältnis „allochthone Sedimentfraktion/Quarz" ließ sich als Maß für unterschiedliche Transportenergie auswerten.

Der Verlauf des Karbonatgehaltes und der Ca/Mg-Verhältnisse sowie die Beziehungen innerhalb der allochthonen Sedimentfraktion führten zu der Vorstellung einer im wesentlichen epirogen beeinflußten Ausbildung der Zyklotheme.

Die flächenhafte Verbreitung von Schill- und Bruchschillsedimenten (allochthone Thanatocoenosen) muß mit der Wirkung von grundberührendem Seegang in Verbindung gebracht werden. Die erhöhten Wasserbewegungen waren mit Strömungen verbunden, die sich besonders bei relativ geringen Wassertiefen in verstärkten Aufarbeitungen und Materialtransport auswirkten. Ähnliches gilt für die intraformationellen Konglomerathorizonte, bei denen trans- und regressive Wasserbewegungen in regional begrenzten Bereichen mitgewirkt haben können. Aufbau und Ausbildung dieser Sedimente wurden untersucht. Es ergaben sich je nach dem Verhältnis Grundmasse (feinkörniger Kalzit, Ooide) zu den gröberen Komponenten (Schill, Bruchschill, intraformationelle Gerölle) spezifische Lagebeziehungen der Komponenten zueinander. Die Abfolgen ließen oft eine gerichtete Abnahme der Strömungsintensität vom Liegenden zum Hangenden erkennen. Diese Tendenz wurde mit den durch nachlassende Turbulenz entstandenen Schichtungstypen (graded bedding) verglichen.

Die organogen-klastischen Detrituskalke sowie die bruchschillführenden Oolithkalke zeigen strömungsbedingte transversale Schrägschichtungen. Die in und auf ihnen vorkommenden Rippelmarken zeigen durch ihre oft vorhandene geringe

Asymmetrie, besonders aber auch durch ihren Verlauf ± senkrecht zu linearen Erosionsformen, daß auch die Oscillationsrippeln (Seegangsrippeln) durch Strömungen beeinflußt sind.

Autochthone Thanatocoenosen (Biocoenosen) finden sich im Unteren Muschelkalk — abgesehen von Placunopsiden und Bohrgängen — selten. Als Beispiele wurden die Lebensgemeinschaften von *Trypanites weisei, Rhizocorallium, Lima lineata, Myophoria orbicularis* und *Placunopsis ostracina* untersucht. Für *Myophoria orbicularis* und *Myophoria vulgaris, Trypanites* und *Balanoglossites* wurden die Beziehungen zur Salinität aufgezeigt.

Das autochthone Vorkommen der einzelnen Fossilien ließ Schlüsse auf ihre Lebensweise und ihr Environment zu; speziell auf Untergrundbeschaffenheit, Sedimentation, Strömung, Durchlüftung und Salinität.

Die „Seesinterkalke" werden als Stromatolithe des Unteren Muschelkalkes nach verschiedenen lithologischen Gesichtspunkten (geochemisch, petrographisch, strukturell-texturell, stratinomisch) betrachtet. Sie liegen meistens als autochthone Bildungen vor, teilweise auch als „Bruchkalke" (Aufarbeitungsprodukte von Seesinterkalken, die zusammen mit Ooiden, Trochiten und intraformationellen Geröllen sedimentiert sind).

Eine endgültige Entscheidung, ob diese Sedimente organischer oder anorganischer Genese sind, ist vor allem durch das Fehlen von Zellstrukturen nicht möglich. Nach der Ausbildung ihrer Wachstumsstrukturen, die sich bis in den mikroskopischen Bereich feststellen lassen und nach Vergleichen mit rezenten Stromatolithen — wobei es sich um lamellare Algensedimente handelt, die im Zusammenwirken von rhythmischer Sedimentation und Algenpolstern in Flachwasserbereichen vorkommen — wird auch für die „Seesinterkalke" eine Beteiligung von Algen für wahrscheinlich gehalten.

Die Auswertung lithologischer und faunistischer Merkmale ergab für die Beurteilung der Tiefenschwankungen des Muschelkalkmeeres weitere Anhaltspunkte, die sich auch mit den geochemischen Untersuchungsergebnissen in Übereinstimmung bringen ließen. Danach nahm die Tiefe des Wellenkalkmeeres im Untersuchungsgebiet — unterbrochen von verschiedenen rückläufigen Tendenzen im Bereich bruchschillführender und oolithischer Gesteinszonen — vom Liegenden zum Hangenden allgemein zu. Die Auswertung geologischer und aktuogeologischer Beobachtungen macht wahrscheinlich, daß für die Sedimente des Unteren Muschelkalkes nur Flachmeerregionen des nereitischen Bereiches in Betracht kommen. In einzelnen Abschnitten, so im mu1 mit seinen intraformationellen Konglomerathorizonten, im Bereich der Bruchschillablagerungen, oolithischen Kalke und Seesinterkalke sowie innerhalb der Orbicularisschichten sind Wassertiefen im allgemeinen bis zu 30 m wahrscheinlich. Im Bereich der Terebratelregion, im liegenden und mittleren Teil des mu3 dürften Tiefen bis über 75 m erreicht worden sein.

Die Richtungen von linearen Erosionsformen wurden statistisch ausgewertet. Dabei handelt es sich um Rillen und Rinnen (letztere mit longitudinaler Schrägschichtung oder Anlagerungsschichtung). Im Zusammenhang mit stratinomischen Einzelbeobachtungen lassen sich vor allem von ± NE nach SW-gerichtete Strömungen erkennen. Im Verlauf des Unteren Muschelkalkes konnten von NE/SW nach N/S und wieder nach NE/SW-drehende Strömungen abgeleitet werden. Die auftretenden

Richtungen passen sich in das paläogeographische Bild der süddeutschen Trias ein.

Frühdiagenetische und diagenetische Veränderungen an fossilleeren, fossilführenden und fossilreichen Gesteinen wurden im Verlauf der Arbeit betrachtet und mit den verschiedenen Zusammensetzungen und Erhärtungsbedingungen in Beziehung gesetzt. Die stratigraphische, sedimentologische und ökologische Bedeutung von Hardgrounds für den Unteren Muschelkalk wurde dargelegt und eine Einteilung versucht.

# A. Problemstellung

Eine Untersuchung des Wellenkalkes unter Berücksichtigung von Feinstratigraphie, Biostratinomie und Geochemie sowie aktuogeologischen Beobachtungen in rezenten Flachmeeren verspricht unsere Vorstellung über die Genese zu erweitern.

Sedimente und Fossilien, ihre Zusammensetzung und Lagerung sind dabei die uns überlieferten Dokumente, deren Analyse bestimmte Gesetzmäßigkeiten erkennen lassen. Es bleibt zu klären, inwieweit solche Gesetzmäßigkeiten die gegenseitigen Beziehungen und Zusammenhänge der einzelnen ökologischen Faktoren — Sedimentation, Strömung, Licht, Durchlüftung, Wassertiefe und Salinität — widerspiegeln.

An verschiedenen Untersuchungsobjekten des Unteren Muschelkalkes soll versucht werden, das „environment" soweit wie möglich zu erfassen und in seinen Veränderungen darzustellen.

Um die stratinomischen und feinstratigraphischen Beobachtungen zu ergänzen und zu stützen, waren geochemische Untersuchungen um so mehr wünschenswert, als erst die Auswertung der nach verschiedenen Methoden gewonnenen Ergebnisse zu einigermaßen gesicherten Aussagen berechtigen.

Feinstratigraphie — die zentimeterweise Aufnahme von Gesteinsserien — ergibt unter Umständen einen Einblick in den Sedimentationsverlauf und damit eine Gliederungsmöglichkeit fossilarmer, relativ einheitlicher Gesteinsserien, sowie eine Möglichkeit zur Parallelisierung über kleine und mittlere Entfernungen.

Biostratinomie — die Untersuchung der Lagebeziehungen von Fossilien untereinander und zum Sediment — ermöglicht Rückschlüsse auf Lebensraum, Einbettung, Fossilisation, Sedimentation und Diagenese.

Geochemie — untersucht die quantitativ-chemische Zusammensetzung von Gesteinsserien und ihre Änderungen in vertikaler und horizontaler Richtung — ermöglicht Parallelisierungen über kleine und mittlere Entfernungen und läßt gewisse Gesetzmäßigkeiten der Sedimentation erkennen. Die Änderungen der chemischen Parameter in der Vertikalen spiegeln das zeitliche Nacheinander der Entwicklung, in der Horizontalen das räumliche Nebeneinander wider.

Die Auswertung aktuogeologischer Befunde nach Arbeiten von K. Gripp, W. Häntschel, F. Hecht, W. Hensen, K. Lüders, H. E. Reineck, A. Remane, R. Richter, W. Schäfer, H. Schwarz, F. Trusheim, J. Weigelt und anderen bestätigt den Flachmeercharakter der Sedimente des Unteren Muschelkalkes. Manche fossilen

Erscheinungen bekommen erst durch rezente analoge Bildungen ihre stratinomische Bedeutung.
Jede Deutung darf aber keine einfache Übertragung von rezenten auf fossile Verhältnisse sein. Erst die Häufung verschiedener Hinweise ermöglicht Aussagen über Tiefenverhältnisse, Wassertemperatur, Strömungsverhältnisse, Salinität und ähnliches.
Auf der Grundlage von feinstratigraphischen Aufnahmen, geochemischen Untersuchungen und zahlreichen Einzelbeobachtungen sollen die verschiedenen Gesteinstypen und die wichtigsten Tapho- und Biocoenosen des Unteren Muschelkalkes untersucht und stratinomisch ausgewertet werden.
Nach einem allgemeinen Überblick, der besonders die Abgrenzung des Unteren Muschelkalkes berücksichtigt, werden im ersten Abschnitt die Gesteine des Unteren Muschelkalkes lithologisch, geochemisch und sedimentologisch untersucht. Der zweite Abschnitt befaßt sich vorwiegend mit den organogenen Sedimentbestandteilen und ihrer Bedeutung für stratinomische und biostratinomische Fragen. Im dritten Abschnitt werden Sedimentstrukturen und Erosionsformen behandelt, die stratinomisch und genetisch von Bedeutung sind.

# B. Geologisch-stratigraphischer Überblick

Der untere Muschelkalk in Unterfranken gehört in den Bereich der Meininger Fazies. Sie ist gegenüber der Mosbacher und Freudenstädter Fazies überwiegend kalkig ausgebildet. Das Untersuchungsgebiet ist auf Abb. 1 ersichtlich.

*1. Gliederung des Unteren Muschelkalkes in Unterfranken*

Stratigraphisch ergaben die Untersuchungen wenig Neues. Die Schichtenfolge gestattet eine Dreigliederung in $mu_1$, $mu_2$ und $mu_3$. Nach sedimentologisch-lithologischen Gesichtspunkten erfordert dies folgende Zusammenfassungen:

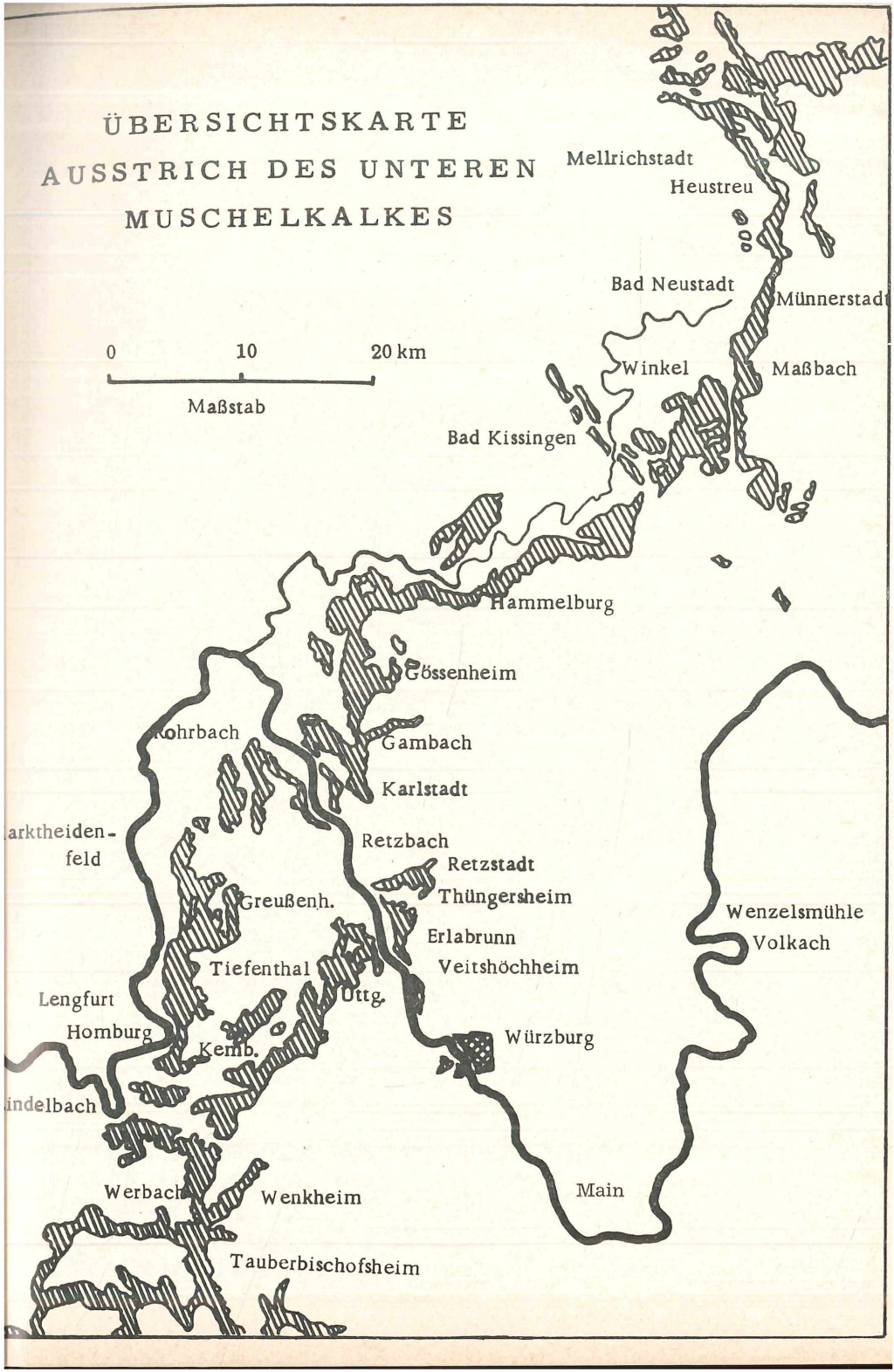
*Oberer Wellenkalk* (Orbicularisschichten, Schaumkalkzone, oberer Wellenkalk i. e. S.)

*Mittlerer Wellenkalk* (Terebratelzone, mittlerer Wellenkalk i. e. S.)

*Unterer Wellenkalk* (Oolithzone, unterer Wellenkalk i. e. S., Grenzgelbkalk).

Die Gesamtmächtigkeiten des Unteren Muschelkalkes betragen im Norden Unterfrankens etwa 110 m und nehmen nach Süden auf ca. 80 bis 90 m ab (Rutte 1957).

Abb. 1: Übersichtskarte des Untersuchungsgebietes ——▶


ÜBERSICHTSKARTE
AUSSTRICH DES UNTEREN
MUSCHELKALKES
0
10
20 km
Maßstab
Mellrichstadt
Heustreu
Bad Neustadt
Münnerstadt
Winkel
Maßbach
Bad Kissingen
Hammelburg
Gössenheim
Rohrbach
Gambach
Karlstadt
arktheiden-
feld
Retzbach
Retzstadt
Thüngersheim
Greußenh.
Wenzelsmühle
Volkach
Erlabrunn
Veitshöchheim
Tiefenthal
Uttg.
Lengfurt
Homburg
Kemb.
Würzburg
indelbach
Werbach
Wenkheim
Main
Tauberbischofsheim

Als Beispiele für feinstratigraphische Aufnahmen sollen drei Profile dienen. Die den Beschreibungen nachgestellten Zahlen geben die laufenden Nummern der geochemisch untersuchten Proben an.

*Profil 1:*

*Übergang Buntsandstein-Muschelkalk am Kallmuth bei Lengfurt (Main)*

Hangendes: Unterer Wellenkalk (nicht aufgeschlossen)

0,25 m Mergel, grau, feinschichtig ebenplattig

0,60 m Mergel, grau, durch linsenförmige Kalkmergel flaserig, bei 0,35 und 0,40 m je eine bis 0,02 m starke Feinschillage bzw. -linse, **34**.

0,26 m Bruchschillkalkstein, (Lima-Bank), z. T. sporadisch intraformationelle kleine Konglomerate führend, blaugrau, feinkristallin und fest, z. T. ockerbraune Kristallisate, die zu Ockermulm verwittern, vereinzelt feine Schill- und Halbschillpartien mit stark gewölbten Schalen in lagiger Textur, gewölbt oben überwiegt, sonst in wirrer Lagerung, Dachfläche häufig mit Lima lineata-Streupflaser, **35**.

0,76 m Mergel, grau, feinplattig, ebenflächig, bei 0,18 und 0,28 m je ein 0,01 bis 0,02 m starkes Halbschillbänkchen, feine ockerig angewitterte Schalen, lagige Textur, **36**.

0,22 m Mergel, grau, plattig bis feinplattig, polyedrisch verwitternd, unregelmäßige Oberfläche.

0,01 m Kalkstein, blaugrau, feinkristallin, vereinzelt bruchschillführend, ockerig rostbraune Verwitterungsflecke.

0,08 m Mergel, grau-gelblich, plattig bis feinplattig.

0,38 m Kalkstein, graubraun bis gelbbraun, flaserig bis feingeschichtet, feinsandig.

0,50 m Wellenkalk, Kalkmergel, blaugrau, flaserig, z. T. pseudokonglomeratisch, besonders im Hangendteil Komponenten bis 1 cm $\phi$, bei 0,40—0,45 m Sigmoidalklüftung: 120°/55° SW, **37**.

0,02 m Mergel, graubraun bis gelb, feinblättrig, sandig, glimmerig.

0,04 m Kalkstein, feinkristallin, z. T. bruch- und halbschillführend, sehr feinschalige kleine Muscheln und Myophorien, Abschluß der Bank feinsandig-muskovitführender Besteg, **38**.

0,04 m Kalkstein, graublau mit rostbraunen Flecken, z. T. in wolkiger Verteilung (Umkristallisation von Bruchschill), feinkristallin.

0,05 m Mergel, grau, feinblättrig.

0,16 m Kalkstein, pseudokonglomeratisch kompakt, graublau, feinkristallines kalzitisches Bindemittel, Komponenten 1—3 cm $\phi$ mehr oder weniger horizontal eingeregelt, Komponenten zum Hangenden an Größe abnehmend, **39**.

0,12 m Kalkstein (Hangendteil des Grenzgelbkalkes), blaugrau, im angewitterten Zustand ockerfarbig, feinkristallin, intensiv mit Bohrgängen durchsetzt, deren Wände mit ockerigem Material ausgekleidet sind, **40**.

a) Trypanites weisei: Bohrgänge bis 1 mm $\phi$, stets $\pm$ senkrecht zur Oberfläche, 8 bis maximal 10 cm in das Gestein reichend, in Vertiefungen der teilweise vorhandenen kleinen Trichter sind vereinzelt kleine Kügelchen und Schnüre nachzuweisen (Kotpillen von Trypanites).

b) Balanoglossites triadicus: Bohrgänge bis 1,5 $\phi$, vollkommen unregelmäßig, enden meist an der Unterfläche dieser Bank, teilweise erreichen sie auch den Hangendteil der älteren Schicht.

1,20 m Kalkstein, schwach dolomitisch bis dolomitisch, eisenschüssig, kompakt, splittriger Bruch, fahlgelb bis intensiv ockergelb, z. T. braunrot, bei starker Verwitterung kreidig weich, hangende 0,20 m mit Balanoglossites-Bohrgängen durchzogen (**41**). Sehr feingeschichtet, z. T. geflammt, feinzackige Stylolithen, die durch Kalkspat verheilten Klüfte bilden bei stärkerer Verwitterung des Gesteins die Rippen des entstehenden Zellenkalks (Grenzgelbkalk), **42**.

0,01 m Tonmergel, grauschwarz, sehr fein geschichtet, bituminös, mit weißen Gipsausblühungen ($CaSO_4$ qualitativ nachgewiesen, konservierte Einschwemmungen von organischer Substanz in stark mineralisiertem Meerwasser?).

0,58 m Kalkmergel bis Mergel, dolomitisch, gelblich-grau bis fahlockergrau, homogen, teilweise auch grau-ockerig, gebändert, ohne erkennbare Materialunterschiede, z. T. grauoliv, schwach feinsandig, Liegendteil feinschichtig-blättrig, Hangendteil plattig und grobscherbig verwitternd (ein Merkmal des zum Hangenden zunehmenden Karbonatgehaltes), durch den Verwitterungseinfluß wird z. T. Schrägschichtung sichtbar, bei Ausfüllung von Klüften mit Kalkspat neigen diese Partien zur Zellenkalkbildung, **43**, **44**.

0,75 m Tonmergel bis Tongestein, dolomitisch, grauoliv, primär feingeschichtet, z. T. brekziöse Textur (Auslaugung von Gips bzw. Anhydrit), **45**.

0,60 m Tonmergel bis Tongestein, grauoliv bis grauschwarz, feingeschichtet, ebenplattig, feinpolyedrisch bis feinblättrig verwitternd, **46**.

1,02 m Tongestein, graugrün, liegende 0,40 m tiefgrün, Hangendteil mit mehreren bis 3 cm mächtigen hellgrauen Quarzitbänkchen und sandigen Mergeln, feinblättrig, **47**.

0,19 m Tongestein, tiefrotbraun, polyedrischer Zerfall, **48**.

1,55 m Tongestein, rotbraun bis violett, mit graugrünen Flecken und Schmitzen, sekundäre Kalkspatdrusen mit graugrüner Umgebung (nach Beobachtungen an Bohrkernen im Röt sind solche Reduktionsfarben stets an die nähere Umgebung von Gips und Anhydritknollen gebunden. Außer gelegentlichen weißen Ausblühungen und brekziösen Auslaugungserscheinungen sind keine Evaporite mehr nachzuweisen), **49**.

1,30 m Tongestein, rotbraun bis braunviolett, polyedrischer Zerfall, **50**.

Liegendes: Obere Röttone (nicht aufgeschlossen).

*Profil 2:*

*Oolithzone beta am Kallmuth bei Lengfurt (Main)*

Hangendes: Mittlerer Wellenkalk, **57**.

—0,30 m Kalkstein, blaugrau, feinkristallin bis dicht, splittrig. Hangendteil flaserig, teilweise mit submarinen Gleitungen, **58**.

—2,00 m Mergelkalk, feinplattig, z. T. schwach flaserig, mit Undularia scalata, **59**.

0,14 m Schill- bis Halbschillkalkstein, kristallin, massenhaftes Auftreten von Lima lineata, einklappig, meist in stabiler Lage (im Neuen Steinbruch des Portland-Zementwerkes wurden in der gleichen Schicht Lima regularis, Lima lineata, Hoernesia socialis, Myophoria laevigata, Pecten, Enantiostreon, Cidaris-Stacheln und ein Placodus-Zahn gefunden), **60**.

0,75 m Mergelkalk, feinflaserig, bei 0,50 bis 0,55 m grobknaurige Kalkmergel, blaßgelblich verwitternd, **61**.

—0,30 m Konglomeratischer Bruchschillkalkstein (Oolithbank beta) 0,15—0,20 m Bruchschillkalk, kristallin, in Umgebung von Schillkomponenten ockerig verwitternd, sporadisch intraformationelle Konglomerate führend, 2 bis 3 cm $\phi$, Schillkomponenten in dichter, wirrer Lagerung, reich an Crinoidenstielgliedern, Bindemittel besteht aus feinkörnigem Kalzit und kleinen Ooiden, **62**.

0,10 m Bruchschillkalkstein mit großem Anteil an intraformationellen Konglomeraten, Komponenten bestehen aus scherbigen, wenig abgerolltem blaugrauem Kalkstein, 1—5 cm $\phi$, vereinzelt Bruchschillreste und Crinoidenstielglieder, Bindemittel: feinkristalliner Kalzit, Ooide, Glaukonitkörnchen.

—0,08 m Kalksteinbank, graublau bis grauschwarz, feinkristallin, unregelmäßige Oberfläche, z. T. aufgearbeitet, mit Bohrgängen von Trypanites weisei, **63**.

0,35 m Kalkstein, plattig bis feinplattig, durch dünne Mergelbestege getrennt (Wellenkalk).

0,10 m Kalkstein, flaserig (Wellenkalk wie oben), **64**.

0,25 m Kalkstein, grau, feinkristallin, feinplattig bis -knaurig (Wellenkalk).

0,40 m Kalkstein, knaurig bis grobknaurig, sonst wie oben (Wellenkalk).

0,15 m Kalkstein, flaserig, (Wellenkalk), **65**.

1,10 m Kalkstein, vorwiegend plattig, in Wechsellagerung mit flaserigem und knaurigem Kalkstein (Wellenkalk), **66**.

Liegendes: Unterer Wellenkalk (nicht aufgeschlossen).

*Profil 3:*

*Übergang Unterer-Mittlerer Muschelkalk bei Tiefenthal*

Hangendes: Mittlerer Muschelkalk

0,60 m Dolomitischer Kalkstein, feinkristallin, im frischen Zustand grau, angewittert ockergelb, fossilleer, **71**.

0,55 m Wechsellagerung: Dolomitischer Kalkstein, plattig bis 3 cm und dolomitischer Mergel, feinplattig.

0,20 m Dolomitischer Kalkstein, mikrokristallin, feingeschichtet, grau z. T. ockerig, schwach bituminös.

0,25 m Dolomitischer Kalkstein, konglomeratisch bis brekziös, (entspricht der intraformationellen Konglomeratlage, die den Mittleren Muschelkalk von den Orbicularisschichten trennt) Komponenten: Dolomitbrocken, hellgelblich, porös, mit Drusen von Kalkspat, dolomitische Kalkplättchen, ockerig bis braun, feinkristallin, kalkiges Bindemittel — die Größe der Komponenten von 1—4 cm nimmt von unten nach oben ab, **72**.

0,25 m Kalkstein, dolomitisch, plattig, blaugrau, z. T. durch ausgelaugte Kristalle (Anhydrit?) poröse Textur, im Liegenden Residuallage (Orbicularisschichten).

1,45 m Kalkmergel, schwach dolomitisch, fahlgrau und mild, z. T. noch graubraun, feinkristallin und fest, schwach bituminös, plattig 5—8 cm, in Wechsellagerung mit dolomitischen Mergeln 1—2 cm, **73**.

0,15 m Wechsellagerung: Kalkmergel, dolomitisch, fahlgrau, plattig 2—3 cm; Mergel, grau, dolomitisch, 1—5 cm.

0,25 m Wechsellagerung: Kalkmergel, fahlgrau, dolomitisch, feingeschichtet, plattig 3—5 cm, mit Mergelbestegen bis 0,5 cm.

0,30 m Wechsellagerung: Kalkmergel, grau, 2—3 cm, mit Mergeln, grau, 3—5 cm, **74**.

0,10 m Schill- bis Halbschillkalkstein, überwiegend aus Myophoria orbicularis neben einigen Gervillien aufgebaut, stark ineinandergeschachtelt, in flachen Rinnen und in Rillen abgelagert, **75**.

0,75 m Kalkstein, plattig, graublau, feinkristallin, schwach bituminös, splittriger Bruch, keine erkennbare Fossilführung, **76**.

0,25 m Bruchschillkalkstein, kristallin, vorwiegend Myophorienreste (3. Schaumkalkbank), **77**.

0,90 m Kalkstein, grau, plattig bis 5 cm, mit Mergellagen bis 1 cm wechsellagernd, **78**.

0,02 m Mergel, grau, blättrig.

0,10 m Wechsellagerung: Kalkstein, grau 1—2 cm, mit Mergellagen 1—2 cm.

0,30 m Wechsellagerung: Kalkmergel, grau und Mergel, graugrünlich, z. T. schwach feinsandig, wenig Materialunterschied.

0,08 m Kalkstein, feinkristallin, grau mit rostfarbigen Füllungen, z. T. umkristallisierte Fossilrelikte erkennbar.

0,12 m Mergel, grauoliv, feinblättrig.

0,12 m Kalkstein, mikrokristallin, blaugrau, kompakt, **79**.

0,35 m Wechsellagerung: Kalkmergel, feinkristallin, graubräunlich, feinplattig, mit Mergel, grau, dicht.

0,03 m Kalkstein, feinkristallin, graublau bis graubraun, fossilfrei, **80**.

0,43 m Halbschillkalkstein, poröse Textur, bituminös, graugrün infolge von Glau-

konitführung, Muschelschalen meist in wirrer Lagerung, keine deutliche Schichtung (Hangendteil der mittleren Schaumkalkbank), **31**.

0,10 m Kalkstein, feinkristallin, (umkristallisiert), z. T. noch oolithisch, vereinzelt auch Muschelschalenreste, durch 0,5—1 cm Mergelzwischenlagen gegliedert.

0,55 m Oolithischer Kalkstein, Ooide maximal 1,5 mm $\phi$, das massige Gestein hat in frischem Zustand ein graubläuliches bis graugrünes Aussehen infolge seines Gehaltes an Glaukonit, nur sporadisch sind Muschelschalen in ungeregelter Lagerung eingeschaltet. **82**.

Der Liegendteil dieser 2. Schaumkalkbank war an dieser Stelle nicht mehr aufgeschlossen. Er besteht aus einer intraformationelle Konglomerate führenden Bruchschillzone, die Basis besteht entweder aus dem noch vorhandenen Bohrwurmkalk oder aus einer Erosionsfläche. **83**.

Liegendes: Wellenkalkzwischenmittel, (oberer Wellenkalk der Schaumkalkzone).

Sowohl Liegend- als Hangendgrenze des Unteren Muschelkalkes sind als Fasziesgrenzen im Sinne von VOLLRATH (1924) aufzufassen. Ihre Ausbildung soll etwas näher betrachtet werden:

2. *Die Liegendgrenze: Grenzgelbkalk*

Nach den größtenteils kontinental-evaporitischen Ablagerungen des Röt sind Myophorienschichten und G r e n z g e l b k a l k die ersten Sedimente unter ± normal marinen Bildungsbedingungen. Das im einzelnen diskontinuierliche, im ganzen allmähliche Vorrücken der marinen Fazies von Norden in Richtung auf die untere Tauber führte zur Bildung dieser noch ± dolomitischen Sedimente.

Petrographisch bleibt der Grenzgelbkalk im gesamten Untersuchungsgebiet stets ein feinkörniger bis dichter homogener oder feingeschichteter Kalkstein. Seine Mächtigkeit schwankt zwischen 0,35 m (Kissingen) und 1,70 m (Gambach). Außer Wirbeltierresten ist das Gestein meist fossilfrei, lediglich in seinem Hangendteil wurden — z. B. bei Lengfurt — Bohrgänge von *Trypanites* und *Balanoglossites* beobachtet.

Die Grenze des Unteren Muschelkalkes zum Liegenden (Röt) wurde seit F. VON SANDBERGER stets an die Basis des Grenzgelbkalkes gelegt.

Einen Überblick über die geochemische Variationsbreite des Grenzgelbkalkes gestatten die Hauptbestandteile: Kalzium, Magnesium und Kohlendioxyd — wodurch der autochthone Sedimentanteil und dessen Verhältnisse von Ca und Mg erfaßt werden können (Tab. 1, Tab. 2).

Aus den in Tabelle 1 und 2 angeführten Werten wird deutlich, daß bei gleichbleibendem Gesamtkarbonatgehalt und weitgehend gleichem lithologischem Habitus das Ca/Mg-Verhältnis vom Liegenden zum Hangenden deutlich zunimmt. Dies entspricht einer Abnahme des dolomitischen Anteiles

des Gesteins und bedeutet genetisch eine Abnahme der Salinität zur Bildungszeit.

Tabelle 1: Sammelproben aus Bohrung I/59 bei Lengfurt

| Grenzgelbkalkprofil | | Ca % | Mg % | $CO_2$ % | Ca/Mg |
|---|---|---|---|---|---|
| Hangendteil | 0,9—1,2 m | 32,5 | 0,62 | 35,7 | 51,3 |
| Mittelteil | 0,3—0,9 m | 32,0 | 0,76 | 36,1 | 42,2 |
| | | 30,0 | 1,30 | 35,1 | 23,4 |
| Liegendteil | 0—0,3 m | 29,2 | 3,64 | 34,7 | 7,9 |

Tabelle 2: Einzelproben Grenzgelbkalk

| Lokalität | $CO_2$ % | Ca/Mg |
|---|---|---|
| 1. Greußenheim, oberer Teil | 39,1 | 61,5 |
| 2. Gössenheim, oberer Teil | 36,4 | 45,6 |
| 3. Gambach, mittlerer Teil | 27,4 | 41,2 |
| 4. Volkenberg, unterer Teil | 32,2 | 30,7 |
| 5. Lengfurt—Kallmuth, unterer Teil | 31,0 | 6,5 |
| 6. Karlstadt, unterer Teil | 36,3 | 6,1 |
| 7. Thüngersheim, unterer Teil | 28,2 | 2,6 |

*3. Die Hangendgrenze: Orbicularisschichten*

Alle Gesteine der Orbicularisschichten sind lithologisch sehr ähnlich. Die Gesamtkarbonatgehalte zeigen, daß es sich bei den sogenannten „Orbicularis mergeln" nicht um Mergel ($CO_2$-Gehalte von ca. 15,8 bis 27,6 Prozent), sondern um Kalke, höchstens Mergelkalke bis Kalkmergel, handelt. Vgl. Tab. 3.

Die auffälligen Unterschiede im dolomitischen Anteil (Ca/Mg 48,9 kalkig, Ca/Mg 1,7 - nahezu reiner Dolomit) charakterisieren die Orbicularisschichten genetisch als Übergangszone von einem ± normal marinem zu einem hochsalinarem Ablagerungsmilieu (spiegelbildliches Verhalten zu den Verhält-

Tabelle 3: Einzelproben aus den Orbicularisschichten

| Lokalität | $CO_2$ % | Ca/Mg |
|---|---|---|
| 1. Karlstadt, Hangendteil | 40,4 | 1,7 |
| 2. Steinbachtal/Würzburg, Hangendteil | 43,7 | 2,6 |
| 3. Karlstadt, Hangendteil | 39,3 | 3,6 |
| 4. Hochhausen/Tauber, Hangendteil | 39,3 | 6,8 |
| 5. Karlstadt, Hangendteil | 40,3 | 14,0 |
| 6. Tiefenthal, Liegendteil | 34,8 | 44,2 |
| 7. Steinbachtal/Würzburg, Liegendteil | 31,1 | 48,9 |

nissen innerhalb des Grenzgelbkalkes). Die genetisch wichtige Grenze zwischen kalkigen und dolomitischen Gesteinen mit äußerlich gleichem Habitus verläuft also innerhalb der Orbicularisschichten.

Seit SANDBERGER wurden diese Schichten mit *Myophoria orbicularis* zum Unteren Muschelkalk gestellt, wenn auch die Grenzziehung zum Mittleren Muschelkalk immer wieder unter den verschiedensten Gesichtspunkten diskutiert wurde.

Für eine Einstufung in den Unteren Muschelkalk spricht:

a) die noch vorwiegend kalkige Ausbildung, besonders des Liegendteiles
b) das Vorhandensein einer zwar spärlichen, doch individuenreichen Fauna
c) das verbreitete Vorkommen von Schaumkalk und des Liegendteiles der Orbicularisplatten in einem Aufschluß, weshalb dieser Teil oft den Abschluß der Steilstufe des Unteren Muschelkalkes bildet.

Für eine Zuordnung zum Mittleren Muschelkalk könnte geltend gemacht werden:

a) der petrographische Habitus: vorwiegend plattige Ausbildung
b) der geochemische Einschnitt: Hangendteil dolomitisch
c) der faunistische Einschnitt: Eintönigkeit der Fauna
d) die morphologische Einheit zusammen mit Gesteinen des Mittleren Muschelkalkes: Tendenz zur Verebnung.

Diese Einstufung wurde im Untersuchungsgebiet von REIS & KRAUS (1926), REIS (1928) und GENSER (1930) angewandt, darüber hinaus von LORETZ, BORNEMANN, FRANTZEN & von KOENEN, R. WAGNER, GRUPE, SCHUBERT u. a. Da die genetisch wichtige „Kalk-Dolomit-Grenze" im Untersuchungsgebiet wie in vielen anderen Gebieten in verschiedenen stratigraphischen Ab-

schnitten innerhalb der Orbicularisschichten verläuft und ohne geochemische Untersuchungen nicht festgelegt werden kann (GENSER 1930, JUBITZ 1958), muß die Grenze zwischen Unterem und Mittlerem Muschelkalk nach feinstratigraphischen Merkmalen gezogen werden, die sich mit den Forderungen des kartierenden Geologen vereinbaren lassen:

Hierzu ist die 3. Schaumkalkbank wegen ihrer lückenhaften Ausbildung nicht geeignet und eine Tieferlegung der Grenze mu/mm wäre nicht sinnvoll. Stratigraphischen Wert besitzt dagegen eine großoolithische bzw. brekziöse Kalkbank „innerhalb" der Orbicularisschichten, die im Taubertal, in dem Gebiet um Mosbach und im Bereich des östlichen Odenwaldes nachgewiesen wurde (BARTZ 1950; LODEMANN 1958, 1960).

Das Auftreten einer spezifischen Kalkbank im Grenzbereich Orbicularisschichten — Mittlerer Muschelkalk konnte auch in Unterfranken an mehreren Stellen beobachtet werden — so bei Werbach als großoolithische Kalkbank, bei Karlstadt als intraformationelle Konglomeratbank, bei Tiefenthal als Konglomeratbank in brekziöser Ausbildung. Damit erscheint es möglich, auch für Unterfranken eine einheitliche Grenzziehung nach folgenden Merkmalen vorzunehmen:

*a) Einstufung in den o b e r s t e n Unteren Muschelkalk:*

feinkristalline, homogene plattige Kalke bis Kalkmergel, z. T. mit Muschelpflastern oder vereinzelten Myophorien, z. T. dolomitisch (Orbicularisschichten) und/oder

intraformationelle Konglomeratbank, brekziöse oder großoolithische Kalkbank, meist sekundär dolomitisiert.

*b) Einstufung in den u n t e r s t e n Mittleren Muschelkalk:*

feinkristalline, stets typisch feingeschichtete Kalke bis Dolomite, plattig wie Orbicularisschichten, aber ebenflächiger, oder Gesteine gleicher Ausbildung, aber dickbankig (Basiskarbonate des Mittleren Muschelkalkes).

# C. Geochemisch-Lithologischer Teil

## I. Problematik und Methodik

### 1. *Aufgabenstellung*

Im Unteren Muschelkalk ließen sich durch feinstratigraphische und geochemische Methoden eine Reihe von Gesetzmäßigkeiten nachweisen, die in ihrer Bedeutung für die Genese diskutiert werden sollen. In diesem Rahmen interessieren besonders:

1. Welche Gesetzmäßigkeiten bestehen in der Karbonatsedimentation und welche Bedeutung haben sie für Stratigraphie und Genese?
2. Welche Beziehungen bestehen zwischen den strukturell-texturellen Merkmalen der Gesteine und ihrer geochemischen Zusammensetzung?

Tabelle 4: Profil durch den Unteren Muschelkalk (mu1) von Lengfurt (Sammelproben von je 0,90 m, laufende Proben-Nr. vom Hangenden zum Liegenden; nichtbestimmte Werte sind durch — gekennzeichnet)

| Prob.-Nr. | Glüh-verl. | $SiO_2$ % | $Al_2O_3$ % | $Fe_2O_3$ % | CaO % | MgO % | $SO_3$ % | B ppm | Ca/Mg Vollanalyse |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 38,58 | 8,63 | 3,35 | 1,07 | 46,84 | 0,95 | 0,01 | — | 58,8 |
| 2 | 38,66 | 7,98 | 2,74 | 1,14 | 47,61 | 0,79 | 0,01 | — | 71,8 |
| 3 | 38,20 | 8,65 | 3,56 | 1,27 | 47,05 | 0,77 | 0,04 | — | 71,2 |
| 4 | 36,06 | 12,28 | 5,06 | 1,74 | 43,91 | 1,16 | 0,01 | — | 45,2 |
| 5 | 35,90 | 12,13 | 5,28 | 1,75 | 43,25 | 1,18 | 0,01 | — | 43,4 |
| 6 | 35,97 | 12,25 | 5,28 | 1,71 | 43,27 | 0,99 | 0,04 | — | 52,1 |
| 7 | 34,70 | 13,87 | 5,75 | 2,00 | 41,79 | 1,25 | 0,01 | — | 39,6 |
| 8 | 35,20 | 13,41 | 4,56 | 1,97 | 42,52 | 1,25 | 0,01 | — | 40,4 |
| 9 | 33,90 | 15,17 | 6,11 | 2,04 | 41,00 | 1,02 | 0,01 | — | 47,9 |
| 10 | 37,55 | 9,65 | 3,84 | 1,52 | 45,93 | 0,97 | 0,01 | — | 56,2 |
| 11 | 38,32 | 8,17 | 3,67 | 1,32 | 46,91 | 0,76 | 0,01 | 170 | 74,5 |
| 12 | 37,60 | 9,20 | 3,90 | 1,32 | 46,48 | 0,97 | 0,01 | 163 | 57,4 |
| 13 | 38,18 | 8,08 | 3,27 | 1,18 | 47,59 | 0,88 | 0,01 | 165 | 64,1 |
| 14 | 38,18 | 9,31 | 3,93 | 1,37 | 46,54 | 0,96 | 0,01 | 156 | 56,9 |
| 15 | 35,94 | 11,22 | 4,71 | 1,73 | 44,50 | 0,95 | 0,01 | 152 | 55,8 |
| 16 | 36,06 | 11,46 | 4,69 | 1,75 | 44,23 | 0,97 | 0,01 | 77 | 54,2 |
| 17 | 39,96 | 6,15 | 2,57 | 1,06 | 48,98 | 0,86 | 0,01 | 160 | 65,7 |
| 18 | 39,71 | 6,22 | 2,57 | 1,00 | 49,25 | 0,86 | 0,01 | 117 | 59,5 |
| 19 | 37,33 | 9,35 | 3,81 | 1,34 | 46,59 | 0,99 | 0,01 | 208 | 56,2 |
| 20 | 35,91 | 11,61 | 4,90 | 1,69 | 43,85 | 1,23 | 0,01 | 163 | 42,2 |
| 21 | 39,50 | 6,26 | 6,64 | 1,02 | 49,05 | 0,80 | 0,01 | 169 | 72,9 |
| 22 | 37,12 | 9,81 | 4,06 | 1,43 | 45,90 | 0,91 | 0,01 | 205 | 60,8 |
| 23 | 34,59 | 12,98 | 5,61 | 1,83 | 42,62 | 1,03 | 0,01 | 190 | 49,0 |
| 24 | 33,70 | 14,91 | 6,54 | 2,19 | 40,15 | 1,21 | 0,01 | 199 | 39,3 |
| 25 | 37,24 | 9,36 | 3,97 | 1,59 | 45,83 | 0,92 | 0,01 | 171 | 57,7 |
| 26 | 37,60 | 9,28 | 4,08 | 1,45 | 45,79 | 0,92 | 0,01 | 89 | 58,5 |
| 27 | 34,36 | 13,00 | 5,89 | 2,03 | 41,74 | 1,07 | 0,01 | 167 | 46,5 |
| 28 | 29,10 | 21,51 | 9,10 | 2,84 | 33,48 | 2,76 | 0,01 | 152 | 13,6 |
| 29 | 34,61 | 13,50 | 5,70 | 1,94 | 41,35 | 1,60 | 0,05 | 152 | 30,6 |
| 30 | 31,90 | 17,61 | 6,76 | 2,24 | 37,48 | 2,85 | 0,04 | 204 | 15,6 |
| 31 | 35,05 | 13,54 | 4,93 | 2,38 | 40,40 | 2,88 | 0,03 | 190 | 16,6 |
| 32 | 33,86 | 15,33 | 5,58 | 2,55 | 38,33 | 3,01 | 0,11 | — | 15,2 |
| 33 | 26,01 | 23,98 | 13,12 | 10,95 | 23,25 | 2,25 | 0,15 | — | 13,9 |

3. Bestehen vergleichbare Gesetzmäßigkeiten innerhalb der Karbonatphase zu denen des echten Salinarzyklus?
4. Bestehen Gesetzmäßigkeiten zwischen Fossilführung, dem Auftreten von intraformationellen Konglomeraten, Schill- bis Bruchschillkalken sowie Oolithkalken einerseits und geochemischen Parametern andererseits?

Vollanalysen können uns einen allgemeinen Überblick über die Gesamtzusammensetzung der Sedimente geben. Aus Tab. 4 ist ersichtlich, daß die Gruppen $SiO_2$, $Al_2O_3$ und $Fe_2O_3$ untereinander gut korrelierbar sind. Diese Korrelation ist in erster Linie auf ihre Bindung in den Tonmineralen zurückzuführen. Wie eine Röntgenanalyse einer größeren Sammelprobe ergab, sind am Aufbau der nicht karbonatischen Sedimentfraktion überwiegend Illit, untergeordnet Montmorillonit und Kaolinit beteiligt. Ferner sind Quarz, Feldspäte, Glimmer und Schwerminerale enthalten.

Zu der Gruppe $SiO_2$-$Al_2O_3$-$Fe_2O_3$ zeigen Kalium und Phosphor eine gewisse positive Korrelation entsprechend ihrer Zugehörigkeit zum allochthonen Sedimentanteil. Für Phosphor scheint auch eine Bindung in Form kryptokristallinen Phosphatkarbonates möglich zu sein (Degens u. a. 1960).

In der Vollanalyse wird der Magnesium-Gehalt (MgO) der Tonminerale und des Karbonates summarisch erfaßt und ergibt eine lose, aber noch deutliche Korrelation von MgO zu der Gruppe der allochthonen Komponenten. Der Karbonatgehalt ($CO_2$) — hier angenähert durch den Glühverlust wiedergegeben — verläuft zusammen mit dem Kalzium-Gehalt (CaO) als Hauptbestandteil der karbonatischen Sedimentfraktion genau entgegengesetzt der Gruppe $SiO_2$, $Al_2O_3$, $Fe_2O_3$.

Das Ca/Mg-Verhältnis der Vollanalyse spiegelt im wesentlichen das Verhältnis „Ton/Karbonat" wider. Ein Maß für das „Kalk/Dolomit-Verhältnis" ist nur durch Berechnung des an $CO_2$ gebundenen CaO und MgO zu erhalten.

Die Sulfat-Gehalte ($SO_3$) sind im allgemeinen gering. Bei größeren Gehalten ergeben sich Korrelationen zum Ca/Mg-Verhältnis und zum Bor-Gehalt (Abb. 6).

Bei bedeutenden Konzentrationen wird der Sulfat-Gehalt schon makroskopisch durch Einschlüsse von Anhydrit, Gips oder durch Hohlräume bereits ausgelaugter Kristalle und Linsen erkennbar (Reis 1901, Jubitz 1958) und erlangt so diagnostische Bedeutung für die Beurteilung des Dolomitgehaltes.

Diese Erscheinungen sind in den Grenzbereichen Kalk/Dolomit/Anhydrit allgemein verbreitet. Für die Sedimentation im Unteren Muschelkalk — besonders durch die Ausbildungen an den Grenzen so/mu und mu/mm — geben sie uns deutliche Hinweise auf die Verbindung zum echten Salinarzyklus (vgl. Richter-Bernburg 1955).

Für genetische Fragen ist eine getrennte Betrachtung der autochthonen und

allochthonen Sedimentfraktion sinnvoll, da die Vollanalyse die geochemischen Verhältnisse innerhalb der einzelnen Sedimentfraktion verschleiert und jede Interpretation erschwert.

Die weiteren geochemischen Untersuchungen stützen sich vor allem auf die autochthone Sedimentfraktion, die die chemisch-physikalischen Bedingungen des Environments am besten widerspiegelt. Dieser Fraktion entspricht bei unseren Untersuchungen das HCl-Lösliche, also die Karbonate und die von ihnen kollektierten Elemente.

2. *Probenentnahme*

Zur geochemischen Untersuchung dienten Einzelproben aus feinstratigraphisch aufgenommenen Profilen. Die geochemische Gesamttendenz kommt am besten in Sammelproben zum Ausdruck. Dafür geeignetes Probenmaterial liefert z. B. das mit Luftspülung arbeitende Salzgittergerät H-60, bei dem das Bohrklein sofort durch einen Preßluftstrom ausgebracht wird. Jeder Hub des Bohrgerätes erbrachte gegebenenfalls eine Sammelprobe von einem 0,30 m mächtigen Profilabschnitt. Das gesamte Bohrgut eines jeden Vortriebes wurde gesammelt, geviertelt und zu einer Probe vereinigt. Die für die geochemischen Untersuchungen verwendeten Bohrungen wurden so ausgewählt, daß die Proben nicht durch Kluftbildungen und Verwitterung verfälscht waren.

Geochemisch-lithologisch untersuchte Profile:

1. Unterer Muschelkalk von 29 Bohrungen aus dem Gebiet Homburg — Lengfurt — Erlenbach (Geochemisches Richtprofil)
2. Unterer Muschelkalk von Lengfurt (Vollanalysen, Proben-Nr. 1—33)
3. Übergang Oberer Buntsandstein — Unterer Muschelkalk am Kallmuth zwischen Homburg und Lengfurt (Einzelproben, Nr. 34—50)
4. Profil im Bereich der Oolithbank beta am Kallmuth (Einzelproben, Nr. 57—66)
5. Übergang Unterer Muschelkalk — Mittlerer Muschelkalk bei Tiefenthal (Einzelproben, Nr. 71—83)
6. Übergang Unterer Muschelkalk — Mittlerer Muschelkalk bei Karlstadt (Einzelproben, Nr. 84—94)
7. Übergang Mittlerer Muschelkalk — Oberer Muschelkalk an der Wenzelsmühle bei Obervolkach (Einzelproben, Nr. 108—137)
8. Unterer Muschelkalk von Lengfurt (Sammelproben von je 0,30 m, Nr. 138—368).

3. *Aufbereitung der Gesteinsproben:*

Das aus Einzelproben bestehende Gesteinsmaterial wurde gewaschen, bei

100° C getrocknet und in einer Backenpresse zerkleinert. Die Sammelproben konnten gleich getrocknet werden. Die geknackten Gesteinsproben wurden gemahlen und auf eine Korngröße kleiner als 0,05 mm gebracht. Das so gewonnene Material bildete die analytische Grundsubstanz.

Davon wurden 4 g eingewogen, mit 2n HCl versetzt und zwei Stunden bei 90° C aufbereitet. Die Lösung wurde filtriert, mit destilliertem Wasser gewaschen und auf 100 ml aufgefüllt. Hiervon wurden 25 ml abpipettiert (das entspricht dem HCl-löslichem von 1 g Grundsubstanz) und auf 100 ml aufgefüllt. Diese Lösung diente zur Bestimmung von Kalzium, Magnesium, Phosphor und Kalium sowie zum qualitativen Nachweis von Strontium und Mangan. Die hohen Ca-Konzentrationen wirkten sich auf Strontium und Mangan so störend aus, daß von quantitativen Angaben abgesehen werden mußte. Aus dem verbliebenen Rest von 75 ml (entsprechend 3 g Einwaage) wurde Eisen bestimmt.

4. *Chemische Nachweismethoden:*

Die flammenanalythischen und spektralphotometrischen Untersuchungen wurden mit dem ZEISS-Spektralphotometer PMQ II mit Flammenzusatz ausgeführt. Ca, Mg und K wurden flammenphotometrisch bestimmt. Zur Anregung diente eine Wasserstoff-Sauerstoff-Flamme (Druck: Sauerstoff 0,30 kg / cm², Wasserstoff 220 mm WS). Die Eichlösungen wurden den Analysenlösungen in Zusammensetzung und Konzentration weitgehend angepaßt, um die Störeinflüsse durch Fremdelemente zu verringern bzw. weitgehend auszuschalten.

Phosphor wurde photometrisch bestimmt. Gemessen wurde die Gelbfärbung des Molybdivanado-Phosphorsäure-Komplexes in 2 cm Küvetten. Für die Bor-Bestimmungen wurde das bei 70° C getrocknete, gewaschene HCl-Unlösliche verwendet und zwar die Fraktion unter 0,05 mm. Die Bor-Analysen wurden nach der für Reihenuntersuchungen geeigneten Methode nach Ernst und Werner (1959) durchgeführt. Nach dem Sodaaufschluß von 350 mg wird das Bor im Methanoldampfstrom als Borsäure-Methyl-Ester destilliert. Die am Schluß des weiteren Arbeitsganges auftretende Blaufärbung wurde photometrisch gemessen und mit Hilfe einer Eichkurve die Gehalte in g/t (ppm) ermittelt, die sich auf 1 t HCl-unlösliche Substanz beziehen. Eisen wurde maßanalytisch nach Reinhardt-Zimmermann bestimmt. Ebenfalls maßanalytisch wurden die Karbonatbestimmungen vorgenommen, indem 1 g Analysensubstanz mit 20 ml 1n HCl versetzt und die überschüssige Säure mit 0,5 n NaOH titriert wurde. Die Vollanalysen führte das Labor des Zementwerkes Lengfurt aus.

Alle verwendeten Nachweismethoden sind in Tabelle 5 zusammengestellt.

Tabelle 5: Zusammenstellung der verwendeten chemischen Nachweismethoden

| Nachgew. Elemente | Art der Bestimmung |
|---|---|
| Mg | a) flammenphotometrisch (285 mμ und 371 mμ)<br>b) maßanalytisch (Titriplex III) |
| Ca | a) flammenphotometrisch (554 mμ)<br>b) maßanalytisch (Titriplex III) |
| Fe | a) maßanalytisch (REINHARD-ZIMMERMANN)<br>b) maßanalytisch (Titriplex III) |
| K | flammenphotometrisch (768 mμ) |
| P | kolorimetrisch (430 mμ) |
| Al | gravimetrisch (als $Al_2O_3$) |
| B | kolorimetrisch (630 mμ) nach ERNST & WERNER (1959) |
| $SiO_2$ | gravimetrisch (als $SiO_2$) |
| $CO_2$ | a) maßanalytisch (mit 0,5 n NaOH)<br>b) gravimetrisch (Glühverlust) |
| $SO_3$ | gravimetrisch (als $BaSO_4$) |
| Freies $SiO_2$ | gravimetrisch (Quarz) |

5. *Zur Auswertung der Analysen*

Die HCl-löslichen Bestandteile der untersuchten autochthonen Sedimentfraktionen bestehen hauptsächlich aus Karbonaten, Eisen- und Manganhydroxyden und -oxyden sowie geringen Mengen Phosphat und Sulfat. Für die Interpretation der Ca/Mg-Verhältnisse war der Einfluß von Magnesium aus den Tonmireralen von besonderem Interesse.

Zur Abschätzung dieser Beeinflussung wurden die Ca/Mg-Verhältnisse von Vollanalysen mit denen von Analysen des HCl-Löslichen verglichen. Dabei zeigte sich, daß das Verhältnis Ca/Mg der Vollanalyse im wesentlichen das „Karobnat-Ton"-Verhältnis widerspiegelt, das Ca/Mg-Verhältnis aus dem HCl-Löslichen dagegen nur in geringem Umfang durch die allochthonen Komponenten beeinflußt wird.

Für die Gesteine des Unteren Muschelkalkes mit durchschnittlich 25 bis

35 % allochthonen Bestandteilen ist die Modifizierung der Ca/Mg-Relationen so gering, daß eine den Umfang der Beeinflussung berücksichtigende Interpretation der Ca/Mg-Verhältnisse möglich ist.

Eine Klassifizierung der Gesteine im einzelnen kann erfolgen:

a) *nach chemisch-petrographischen Gesichtspunkten,*
wobei zu unterscheiden sind Tongestein (0 bis 15 % Karbonat), Mergel (15 bis 35 %), Kalkmergel (35 bis 65 %), Mergelkalk (65 bis 75 %), Kalkstein, mergelig (75 bis 85 %) und Kalkstein (85 bis 100 %) — vgl. hierzu BARTH, CORRENS, ESCOLA (1961), H. MÜLLER (1958). Nach dem Ca/Mg-Verhältnis können dolomitische (Ca/Mg 3,3 bis 1,7), schwach dolomitische (3,3 bis 60) und kalkige Gesteine (Ca/Mg über 60) unterschieden werden (CHILINGAR 1957).

b) *nach strukturell-texturellen Merkmalen und Fossilführung,*
wobei Merkmale wie Schichtung, Kristallinität und Anordnung der detritischen Komponenten sowie quantitative Anteile der erhaltungsfähigen organogenen Hartteile und u. U. deren qualitative Zusammensetzung zu berücksichtigen sind.

Danach können im Unteren Muschelkalk folgende Gesteinstypen unterschieden werden (Abb. 2):

1. *Sporadisch fossilführende Gesteine*
   a) plattige Wellenkalke
   b) flaserige Wellenkalke
   c) knaurige Wellenkalke
   d) konglomeratische Wellenkalke

   } Die strukturell-texturellen Begriffe werden bei der Behandlung der einzelnen Gesteine näher erläutert.

2. *Stets fossilführende Gesteine*
   a) Bohrwurmkalke (mit Bohrgängen durchsetzt — Dachfläche oft mit sessilen Muscheln)
   b) Konglomeratische Kalksteine (intraformationelle Konglomerathorizonte, crinoiden- bis bruchschillführend)
   c) Konglomeratische Bruchschillkalke (z. T. crinoidenführend, z. T. oolithisch)
   d) Schill- bis Bruchschillkalke (z. T. crinoidenführend, z. T. oolithisch, sporadisch intraformationelle Gerölle führend)
   e) Oolithische Kalksteine (meist ± crinoiden- und schillführend)
   f) „Seesinterkalke" (lamellare Feinstruktur)
3. *Stark umkristallisierte Gesteine*
   a) Mikro- bis feinkristalline Kalksteine (z. T. kryptogene Feinschichtung von kleinsten Schalenrelikten, die nur im angewitterten Zustand oder mikroskopisch erkennbar)
   b) Mikro- bis feinkristalline, dolomitische Kalksteine (z. T. feingeschichtet bis gebändert, im angewitterten Zustand z. T. als Zellenkalke ausgebildet)

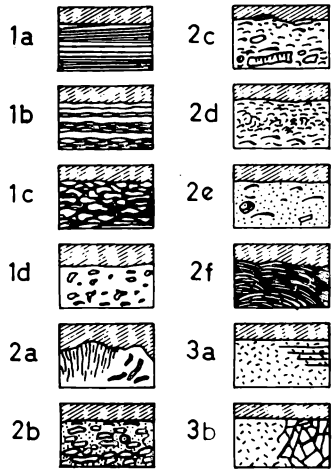



Abb. 2: Gesteinstypen des Unteren Muschelkalks (schematisch) Erläuterung auf Seite 25

## II. Untersuchungsergebnisse

1. *Beziehungen zwischen Geochemie und Lithologie, ihre chemostratigraphische und sedimentologische Auswertung*

Die Auswertung der Gesamtkarbonatbestimmungen von 29 Bohrungen hat gezeigt, daß maximal 4 km voneinander entfernte Bohrungen allein durch die Gesamtkarbonatdiagramme miteinander korreliert werden können. Durch Vergleiche mit Aufschlüssen (Steinbruch des Zementwerkes Lengfurt, Aufschlüsse am Kallmuth u. a.) konnten in den Diagrammen die stratigraphischen Hauptzonen festgelegt werden. Neben den charakteristischen Gesteinen der Oolith-, Terebratel- und Schaumkalkzone waren auch innerhalb des scheinbar eintönigen Wellenkalkes charakteristische Karbonatabfolgen nachzuweisen, die auch eine stratigraphische Einordnung von Teilprofilen auf chemostratigraphischer Grundlage ermöglichen (Taf. 1, Fig. 1, siehe Umschlag 3).

Durch die Korrelation der Gesamtkarbonat-Diagramme von stratigraphisch lückenlosen Bohrprofilen mit solchen von stratigraphisch noch unbekannten Abfolgen (z. B. bei Überlagerung mit Lößlehm) ließen sich im Unteren Muschelkalk auch Störungen nachweisen und deren Sprunghöhen auf ± 0,5 m genau bestimmen, was z. B. selbst im Aufschluß bei Verwerfungen innerhalb eintöniger Wellenkalke nicht immer möglich ist. Wie bereits durch die Untersuchungen von JUBITZ (1958) dargelegt, läßt sich die angewandte Methode erfolgreich für die Untersuchung von Kalklagerstätten nutzen. Darüber hinaus könnten auf dieser Grundlage quantitativ-chemostratigraphische Vergleiche über größere Gebiete gezogen werden.

Innerhalb der relativ eintönigen Wellenkalkserien sind nach strukturell-texturellen Merkmalen nur schwer gesetzmäßige Abfolgen erkennbar. Eine Gliederung kann stets nur nach dem jeweils vorherrschenden strukturell-texturellen Gesteinstypus erfolgen. Danach läßt sich folgender lithologischer Zyklus bedingt nachweisen:

| | |
|---|---|
| 4. *Kalkstein* (dickbankig, kompakt) | — Schill- bis Bruchschillkalk, teilweise oolithisch, Oolitischer Kalkstein, Intraformationelle Konglomeratbank. |
| 3. *Kalkstein* (Wellenkalk) . . . | — dickplattig bis plattig — plattig bis schwach flaserig. |
| 2. *Mergelkalk* (Wellenkalk) . . . | — fein- bis grobflaserig fein- bis grobknaurig. |
| 1. *Mergel bis Kalkmergel* (Wellenkalk) . . . . . | — fein- bis grobflaserig feinplattig bis flaserig. |

Diese Abfolge kann vom Liegenden zum Hangenden nacheinander durchlaufen werden (1—2—3—4), die rückläufige Abfolge (4—3—2—1) ist meist unterdrückt oder ihre Mächtigkeit ist gegenüber der ansteigenden Abfolge stark reduziert. Es handelt sich dabei um „Zyklen mittlerer Größenordnung" von 1 bis 10 m (FIEGE 1938, 1951 und FIEGE, LAMBRECHT & van LECKWIJK 1957, S. 301), die den Schwankungen in der Karbonatsedimentation entsprechen, wie sie im geochemischen Richtprofil zum Ausdruck kommen. Diese Sedimentationszyklen sind als Zyklotheme (WELLER 1931) aufzufassen. Die Mergel-Phase (z. T. dolomitisch) wird hier an den Beginn eines Zyklothems gestellt. Die petrographisch-texturellen Einheiten wirklich in eine echte genetische Abfolge zu ordnen scheitert an der Unvollständigkeit der Zyklotheme (vgl. JUBITZ 1958).

In geochemischer Sicht ist das Erscheinungsbild klarer. Aus den auf Taf. 1 zusammengestellten Untersuchungsergebnissen ist ersichtlich:

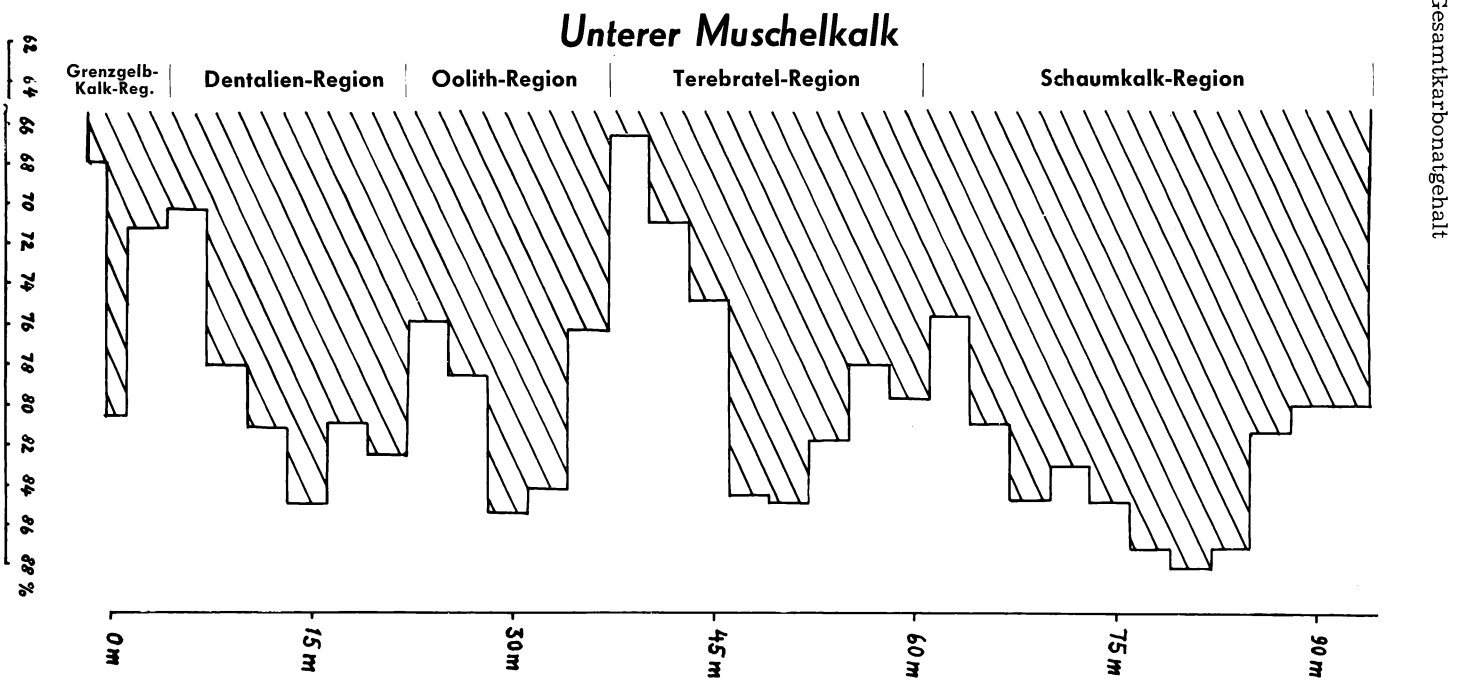
1. Es sind zyklische Schwankungen im Karbonat-Ton-Verhältnis festzustellen, sie entsprechen den meist asymmetrisch ausgebildeten Zyklothemen.
2. Im Verlauf des Unteren Muschelkalkes nimmt der Karbonatgehalt im einzelnen zwar diskontinuierlich, im Ganzen aber ± kontinuierlich zu.
3. In den Karbonatmaxima liegt im allgemeinen eine charakteristische kompakte Kalkbank, daneben treten aber auch innerhalb von Wellenkalkserien Karbonatmaxima auf, die nicht mit einer besonderen Kalkbank identisch sind.

Mehrere Zyklotheme lassen sich zu Megazyklothemen zusammenfassen, in

Tafel 1, Fig. 2:

## Zyklischer Sedimentationsverlauf im Unteren Muschelkalk von Unterfranken

Gesamtkarbonatdiagramm des Unteren Muschelkalkes aus dem Gebiet Homburg—Lengfurt—Erlenbach (Zusammenfassung der Karbonatgehalte über je 3 m aus 29 Bohrungen mit dem Salzgittergerät H 60. Danach sind 5 Megazyklotheme zu unterscheiden, die eine Gliederung in Grenzgelbkalk-, Dentalien-, Oolith-, Terebratel- und Schaumkalk-Region ergeben).



denen das Gesamtkarbonat ebenfalls zyklisch verläuft und im Bereich des Unteren Muschelkalkes vom Liegenden zum Hangenden generell zunimmt. Im untersuchten Gebiet nimmt auch ihre Mächtigkeit vom Liegenden zum Hangenden zu (Taf. 1, Fig. 2).

Von einer näheren Klassifizierung soll hier abgesehen werden, da solche Einteilungen nur in einem größeren regionalen Rahmen vorgenommen werden sollten, gewissermaßen als Integral aller geochemischen und strukturell-texturellen Untersuchungsergebnisse.

2. *Übergang Buntsandstein — Muschelkalk*

Die Entwicklungstendenz der Sedimentation und der geochemischen Parameter am Übergang Buntsandstein-Muschelkalk wird an einem Profil am Kallmuth abgeleitet (Profil 1, Abb. 3, Tab. 6).

Im oberen Röt erreicht der Karbonatgehalt einzelne Schwellenwerte, bleibt aber allgemein niedrig. Mit dem Grenzgelbkalk tritt eine sprunghafte Erhöhung ein. Ca als Hauptbestandteil des Karbonates geht mit dieser Entwicklung ± konform. Wie sich innerhalb des Grenzgelbkalkes deutlich zeigt, ist Mg unabhängig von Ca. Hier vollzieht sich bei ± gleichbleibendem $CO_2$ eine deutliche Abnahme des Mg. Diese Beziehungen werden am klarsten durch das Ca/Mg-Verhältnis wiedergegeben.

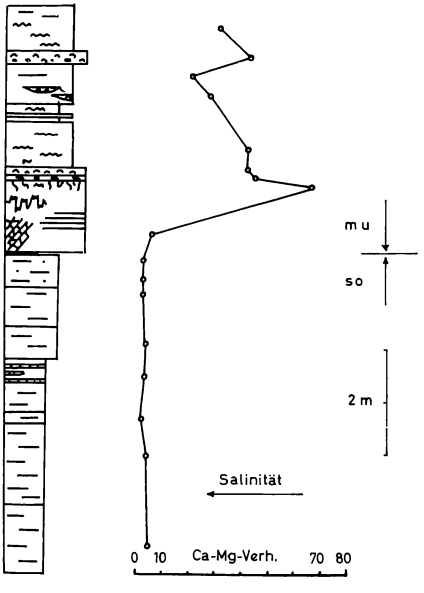



Abb. 3:
Übergangsprofil Buntsandstein-Muschelkalk am Kallmuth zwischen Homburg und Lengfurt (vgl. hierzu Profil 1, Tab. 6)

Im oberen Röt sowie im Liegendteil des Grenzgelbkalkes schwanken diese Relationen zwischen 1,7 und 10 und erreichen im Hangendteil des mit Bohrgängen durchzogenen Grenzgelbkalkes allgemein Werte über 40. Im folgenden Wellenkalk bewegen sich die Ca/Mg-Verhältnisse in weiten Grenzen zwischen 13 und über 100.

Tabelle 6: Übergang Oberer Buntsandstein — Unterer Muschelkalk am Kallmuth zwischen Homburg und Lengfurt (Einzelproben)

| Prob.-Nr. | Stratigraphie | Fe % | P % | K % | Ca % | Mg % | $CO_2$ % | Ca/Mg |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 34 | mu 1 | 1,34 | 0,013 | 0,23 | 27,2 | 0,85 | 30,2 | 32,0 |
| 35 | mu 1 | 1,08 | 0,010 | 0,03 | 37,2 | 0,85 | 41,1 | 43,7 |
| 36 | mu 1 | 1,00 | < 0,010 | 0,06 | 34,0 | 1,55 | 37,8 | 21,9 |
| 37 | mu 1 | 1,18 | 0,011 | 0,14 | 27,6 | 0,95 | 31,2 | 29,0 |
| 38 | mu 1 | 0,59 | < 0,010 | 0,10 | 36,4 | 0,78 | 37,3 | 46,6 |
| 39 | mu 1 | 1,06 | 0,010 | 0,06 | 34,8 | 0,81 | 38,9 | 42,9 |
| 40 | mu 1 | 1,18 | 0,014 | 0,08 | 33,6 | 0,74 | 37,3 | 45,4 |
| 41 | Ggk | 1,19 | 0,010 | 0,05 | 37,5 | 0,56 | 41,3 | 66,9 |
| 42 | Ggk | 1,55 | 0,012 | 0,06 | 24,8 | 3,72 | 31,0 | 6,6 |
| 43 | so 3 | 1,77 | 0,032 | 0,19 | 12,0 | 3,70 | 19,9 | 3,2 |
| 44 | so 3 | 2,25 | 0,028 | 0,13 | 11,3 | 3,48 | 18,6 | 3,2 |
| 45 | so 3 | 2,16 | 0,036 | 0,36 | 5,0 | 1,64 | 9,8 | 3,0 |
| 46 | so 3 | 1,05 | 0,020 | 0,17 | 16,4 | 3,40 | 21,5 | 4,8 |
| 47 | so 3 | 1,30 | 0,034 | 0,37 | 8,0 | 2,30 | 13,1 | 3,4 |
| 48 | so 3 | 2,45 | 0,037 | 0,34 | 3,2 | 2,93 | 5,7 | 1,1 |
| 49 | so 3 | 1,51 | 0,029 | 0,34 | 10,1 | 1,98 | 14,1 | 5,1 |
| 50 | so 3 | 3,74 | 0,036 | 0,47 | 3,0 | 0,56 | 5,1 | 5,3 |

Anmerkung: Alle Analysen sind stratigraphisch vom Hangenden zum Liegenden angegeben und fortlaufend numeriert. Es werden folgende Abkürzungen verwendet:

mo 2 — Ceratitenschichten
mo 1 — Trochitenkalk
mm 2 — Mittl. Muschelkalk, ober. Teil
HoZ — Hornsteinzone im mm 2
T 1, 2 — Terebratelbank, unt., obere
mu 2 — mittlerer Wellenkalk i. e. S.
LiGB — Lima-Gastropodenbank
OO 1, 2 — Oolithbank, alpha, beta

| | | | |
|---|---|---|---|
| mm 1 | — Mittl. Muschelkalk, unt. Teil | mu 1 | — unterer Wellenkalk i. e. S. |
| orb | — Orbicularisschichten | KglB | — intraformationelle Konglomeratbank |
| orbF | — Orbicularisschillkalk | | |
| X 1, 2, 3 | — Schaumkalkbank, untere, mittlere, obere | DeB | — Dentalien-Bänke |
| | | LiB | — Lima-Bank |
| mu 3 | — oberer Wellenkalk i. e. S. | Ggk | — Grenzgelbkalk |
| SpB | — Spiriferinabank | so 3 | — Obere Röttone |

Der Fe-Gehalt ist im Röt durchschnittlich 5 bis 10 mal höher als im Unteren Muschelkalk, er nimmt mit dem Grenzgelbkalk bedeutend ab, obwohl er hier innerhalb des Unteren Muschelkalkes ein relatives Maximum erreicht.

Die im HCl-Löslichen erfaßten Fe-Gehalte stehen im Grenzbereich so/mu in einem reziproken Verhältnis zum Karbonatgehalt.

Der Phosphor-Gehalt zeigt meist eine deutliche Korrelation zu Fe; vereinzelt auch zu $CO_2$, besonders dann, wenn es sich um fossilreiche Gesteine handelt. Kalium ist im allgemeinen mit P und Fe korreliert und verläuft umgekehrt wie Ca und Mg. In den K-Gehalten macht sich der Einfluß der detritischen Komponente bemerkbar.

*Geochemisch* ist die Buntsandstein-Muschelkalk-Grenze durch eine schnelle Zunahme des Gesamtkarbonates und eine sprunghafte Änderung im Ca/Mg-Verhältnis gekennzeichnet.

*Petrographisch* vollzieht sich ein schneller Übergang von dolomitischen Tongesteinen und Mergeln zu Kalkmergeln und Kalken mit abnehmendem Dolomitanteil.

*Genetisch* ist dieser Übergang eng mit den Bildungsbedingungen dolomitisch-kalkiger Sedimente verknüpft.

Graf und Goldsmith (1956) konnten unter hohen Druck- und Temperaturbedingungen Gesteine mit wechselnden Ca/Mg-Verhältnissen darstellen (Protodolomite). Im Vergleich zu normalem Dolomit (Ca/Mg 1, 648) sind diese Protodolomite metastabil und durch Überschuß an $CaCO_3$ gekennzeichnet.

Nach neueren Untersuchungen können normale Dolomite aber auch unter natürlichen p-t-Bedingungen entstehen. Solche Dolomite sind im Großen Salzsee (Twenhovel 1950), im Kaspischen Meer, im Aral- und Balchaschsee (Vitalj 1953, Strachow 1958) gefunden und untersucht worden.

So wurden z. B. in einem rezenten Sediment der Kara Bogas-Bucht des Kaspischen Meeres 15,5 % Magnesit, 27,7 % Gips, ca. 30 % Glaubersalz und ca. 26,8 % Dolomit und Kalzit gefunden.

Die Analyse der hydrochemischen Verhältnisse zeigte stets deutlich erhöhte

Salinität, in vielen Fällen eine Erhöhung der Alkalireserven und des pH-Wertes.

Es konnte ferner gezeigt werden, daß die Mineralbildung bei der Erhöhung der Salinität von Kalkspat (Salinität bis 7 ‰) über Kalkspat und Dolomit (Salinität 7 bis 18 ‰) nach Dolomit (Salinität über 18 ‰) verläuft und schließlich neben der Ausscheidung von echten Evaporiten zu getrennter Bildung von Kalkspat und Magnesit führt (STRACHOW 1958, vgl. auch BUDZINSKI 1961, HEIMLICH 1959).

Für die dolomitische Randfazies des Germanischen Muschelkalkes wurde bereits von BRINKMANN (1925) ein höherer Salzgehalt des Muschelkalkmeeres angenommen und eine synsedimentäre Dolomitbildung postuliert.

Nach den vorliegenden geochemischen Untersuchungsergebnissen, speziell nach dem Verlauf der Ca/Mg-Verhältnisse, den verschiedenen Sulfat- und Bor-Gehalten (Abb. 6) muß auch für die zeitliche Abfolge mit verschiedenen Salzgehalten gerechnet werden. Die Gesetzmäßigkeiten im Verlauf der Ca/Mg-Verhältnisse an der Röt-Muschelkalkgrenze können an allen Profilen bestätigt werden (vgl. JUBITZ 1958); auch dies spricht für eine primäre Bildung von Karbonaten, deren verschiedenes Ca/Mg von der jeweiligen Salinität beeinflußt ist.

Die geochemischen Parameter lassen demnach auf Salinitätsschwankungen schließen und damit auf wiederholte Änderungen des Environments. Für unsere Untersuchungen wurden folgende Kriterien berücksichtigt:

a) Das Ca/Mg-Verhältnis als Maß für den unterschiedlichen Dolomitgehalt der Gesteine (WERNER 1958, DEGENS 1959, DEGENS, KNETSCH, REUTER 1960, REUTER 1961).

b) Der Bor-Gehalt zeigt in marinen Sedimenten ebenfalls eine Abhängigkeit von der Salinität, da die Absorption von B durch die Tonminerale (bevorzugt durch Illit) bei erhöhter Salinität größer ist.

Für die Bestimmung der Salinitätsfazies mit Hilfe des B-Gehaltes sind streng genommen nur Gesteine mit gleichem Tonanteil vergleichbar, da andernfalls in erster Linie der verschiedene Tonanteil für die B-Gehalte bestimmend ist (vgl. HEIDE & THIELE 1956). Bor wurde deshalb aus der HCl-unlöslichen Fraktion bestimmt, wo sich besonders bei Gesteinen mit niedrigem Ca/Mg (HCl-lösliche Fraktion) deutliche Korrelationen zwischen Ca/Mg und B zeigten (Abb. 6). Die Gehalte stimmen mit den von HARDER (1959) angegebenen Durchschnittswerten — in Kalken bis 200 g/t B und in Dolomiten bis 300 g/t — überein.

c) Der Sulfat-Gehalt spielt besonders im Grenzbereich Kalk-Dolomit-Anhydrit nicht nur eine Rolle für die Beurteilung des Dolomitanteiles (JUBITZ 1958), sondern ist zugleich ein Hinweis für die Beurteilung der Salinitätsfazies.

### 3. *Stratigraphische Leitzonen im Unteren Muschelkalk am Beispiel der Oolithbank beta erläutert*

Die im Liegenden der Terebratel- und Schaumkalkzone stets karbonatreichen, meist plattigen Wellenkalke erreichen auch im Liegenden der

Oolithbank beta hohe Werte (Taf. I, Fig. 1), oft erreichen sie auch das Maximum des Karbonatgehaltes der entsprechenden Zone.

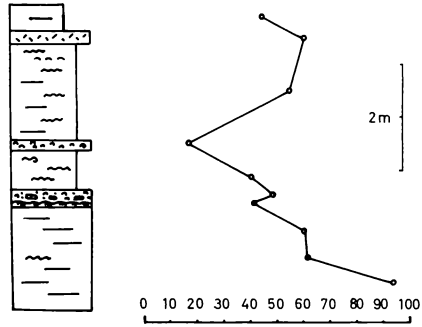



Abb. 4:
Profil im Bereich der Oolithbank beta am Kallmuth bei Lengfurt (vgl. hierzu Profil 2, Tab. 7)

In diesen Wellenkalken nimmt bei etwa gleichbleibenden Ca- und $CO_2$-Gehalten der Mg-Anteil allmählich zu (Profil 2, Abb. 4, Tab. 7). Er erreicht in der Sohlbank (Bohrwurmkalk) der Oolithbank beta ein relatives Maximum. Die in dem betrachteten Profil als crinoidenführende, konglomeratische Bruchschillkalkbank ausgebildete stratigraphische Leitbank unterscheidet sich

Tabelle 7: Oolith-Zone beta am Kallmuth (Einzelproben)

| Prob.-Nr. | Strati-graphie | Fe % | P % | K % | Ca % | Mg % | $CO_2$ % | Ca/Mg |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 57 | mu 2 | 0,46 | 0,010 | 0,06 | 34,6 | 0,78 | 38,6 | 44,3 |
| 58 | mu 2 | 0,46 | < 0,010 | 0,05 | 36,4 | 0,60 | 40,1 | 60,6 |
| 59 | mu 2 | 0,75 | < 0,010 | 0,06 | 35,9 | 0,65 | 39,6 | 55,2 |
| 60 | LiGB | 1,19 | 0,012 | 0,04 | 34,8 | 1,96 | 39,2 | 17,7 |
| 61 | mu 2 | 0,63 | 0,010 | 0,05 | 36,4 | 0,90 | 38,6 | 40,4 |
| 62 | OO 2 | 2,07 | 0,020 | 0,03 | 36,9 | 0,78 | 40,7 | 47,3 |
| 63 | OO 2 | 0,81 | 0,013 | 0,03 | 37,6 | 0,90 | 41,4 | 41,8 |
| 64 | mu 1 | 0,35 | 0,010 | 0,04 | 36,1 | 0,60 | 40,2 | 60,1 |
| 65 | mu 1 | 0,40 | < 0,010 | 0,04 | 34,8 | 0,56 | 38,2 | 62,1 |
| 66 | mu 1 | 0,46 | < 0,010 | 0,05 | 35,6 | 0,38 | 39,2 | 93,7 |

vom Liegenden und Hangenden durch ein höheres Ca/Mg-Verhältnis. Zum Hangenden steigen die Mg-Werte weiter an und erreichen im Bereich der Lima-Gastropodenbank ihren größten Wert, doch ist diese fossilreiche Kalkbank mit einem Ca/Mg von 17,7 noch nicht dolomitisch. Bemerkenswert sind der hohe Fe- und P-Gehalt dieser Bank.

Bei der Untersuchung von Einzelproben wie auch von Sammelproben läßt sich immer wieder feststellen, daß organogen-klastische Detrituskalke in markanten Änderungsbereichen des Ca/Mg auftreten, wobei diese Kalkbänke meist den *Abschluß* einer gerichteten Karbonatssteigerung bilden

4. *Übergang Unterer Muschelkalk — Mittlerer Muschelkalk*

In diesem Bereich treten für die Grenzziehung und Genese des Unteren Muschelkalkes wesentliche Tendenzen auf (Profil 3, Tab. 8, Abb. 5). Zunächst ist ersichtlich, daß der Karbonatgehalt keinen mit der Untergrenze des mu vergleichbaren Hiatus zeigt. Von Bedeutung ist deshalb vor allem das Verhalten von Ca und Mg. Die Schaumkalke haben bei hohem Gesamtkarbonat auch hohe Ca- und relativ niedere Mg-Gehalte — wodurch sich ihr hohes Ca/Mg-Verhältnis erklärt. In Richtung auf den Mittleren Muschelkalk nimmt der Mg-Gehalt ± stetig zu, teilweise tritt auch eine schnelle Zunahme innerhalb der Orbicularisschichten ein. Diese Entwicklung spiegelt die deutliche Abnahme der Ca/Mg-Werte wider.

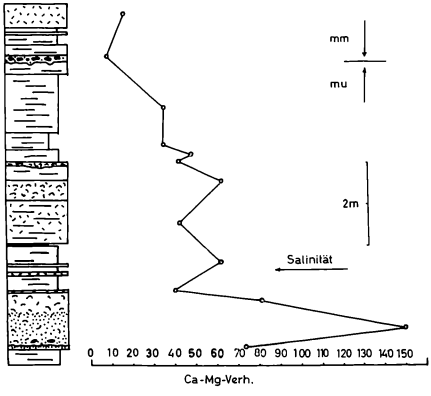



Abb. 5:
Übergangsprofil Unterer Muschelkalk — Mittlerer Muschelkalk bei Tiefenthal (vgl. hierzu Profil 3, Tab. 8)

In dem betrachteten Profil bei Tiefenthal sind die Orbicularisschichten nur in dem obersten Teil dolomitisch entwickelt. Das intraformationelle Konglomerat an der Grenze mu/mm besteht aus aufgearbeiteten Orbicularisschichten. Die geringe Transportbeanspruchung der Geröllkomponenten läßt

Tabelle 8: Übergang Unterer Muschelkalk — Mittlerer Muschelkalk bei Tiefenthal (Einzelproben)

| Prob.-Nr. | Strati-graphie | Fe % | P % | K % | Ca % | Mg % | $CO_2$ % | Ca/Mg |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 71 | mm 1 | 2,94 | 0,020 | 0,07 | 32,6 | 1,26 | 37,9 | 25,8 |
| 72 | KglB | 0,96 | 0,014 | 0,05 | 30,4 | 3,45 | 39,8 | 8,8 |
| 73 | orb | 0,59 | 0,010 | 0,11 | 30,9 | 0,90 | 34,8 | 34,4 |
| 74 | orb | 0,59 | < 0,010 | 0,12 | 30,0 | 0,85 | 33,9 | 35,4 |
| 75 | orbF | 0,76 | 0,010 | 0,09 | 29,2 | 0,60 | 32,8 | 48,5 |
| 76 | orb | 0,63 | < 0,010 | 0,04 | 33,2 | 0,78 | 38,4 | 42,5 |
| 77 | X 3 | 0,47 | 0,010 | 0,05 | 34,8 | 0,56 | 38,8 | 62,1 |
| 78 | mu 3 | 0,95 | < 0,010 | 0,06 | 32,1 | 0,78 | 35,8 | 41,1 |
| 79 | mu 3 | 0,38 | < 0,010 | 0,04 | 35,2 | 0,58 | 39,5 | 60,5 |
| 80 | mu 3 | 1,24 | 0,018 | 0,09 | 30,0 | 0,74 | 34,0 | 40,5 |
| 81 | X 2 | 0,50 | 0,010 | 0,03 | 36,5 | 0,45 | 40,5 | 81,1 |
| 82 | X 2 | 0,43 | 0,010 | 0,02 | 37,5 | 0,25 | 42,0 | 150,0 |
| 83 | X 2 | 0,51 | 0,011 | 0,03 | 36,9 | 0,50 | 41,5 | 73,8 |

auf eine lokale Aufarbeitung der obersten Partien der Orbicularisschichten schließen.

Das Profil zeigt weiter, daß die an der Basis des Mittleren Muschelkalkes vorkommenden Karbonate nicht immer dolomitisch ausgebildet sind, obwohl sie auf Grund der Verwitterungsfarbe, die durch hohen Fe-Gehalt bedingt ist, der Kristallinität und der meist typischen Feinschichtigkeit oft als Dolomite angesprochen werden. Dies zeigen auch die geochemischen Parameter des Übergangsprofiles bei Karlstadt (Abb. 6). Die Korrelationen von Bor und Ca/Mg sind an diesem Profil besonders deutlich (Tab. 9).

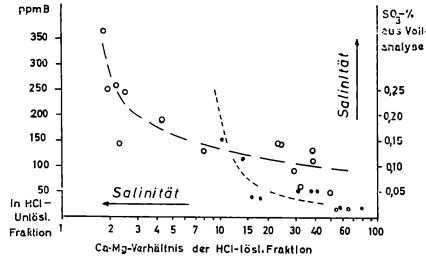



Abb. 6:
Korrelation Ca/Mg mit den Gehalten von Bor und Sulfat (Ca/Mg aus der HCl-löslichen Sedimentfraktion; B-Gehalte aus der HCl-unlöslichen Fraktion, $SO_3$-Gehalte der Vollanalyse; vgl. Tabelle 4, 9 und 10)

Tabelle 9: Übergang Unterer Muschelkalk — Mittlerer Muschelkalk bei Karlstadt/Main (Einzelproben)

| Prob.-Nr. | Strati-graphie | Fe % | P % | K % | Ca % | Mg % | $CO_2$ % | B ppm | Ca/Mg |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 84 | mm 1 | 0,62 | 0,020 | 0,06 | 25,6 | 10,08 | 46,3 | 248 | 2,5 |
| 85 | mm 1 | 0,41 | 0,012 | 0,04 | 24,8 | 5,92 | 37,9 | — | 4,2 |
| 86 | mm 1 | 0,47 | < 0,010 | 0,05 | 38,4 | 1,09 | 42,4 | — | 38,2 |
| 87 | mm 1 | 0,21 | 0,027 | 0,05 | 35,6 | 0,91 | 39,2 | 130 | 39,1 |
| 88 | mm 1 | 0,73 | 0,022 | 0,16 | 30,8 | 0,75 | 33,9 | — | 41,0 |
| 89 | mm 1 | 0,55 | 0,012 | 0,07 | 34,6 | 0,92 | 38,2 | — | 37,6 |
| 90 | mm 1 | 1,76 | 0,060 | 0,32 | 15,4 | 7,30 | 31,1 | — | 2,1 |
| 91 | orb | 1,72 | < 0,010 | 0,31 | 15,4 | 8,12 | 31,4 | — | 1,9 |
| 92 | orb | 1,17 | 0,010 | 0,11 | 18,5 | 10,25 | 33,5 | 368 | 1,8 |
| 93 | orb | 1,18 | 0,023 | 0,07 | 23,1 | 10,30 | 44,0 | 256 | 2,2 |
| 94 | orb | 1,22 | 0,016 | 0,09 | 20,0 | 10,25 | 44,1 | 250 | 1,9 |

Die Untersuchungsergebnisse an dem Übergang Unterer Muschelkalk — Mittlerer Muschelkalk können dahingehend zusammengefaßt werden, daß diese Grenze

1. nicht durch eine charakteristische Änderung im Gesamtkarbonat zu erfassen ist, da die niederen Ca-Gehalte durch höhere Mg-Gehalte ± ausgeglichen werden,
2. dafür aber durch ein charakteristisches Fallen der Ca/Mg-Verhältnisse angezeigt wird; diese Entwicklung vollzieht sich innerhalb der Orbicularisschichten und läßt sich feinstratigraphisch schwer erfassen,
3. nicht mit der Faziesgrenze Wellenkalk i. w. S.-Mittlerer Muschelkalk zusammenfällt und der innerhalb der Orbicularisschichten auftretende geochemische Schnitt auf einer grundlegenden Änderung des Kalk/Dolomit-Verhältnisses beruht, was genetisch auf eine Erhöhung der Salinität zurückzuführen ist und besonders faunistisch zu einschneidenden Konsequenzen geführt hat.

5. *Übergang Mittlerer Muschelkalk — Oberer Muschelkalk*

Um die geochemischen Gesetzmäßigkeiten des Unteren Muschelkalkes zu erhärten, wurde vergleichsweise ein Übergangsprofil Mittlerer Muschelkalk — Oberer Muschelkalk untersucht, das an der Wenzelsmühle bei Obervolkach gut aufgeschlossen ist (Tab. 10, Abb. 7).

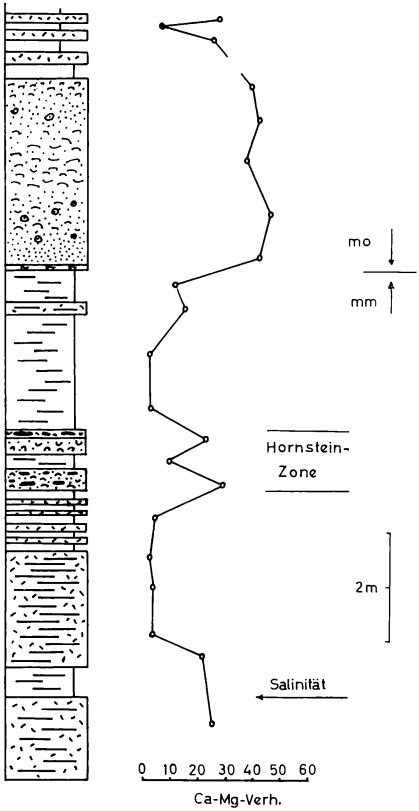



Abb. 7:
Übergangsprofil Mittlerer Muschelkalk — Oberer Muschelkalk an der Wenzelsmühle bei Obervolkach (vgl. hierzu Tab. 10)

Wie dieses Profil zeigt, werden mit den hornsteinführenden oolithischen Bruchschillkalken die geochemischen, petrographischen und faunistischen Verhältnisse des Trochitenkalkes vorweggenommen. Diese Gesteine verdanken ihre Entstehung einer „Ingression", die eine Herabsetzung der Salinität brachte und damit wieder die Voraussetzung für eine reiche Entfaltung des Lebens unter ± normal marinen Bedingungen gab. Nach ihrer Bildung erfolgte noch einmal eine Erhöhung der Salinität, wodurch dolomitische Kalkmergel zur Ablagerung kamen.

Mit den Knauerkalken, den oolithischen und trochitenführenden Bruchschillkalken ($mo_1$) setzen sich die normal marinen Bedingungen des Oberen Muschelkalkes durch, wie dies die relativ hohen Ca/Mg-Verhältnisse des Trochitenkalkes zeigen.

Tabelle 10: Übergang Mittlerer Muschelkalk — Oberer Muschelkalk bei Obervolkach (Einzelproben)

| Prob.-Nr. | Strati-graphie | Fe % | P % | K % | Ca % | Mg % | $CO_2$ % | B ppm | Ca/Mg |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 108 | mo 2 | 0,41 | 0,024 | 0,01 | 38,5 | 1,07 | 42,5 | — | 35,9 |
| 109 | mo 2 | 0,46 | 0,022 | 0,03 | 35,4 | 1,07 | 39,0 | — | 33,0 |
| 110 | mo 2 | 0,41 | 0,056 | 0,01 | 35,4 | 1,04 | 39,0 | — | 34,0 |
| 111 | mo 2 | 0,54 | 0,045 | 0,01 | 35,2 | 1,10 | 38,7 | — | 32,0 |
| 112 | mo 2 | 0,67 | 0,020 | 0,04 | 32,1 | 1,47 | 35,3 | 60 | 21,8 |
| 113 | mo 2 | 0,41 | 0,070 | 0,01 | 37,7 | 1,20 | 41,5 | — | 31,4 |
| 114 | mo 2 | 1,24 | 0,057 | 0,18 | 16,3 | 1,74 | 17,9 | — | 9,3 |
| 115 | mo 2 | 0,35 | 0,023 | 0,01 | 39,2 | 1,02 | 43,0 | — | 37,8 |
| 116 | mo 2 | 0,22 | 0,018 | 0,01 | 39,8 | 1,04 | 43,2 | — | 38,2 |
| 117 | mo 2 | 0,42 | 0,019 | 0,03 | 33,7 | 1,18 | 37,0 | — | 28,5 |
| 118 | mo 2 | 1,35 | 0,034 | 0,11 | 13,9 | 1,87 | 15,3 | 130 | 8,2 |
| 119 | mo 2 | 0,46 | 0,013 | 0,02 | 33,3 | 1,32 | 36,7 | 143 | 25,2 |
| 120 | mo 1 | 0,11 | 0,010 | 0,01 | 25,5 | 0,64 | 28,1 | 112 | 39,8 |
| 121 | mo 1 | 0,24 | 0,010 | 0,01 | 33,3 | 0,78 | 36,7 | — | 42,6 |
| 122 | mo 1 | 0,29 | 0,017 | 0,02 | 30,6 | 0,81 | 33,7 | — | 37,7 |
| 123 | mo 1 | 0,27 | 0,010 | 0,02 | 33,3 | 0,72 | 36,7 | — | 46,2 |
| 124 | mo 1 | 0,74 | 0,014 | 0,03 | 37,7 | 0,88 | 41,5 | 51 | 42,8 |
| 125 | mm 2 | 0,43 | 0,034 | 0,03 | 28,6 | 2,38 | 35,5 | — | 12,0 |
| 126 | mm 2 | 0,38 | < 0,010 | 0,03 | 30,6 | 1,93 | 33,9 | — | 15,8 |
| 127 | mm 2 | 1,45 | 0,021 | 0,04 | 20,6 | 9,64 | 40,1 | 144 | 2,1 |
| 128 | mm 2 | 1,38 | 0,012 | 0,02 | 20,6 | 8,01 | 37,2 | — | 2,5 |
| 129 | HoZ | 0,38 | 0,010 | 0,02 | 32,8 | 1,43 | 36,0 | 91 | 22,9 |
| 130 | mm 2 | 1,14 | < 0,010 | 0,06 | 27,9 | 2,68 | 35,4 | — | 10,6 |
| 131 | HoZ | 0,41 | 0,021 | 0,03 | 30,0 | 1,07 | 34,0 | — | 28,0 |
| 132 | mm 2 | 1,00 | 0,025 | 0,05 | 28,9 | 6,41 | 43,0 | — | 4,5 |
| 133 | mm 2 | 1,04 | 0,021 | 0,05 | 21,6 | 9,12 | 40,1 | — | 2,3 |
| 134 | mm 2 | 0,97 | 0,020 | 0,03 | 27,9 | 6,82 | 41,9 | 192 | 4,1 |
| 135 | mm 2 | 1,01 | 0,012 | 0,04 | 26,7 | 7,30 | 42,5 | — | 3,6 |
| 136 | mm 2 | 0,41 | < 0,010 | 0,04 | 34,2 | 1,50 | 37,9 | — | 22,8 |
| 137 | mm 2 | 0,35 | 0,020 | 0,04 | 39,1 | 1,60 | 44,0 | 146 | 24,4 |

Die Grenze des kompakten Trochitenkalkes zum Liegenden wie zum Hangenden ist als Faziesgrenze aufzufassen (KLEINSORGE 1935, FRANK 1937, SCHNEIDER 1957). Sie wurde auch von den kartierenden Geologen des Untersuchungsgebietes REIS, SCHUSTER, NATHAN u. a. zur Grenzziehung mm/mo1/mo2 benutzt, da sie bereits morphologisch in Erscheinung tritt.

Auf Grund der Horizontbeständigkeit und weiten Verbreitung wurde aber von REIS (1910, S. 30; 1928, S. 21) die Basis der hornsteinführenden Gesteine für die Grenzziehung mm/mo vorgeschlagen, ähnlich hat sich A. H. MÜLLER (1950) für die thüringischen Verhältnisse ausgesprochen.

Die Ceratitenschichten sind durch eine scharfe Wechsellagerung von Kalken, Kalk- und Tonmergeln ausgezeichnet. Die ihnen entsprechenden Änderungen im Ca/Mg sind stark durch die unterschiedlichen Tonanteile beeinflußt, die auch in den Schwankungen von K, Fe und z. T. P zum Ausdruck kommen. Die Untersuchungen ergaben, daß der Übergang mm/mo durch relativ geringe Änderungen im Gesamtkarbonat und eine diskontinuierliche Erhöhung des Ca/Mg-Verhältnisses (abnehmende Salinität) gekennzeichnet ist.

Der Trochitenkalk ist durch hohe Ca/Mg-Verhältnisse bei geringen Änderungen (± normal marin) charakterisiert, die Ceratitenschichten durch einen steten Wechsel von hohen und niederen Ca/Mg-Relationen, die hier allerdings nicht ohne Korrektur genetisch gedeutet werden dürfen. Die Gesamttendenz ließe sich am besten durch Sammelproben ermitteln.

6. *Lithologische und geochemische Stellung der einzelnen Wellenkalktypen*

Die Wellenkalke i. e. S. haben mengenmäßig den größten Anteil am Aufbau des Unteren Muschelkalkes. Von grundsätzlicher Bedeutung erscheint die Frage: Inwieweit gestattet die feinstratigraphische Profilaufnahme Rückschlüsse auf Chemismus und Genese der einzelnen Wellenkalke? Für eine feinstratigraphische Gliederung des „Wellenkalkes" genügen die beschreibenden strukturell-texturellen Begriffe: plattig — flaserig — knaurig — konglomeratisch. Sie wurden im Rahmen feinstratigraphischer Arbeiten unter Leitung von S. v. BUBNOFF und K. B. JUBITZ in den Jahren 1956 bis 1958 allgemein angewandt.

a. *Plattiger Wellenkalk*

Unter plattigem Wellenkalk werden ± ebenschichtige Kalkmergel, Mergelkalke und Kalke — z. T. in Wechsellagerung — zusammengefaßt. Die Schichtung ist durch Mergellagen oder bituminöse Tonbestege deutlich markiert.

Nach der Mächtigkeit einer Einzelschicht unterscheiden wir:

a) feinplattigen (blättrigen) Wellenkalk (bis 2 cm)
b) plattigen Wellenkalk (2—5 cm)
c) dickplattigen Wellenkalk (über 5 cm).

Lebensspuren kommen z. T. massenhaft auf den Schichtflächen vor, auch Schalenpflaster oder in Lebensstellung eingebettete Limen und Myophorien wurden beobachtet, kleine Wellenrippeln können vorhanden sein.

Sigmoidalklüfte und Primärklüfte sind für diese Gesteinstypen — wozu auch die durch ihre Sonderstellung ausgezeichneten Orbicularisplatten zu rechnen sind — charakteristisch.

In geochemischer Hinsicht sind die plattigen Wellenkalke nicht einheitlich. Der Karbonatgehalt kann je nach ihrer Lage innerhalb eines Zyklothems sehr verschieden sein: Kalkmergel und Mergelkalke kommen meist am Anfang oder Ende eines Zyklothems vor, Kalke meist am Ende eines Hemizyklothems oder in der Mitte eines Zyklothems.

Die allgemeine Erhöhung des Karbonatgehaltes vom unteren zum oberen Wellenkalk hat auf die strukturell-texturelle Ausbildung keinen Einfluß Auch das Ca/Mg-Verhältnis ist kein spezifisches Merkmal für die plattigen Wellenkalke.

Es ist anzunehmen, daß diese Gesteine i. a. unter ruhigen Wasserverhältnissen abgelagert wurden, meist unterhalb des Wellenwirkungsbereiches.

b. *Flaseriger Wellenkalk*

Unter flaserigem Wellenkalk werden deutlich geschichtete Kalkmergel, Mergelkalke und Kalksteine zusammengefaßt, deren Schichtflächen wellig bis stark wellig ausgebildet sind und teilweise bis zur linsenförmigen Auflösung reichen. Die Substanz der Schichtfugen besteht aus Mergel und Tonmergel. Gegenüber der plattigen Ausbildung treten die einheitlichen Schichtfugen weitgehend zurück.

Entsprechend der Mächtigkeit einer Einzelschicht, bzw. der Flasern unterscheiden wir:

a) feinflaserigen Wellenkalk (bis 2 cm)
b) flaserigen Wellenkalk (2 bis 5 cm)
c) grobflaserigen Wellenkalk (über 5 cm).

Querplattungserscheinungen, speziell in Form von Lösungsrippeln, sind häufig zu beobachten. Durch Sigmoidalklüfte wurden die Flasern teilweise eingeregelt. Im Normalfall zeigt die Flaserstruktur keine Streßbeanspruchung.

Die Flaserentstehung wurde mehrfach in der Literatur diskutiert. Beispielsweise Hildebrandt (1928, 1929) möchte sie durch Phasendifferenzierung zwischen Karbonat und Ton erklären, Engels (1958) glaubt teilweise horizontale Gleitbewegungen annehmen zu müssen.

Da jedoch fließende Übergänge zwischen plattigen und flaserigen Wellenkalken bestehen, dürfte eine primäre Bildungsweise wahrscheinlich sein.

Als Bildungsbereich des flaserigen Wellenkalkes kommt stärker bewegtes Wasser in Betracht, wobei eventuell vorhandene Feinschichtung durch syngenetische Karbonatkonzentrationen bis zur Unkenntlichkeit verwischt wurde.

Für die geochemischen Verhältnisse gilt das gleiche wie für den plattigen Wellenkalk.

c. *Knauriger Wellenkalk*

Unter knaurigem Wellenkalk werden undeutlich geschichtete, unregelmäßig rundlich begrenzte Kalkmergel — bis Kalksteinkörper zusammengefaßt. Die Fugen dieses Haufwerkes von Knauern und Wülsten bestehen aus Mergel und Tonmergel. In der Reihe: plattig — flaserig — knaurig — konglomeratisch — tritt die Schichtung mehr und mehr zurück, ein sichtbarer Ausdruck für immer unruhiger werdende Ablagerungsbedingungen. Wie bei diesen Gesteinen unterscheiden wir für die feinstratigraphische Aufnahme:

a) feinknaurigen Wellenkalk
b) knaurigen Wellenkalk
c) grobknaurigen Wellenkalk.

Die Bildungsbedingungen des knaurigen Wellenkalkes können mit den der Knauerkalke des Oberen Muschelkalkes verglichen werden. So zeigten Biocoenosen von *Coenothyris vulgaris* aus Knauerkalken des Oberen Muschelkalkes von Thüringen verglichen mit solchen aus plattigen Kalken folgende Veränderungen (nach A. H. Müller, 1950):

a) Vergrößertes Stielloch, Verstärkung und Rundung der Wirbelregion und Anpassung an die Kugelform (Anpassung an stärker bewegtes Wasser).

b) Unregelmäßig rauhe Schalen, stumpfe Schalenschlußwinkel (Ergebnis rhythmischer Wachstumsunterbrechungen und anhaltender Schalendrucke).

Solche Erscheinungen sind bei rezenten Muscheln und Brachiopoden für den Gezeitenbereich charakteristisch (Weigelt 1920, 1923). Damit sind die Knauerkalke wahrscheinlich Bildungen aus dem Ebbe-Flut-Bereich.

Für den knaurigen Wellenkalk können nach biostratinomischen Befunden keine spezifischen Bildungsbedingungen angegeben werden. Es muß aber als wahrscheinlich gelten, daß sie zumindest unter starken Wasserbewegungen abgelagert wurden, bei denen Umlagerungen eine große Rolle spielten. Wie bei den plattigen und flaserigen Wellenkalken sind auch für die knaurigen Wellenkalke die geochemischen Werte nicht spezifisch.

d. *Konglomeratischer Wellenkalk*

Der Karbonatgehalt des konglomeratischen Wellenkalkes richtet sich nach der Zusammensetzung der Gerölle und der Grundmasse, wobei die Grund-

masse meist den geringeren Karbonatgehalt aufweist. Petrographisch-texturell steht der konglomeratische Wellenkalk zwischen knaurigem Wellenkalk und intraformationellen Konglomeratbänken.

Tabelle 11: Lithologische Stellung des konglomeratischen Wellenkalkes

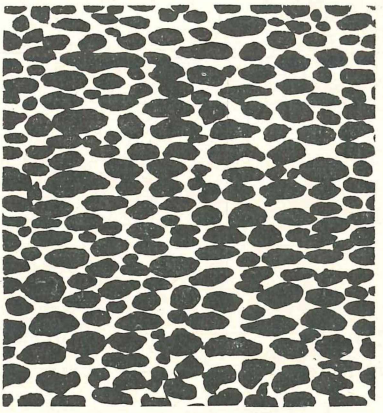
| Lithologische Merkmale | knauriger Wellenkalk | konglomeratischer Wellenkalk | intraformationelle Kalkbank |
|---|---|---|---|
| Form der Komponenten (Gerölle) | unregelmäßig gerundet | brekziös bis gerundet | gerundet, z. T. scherbig |
| Anteil und Ausbildung des Bindemittels | wenig — homogen | sehr unterschiedl. — homogen und dicht | wenig — körnig u. inhomog. |
| Lagerungsart — Texturbezeichnung | dichtes Haufwerk | „Einsprenglinge" locker bis dicht | mehr oder weniger dicht |
| Mächtigkeit | meist groß | lokal groß | stets gering |
| Liegend- und Hangend-Begrenzung | meist Übergänge nur z. T. scharf | deutlich, z. T. Übergänge | stets deutlich, meist scharf |
| Fossilführung | gering | fehlt | stets reich |
| Transportbeanspruchungsgrad | mäßig bis groß | gering bis mäßig | gering bis groß |
| Erhärtung der Komponenten vor der definitiven Ablagerung | gering, nicht abgeschlossen | mäßig, meist abgeschlossen | stark, vollkommen abgeschlossen |

Die lockere Lagerung der Gerölle in homogener Grundmasse entspricht einer Anordnung von „schwimmenden Einsprenglingen" in Eruptivgesteinen und läßt sich nur durch einen Materialtransport in schweren Suspensionen (Schlammströmen) erklären. So kann z. B. eine Strömung von 0,25 m/sec in reinem Wasser Sandkörner bis 0,16 g transportieren, dagegen können bei Erhöhung der Dichte und gleicher Strömungsgeschwindigkeit Komponenten bis 1 kg transportiert werden (KUENEN 1948).

Bei Verringerung der Strömungsintensität wurden die Sedimentmassen bei geringer Transportbeanspruchung und ohne nennenswerte Klassierung abgelagert (Abb. 8a). Die ökologischen Bedingungen im Ablagerungsbereich solcher Sedimente waren denkbar ungünstig und sie sind demzufolge auch fossilfrei.

Abb. 8: Verschiedene Ausbildung konglomeratischer Wellenkalke (Ausschnitt jeweils 750 cm²)

a) Konglomeratischer Wellenkalk (mu2) — Kalkwerk Hammelburg



b) Konglomeratischer Wellenkalk (mu1) — Kallmuth bei Lengfurt/M.

Ein Transport in spezifisch leichteren Meeresströmungen verbunden mit ständigem Aufrühren der Gerölle führte zu einem konglomeratischen Wellenkalk mit gerundeten Komponenten in dichter Packung (Abb. 8b).
Damit können die Abrundungsgrade im Zusammenhang mit der Packungsdichte als Kriterien für die Bildungsbedingungen bewertet werden.
Geochemisch liefern die konglomeratischen Wellenkalke keine charakteristischen Merkmale, die sie von anderen Wellenkalktypen unterscheiden.

### 7. *Geochemisch-lithologische Gesetzmäßigkeiten innerhalb des Unteren Muschelkalkes und ihre Deutung*

Durch feinstratigraphische und geochemische Profilaufnahmen konnte im Unteren Muschelkalk des Untersuchungsgebietes ein zyklischer Sedimentationsverlauf nachgewiesen werden, wobei die feinstratigraphischen, strukturell-texturellen Einheiten nicht so klar zu erfassen sind wie die geochemischen Zyklotheme. Diese Ergebnisse aus dem Unteren Muschelkalk von Unterfranken gelten in ähnlicher Weise für Thüringen, Sachsen-Anhalt und andere Gebiete (Jubitz 1958).
Zyklotheme treten in fast allen Formationen auf, die nach Jessen (1956) nur durch den Dualismus von steten endogen-allgemeinen und zyklisch-extratellurischen Ursachen und ihrer verschiedenen Überlagerung zu erklären sind.
Nach Gripp (1956) weist ein Wechsel von tonigen und kalkigen Sedimenten wahrscheinlich auf Temperaturschwankungen hin. So haben z. B. die rezenten Sedimente der Ost- und Nordsee nur einen Kalkgehalt von 0 bis 15 %,

die des westlichen Mittelmeeres 25 bis 80 % (Nordufer) und über 90 % (Südufer), die des Roten Meeres ebenfalls über 90 %.

Wesentlich für die Beurteilung der sedimentologischen Verhältnisse im Unteren Muschelkalk sind in diesem Zusammenhang die Schwermineraluntersuchungen von FÜCHTBAUER (1950) im Göttinger Muschelkalk und von H. MÜLLER (1956) im Grenzbereich Röt-Muschelkalk bei Jena:

Die Untersuchungen haben gezeigt, daß der Schwermineralanteil sowohl mengenmäßig als auch nach der Korngröße mit Annäherung an die Grenze des Unteren Muschelkalkes allmählich abnimmt. Im weiteren Verlauf des Unteren Muschelkalkes bleibt der prozentual geringe Anteil ± konstant, auch das Zufuhrverhältnis der Leichtminerale untereinander, doch verschieben sich bei Erhöhung des Karbonatgehaltes die Korngrößen in Richtung auf die feinsten Fraktionen.

Diese Befunde könnten im großen und ganzen auf die unterfränkischen Verhältnisse übertragen werden. Sie drücken sich auch in geochemischen Parametern innerhalb der allochthonen Sedimentfraktion aus (Abb. 9).

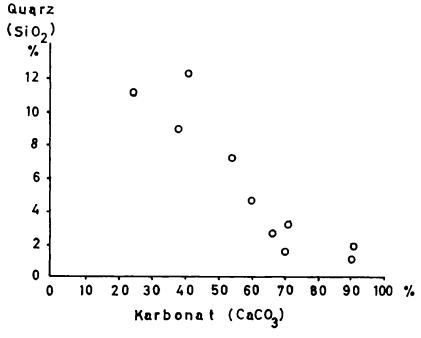



Abb. 9: Beziehungen zwischen Gesamtkarbonat-Gehalten und freier Kieselsäure (Quarz). Mit zunehmendem Gesamtkarbonat (autochthone Sedimentfraktion) erfolgt innerhalb der allochthonen Fraktion eine Abnahme des Quarzanteiles, die mit Ausnahme der organogen-klastischen Detrituskalke auch mit einer Abnahme der Korngrößen verbunden ist.

Dieser Sachverhalt weist darauf hin, daß ein Ansteigen des Karbonatgehaltes durch verminderte Zufuhr von terrigenem Material hervorgerufen wird, z. B. durch verringerte Reliefenergie, nachlassende Transportkraft bei größerer Wassertiefe, durch Transgression und damit Erweiterung des Meeres oder durch klimatische Einflüsse, insbesondere durch Verringerung der Niederschläge in den Abtragungsgebieten. Der Einfluß der einzelnen Faktoren läßt sich schwer abschätzen.

Von FIEGE (1951) und WELLER (1956) wurde eine epirogene Entstehung der Zyklotheme vertreten. Dabei läßt sich aus der symmetrischen oder asymmetrischen Ausbildung nicht direkt auf die Art der epirogenen Bewegung schließen. „Eine symmetrische Bewegung kann sehr wohl einen asymmetrischen Zyklus erzeugen", doch ist mit sinusförmigen Bewegungen nur in

den seltensten Fällen zu rechnen, „da den Bewegungen, die die Zyklotheme erzeugen, Bewegungen längerer Periode (z. B. Undationen) übergeordnet sind" (FIEGE 1951).

Die im Unteren Muschelkalk von Unterfranken beobachtete Verteilung der Schwerminerale, die FISCHER (1908, S. 42) in Mineraltabellen zusammengestellt hat, lassen sich mit einer epirogen beeinflußten Sedimentation in Übereinstimmung bringen:

Danach sind die detritischen Anteile von Quarz, Feldspat und Glimmer zu Beginn des $mu_1$ noch relativ groß und nehmen im Verlauf des $mu_1$ und $mu_2$ mehr und mehr ab und erreichen in der Terebratelregion ein Minimum. Erst innerhalb der Schaumkalkregion ($mu_3$) nimmt ihr Anteil wieder deutlich zu.

Die organogenen Detrituskalke (bruchschillführende intraformationelle Konglomerathorizonte, oolithische Schill- und Bruchschillkalke usw.) zeigen allgemein größere Anteile an allochthonen Mineralen als nach dem Karbonatgehalt vergleichbare Wellenkalke.

Diese Befunde spiegeln erstens den Rückgang des terrigenen Einflusses im Verlauf des Unteren Muschelkalkes wider und unterstreichen zweitens die größere Bedeutung von Turbulenz und Strömung für die Bildung der bruchschillführenden Gesteine.

Ein großer Tongehalt des Sedimentes zeigt im allgemeinen stärkere kontinentale Beeinflussung und damit erhöhte Transportkräfte an. Spezifische Schwankungen der Transportkräfte können darüber hinaus durch den verschiedenen Quarz-Gehalt an der „Tonmineralfraktion", bzw. durch das Verhältnis „Tonmineralfraktion/Quarz" charakterisiert werden. Wie aus Tafel 1 ersichtlich ist, beginnt sowohl der $mu_1$ wie der $mu_2$ mit einer Mergel- bis Kalkmergelserie. Der in Tab. 12 angegebene Vergleich von Gesteinen beider Serien zeigt, daß der relative Quarzanteil an der allochthonen Sedimentfraktion im $mu_2$ wider Erwarten etwa doppelt so groß ist wie im $mu_1$. Diese Sonderentwicklung im Gebiet Homburg-Lengfurt deutet auf verstärkte Transportkräfte zu Beginn des $mu_2$. Sie dürfte wohl mit der im paläogeographischen Bild des Unteren Muschelkalkes hervortretenden Schwellenregion zwischen Main und unterer Tauber (VOLLRATH 1924, Taf. IX) in Verbindung zu bringen sein, die das Meininger Faziesgebiet vom Mosbacher Becken trennt.

Es ist die Hebungszone, die sich bereits im Oberen Buntsandstein bemerkbar macht (DEGENS, KNETSCH, REUTER 1960, S. 227) und später im Oberen Muschelkalk als „Gammesfelder Barre" große Bedeutung für die Fazies des unterfränkischen Quaderkalkes erlangt (RUTTE 1957, S. 58).

Bemerkenswert ist, daß auch die organogen-klastischen Detrituskalke trotz ihres hohen Karbonatgehaltes auf erhöhte Transportkräfte und Wasserbewegung hinweisen (Verhältnis „Tonmineralfraktion/Quarz" von einem Terebratelkalk bei Lengfurt 4,8 und von einem Schaumkalk 6,2 bei über

Tabelle 12: Qualitative Beurteilung der Transportkräfte nach dem Verhältnis „Tonmineralfraktion/Quarz" (Vergleich von sechs Einzelproben)

| Geochemisch-mineralogische Parameter | Gesteine aus Liegendteil mu1 | | | Gesteine aus Liegendteil mu2 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| „Tonmineralfraktion" (nicht karbonatische Bestandteile in %) | 57,75 | 33,25 | 30,00 | 75,00 | 59,75 | 46,20 |
| Quarzanteil innerhalb der „Tonmineralfraktion" in % | 4,85 | 2,47 | 1,48 | 11,05 | 12,19 | 7,20 |
| Verhältnis „Tonmineral-fraktion/Quarz" | 12,9 | 13,5 | 20,2 | 6,8 | 4,8 | 6,4 |
| Qualitative Beurteilung der Transportkräfte | relativ klein | | | relativ groß | | |

90 % Gesamtkarbonat entspricht demnach den erhöhten Transportkräften zu Beginn des mu2).

Nach den angeführten Beziehungen zwischen der autochthonen und allochthonen Sedimentfraktion („Karbonat/Ton") und innerhalb der allochthonen Sedimentfraktion (relativer Quarzanteil) kommen wir zu der Auffassung einer epirogen beeinflußten zyklischen Sedimentation im Unteren Muschelkalk, wenn auch eine Modifizierung durch Schwankungen von Wassertemperatur und Klima (Niederschläge) nicht abgelehnt werden kann.

Um die Beziehungen zum Ca/Mg-Verhältnis aufzuzeigen, sei noch auf drei Faktoren hingewiesen, die die Sedimentation unter Umständen entscheidend beeinflussen können:

1. Relativ schnelle Salinitätserhöhung durch Verdunstung — gleichbleibende Klimaverhältnisse vorausgesetzt — ist in Gebieten mit relativ geringen Wassertiefen möglich (schnelle Änderung der Ca/Mg-Verhältnisse im mu1).

2. Erhöhung der Sedimentationsgeschwindigkeit toniger Bestandteile durch Erhöhung der Salinität, die Klärfähigkeit von Lösungen mit suspendierten Teilchen nimmt bei Anwesenheit von NaCl, KCl, $MgSO_4$ und $MgCl_2$ stufenweise zu — (die Mergel-Phase der Zyklotheme ist z. T. dolomitisch entwickelt).

3. Beziehungen zwischen Karbonatlöslichkeit und den hydrochemischen Verhältnissen (WATTENBERG 1925/1936) macht zumindest eine Beeinflussung der Karbonatsedimentation wahrscheinlich (mit steigender Salinität nimmt die Löslichkeit für

$CaCO_3$ zu, bzw. die $CaCO_3$-Ausfällung nimmt ab. Grenze so/mu, Mergel-Phasen der Zyklotheme, Grenze mu/mm).

Damit können wir das Ca/Mg-Verhältnis bedingt als Hinweis auf Tiefenschwankungen werten, die mit epirogenen Bewegungen und in der Folge mit Salinitätsänderungen verbunden waren und mit den Vorstellungen der im wesentlichen epirogen beeinflußten Zyklotheme in Übereinstimmung zu bringen sind. In den untersuchten Profilen (Taf. 2, Tab. 13) verläuft das Ca/Mg-Verhältnis im Röt zwischen 6,7 und 10,5 — nimmt dann im Unteren Muschelkalk schnell zu und erreicht ± kontinuierlich einen Wert von 112,6, um innerhalb von 0,30 m wieder auf 10,8 zurückzugehen. Nach einem erneuten Ansteigen auf 96,0 fällt es innerhalb von 0,60 m wieder relativ schnell auf 17,6 — und zwar im Hangenden einer intraformationellen Konglomeratbank. Die relativ großen und schnellen asymmetrischen Schwankungen nehmen im weiteren Verlauf des $mu_1$ mehr und mehr ab. Im $mu_2$ und $mu_3$ treten ebenfalls noch Schwankungen auf, doch vollziehen sich die Änderungen meist in einem Bereich mit höherem Ca/Mg, in dem bereits geringe Änderungen der dolomitischen Komponenten zu großen nummerischen Schwankungen im Ca/Mg führen.

Genetisch lassen sich diese Befunde folgendermaßen interpretieren:

Mit der Transgression des Muschelkalkmeeres wurde durch Zufuhr von frischem Meerwasser die Salinität des „Rötmeeres" schnell herabgesetzt (steigendes Ca/Mg.). Es erfolgte ein Rückgang des detritisch zugeführten Materials (Ton, Quarz, Schwerminerale), der sich effektiv in der Erhöhung des Karbonates bemerkbar macht. Da die Löslichkeit von Karbonat stark durch die hydrochemischen Verhältnisse mitbestimmt wird, verhinderte wahrscheinlich die hohe Löslichkeit von Karbonat unter den teilweise evaporitischen Sedimentationsbedingungen des Röt auch größere Karbonatausscheidungen. Die Herabsetzung der Salinität äußerte sich zunächst in einer erhöhten Karbonatbildung (Grenzgelbkalk).

Unter ± normal marinen Bedingungen wurden dann auch günstige Voraussetzungen für die Muschelkalkfauna erreicht. Mit Zunahme der Wassertiefe wurden die Salinitätsschwankungen geringer. Die Einnahme neuer Biotope wurde ermöglicht, doch im Verlauf des Unteren Muschelkalkes müßten sich die eingewanderten Faunen immer wieder mit veränderten Lebensbedingungen auseinandersetzen.

Tabelle 13: Unterer Muschelkalk von Lengfurt/Main (Sammelproben)

| Prob.-Nr. | Stratigraphie | Fe % | P % | K % | Ca % | Mg % | $CO_2$ % | Ca/Mg |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 138 | mu 3 | 0,49 | < 0,010 | 0,05 | 36,0 | 0,56 | 39,4 | 64,2 |
| 139 | mu 3 | 0,27 | < 0,010 | 0,04 | 35,7 | 0,56 | 39,1 | 63,7 |
| 140 | mu 3 | 0,29 | < 0,010 | 0,05 | 34,0 | 0,45 | 37,2 | 75,5 |
| 141 | mu 3 | 0,33 | < 0,010 | 0,04 | 33,6 | 0,56 | 36,9 | 60,0 |
| 142 | mu 3 | 0,39 | < 0,010 | 0,05 | 32,9 | 0,50 | 36,1 | 65,8 |
| 143 | mu 3 | 0,72 | < 0,010 | 0,06 | 32,0 | 0,56 | 35,2 | 57,1 |
| 144 | mu 3 | 0,61 | 0,010 | 0,05 | 33,6 | 0,60 | 36,8 | 56,0 |
| 145 | mu 3 | 0,82 | < 0,010 | 0,06 | 34,0 | 0,60 | 37,6 | 56,6 |
| 146 | mu 3 | 0,87 | 0,010 | 0,06 | 34,0 | 0,60 | 37,5 | 56,6 |
| 147 | mu 3 | 1,15 | 0,012 | 0,12 | 28,4 | 0,56 | 31,2 | 50,7 |
| 148 | mu 3 | 1,08 | 0,010 | 0,12 | 29,4 | 0,50 | 32,4 | 58,8 |
| 149 | mu 3 | 1,09 | 0,010 | 0,11 | 30,2 | 0,90 | 33,2 | 33,5 |
| 150 | mu 3 | 1,20 | 0,013 | 0,12 | 38,5 | 0,90 | 31,5 | 42,7 |
| 151 | mu 3 | 0,93 | 0,010 | 0,10 | 30,6 | 0,87 | 33,8 | 35,1 |
| 152 | mu 3 | 1,09 | 0,010 | 0,11 | 30,0 | 0,58 | 33,1 | 51,7 |
| 153 | mu 3 | 1,26 | 0,018 | 0,08 | 26,3 | 0,56 | 28,8 | 46,9 |
| 154 | mu 3 | 1,02 | 0,014 | 0,05 | 31,2 | 0,90 | 34,3 | 34,6 |
| 155 | mu 3 | 1,06 | 0,012 | 0,05 | 30,5 | 0,90 | 34,6 | 33,8 |
| 156 | mu 3 | 1,00 | 0,011 | 0,06 | 34,6 | — | 38,0 | — |
| 157 | mu 3 | 0,85 | 0,010 | 0,04 | 31,6 | 0,81 | 34,8 | 39,0 |
| 158 | mu 3 | 0,90 | < 0,010 | 0,06 | 31,0 | 0,58 | 33,9 | 53,4 |
| 159 | mu 3 | 1,01 | 0,013 | 0,06 | 29,9 | 0,70 | 33,0 | 42,7 |
| 160 | mu 3 | 0,88 | 0,010 | 0,05 | 32,2 | 0,78 | 35,6 | 41,0 |
| 161 | mu 3 | 0,93 | 0,011 | 0,05 | 31,2 | 0,85 | 34,3 | 36,7 |
| 162 | mu 3 | 0,92 | 0,010 | 0,06 | 31,5 | 0,78 | 34,6 | 40,3 |
| 163 | mu 3 | 0,80 | < 0,010 | 0,07 | 32,6 | 0,65 | 36,0 | 50,1 |
| 164 | mu 3 | 0,83 | < 0,010 | 0,06 | 32,2 | 0,50 | 35,4 | 64,4 |
| 165 | mu 3 | 0,73 | < 0,010 | 0,05 | 33,2 | 0,56 | 36,4 | 59,2 |
| 166 | mu 3 | 0,66 | < 0,010 | 0,04 | 34,0 | 0,50 | 37,5 | 68,0 |
| 167 | mu 3 | 0,71 | < 0,010 | 0,05 | 33,8 | 0,60 | 37,2 | 56,3 |
| 168 | mu 3 | 0,81 | < 0,010 | 0,07 | 32,6 | 0,70 | 36,1 | 46,5 |
| 169 | mu 3 | 0,82 | < 0,010 | 0,06 | 32,6 | 0,78 | 36,0 | 41,8 |
| 170 | mu 3 | 1,01 | < 0,010 | 0,08 | 31,4 | 0,90 | 34,9 | 34,8 |
| 171 | mu 3 | 1,06 | < 0,010 | 0,06 | 31,9 | 0,70 | 35,2 | 45,5 |
| 172 | mu 3 | 0,99 | 0,010 | 0,08 | 31,0 | 0,65 | 34,1 | 47,7 |
| 173 | mu 3 | 1,17 | 0,015 | 0,07 | 30,0 | 0,70 | 33,9 | 42,8 |

Tabelle 13: Unterer Muschelkalk von Lengfurt/Main (Sammelproben)

| Prob.-Nr. | Strati-graphie | Fe % | P % | K % | Ca % | Mg % | $CO_2$ % | Ca/Mg |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 174 | mu 3 | 1,11 | 0,012 | 0,07 | 28,8 | 0,70 | 31,8 | 41,1 |
| 175 | mu 3 | 1,64 | 0,016 | 0,08 | 28,1 | 0,78 | 30,7 | 36,0 |
| 176 | T 2 | 1,08 | 0,015 | 0,06 | 32,5 | 1,06 | 35,9 | 30,6 |
| 177 | T 2 | 1,05 | 0,011 | 0,08 | 33,4 | 0,78 | 36,5 | 42,8 |
| 178 | mu 2 | 2,89 | 0,016 | 0,06 | 30,6 | 0,70 | 33,7 | 43,7 |
| 179 | mu 2 | 0,79 | < 0,010 | 0,06 | 31,9 | 0,70 | 35,1 | 45,5 |
| 180 | mu 2 | 0,96 | < 0,010 | 0,07 | 31,1 | 0,65 | 34,1 | 47,8 |
| 181 | mu 2 | 1,06 | 0,011 | 0,08 | 30,6 | 0,70 | 31,9 | 43,7 |
| 182 | mu 2 | 0,80 | 0,012 | 0,07 | 31,9 | 0,58 | 34,9 | 55,0 |
| 183 | mu 2 | 1,05 | 0,015 | 0,07 | 32,1 | 0,78 | 35,2 | 41,1 |
| 184 | T 1 | 0,96 | 0,010 | 0,03 | 35,2 | 1,15 | 39,0 | 30,6 |
| 185 | T 1 | 1,08 | 0,010 | 0,04 | 34,0 | 1,06 | 38,0 | 32,1 |
| 186 | T 1 | 0,64 | 0,010 | 0,04 | 35,2 | 0,60 | 38,6 | 58,6 |
| 187 | mu 2 | 0,65 | < 0,010 | 0,05 | 34,4 | 0,60 | **37,7** | 57,3 |
| 188 | mu 2 | 0,61 | 0,010 | 0,05 | 34,8 | 0,60 | 38,2 | 58,0 |
| 189 | mu 2 | 0,63 | < 0,010 | 0,05 | 33,0 | 0,50 | 36,2 | 66,0 |
| 190 | mu 2 | 0,52 | < 0,010 | 0,06 | 33,8 | 0,40 | 37,0 | 84,5 |
| 191 | mu 2 | 0,55 | < 0,010 | 0,05 | 34,0 | 0,50 | 37,2 | 68,0 |
| 192 | mu 2 | 0,58 | < 0,010 | 0,07 | 34,8 | 0,38 | 37,9 | 91,5 |
| 193 | mu 2 | 0,55 | < 0,010 | 0,05 | 34,8 | 0,40 | 38,0 | 87,0 |
| 194 | mu 2 | 0,53 | < 0,010 | 0,05 | 35,0 | 0,39 | 38,3 | 89,7 |
| 195 | mu 2 | 0,55 | < 0,010 | 0,05 | 33,8 | 0,43 | 37,2 | 78,6 |
| 196 | mu 2 | 0,48 | < 0,010 | 0,05 | 35,2 | 0,45 | 38,5 | 78,2 |
| 197 | mu 2 | 0,59 | < 0,010 | 0,06 | 34,4 | 0,56 | 37,6 | 61,4 |
| 198 | mu 2 | 0,58 | < 0,010 | 0,05 | 34,8 | 0,56 | 38,1 | 62,1 |
| 199 | mu 2 | 0,46 | < 0,010 | 0,04 | 35,5 | 0,50 | 39,0 | 71,0 |
| 200 | mu 2 | 0,55 | < 0,010 | 0,06 | 35,1 | 0,40 | 38,4 | 88,7 |
| 201 | mu 2 | 0,55 | < 0,010 | 0,06 | 35,2 | 0,32 | 38,4 | 110,0 |
| 202 | mu 2 | 0,62 | < 0,010 | 0,07 | 34,0 | 0,40 | 37,2 | 85,0 |
| 203 | mu 2 | 0,67 | < 0,010 | 0,06 | 33,4 | 0,50 | 36,5 | 66,8 |
| 204 | mu 2 | 0,77 | < 0,010 | — | 33,6 | 0,50 | 36,6 | 67,2 |
| 205 | mu 2 | 0,73 | < 0,010 | 0,05 | 33,6 | 0,40 | 36,7 | 84,0 |

Tabelle 13: Unterer Muschelkalk von Lengfurt/Main (Sammelproben)

| Prob.-Nr. | Strati-graphie | Fe % | P % | K % | Ca % | Mg % | $CO_2$ % | Ca/Mg |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 206 | mu 2 | 0,57 | < 0,010 | 0,04 | 34,4 | 0,56 | 37,6 | 61,0 |
| 207 | mu 2 | 0,63 | < 0,010 | 0,05 | 32,2 | 0,48 | 35,3 | 67,0 |
| 208 | mu 2 | 0,60 | < 0,010 | 0,05 | 32,5 | 0,48 | 35,7 | 67,7 |
| 209 | mu 2 | 0,59 | < 0,010 | 0,06 | 33,3 | 0,38 | 36,5 | 87,6 |
| 210 | mu 2 | 0,61 | 0,010 | 0,06 | 32,5 | 0,45 | 35,7 | 72,2 |
| 211 | mu 2 | 0,65 | 0,011 | 0,06 | 33,4 | 0,40 | 36,7 | 83,5 |
| 212 | mu 2 | 0,81 | 0,012 | 0,07 | 30,6 | 0,45 | 33,8 | 76,5 |
| 213 | mu 2 | 1,06 | 0,013 | 0,08 | 31,9 | 0,56 | 35,1 | 57,9 |
| 214 | mu 2 | 0,98 | 0,012 | 0,07 | 31,4 | 0,45 | 34,7 | 69,7 |
| 215 | mu 2 | 0,71 | 0,010 | 0,06 | 32,6 | 0,45 | 35,9 | 72,4 |
| 216 | mu 2 | 1,00 | 0,015 | 0,08 | 30,6 | 0,56 | 32,8 | 54,6 |
| 217 | mu 2 | 1,56 | 0,018 | 0,10 | 30,6 | 0,60 | 33,0 | 51,0 |
| 218 | mu 2 | 1,40 | 0,017 | 0,13 | 25,2 | 0,52 | 27,5 | 48,4 |
| 219 | mu 2 | 2,31 | 0,017 | 0,12 | 20,9 | 0,56 | 23,2 | 37,2 |
| 220 | mu 2 | 2,04 | 0,020 | 0,15 | 19,5 | 0,60 | 21,6 | 32,5 |
| 221 | mu 2 | 1,90 | 0,018 | 0,12 | 28,1 | 0,60 | 30,8 | 46,8 |
| 222 | mu 2 | 2,02 | 0,019 | 0,15 | 24,7 | 0,74 | 27,1 | 33,3 |
| 223 | mu 2 | 1,79 | 0,015 | 0,09 | 25,0 | 0,81 | 27,5 | 30,8 |
| 224 | mu 2 | 1,56 | 0,015 | 0,09 | 26,0 | 0,90 | 28,6 | 24,8 |
| 225 | mu 2 | 1,14 | 0,010 | 0,06 | 30,6 | 0,70 | 34,6 | 43,7 |
| 226 | mu 2 | 0,86 | < 0,010 | 0,09 | 30,2 | 0,60 | 33,1 | 46,5 |
| 227 | mu 2 | 0,98 | < 0,010 | 0,11 | 28,4 | 0,70 | 31,2 | 40,5 |
| 228 | mu 2 | 1,24 | 0,011 | 0,10 | 27,0 | 0,78 | 29,8 | 34,6 |
| 229 | mu 2 | 1,70 | 0,018 | 0,11 | 27,5 | 0,78 | 30,3 | 35,2 |
| 230 | mu 2 | 1,56 | 0,016 | 0,08 | 28,4 | 0,60 | 31,2 | 47,3 |
| 231 | mu 2 | 1,28 | 0,011 | 0,08 | 30,2 | 0,65 | 33,0 | 46,4 |
| 232 | mu 2 | 1,20 | 0,010 | 0,08 | 28,4 | 0,58 | 31,2 | 49,0 |
| 233 | mu 2 | 1,65 | 0,016 | 0,12 | 24,8 | 0,60 | 27,4 | 41,3 |
| 234 | mu 2 | — | 0,015 | 0,11 | 24,0 | 0,74 | 26,6 | 32,4 |
| 235 | mu 2 | 2,37 | 0,020 | 0,15 | 25,5 | 0,70 | 28,1 | 36,4 |
| 236 | mu 2 | 1,83 | 0,016 | 0,12 | 26,4 | 1,06 | 28,4 | 24,9 |
| 237 | mu 2 | 2,47 | 0,021 | 0,10 | 23,5 | 1,15 | 26,7 | 20,4 |
| 238 | mu 2 | 1,84 | 0,014 | 0,12 | 24,6 | 1,06 | 27,5 | 23,2 |
| 239 | mu 2 | 1,44 | 0,012 | 0,10 | 28,6 | 1,15 | 31,7 | 24,0 |
| 240 | mu 2 | 1,18 | 0,010 | 0,11 | 31,2 | 0,95 | 34,3 | 32,8 |
| 241 | mu 2 | 1,39 | 0,012 | 0,08 | 28,4 | 0,95 | 31,2 | 29,8 |
| 242 | mu 2 | 1,78 | 0,013 | 0,08 | 26,6 | 0,85 | 29,5 | 31,2 |

Tabelle 13: Unterer Muschelkalk von Lengfurt/Main (Sammelproben)

| Prob.-Nr. | Strati-graphie | Fe % | P % | K % | Ca % | Mg % | $CO_2$ % | Ca/Mg |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 243 | mu 2 | 1,57 | 0,011 | 0,10 | 29,4 | 0,75 | 32,2 | 39,2 |
| 244 | mu 2 | 1,04 | 0,010 | 0,07 | 32,6 | 1,00 | 36,1 | 32,6 |
| 245 | mu 2 | 1,50 | 0,010 | 0,06 | 29,6 | 0,91 | 32,4 | 32,5 |
| 246 | mu 2 | 1,30 | 0,012 | 0,11 | 31,6 | 1,06 | 35,0 | 29,8 |
| 247 | mu 2 | 0,69 | 0,015 | 0,10 | 32,2 | 1,06 | 36,3 | 31,3 |
| 248 | mu 2 | 1,05 | 0,015 | 0,06 | 34,4 | 0,81 | 36,9 | 42,4 |
| 249 | mu 2 | 1,24 | 0,023 | 0,07 | 32,6 | 0,90 | 35,6 | 36,2 |
| 250 | mu 2 | 1,10 | 0,018 | 0,08 | 29,4 | 1,00 | 32,9 | 29,4 |
| 251 | mu 2 | 0,98 | 0,012 | 0,08 | 29,8 | 0,90 | 32,9 | 32,8 |
| 252 | mu 2 | 1,62 | 0,025 | 0,08 | 28,0 | 1,15 | 31,2 | 24,2 |
| 253 | mu 2 | 1,48 | 0,024 | 0,11 | 28,0 | 1,23 | 31,4 | 22,7 |
| 254 | mu 2 | 1,45 | 0,022 | 0,06 | 31,9 | 1,44 | 36,4 | 22,1 |
| 255 | mu 2 | 1,36 | 0,019 | 0,06 | 29,6 | 0,95 | 32,8 | 31,1 |
| 256 | mu 2 | 1,13 | 0,012 | 0,05 | 34,4 | 0,95 | 37,6 | 36,2 |
| 257 | mu 2 | 0,92 | 0,011 | 0,05 | 35,0 | 0,78 | 38,7 | 44,8 |
| 258 | OO 2 | 0,79 | 0,010 | 0,05 | 35,4 | 0,70 | 39,3 | 50,5 |
| 259 | OO 2 | 0,76 | < 0,010 | 0,04 | 35,4 | 0,58 | 39,3 | 61,0 |
| 260 | OO 2 | 0,65 | 0,010 | 0,05 | 36,4 | 0,70 | 40,0 | 52,0 |
| 261 | mu 1 | 0,55 | < 0,010 | 0,08 | 36,9 | 0,56 | 40,5 | 65,9 |
| 262 | mu 1 | 0,66 | < 0,010 | 0,05 | 34,6 | 0,50 | 38,0 | 69,2 |
| 263 | mu 1 | 0,63 | < 0,010 | 0,06 | 35,9 | 0,56 | 39,5 | 64,1 |
| 264 | mu 1 | 0,60 | < 0,010 | 0,05 | 33,8 | 0,56 | 37,2 | 60,3 |
| 265 | mu 1 | 0,67 | < 0,010 | 0,07 | 34,2 | 0,50 | 37,4 | 68,4 |
| 266 | mu 1 | 0,80 | 0,010 | 0,07 | 33,8 | 0,56 | 37,1 | 60,3 |
| 267 | mu 1 | 0,80 | 0,010 | 0,08 | 32,8 | 0,70 | 36,0 | 46,8 |
| 268 | mu 1 | 0,83 | 0,012 | 0,08 | 32,0 | 0,54 | 35,1 | 59,2 |
| 269 | mu 1 | 0,90 | < 0,010 | 0,08 | 33,2 | 0,56 | 35,3 | 59,2 |
| 270 | mu 1 | 0,77 | 0,010 | 0,11 | 33,4 | 0,65 | 36,5 | 51,3 |
| 271 | mu 1 | 0,55 | 0,010 | 0,18 | 32,6 | 0,81 | 35,6 | 40,2 |
| 272 | mu 1 | 0,56 | 0,014 | 0,12 | 34,0 | 0,68 | 37,0 | 50,1 |
| 273 | mu 1 | 0,58 | 0,010 | 0,18 | 33,6 | 0,64 | 36,8 | 52,5 |
| 274 | mu 1 | 0,71 | 0,013 | 0,21 | 30,3 | 0,66 | 33,2 | 45,8 |
| 275 | mu 1 | 0,84 | 0,010 | 0,20 | 29,5 | 0,67 | 32,3 | 44,0 |
| 276 | mu 1 | 0,84 | 0,012 | 0,29 | 29,2 | 0,68 | 32,1 | 42,9 |
| 277 | mu 1 | 0,80 | 0,010 | 0,18 | 29,5 | 0,66 | 32,4 | 44,7 |

Tabelle 13: Unterer Muschelkalk von Lengfurt/Main (Sammelproben)

| Prob.-Nr. | Strati-graphie | Fe % | P % | K % | Ca % | Mg % | $CO_2$ % | Ca/Mg |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 278 | mu 1 | 0,68 | 0,012 | 0,17 | 29,5 | 0,62 | 32,4 | 47,5 |
| 279 | mu 1 | 0,71 | 0,013 | 0,14 | 30,2 | 0,68 | 31,1 | 44,4 |
| 280 | mu 1 | 0,76 | 0,014 | 0,27 | 29,3 | 0,76 | 32,5 | 38,5 |
| 281 | mu 1 | 0,76 | 0,010 | 0,16 | 29,5 | 0,62 | 32,8 | 47,5 |
| 282 | mu 1 | 0,76 | 0,010 | 0,17 | 30,0 | 0,62 | 33,0 | 48,3 |
| 283 | mu 1 | 0,84 | 0,020 | 0,20 | 29,3 | 0,68 | 32,1 | 43,0 |
| 284 | mu 1 | 0,85 | 0,020 | 0,21 | 28,0 | 0,64 | 30,8 | 43,7 |
| 285 | mu 1 | 1,02 | 0,017 | 0,22 | 27,5 | 0,66 | 30,3 | 41,6 |
| 286 | mu 1 | 1,21 | 0,019 | 0,18 | 24,9 | 0,96 | 27,4 | 25,9 |
| 287 | mu 1 | 1,01 | 0,010 | 0,18 | 28,8 | 0,80 | 32,0 | 36,0 |
| 288 | OO 1 | 0,56 | 0,010 | 0,13 | 31,7 | 0,64 | 34,6 | 49,5 |
| 289 | OO 1 | 0,59 | < 0,010 | 0,15 | 30,6 | 0,62 | 33,6 | 49,3 |
| 290 | mu 1 | 0,84 | < 0,010 | 0,18 | 28,2 | 0,68 | 31,1 | 41,4 |
| 291 | mu 1 | 0,85 | 0,017 | 0,25 | 29,5 | 0,68 | 32,5 | 43,3 |
| 292 | mu 1 | 0,60 | 0,010 | 0,20 | 32,9 | 0,73 | 35,2 | 45,0 |
| 293 | mu 1 | 0,76 | < 0,010 | 0,26 | 31,2 | 0,86 | 35,0 | 36,2 |
| 294 | mu 1 | 0,65 | < 0,010 | 0,14 | 31,6 | 0,66 | 34,9 | 47,8 |
| 295 | mu 1 | 0,65 | 0,010 | 0,13 | 32,6 | 0,65 | 36,0 | 50,1 |
| 296 | mu 1 | 0,68 | < 0,010 | 0,17 | 32,5 | 0,62 | 35,9 | 52,4 |
| 297 | mu 1 | 0,60 | < 0,010 | 0,17 | 32,0 | 0,58 | 35,3 | 55,1 |
| 298 | mu 1 | 0,50 | < 0,010 | 0,18 | 32,0 | 0,58 | 35,4 | 56,1 |
| 299 | mu 1 | 0,74 | < 0,010 | 0,17 | — | 0,76 | 35,6 | — |
| 300 | mu 1 | 0,48 | < 0,010 | 0,13 | 33,6 | 0,62 | 37,2 | 54,1 |
| 301 | mu 1 | 0,45 | < 0,010 | 0,14 | 31,6 | 0,65 | 34,8 | 48,6 |
| 302 | mu 1 | 0,43 | < 0,010 | 0,12 | 33,6 | 0,65 | 36,9 | 51,7 |
| 303 | mu 1 | 0,42 | < 0,010 | 0,10 | 34,0 | 0,58 | 37,4 | 58,6 |
| 304 | mu 1 | 0,51 | 0,010 | 0,13 | 32,0 | 0,60 | 35,2 | 53,3 |
| 305 | mu 1 | 0,60 | 0,010 | 0,17 | 33,1 | 0,62 | 36,4 | 53,3 |
| 306 | mu 1 | 0,65 | 0,010 | 0,14 | 33,6 | 0,62 | 36,8 | 54,2 |
| 307 | mu 1 | 0,53 | < 0,010 | 0,14 | 32,5 | 0,58 | 35,6 | 56,0 |
| 308 | mu 1 | 0,67 | 0,010 | 0,21 | 30,9 | 0,62 | 33,9 | 49,8 |
| 309 | mu 1 | 0,61 | 0,010 | 0,19 | 30,3 | 0,66 | 33,3 | 45,9 |
| 310 | mu 1 | 0,82 | 0,015 | 0,18 | 28,9 | 0,77 | 31,8 | 37,5 |
| 311 | mu 1 | 0,87 | < 0,010 | 0,14 | 30,9 | 0,70 | 34,4 | 44,1 |
| 312 | KglB | 0,67 | < 0,010 | 0,14 | 33,1 | 0,70 | 36,6 | 47,2 |

Tabelle 13: Unterer Muschelkalk von Lengfurt/Main (Sammelproben)

| Prob.-Nr. | Strati-graphie | Fe % | P % | K % | Ca % | Mg % | $CO_2$ % | Ca/Mg |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 313 | mu 1 | 0,53 | < 0,010 | 0,14 | 33,6 | 0,66 | 37,1 | 50,8 |
| 314 | mu 1 | 0,43 | 0,010 | 0,17 | 33,9 | 0,50 | 37,3 | 67,8 |
| 315 | mu 1 | 0,48 | < 0,010 | 0,17 | 33,1 | 0,48 | 36,4 | 68,9 |
| 316 | mu 1 | 0,45 | < 0,010 | 0,10 | 34,0 | 0,48 | 37,0 | 70,8 |
| 317 | mu 1 | 0,50 | < 0,010 | 0,08 | 34,0 | 0,53 | 37,2 | 64,1 |
| 318 | mu 1 | 0,47 | 0,011 | 0,11 | 34,5 | 0,53 | 37,4 | 65,0 |
| 319 | mu 1 | 0,54 | < 0,010 | 0,11 | 32,0 | 0,58 | 35,0 | 53,3 |
| 320 | mu 1 | 0,54 | 0,031 | 0,13 | 32,0 | 0,58 | 35,1 | 56,8 |
| 321 | mu 1 | 0,54 | 0,012 | 0,13 | 31,9 | 0,53 | 35,0 | 60,1 |
| 322 | mu 1 | 0,48 | 0,010 | 0,12 | 31,0 | 0,48 | 34,1 | 64,5 |
| 323 | mu 1 | 0,68 | 0,016 | 0,18 | 29,5 | 0,58 | 32,9 | 50,8 |
| 324 | mu 1 | 0,79 | 0,016 | 0,13 | 30,3 | 1,03 | 34,2 | 29,4 |
| 325 | KglB | 0,48 | 0,013 | 0,12 | 34,0 | 0,58 | 37,3 | 58,6 |
| 326 | mu 1 | 0,51 | < 0,010 | 0,13 | 33,6 | 0,62 | 36,8 | 54,1 |
| 327 | mu 1 | 0,43 | < 0,010 | 0,10 | 35,9 | 0,48 | 39,5 | 74,7 |
| 328 | mu 1 | 0-57 | 0,022 | 0,14 | 33,1 | 0,51 | 36,4 | 64,9 |
| 329 | mu 1 | 0,51 | < 0,010 | 0,11 | 32,5 | 0,55 | 35,8 | 59,0 |
| 330 | mu 1 | 0,71 | 0,010 | 0,13 | 32,0 | 0,60 | 35,1 | 53,3 |
| 331 | mu 1 | 0,64 | 0,018 | 0,17 | 29,5 | 0,53 | 32,6 | 55,6 |
| 332 | mu 1 | 0,74 | 0,012 | 0,19 | 31,0 | 0,50 | 34,0 | 62,0 |
| 333 | mu 1 | 0,82 | 0,014 | 0,20 | 30,3 | 0,51 | 33,2 | 59,4 |
| 334 | mu 1 | 0,70 | 0,017 | 0,19 | 30,3 | 0,51 | 31,2 | 59,4 |
| 335 | mu 1 | 1,12 | 0,014 | 0,24 | 28,0 | 0,55 | 31,0 | 50,8 |
| 336 | mu 1 | 1,10 | 0,015 | 0,20 | 27,6 | 0,58 | 30,6 | 47,7 |
| 337 | mu 1 | 1,01 | 0,013 | 0,19 | 28,9 | 1,44 | 33,1 | 20,0 |
| 338 | mu 1 | 0,56 | 0,010 | 0,13 | 35,4 | 1,10 | 29,5 | 32,1 |
| 339 | DeB | 0,56 | 0,010 | 0,14 | 35,2 | 0,73 | 38,9 | 48,2 |
| 340 | mu 1 | 0,54 | 0,014 | 0,15 | 31,9 | 0,53 | 35,4 | 60,7 |
| 341 | mu 1 | 0,65 | 0,012 | 0,11 | 32,8 | 0,51 | 35,9 | 64,3 |
| 342 | mu 1 | 0,67 | < 0,010 | 0,13 | 32,5 | 0,55 | 35,8 | 59,1 |
| 343 | mu 1 | 0,88 | 0,015 | 0,14 | 29,7 | 0,51 | 32,9 | 58,2 |
| 344 | mu 1 | 0,65 | 0,015 | 0,18 | 29,6 | 0,55 | 32,8 | 53,8 |
| 345 | mu 1 | 0,70 | 0,016 | 0,21 | 28,2 | 0,56 | 31,5 | 50,4 |
| 346 | mu 1 | 1,05 | 0,017 | 0,22 | 26,5 | 0,62 | 29,5 | 42,7 |

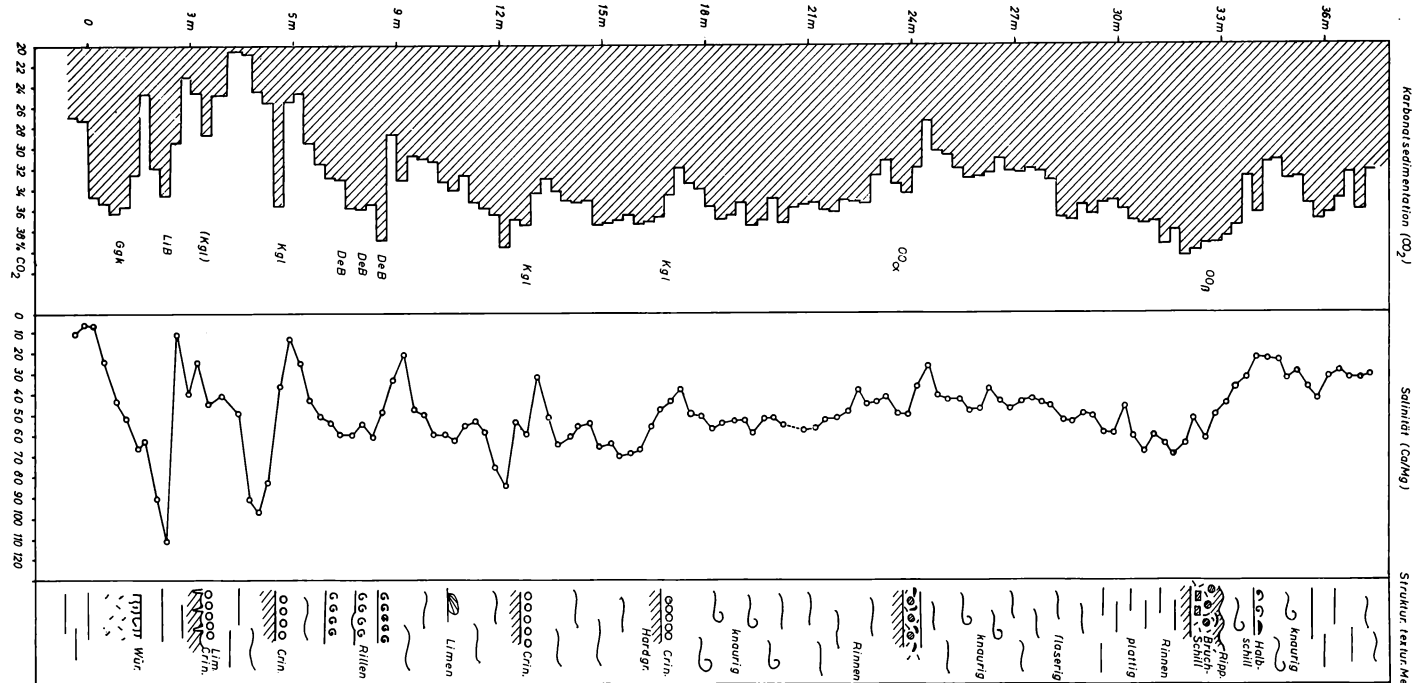
Tabelle 13: Unterer Muschelkalk von Lengfurt/Main (Sammelproben)

| Prob.-Nr. | Stratigraphie | Fe % | P % | K % | Ca % | Mg % | $CO_2$ % | Ca/Mg |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 347 | mu 1 | 1,33 | 0,017 | 0,19 | 22,5 | 0,91 | 24,6 | 24,7 |
| 348 | mu 1 | 1,15 | 0,020 | 0,26 | 28,2 | 1,60 | 25,4 | 17,6 |
| 349 | KglB | 0,56 | 0,013 | 0,19 | 32,5 | 0,91 | 35,6 | 34,6 |
| 350 | mu 1 | 0,18 | < 0,010 | 0,09 | 23,2 | 0,28 | 25,5 | 34,2 |
| 351 | mu 1 | 0,22 | < 0,010 | 0,08 | 22,1 | 0,23 | 24,4 | 96,0 |
| 352 | mu 1 | 0,14 | < 0,010 | 0,07 | 18,1 | 0,20 | 20,7 | 90,5 |
| 353 | mu 1 | 0,33 | 0,010 | 0,12 | 17,9 | 0,37 | 20,5 | 48,3 |
| 354 | mu 1 | 0,76 | < 0,010 | 0,06 | 22,1 | 0,53 | 24,7 | 41,7 |
| 355 | KglB | 0,28 | < 0,010 | 0,07 | 25,7 | 0,58 | 28,6 | 44,3 |
| 356 | mu 1 | 0,25 | < 0,010 | 0,08 | 21,7 | 0,91 | 24,6 | 23,8 |
| 357 | mu 1 | 0,16 | 0,010 | 0,09 | 20,9 | 0,53 | 23,0 | 39,4 |
| 358 | mu 1 | 0,85 | 0,022 | 0,15 | 24,8 | 2,28 | 29,4 | 10,8 |
| 359 | LiB | 0,17 | 0,010 | 0,12 | 31,6 | 0,28 | 34,5 | 112,6 |
| 360 | mu 1 | 0,16 | < 0,010 | 0,08 | 28,9 | 0,32 | 31,9 | 90,6 |
| 361 | mu 1 | 0,31 | < 0,010 | 0,05 | 20,0 | 0,32 | 24,6 | 62,5 |
| 362 | mu 1 | 0,34 | < 0,010 | 0,07 | 29,2 | 0,44 | 32,4 | 66,2 |
| 363 | Ggk | 1,19 | 0,014 | 0,11 | 32,5 | 0,62 | 35,7 | 51,3 |
| 364 | Ggk | 1,56 | < 0,010 | 0,05 | 32,0 | 0,76 | 36,1 | 42,2 |
| 365 | Ggk | 1,79 | 0,014 | 0,14 | 30,0 | 1,30 | 35,1 | 23,4 |
| 366 | Ggk | 1,88 | 0,019 | 0,14 | 29,2 | 3,64 | 34,7 | 7,9 |
| 367 | so 3 | 1,46 | 0,024 | 0,17 | 21,8 | 3,22 | 27,2 | 6,7 |
| 368 | so 3 | 1,07 | 0,023 | 0,17 | 22,1 | 2,10 | 26,9 | 10,5 |

Tafel 2, Fig. 1:

# Vergleich der Karbonatgehalte mit den Ca/Mg-Verhältnissen und lithologisch-stratinomischen Kriterien nach Bohrung Lengfurt I/1959

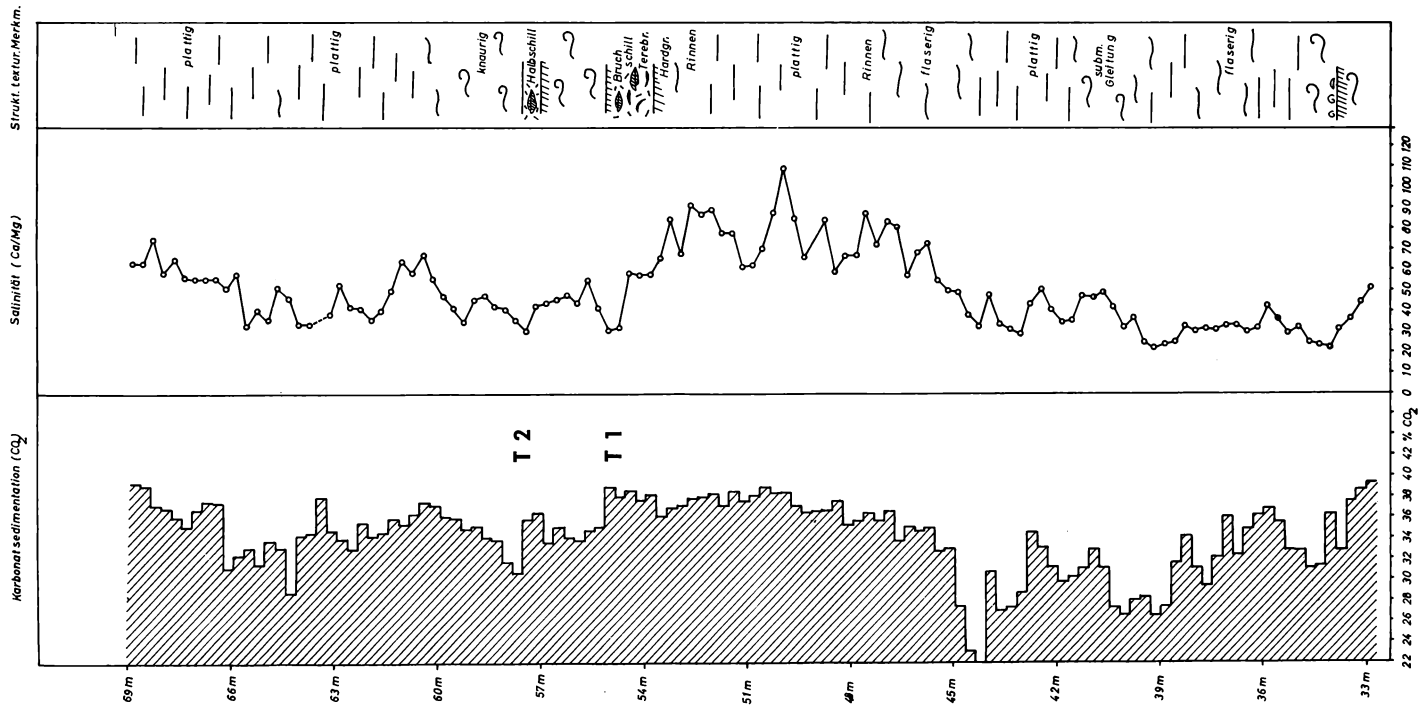
Grenzgelbkalk, Lima-Bank, intraformationelle Konglomeratbänke, Dentalien-Bänke, Oolithbank alpha und Oolithbank beta sind im Diagramm durch hohe Karbonatgehalte erkennbar. In Bezug auf das Ca/Mg-Verhältnis treten sie meist in markanten Änderungsbereichen auf, die wahrscheinlich mit Salinitätsschwankungen in Zusammenhang gebracht werden können, da in den Ca/Mg-Verhältnissen der HCl-löslichen Sedimentfraktion vorwiegend der verschiedene Mg-Anteil der Karbonate erfaßt wurde. Besonders bei geringen Wassertiefen und großer Verdunstung kann es zu schnellen Salinitätsänderungen kommen und zu einer Karbonatsedimentation mit entsprechenden Schwankungen der Mg-Gehalte. Demnach könnten sich in den Ca/Mg-Verhältnissen auch Tiefenschwankungen abzeichnen. Diese Annahme stimmt mit den stratinomischen Beobachtungen insofern überein, als in den markanten Änderungsbereichen des Ca/Mg auch die organogen-klastischen Detritusablagerungen auftreten, die nach verschiedenen Merkmalen relativ geringe Wassertiefen und verstärkte Wasserbewegungen anzeigen.



*Tafel 2, Fig. 2:*

## Vergleich der Karbonatgehalte mit den Ca/Mg-Verhältnissen und lithologisch-stratinomischen Kriterien nach Bohrung Lengfurt XI/1959

Die Terebratelbänke treten am Ende einer gesteigerten Karbonatsedimentation auf, in denen hohe Ca/Mg-Verhältnisse vorherrschen. Obwohl z. B. die Karbonatgehalte der unteren Terebratelbank die Gehalte im Bereich der liegenden Wellenkalke noch übertreffen, fällt das Ca/Mg trotz ansteigender Karbonatgehalte innerhalb dieser Leitbank.



Auf Grund des Verlaufes der Ca/Mg-Verhältnisse erhalten wir den Eindruck, daß Salinitäts- und Tiefenschwankungen — neben anderen Faktoren — für die sedimentologischen und ökologischen Bedingungen von entscheidender Bedeutung waren. Diese Wechselbeziehungen könnten bei der Betrachtung eines Zyklothems folgendermaßen dargestellt werden:

1. *epirogene Senkung des Sedimentationsgebietes* (Wellenkalk: Mergel —▶ Kalkmergel —▶ Mergelkalk):
Transgressive Erweiterung des Meeres (Abnahme des allochthonen Sedimentanteiles und Erhöhung des Karbonates; Verringerung der Salinität (steigendes Ca/Mg).

2. *epirogene Hebung bzw. verminderte Senkung des Sedimentationsgebietes* (Wellenkalk: Kalkmergel —▶ Kalkstein):
Mehr oder weniger gleichbleibende Wassertiefe und Übergang von fallender zu wieder ansteigender Salinität (bei ± geringen Änderungen des Gesamtkarbonates durchlaufen die Ca/Mg-Werte ein Maximum, noch keine oder keine wesentliche Zunahme des detritischen Materiales) — Verstärkung der Strömungen (Rinnen und Rillen).

3. *epirogene Hebung des Sedimentationsgebietes* (Kompakte Detrituskalke):
Sedimentationsunterbrechungen (Hardgrounds) und starke Besiedlung (Crinoiden, Brachiopoden, Muscheln etc.). Verstärkung der Wasserbewegungen infolge geringerer Wassertiefe, die schließlich zu Aufarbeitungen und zur Zerstörung der Lebensgemeinschaften führen, (Bildung von allochthonen Thanatocoenosen in Form bruchschillführender Gesteine; sie lagern oft auf Erosionsflächen, z. T. auf Emersionsflächen) — Weitere Erhöhung der Salinität (fallendes Ca/Mg).

4. *epirogene Hebung des Abtragungsgebietes, z. T. auch des Sedimentationsgebietes* (Wellenkalk: Kalk —▶ Kalkmergel —▶ Mergel oder nur Mergel):
Allmähliche oder schnelle Verstärkung der detritischen Materialzufuhr und damit abnehmende Wassertiefe und Zunahme der Salinität (bei abnehmendem Karbonat fallendes Ca/Mg; Sediment des symmetrischen Zyklothems: Wellenkalk mit abnehmendem Karbonatgehalt, Sediment des asymmetrischen Zyklothems: karbonatarmer Wellenkalk (Mergel), meist feinplattig, z. T. schwach dolomitisch bis dolomitisch.
Wesentlich als Ergänzung für unsere Betrachtungen ist das Auftreten von oolithischen Kalken in Änderungsbereichen von Ca/Mg. Relativ niedere Ca/Mg-Verhältnisse beobachteten wir entweder:

a) im Liegenden (z. B. Oolithische Kalke an der Basis des mu in Thüringen; Oolithbank beta in Thüringen, Trochitenkalk) oder

b) im Hangenden (z. B. Oolithbank beta, Terebratel- und Schaumkalkbänke im Untersuchungsgebiet) oder

c) im Liegenden und Hangenden (z. B. oolithische Gesteine der Hornsteinzone; großoolithische Kalkbank an der Grenze mu/mm).

Nach Beobachtungen in Gebieten mit rezenten Oolithbildungen hält QUIRING (1944) folgende Bedingungen für erforderlich:

1. flaches Wattenmeer („Oolithwatten"), 2. Wasser- und Jahreslufttemperaturen nicht unter 20°C, die eine schnelle Verdunstung gewährleisten, 3. Vorhandensein

von Gezeiten oder ähnlicher Erscheinungen, da für die Stabilisierung der Ooide Trocknung notwendig ist, 5. Verdunstung größer als Niederschläge (zumindest zeitweise) und 6. Sättigung der Flut mit $CaCO_3$ und das Vorhandensein von Kristallisationskeimen (suspendierte Kalkteilchen etc.).

Auf die Verhältnisse des Muschelkalkes angewandt, müßte demnach die Bildung der Ooide in den südlichen, küstennäheren Bereichen des Muschelkalkmeeres zu vermuten sein. Die oolithischen Sedimente des Beckeninneren können jedoch sicher nicht nur als verfrachtete Produkte aus den küstennahen Regionen betrachtet werden. So deutet z. B. die Faziesverschiebung der Oolithbank beta von intraformationellen Bruchschillkalken (im Süden) zu oolithischen Kalken (im Norden) zumindest auch auf eine Bildungsmöglichkeit unter geringen bis mäßigen Wassertiefen. Auch nach LOMBARD (1959, S. 142) und NEWILL, PURDY & IMBRIE (1960, S. 481) scheint eine Oolithbildung unter Wasserbedeckung möglich, wenn auch nur bei geringen Wassertiefen, in denen die Wasserbewegungen voll wirksam werden können.
Für die Oolithe des Unteren Muschelkalkes kommen wir zu der Auffassung, daß sie sich in warmen Gewässern gebildet haben, in denen es durch Zufuhr von frischem Meerwasser trotz geringer Wassertiefe nicht zu einer Überhöhung der normalen Salinität gekommen ist. Die intensiven Wirkungen von Strömungen und Turbulenz sind an intensiver Rippelschichtung, bedeutenden Erosionserscheinungen und der teilweise konglomeratischen Ausbildung der oolithischen Kalke unverkennbar.

# D. Biostratinomischer Teil

Die organogen-klastischen Sedimente (organogene Detrituskalke) werden durch ihre Fossilreste charakterisiert. Biostratinomisch handelt es sich dabei um typische Grabgemeinschaften oder Thanatocoenosen (WASMUND 1927). Unter Thanatocoenosen verstehen wir die erhaltungsfähigen Reste abgestorbener Organismen, die Bestandteile des Sedimentes bilden. Nach der Mitwirkung verfrachtender Kräfte unterscheiden wir:

a) *autochthone Thanatocoenosen* (Biocoenosen)

Einbettung erfolgt am Lebensort, der zugleich Sterbeort ist — sie dokumentieren Ausschnitte von Lebensgemeinschaften, ihre Zusammensetzung ist biologisch bedingt, ihr Standort ist von ökologischen Faktoren abhängig.

b) *allochthone Thanatocoenosen* (Taphocoenosen)

Einbettung erfolgt entweder nach vorheriger Verfrachtung vom Lebens- und Sterbeort oder nach vorangegangenem Transport des Organismus in ein lebensfremdes oder lebensfeindliches Environment, ihre Bildung setzt gegebenenfalls Wasserbewegung, vor allem Strömungen voraus, letztlich bestimmen also chemisch-physikalische Gesetzmäßigkeiten die Zusammensetzung und den Standort der Taphocoenosen.

## I. Allochthone Thanatocoenosen (organogen-klastische Sedimente)

Im Gegensatz zu den weniger auffälligen und selteneren Erscheinungen der Biocoenosen sind die zunächst zu besprechenden Taphacoenosen allgemein verbreitet, treten gesteinsbildend auf und haben daher auch große stratigraphische Bedeutung. Sie lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

1. Intraformationelle Konglomerathorizonte, bruchschillführend
2. Schill- bis Bruchschillkalke, z. T. geröllführend
3. Oolithische Kalke, schill- bis bruchschillführend
4. Schalenpflaster

### 1. *Intraformationelle Konglomerathorizonte*

Gesteine, die bei kalkiger Grundmasse im wesentlichen aus gerundeten Kalkgeröllen, Bruchschill und Crinoidenstielgliedern bestehen, bezeichnen wir als bruchschillführende intraformationelle Konglomerate (Abb. 10). In

Abb. 10: Intraformationelle Konglomeratbank über einer Kalkmergelschicht, deren Risse mit Aufarbeitungsmaterial ausgefüllt sind. Unterer Wellenkalk (mu1) im Steinbruch des Zementwerkes Lengfurt.

der Literatur finden sich dafür auch Bezeichnungen wie „Crinoiden-Geschiebe-Kalke", „Pseudokonglomerate", „Konglomeratbänke", „Eigengeröllhorizonte".

In Unterfranken kommen diese Gesteine ausschließlich im unteren Wellenkalk vor, darüber hinaus bildet eine intraformationelle Konglomeratbank an vielen Stellen den Abschluß des Unteren Muschelkalkes.

Schneller fazieller Wechsel schränkt ihren stratigraphischen Wert selbst im Bereich kleiner und mittlerer Entfernungen sehr ein (vgl. LODEMANN, 1960). Ähnliche Bildungen finden sich in Thüringen vorwiegend im mittleren Wellenkalk (R. WAGNER 1897, MÜLLER & MÄGDEFRAU 1957); im Gebiet der Naumburger Mulde, im nördlichen Harzvorland und im Subherzynen Becken auch im unteren Wellenkalk (MUSSTOPF 1958, NIESLUCHOWSKI 1957, WINTER 1957, JUBITZ 1958).

Die groben Bestandteile der intraformationellen Geröllhorizonte überwiegen gegenüber der Grundmasse. Die Gerölle sind unvollkommen klassiert, meist berühren sie sich gegenseitig (dichte Packung), seltener sind größere Zwischenräume vorhanden (lockere Lagerung).

Die Zwickel sind durch kalzitisch-ankeritische oder ankeritisch-dolomitische Grundmasse, Crinoidenstielglieder und Bruchschill ausgefüllt. Scherbenförmige Gerölle sind oft dachziegelartig gelagert, im Profil wurden bis 3 x 12 cm große Gerölle beobachtet.

Die Neigung solcher Gerölle war gegen die Strömung gerichtet (HÄNTSCHEL 1939); im Profil können jedoch die wahren Einfallsrichtungen nicht ermittelt werden, weil die räumliche Lage nicht erfaßt werden kann.

Lediglich an eingeregelten Komponenten auf Schichtflächen kann die letzte wirksame Strömungsrichtung ermittelt werden.

Oft überwiegen im Liegendteil der maximal 0,30 m mächtigen „Eigengeröllhorizonte" die gröberen Komponenten, im Hangendteil dagegen Bruchschill. Eine solche Abfolge weist auf nachlassende Turbulenz und Strömungsintensität hin.

Die untere Begrenzung der intraformationellen Konglomeratlagen ist stets scharf; verläuft meist parallel zur Schichtung, teilweise sind auch Rillen und Rinnen in den Untergrund eingeschnitten.

Der Ablagerung von intraformationellen Konglomeratlagen ging meist eine flächenhafte Erosion voraus.

Auch Verlagerungen von Prielen, die z. B. im Jade-Gebiet maximal 100 m pro Jahr betragen (LÜDERS 1934), lassen eine flächenhafte, nicht gleichaltrige Konglomerat- bzw. Schillage entstehen, die u. U. Strandnähe oder Transgression vortäuscht (GRIPP 1956, REINECK 1958). Diese Bildungsweise spielt im Unteren Muschelkalk eine untergeordnete Rolle, doch dürfte sie für die an der Grenze Orbicularisschichten — Mittlerer Muschelkalk

beobachtete intraformationelle Konglomeratbank zutreffen. Dafür sprechen: 1. überhängende „Prallhänge", 2. longitudinale Schrägschichtung und 3. schnelles Auskeilen und Anschwellen der Mächtigkeiten bis auf ca. 50 cm (Abb. 11).

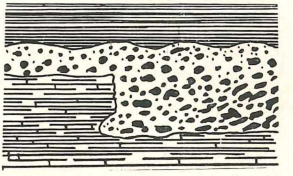


Abb. 11: Intraformationelle Konglomeratbank an der Grenze Orbicularisschichten — Mittlerer Muschelkalk im Steinbruch des Zementwerkes Karlstadt (die Lagerungsverhältnisse sprechen für eine Bildung durch lineare Erosion über Untiefen oder trockengelaufenen Gebieten: Prallhang mit Auskolkung, Anlagerungsschichtung des Aufarbeitungsmaterials im Liegendteil, Abschluß durch Oscillationsrippeln und feinkörniges Material im Hangenden, schnelles Auskeilen; Länge des Ausschnittes ca. 1 m).

Aussagen über den Verfestigungsgrad des i. a. aufgearbeiteten Untergrundes ergaben sich an einer lokalen Konglomeratbank im Steinbruch des Zementwerkes Lengfurt (Abb. 12):

Das Liegende der Konglomeratbank besteht aus mikrokristallinem Mergelkalk, an seiner oberen Grenzfläche treten in ± regelmäßigen Abständen bis 8 cm tiefe Risse und bis 5 mm starke Bohrgänge auf. Die oberen 3 cm der Mergelkalklage zeigen teilweise konkave Durchbiegung, die Risse sind hier scharf begrenzt. In diesem Teil war die Verfestigung offensichtlich abgeschlossen, als die Überdeckung mit crinoiden- und bruchschillführendem Aufarbeitungsmaterial erfolgte.

Abb. 12:
Ausbildung von Rissen im Liegenden einer intraformationellen Konglomeratbank. Die Begrenzung der Risse läßt auf einen frühdiagenetisch von oben nach unten abnehmenden Verfestigungsgrad schließen. Unterer Wellenkalk (mu1) im Steinbruch des Zementwerkes Lengfurt.

Im unteren Teil war die Verfestigung dagegen noch nicht so weit abgeschlossen, worauf besonders die schlierig-diffuse Begrenzung der Risse schließen läßt. Offenbar führte hier eine erneute Wasseraufnahme zu einer teilweisen Vermischung von Aufarbeitungsmaterial und Mergelkalk.
Ausgefüllte Risse, konkave Durchbiegung der obersten Teile und Anzeichen für abnehmenden Verfestigungsgrad von oben nach unten sind die bezeichnenden Merkmale der Auflagerungsschicht dieser intraformationellen Konglomeratbank.
Es ist daher wahrscheinlich, daß es sich um echte Trockenrisse handelt, deren Bildung eine Emersion voraussetzt, obwohl ähnliche Erscheinungsformen u. U. auch durch längere Sedimentationsunterbrechungen entstehen können.

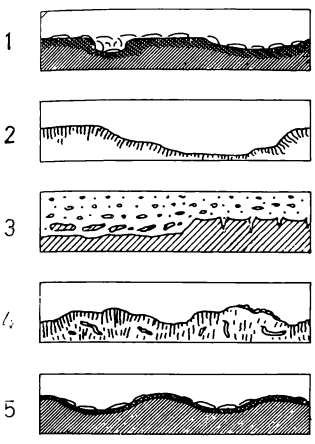
Die intraformationellen Konglomerate sind demnach zumindest im Anschluß an längere Sedimentationsunterbrechungen entstanden und ihre Auflagerungsfläche bestand aus verfestigten Sedimenten, die in Analogie zu rezenten Bildungen als „Hardgrounds" bezeichnet werden können.

Unter dem Begriff „Hardground" werden ebene bis wellige oder durch bohrende Organismen perforierte, submarine Oberflächen ohne rezente Sedimentbedeckung zusammengefaßt (Lombard 1956); es gehören aber auch Erosions- und Emersionsflächen dazu (Voigt 1959).
Derart ausgezeichnete Schichten wurden bei stratigraphischen Untersuchungen teilweise registriert und z. B. von Reis (1910) auch in ihrer ökologischen Bedeutung als Siedlungsflächen erkannt.
Für den Unteren Muschelkalk soll das Gemeinsame aller Hardgroundtypen hier kurz charakterisiert werden. Es sind dies:

a) Anzeichen für eine Verfestigung der Sedimente schon vor der Ablagerung des Hangenden — dies setzt Sedimentationsunterbrechung voraus
b) Die Hardgrounds (im mu) fallen meist mit der Schichtung zusammen — Ausnahmen entstehen, wenn der frühen Erhärtung lineare Erosion vorausging
c) eine Folge der Sedimentationsunterbrechung sind scharfe Obergrenzen, wozu auch die Sohlflächen von Erosionsformen zu rechnen sind.

Während z. B. in der Oberkreide ein Hardground u. U. ganze Abteilungen vertreten kann (faunistisch belegte Sedimentationslücken durch Fossilien aus den Hohlformen von Hardgrounds, Voigt 1954, 1956), finden sich im Ablagerungsgebiet des Unteren Muschelkalkes keine Anzeichen für größere lipalische Intervalle. Dennoch hat der Nachweis von Hardgrounds auch im Unteren Muschelkalk grundsätzliche Bedeutung, nicht nur für Lithologie und Stratigraphie, sondern vor allem für stratinomische Fragen.
Die im Unteren Muschelkalk vorkommenden Hardgroundtypen wurden deshalb in Abb. 13 zusammengestellt.

Abb. 13: Zusammenstellung der verschiedenen Hardground-Typen des Unteren Muschelkalkes.




Typ 1: Hardground-Übergangstyp — besteht aus Schichtflächen, in die steil geböschte Rinnen und Rillen eingeschnitten sind, oft mit feinsandig-glimmerigen Bestegen und Schalenpflastern bedeckt, Grabgänge und postmortaler Bewuchs von Schalen kommen vor.

Typ 2: Hardground besteht aus einer Erosionsfläche, die mit Bohrgängen ± senkrecht zur Oberfläche perforiert ist, z. T. mit Placunopsidenbewuchs — meist durch Bruchschillkalk überlagert.

Typ 3: Hardground besteht aus einer Erosions- oder Emersionsfläche, letztere mit Trockenrissen. Bohrgänge, Ocker- und Glaukonitkrusten kommen vor — Überlagerung durch intraformationelle Konglomeratbänke.

Typ 4: Hardground besteht aus bis zu 25 cm mächtigen feinkristallinem Kalkstein mit welliger Oberfläche, die meist stark durch Bohrgänge (Trypanites, Balanoglossites) perforiert, oft auch mit sessilen Organismen bewachsen (Placunopsis, Enantiostreon, Encrinus) und nicht selten mit einer Glaukonit-, Ockerkalk- oder Tonmergelkruste überdeckt ist, die auch die Hohlformen ausfüllt — Überlagerung: organogenklastische Detrituskalke, „Seesinterkalk", Wellenkalk.

Typ 5: Hardground-Übergangstyp — besteht aus bis 5 cm mächtigen feinkristallinen bis dichten Kalksteinlagen, die oft die Dachfläche von organogenklastischen Detrituskalken bilden, sie sind z. T. durch Setzungserscheinungen zerbrochen, Schrumpfungsrisse kommen vor, oft nur in Erosionsrelikten an mit Placunopsiden besiedelten Stellen erhalten — Überlagerung meist Wellenkalk.

Die stets im Zusammenhang mit Hardgrounds (Typ 3) auftretenden intraformationellen Konglomerathorizonte lassen sich abschließend durch folgende Befunde charakterisieren:

1) Es handelt sich um Sedimente von Aufarbeitungsprodukten verfestigter Schichten und tierischer Lebensgemeinschaften (Biocoenosen). Unter günstigen Umständen lassen sich die Transportrichtungen rekonstruieren.

2) Diese Kalkbänke treten in markanten Änderungsbereichen des Ca/Mg auf und geben so Hinweise auf Salinitäts- und Tiefenschwankungen in ihrem Bildungsbereich. Es ist wahrscheinlich, daß diese Schwankungen mit trans- und regressiven Wasserbewegungen ursächlich in Verbindung stehen.

3) Intraformationelle Konglomerathorizonte sind keine Indizien für küstennahe Bildungen, sie sind eher Anzeichen für lokal geringe Wassertiefen.

Trockenlaufen ist keine unbedingte Voraussetzung für ihre Entstehung, doch sind vereinzelt Emersionsflächen nachzuweisen.

4. Im allgemeinen vollzog sich ihre Bildung im Zusammenhang mit flächenhafter Aufarbeitung (wenn auch regional begrenzt), nur selten erfolgte sie durch lineare Erosion und die damit verbundene Sedimentation bei der Verlagerung von Rinnen.

2. *Schill- bis Bruchschillkalke*

Als Schill- bis Bruchschillkalke sind im Unteren Muschelkalk ausgebildet: 1) Dentalien-, Oolith-, Terebratel-, Spiriferina- bzw. Trochiten- sowie Schaumkalkbänke — die durch ihre Lage im Profil, ihren Fossilinhalt und ihren lithologischen Habitus zugleich stratigraphische Leitmarken sind,

2) Kalkbänke von geringer horizontaler Erstreckung und Mächtigkeit mit entsprechend lokaler Bedeutung — ferner Ausfüllungen von Rinnen und Rillen, wozu auch die in den Orbicularisschichten vorkommenden Schill- bis Halbschillbildungen zählen.

Je nach Anteil von erhaltenen und zerbrochenen organogenen Hartteilen können wir im Unteren Muschelkalk unterscheiden:

1. *Schillkalke* — alle Schalen sind vollständig erhalten, ohne intraformationelle Gerölle
2. *Halbschillkalke* — Gemenge von vollständig erhaltenen und zerbrochenen Schalen, z. T. mit intraformationellen Geröllen
3. *Bruchschillkalke* — alle Schalen sind zerbrochen, oft mit intraformationellen Geröllen.

Die Schalenreste liegen stets in einer feinkörnigen Grundmasse aus splittrigem, z. T. oolithischem Kalkstein. Sie sind entweder sekundär umkristallisiert und kalzitisch (Muscheln, Schnecken, Crinoiden); bei Brachiopoden ist meist noch eine seidig glänzende Prismenschicht erhalten *(Coenothyris, Spiriferina)* oder die Schalen sind herausgelöst und hinterlassen nur Steinkerne (Dentalien, Myophorien).

Die Herauslösung der Schalensubstanz hat weder die Form noch die gegenseitigen Lagebeziehungen der Schillkomponenten verändert. Deshalb hat ihr Erhaltungszustand keinen Einfluß auf eine Zuordnung zu Schill-, Halbschill- oder Bruchschillkalken.

Die Schalengrößen weisen große Unterschiede auf. Oft herrscht eine eng begrenzte Größengruppe vor, daneben finden sich aber auch vollkommen unsortierte Gemenge. Je nach dem Mengenverhältnis von Schalen zu Grundmasse ist die räumliche Entfernung benachbarter Schillelemente verschieden. Mengenmäßig überwiegt stets die Grundmasse.

Die Lagerung der Schillkomponenten kann sein:

a) dicht — alle benachbarten Komponenten berühren sich
b) locker — die Komponenten sind durch feinkörnige oder oolithische Grundmasse voneinander getrennt.

Trotz der Bedeutung der organogen-klastischen Detrituskalke für den Unteren Muschelkalk war über die gegenseitigen Lagebeziehungen der Schillkomponenten wenig bekannt. Auf Grund von feinstratigraphischen Profilaufnahmen und zahlreichen Einzelbeobachtungen ließen sich folgende Befunde aufstellen:

1) Eine dichte, mehr oder weniger wirre Lagerung tritt dann auf, wenn die Grundmasse einen relativ geringen Anteil am Gestein hat. Die wirre Lagerung resultiert aus der gegenseitigen Behinderung der einzelnen Schalenreste.

2) Überwiegt die Grundmasse relativ stark über die Masse der Schill- und Bruchschillkomponenten, so beobachtet man eine ± deutliche Schichtung. Es resultiert eine geregelte, lockere Lagerung und der Schalenanteil „gewölbt oben" nimmt erheblich zu.

3) In allen Schill- bis Bruchschillkalken setzt sich aber meist die stabilste Lage der Schillkomponenten durch, d. h. der prozentual größte Schalenanteil liegt „gewölbt oben". Der Quotient der zahlenmäßigen Anteile (er kann im vertikalen Anschnitt ausgezählt werden)" gewölbt oben" zu „gewölbt unten" hat stets einen Wert größer als 1. Dieses Verhältnis kann z. B. bei schwierigen tektonischen Lageverhältnissen zur Klärung von Hangend und Liegend einer sonst nicht bestimmbaren Lagerung verwendet werden.

Die Bestimmung der Schalenreste in kristallinen Schill- und Bruchschillkalken ist oft schwierig. Manche Komponenten sind an typischen Querschnitten zu erkennen (z. B. Myophorien, Pectiden, Dentalien, Terebrateln). Die vorwiegend kalzitisch struierten Schalen (Brachiopoden) sind deutlich von den aragonitisch struierten zu unterscheiden, letztere fehlen entweder durch diagenetische Auflösung völlig oder sind sekundär durch Kalzit ersetzt.

Die faunistische Zusammensetzung ist sehr eintönig; stets ist das Vorherrschen einer Gruppe — Muscheln, Brachiopoden oder Crinoiden — festzustellen. In der größenmäßigen und faunistischen Zusammensetzung spiegeln sich die nach Art, Richtung und Intensität verschiedenen Wasserbewegungen wider.

### Zur Schillbildung

Die Schillablagerungen im Unteren Muschelkalk treten flächenhaft auf. Sie sind zum größten Teil mit rezenten Bildungen des Flachmeeres zu vergleichen, wie sie vor allem durch die Untersuchungen von R. Richter

(1932, 1936, 1941), HÄNTSCHEL (1939, 1941), SCHÄFER (1941, 1956), GRIPP (1958) u. a. vorliegen.

Weniger die Gezeiten als vielmehr die prozentual häufigste Richtung der grundberührenden Seegangswellen bestimmen den endgültigen Ort der Ablagerung der Sedimente im Flachseebecken.

Durch ihre Wirksamkeit werden bereits aufgebaute Sedimente mit ihren Lebensgemeinschaften wieder zerstört. Die Organismen werden z. T. schon tot, z. T. noch lebend ausgespült und ihre Hartteile als lose Lesedecken oder mächtige Schillanhäufungen ausgebreitet.

„Wo viel grundberührender und grundaufwühlender Seegang durch Winde erzeugte einsinnige Wasserbewegung, dort viel Umschichtung und in der Folge viel freiwerdender Schill und auch Bewegung der Schille an Orte des Schillfangs (Rinnen, Senken, Kolke). Wo kein grundberührender Seegang mehr, weil das Meer zu tief, dort nur noch selten Umlagerungen schon entstandener Schichten, dort also selten Freiwerden der Hartteile von Lebewesen und ihre vermischte Zusammenführung in Schillfallen." (SCHÄFER, 1956, S. 82).

Die Schillablagerungen im Unteren Muschelkalk sind dagegen nicht oder nur ausnahmsweise mit rezenten Bildungen in einem trockenlaufenden Watt zu vergleichen, denn durch Verlagerung von Rinnen und Prielen entstehen nur räumlich beschränkte Schillvorkommen.

Die Ablagerungen des Unteren Muschelkalkes können demnach nicht als Bildung eines Wattenmeeres bezeichnet werden, wenn auch zwischen Watten- und Flachmeer eine ganze Reihe von Konvergenzerscheinungen auftreten können (vgl. GRIPP 1956).

Zur Bruchschillbildung

Die Ausbildung des Bruchschills läßt keine oder nur selten Rückschlüsse auf die Bildungsvorgänge zu. In den heutigen Meeren hat die Bruchschillbildung durch Organismen große Bedeutung. Für den Unteren Muschelkalk sind wir meist auf Vermutungen angewiesen.

BARTHOLOMÄ (1954) fand auf der Dachfläche einer Kalkbank im Hangenden der Oolithbank beta (Blatt Marktheidenfeld) Bohrgänge in Limenschalen, von denen „nur noch undeutliche Umrisse" erkennbar waren. Nach Form, Anordnung und Auftreten sind diese Bohrgänge mit denen des Bohrschwammes vom Typ *Cliona* vergleichbar.

*Placodus gigas* wird immer wieder als „Kronzeuge" für einen Schalenknacker angeführt. Sein Gebiß weist eindeutig auf durophage Ernährung hin. Nach DREVERMANN (1931) war *Placodus* ein Landtier, das nur zur Nahrungssuche weit ins Meer vorstieß. Sein zweifellos vorhandener Anteil am Bruchschill läßt sich qualitativ und quantitativ nicht erfassen.

Allgemein kommen deshalb für die Bruchschillbildung in erster Linie intensive Wasserbewegungen in Betracht. Dafür spricht auch, daß sich

keine konglomeratischen Schillkalke beobachten ließen. Sicher hat die Stoßwirkung der Gerölle entscheidenden Einfluß auf die Zerstörung der Schalen gehabt.

In Abhängigkeit von der Strömungsintensität lassen sich im Aufbau von Schill- bis Bruchschillkalken bestimmte Abfolgen erkennen.

Es handelt sich dabei um Kleinzyklen, die mit „graded bedding" (BAILEY 1936, PH. KUENEN 1952) vergleichbar sind und die hier für den Unteren Muschelkalk erstmals dargestellt werden sollen.

Der Aufbau eines Kleinzyklus kann eine kontinuierliche oder diskontinuierliche Entwicklung zeigen. Mächtigkeit und Abfolgen sind im einzelnen sehr variabel.

Im folgenden wird eine durch nachlassende Strömungsintensität entstandene Abfolge angegeben:

Hangendes: Wellenkalk, oft knaurig, z. T. flaserig, niedriger Karbonatgehalt.

4. *Schill-, Halbschill- oder Bruchschillkalke* — teilweise oolithisch, oft schräg geschichtet, lagige Anordnung der Komponenten, gewölbt oben dominiert, gute Klassierung, doch oft noch Wechsel in der größenmäßigen Zusammensetzung; Abschluß wird gebildet durch a) große Wellenrippeln, nicht selten Interferenzrippeln, b) Muschelpflaster, c) dünne Mergellagen.

3. *Schill- bis Bruchschillkalk* — teilweise oolithisch, z. T. mit sporadisch eingelagerten intraformationellen Geröllen, die stets vollkommen gerundet sind, je nach Lagerungsdichte der Schillkomponenten wirre oder lagig orientierte Anordnung, unvollkommene Klassierung.

2. *Konglomeratischer Bruchschillkalk* — vorwiegend Brachiopoden-, Muschel- oder Crinoidenbruchschill, z. T. geschichtet mit dachziegelartig eingelagerten Scheibengeröllen, wenig gerundet, meist grobes Aufarbeitungsprodukt des unmittelbaren Untergrundes (vergl. Abb. 14).

1. *Feinkristalline Kalkbank (Bohrwurmbank)* — relativ reiner Kalkstein, unregelmäßige Oberfläche, während längerer Sedimentationsunterbrechung von *Trypanites*, *Balanoglossites* u. a. besiedelt, oft mit Placunopsidenbewuchs und Resten von Crinoidenhaftschalen (Hardgroundtyp 4).

Liegendes: Wellenkalk, meist plattig, oft flaserig, durch Erosionsfläche begrenzt, hoher Karbonatgehalt.

Die Abfolge 1 — 2 — 3 — 4 kann durch verschiedene Kombinationen ersetzt sein oder sich wiederholen; z. B. 1 — 2 — 3 — 1 — 3 — 4, hier weist eine Bohrwurmbank innerhalb der kompakten Kalke auf eine längere Sedimentationsunterbrechung hin. Eine weitere häufig zu beobachtende Abfolge 2 — 3 — 4 — 1 zeigt durch die Geröllführung von Schicht 2, daß der Untergrund an dieser Stelle vollständig aufgearbeitet wurde. Eine normale Abfolge (1 bis 4) an der einen Stelle kann an einer anderen bis auf eine dieser Schichten reduziert sein.

Zwischen den einzeln ausgeschiedenen Bereichen bestehen meist fließende Übergänge, lediglich Schicht 1 ist stets allseitig scharf begrenzt. Das Ablagerungsrelief hat z. T. auf die Mächtigkeiten und damit auch auf den Charakter der Abfolge von Schillablagerungen Einfluß: Auf lokalen „Schwellen" erfolgte keine oder nur geringe Ablagerung.

Nur selten läßt sich innerhalb eines Aufschlusses der Zusammenhang von zwei extremen „Fazies" (Rinnen- und Schwellenbereich) beobachten, wie dies in den folgenden Beispielen möglich war.

Ausbildung, Lagerung und Bildungsweise der Oolithbank beta im Neuen Steinbruch des Zementwerkes Lengfurt:

1. Zwischen breiten NW-SE streichenden Rinnen (bis 0,85 m tief) blieben 30 bis 40 m breite Schwellen erhalten (zwischen altem und neuem Steinbruch).

2. Die Böschungswinkel der Rinnen betragen maximal 25°; an ihnen bildeten sich lokal submarine Gleitungen.

3. Das Liegende der Rinnenfüllung bildet eine teilweise erhaltene Bohrwurmbank (Hardground-Typ 4) mit *Trypanites*, *Balanoglossites* und teilweise Placunopsidenbewuchs.

4. Auf der Schwellenregion wurde zur Zeit der Ablagerung der Oolithbank beta kein Sediment abgelagert. Die eigentliche Oolithbank zeigt in ihrem Liegendteil fazielle Differenzierungen:

a) bis 6 m von der Schwelle: crinoidenführender Bruchschillkalk mit kleinen intraformationellen Konglomeraten bis 2 cm Durchmesser, z. T. oolithisch.

b) bis 25 m von der Schwelle: grober konglomeratischer Bruchschillkalk, Gerölle mit Bohrgängen, (z. T. „allochthon", z. T. erst im Geröll entstanden, „autochthon"), Gerölle unvollkommen gerundet, Längsdurchmesser der Gerölle maximal 25 cm (Abb. 14).

c) bis 40 m von der Schwelle: bruchschillführender, oolithisch-glaukonitischer Trochitenkalk, Ende des Aufschlusses.

5. Die Hangendpartie besteht aus ± geschichtetem Bruchschillkalk ohne merkliche Faziesunterschiede, die Hangendfläche zeigt schwach asymmetrische Wellenrippeln (Streichen 95°).

Aus der Größenverteilung der Gerölle im Zusammenhang mit der Richtung der asymmetrisch nach Süden gerichteten Wellenrippeln sind folgende Ablagerungsbedingungen wahrscheinlich:

Die ± Ost-West eingeregelten Gerölle wurden durch von N nach S gerichtete Strömungen transportiert, vor der „Schwelle" lagerten sich die groben Aufarbeitungsprodukte ab. Die Tatsache, daß die größten Gerölle in einem gewissen Abstand von der Schwelle sedimentiert wurden und eine abgestufte fazielle Ausbildung auf kurze Entfernung deutlich wird, spricht dafür, daß die klastischen Detrituskalke nur bei geringen Wasser-

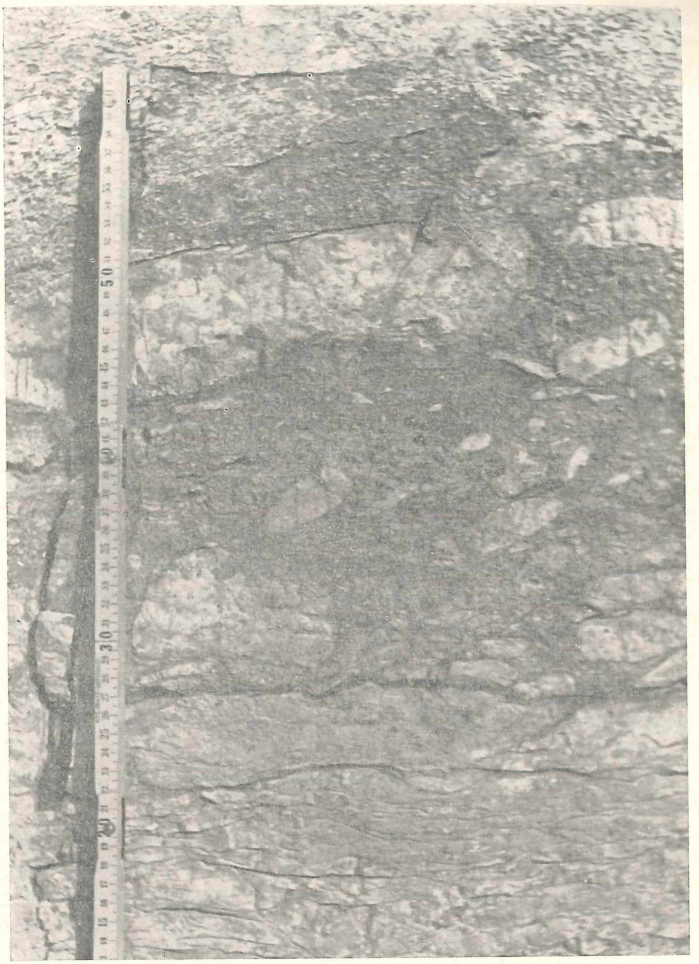


Abb. 14: Konglomeratischer Bruchschillkalk mit großen intraformationellen Geröllen. Liegendteil der Oolithbank beta im Neuen Steinbruch des Zementwerkes Lengfurt.

tiefen gebildet wurden. Ähnliche Verhältnisse, wenn auch nicht in so klarer Differenzierung, fanden sich in der Oolithbank beta am Ravensberg bei Veitshöchheim.

Die untere Terebratelbank am Bergsturz zwischen Karlstadt und Gambach

zeigt auf engem Raum Mächtigkeitsschwankungen von 0,25 bis 1,25 m, die hier ebenfalls auf ein unruhiges Ablagerungsrelief zurückgehen, das durch die Bruchschillablagerungen ausgeglichen wurde.

Von einem stets unruhigen Relief zeugt auch die Ablagerung der obersten Schaumkalkbank. Sie ist z. B. unterhalb der alten Seilbahn im Steinbruch des Zementwerkes Karlstadt (Fußpfad unterhalb der alten Seilbahn) als 4,5 m breite und 0 bis 0,45 m mächtige Rinnenablagerung (Streichen 155°) in oolithischer Ausbildung mit primärer Schrägschichtung entwickelt.

Die folgenden Beispiele zeigen, welche Indizien als Hinweise für Wasserbewegung, Strömungsintensität und Strömungsrichtung ausgewertet werden können:

Die Dentalienbänke bestehen häufig aus Rinnen- und Rillenfüllungen, die stets in einem Niveau auftreten. Im Profil einer 5 cm mächtigen Rinne (Neuer Steinbruch des Zementwerkes Lengfurt) wurden auf 100 cm² Fläche 169 *Entalis* sp., 144 *Omphalopthychia* sp. und 12 Bruchstücke von *Gervillia* sp. ausgezählt. Trotz der hier relativ dichten Lagerung zeigten die Dentalien eine deutliche Einregelung und eine noch erkennbare Einsteuerung (von 169 waren 102 in die N-S-Richtung eingeregelt, davon waren 56 mit der Spitze nach N, 46 nach S orientiert). Entweder ist der Formwiderstand von *Entalis* für eine Einsteuerung zu gering oder es ist neben einer Strömung von N nach S auch mit einer entgegengesetzten Strömung zu rechnen.

Der Hangendteil der unteren und z. T. die gesamte obere Terebratelbank bestehen oft vorwiegend aus doppelklappigen Brachiopoden. Dabei handelt es sich nicht etwa um Biocoenosen, sondern als Ursache kommt nachlassende Strömungsintensität und damit geringere Aufbereitung in Betracht.

Die nahezu ausschließlich aus *Myophoria orbicularis* BRONN bestehenden Halbschill- bis Schillkalke (Steinkernerhaltung) der Orbicularisschichten kommen ebenfalls in geringmächtigen Lagen, Rinnen und Rillen vor. Wirre Lagerung der Komponenten infolge dichter Packung ist typisch. Als Folge einseitig gerichteter Strömungen sind die Muschelschalen in den Rinnen meist vertikal gestellt und vielfach ineinander geschachtelt. In einer Rinne bei Thüngersheim wurden bis 24 ineinandergeschobene Exemplare gezählt.

Die für die Orbicularisschichten im Untersuchungsgebiet charakteristische Gesamtsituation zeigt ein künstlicher Aufschluß im Naturschutzgebiet Höhfeldplatte östlich von Thüngersheim (Abb. 15).

Die Beobachtungen können folgendermaßen zusammengefaßt werden:

1. Die gesamte Schichtfläche ist mit einem losen Myophoriensteinkernpflaster be-

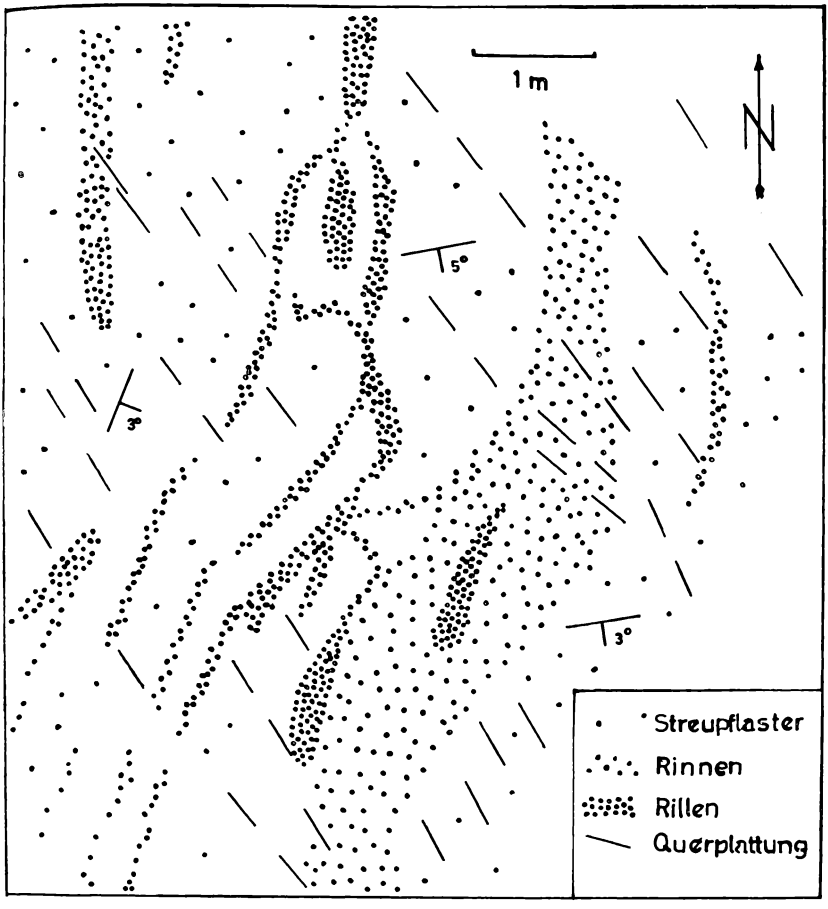



Abb. 15: Verlauf von Erosionsformen (Rinnen und Rillen, die mit Schill von Myophoria orbicularis BRONN ausgefüllt sind) im Bereich der Orbicularisschichten, Höhfeldplatte bei Thüngersheim.

deckt. Lokal kommt es zu erheblichen Verdichtungen. Nach RUTTE (1958) konnten hier auf 1 m² 4 872 Exemplare ausgezählt werden.

2. Die Masse des „Schill" (Steinkernerhaltung) ist einklappig, die Einkippung ist nahezu vollständig in die stabilste Lage erfolgt; das Verhältnis von linken und rechten Klappen ist etwa gleich (keine wesentlichen Formunterschiede); es ist keine Einsteuerung festzustellen (Umriß ohne charakteristischen Formwiderstand).

3. Zweiklappig erhaltene Muschelsteinkerne kommen untergeordnet vor, oft sind

sie deformiert und zeigen netzartige Sprünge, die Auflösung der Schalen erfolgte also nach der frühdiagnetischen Verfestigung.

4. Lokal kommen gehäuft einklappige Myophorien-Steinkerne in scheinbar inverser Lagerung vor. Hier ist jedoch nur der im Sediment vergrabene Teil einer zweiklappigen Muschel überliefert, der obere Teil wurde vor der Sedimentation des Hangenden weggelöst.

5. Die räumliche Gliederung der Rinnen und Rillen, die in die Schichtfläche eingeschnitten sind, geht aus Abb. 15 hervor. Die „Schillmassen" sind im Liegenden und Hangenden durch Steinkernpflaster abgeschlossen, innerhalb der Rinnen und Rillen sind Verschiebungen häufig, eine bestimmte Orientierung der konvexen Seiten ist nicht nachzuweisen. Möglicherweise sind nacheinander entgegengesetzte Strömungsrichtungen wirksam gewesen.

6. In Nord-Süd verlaufende Hauptrinnen (ca. 1 m breit, 25 cm tief) münden Nebenrinnen und -rillen (NNE-SSW-Verlauf, bis 25 cm breit, bis 20 cm tief). Mehrfach wurde ein Gefälle nach Norden ermittelt — die lokal festgestellten Gefällerichtungen können nicht ohne weiteres verallgemeinert werden.

Anordnung und Lagerung der Schillkomponenten sprechen für eine Ausbreitung des ausgespülten Materials durch gerichtete Strömungen.

3. *Bruchschillführende Oolithkalke*

Die im Unteren Muschelkalk vorkommenden faziellen Ausbildungen oolithischer Kalksteine lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

1. oolithische Bruchschill- und Trochitenkalke
2. bruchschill- und trochitenführende Oolithkalke
3. reine Oolithkalke, nur sporadisch mit Trochiten oder Schalenresten.

In allen Ausbildungen können ± regelmäßig oder sporadisch intraformationelle Gerölle eingeschaltet sein; ein größerer Anteil in Zusammenhang mit Mächtigkeitsschwankungen weist auf lokale Aufarbeitung hin. Außerdem kommen Übergänge zu Knauer- und Wulstkalken vor, die z. T. scharf begrenzt in kompakte oolithische Kalke eingelagert sind. Ferner finden sich darin plattige Kalkmergel mit Rhizocorallien und Bohrgängen mit *Balanoglossites* und Wurmspuren.

Als seltene Ausbildung müssen großoolithische, sporadisch fossilführende Kalksteine gelten, die an der Hangendgrenze der Orbicularisschichten vorkommen.

Vorkommen oolithischer Gesteine im Untersuchungsgebiet:

1. sporadisch in intraformationellen Konglomerathorizonten
2. Oolithbank alpha (vorwiegend nördlich Langendorf b. Hammelburg)
3. Oolithbank beta (vorwiegend nördlich Neubrunn bei Wenkheim)
4. Terebratelbänke (lokal, im nördlichen Unterfranken)
5. sporadisch in der Spiriferinabank (z. B. auf Blatt Hammelburg-S, Tauberbischofsheim)

6. Schaumkalkbänke im gesamten Unterfranken
7. Abschluß der Orbicularisschichten (vorwiegend im Taubergebiet).

Bei der Betrachtung der Lagebeziehungen der Schillkomponenten als Ausdruck bestimmter Bildungsumstände sind

a) die Ooide — obwohl das wesentlichste Merkmal dieser Gesteine — in diesem Falle zur Grundmasse zu rechnen. Als kleine Bestandteile (meist unter 1 mm ⌀) wirken sie als „Bindemittel",

b) die Crinoidenstielglieder, die lokal in gesteinsbildenden Anteilen vorkommen, sind „Schilleinsprenglinge" — die nur als kurze Walzen eingeregelt sind, normalerweise keine bestimmte Orientierung zeigen.

In den bruchschillführenden Oolithkalken überwiegt die Grundmasse gegenüber den größeren Bestandteilen noch stärker als bei den Bruchschillkalken. Hieraus resultiert eine spezifische Lagerungsform der gröberen Komponenten:
Wirre Anordnung der Schillkomponenten in massigen, ungeschichteten Oolithkalken — trotz lockerer Lagerung und fehlender Behinderung. Solche Lagerungsverhältnisse können bei schnellen Umlagerungen im Bereich turbulenter Strömungen entstehen, die schnell zur Ruhe kamen — Erscheinungen wie sie auch für den massigen Trochitenkalk des mo1 typisch sind. Daneben kommen schräg- und kreuzgeschichtete oolithische Kalke vor (Relikte von Großrippeln), in denen die Schillkomponenten lagig angeordnet sind. Es handelt sich um transversale Schrägschichtung im Sinne von REINECK (1958). Die relativ großen Trochiten kommen mit kleinen Schalenresten zusammen vor. Dies erklärt sich aus dem relativ geringen spezifischen Gewicht der zur Zeit der Ablagerung porösen Stielglieder (A. H. MÜLLER 1950).

Wie in Schill- bis Bruchschillkalken sind auch in oolithischen Kalken Kleinzyklen festzustellen, die z. T. mit „graded bedding" verglichen werden können. Die Abfolgen entsprechen weitgehend denen der Bruchschillkalke. Bei vollständiger Ausbildung konnten nachstehende Abfolgen beobachtet werden (für die Variation der Abfolgen gilt das gleiche wie für die Schill- bis Bruchschillkalke). Die nachfolgende Abfolge entspricht nachlassender Strömungsintensität und Turbulenz:

Hangendes: Wellenkalk, verschiedene Textur
4. *Oolithischer Kalkstein* oder *trochitenführender Bruchschillkalk* — deutliche oder latente Feinschichtung, Hangendabschluß: Wellenrippeln, Muschelpflaster, dünne Kalksteinlage (Hardground-Typ 5).
3. *Oolithischer Kalkstein, massig* — mit ± großem Schill- und Bruchschillanteil, meist in wirrer Lagerung oder feingeschichtet und lagige Anordnung der Schillkomponenten.
2. *Oolithischer Bruchschillkalk* — crinoidenführend, oft mit intraformationellen

Geröllen, die zum Hangenden größenmäßig abnehmen und besser gerundet sind, oft erfolgt dabei ein Übergang von wirrer zu geschichteter Lagerung.

1. *FeinkristallineKalkbank (Bohrwurmbank)* — oft mit Resten von Placunopsis, Crinoidenhaftscheiben (Hardground-Typ 4).

Liegendes: Wellenkalk verschiedener Textur, zum Hangenden (1.) oft durch Erosionsfläche begrenzt.

Alle richtungsmäßig erfaßbaren Rippeln der Schaumkalkregion und der Region der Oolithbank beta des gesamten Untersuchungsgebietes sind in je einem Richtungsdiagramm zusammengefaßt (Abb. 23).

Zwischen Bruchschill- und Oolithkalken ergaben sich also vergleichbare Gesetzmäßigkeiten in der Abfolge, die im allgemeinen eine nachlassende Strömungsintensität erkennen lassen. Die Materiallieferung für diese Gesteine beruht zum größten Teil auf der Wirksamkeit von grundberührenden Seegangswellen in einem Flachmeer. Die Strömungen konnten sich besonders bei geringen Tiefen auswirken. Bei vollständigen Kleinzyklen ist eine gerichtete Abnahme der Strömungsintensität erkennbar, die mit der Wirkung nachlassender Turbulenz in „graded bedding" vergleichbar ist.

4. *Schalenpflaster*

Im Unteren Muschelkalk gibt es Bildungen, die den rezenten Schalenpflastern entsprechen. Sie treten nicht so auffallend in Erscheinung wie im Oberen Muschelkalk.

Vorkommen:

1. auf ebenen Dachflächen von Schill-, Bruchschill- und oolithischen Bruchschillkalken
2. im Muldenbereich und an den Hängen von Großrippeln, die sich in oder auf Bruchschill- und oolithischen Bruchschillkalken bildeten
3. auf fossilarmen bis fossilfreien plattigen Kalken (Wellenkalk)
4. an der Unterseite von Rinnen- und Rillenfüllungen — die Muschelpflaster bedecken die Sohle
5. auf der Oberseite von Rinnen- und Rillenfüllungen
6. im Inneren von Schillkalken und Rinnenfüllungen als lagig angeordnete, gewölbt oben eingeregelte Schalenreste
7. auf blättrigen Kalkmergeln und Mergeln — die Schalenpflaster sind mit den Sohlflächen der darüberliegenden Kalke fest verbunden — die Auflagerungsfläche zeigt — wie bei Schalenpflastern in Rinnen und Rillen — nur Abdrücke.

Mit A. H. Müller (1957) unterscheiden wir: a) Streupflaster — Schalenreste liegen nur vereinzelt auf dem Sediment, es verbleiben freie Flächen

und b) Vollpflaster — die restlichen Lücken sind geschlossen, es resultiert eine engstmögliche Pflasterung der Sedimentfläche.

Die Klassierung nach Schalengrößen setzt eine Strömung voraus, die ein vorhandenes Schalengemenge ausbreitet oder anreichert und nach dem Gesetz der Gleichfälligkeit sortiert.

Nach den von LÜDERS (1929) in Prielen und im Strömungskanal durchgeführten Untersuchungen haben wir auch für die Beurteilung von Muschelkalkablagerungen gewisse Anhaltspunkte.

Danach wurden bei Strömungsgeschwindigkeiten von 25 bis 30 cm/sec feiner Sand und kleinere Schalenstücke, bei 40 cm/sec grober Sand und kleinere Muschel- und Schneckenschalen und von 60 bis 65 cm/sec große Muschel- und Schneckenreste bewegt.

Bei Strömungsgeschwindigkeiten von 40 bis 60 cm/sec wurden die „gewölbt unten" liegenden Schalen so lange bewegt bis sie in ihre stabilste Lage „gewölbt oben" einkippten.

Durch Verstärkung der Strömungsintensität werden die feineren Schillkomponenten wegtransportiert und die Schalenpflaster werden so von kleineren Bruchschillteilen befreit (A. H. MÜLLER 1950). Erhöht sich die Wasserbewegung weiter, kann es zu Erosion an der einen, zu Überwanderung von Schalenpflastern an einer anderen Stelle kommen (WEIGELT 1923, JESSEN 1932). Durch Frachtsonderung kann lokal eine sonst seltene Form angereichert werden.

Die Zusammensetzung der Schalenpflaster ist im allgemeinen sehr monoton. Stets überwiegen ein bis drei Arten. Bezeichnend für die Schalenpflaster des Unteren Muschelkalkes im Untersuchungsgebiet sind:

*Lima lineata* mit postmortalem Bewuchs von *Placunopsis ostracina; Gervilleia (Hoernesia) socialis — Entalis torquata — Omphalopthychia gregarea — Encrinus* und *Pentacrinus; Nucula goldfussi — Myophoria orbicularis — Myophoria vulgaris — Loxonema sp.; Lima lineata — Gervilleia (Hoernesia) socialis — Loxonema loxonema; Pecten discites — Myophoria orbicularis — Gervilleia (Hoernesia) socialis; Myophoria orbicularis.*

Schon diese Übersicht zeigt, daß die Schalenpflaster Individuen verschiedener Biotope enthalten. Ihre Zusammensetzung entspricht der in Schill- bis Bruchschillkalken und ist nur durch Verfrachtung zu erklären. Die Einregelungen auf den Schalenpflastern sind für stratinomische Fragen von besonderer Bedeutung. Eine Zusammenstellung der verschiedenen Einregelungsarten findet sich bei A. H. MÜLLER (1957, S. 49). Es wird mit R. RICHTER (1931, 1942) zwischen Einkippung (Bewegung um die horizontale Achse — Lagemerkmal) und Einsteuerung (Bewegung um die vertikale Achse — Richtungsmerkmal) unterschieden.

Die Schalenpflaster zeigen im allgemeinen vollständige Einkippung nach

gewölbt oben. Für die Einsteuerungsart ist die Form von entscheidender Bedeutung (SEILACHER 1960).

Die letzte wirksame Strömung konnte an folgenden Beobachtungen ermittelt werden:

1. Dachziegelartige Übereinanderschuppung von *Myophoria orbicularis* östlich Münnerstadt — Strömung von NE.
2. Einregelung von *Entalis* (Dentalien) im Zusammenhang mit gleichgerichteten länglichen Geröllchen und Schüttungskegeln bei Eiersheim (mu1) — Strömung von NNE.
3. Gut eingesteuerte *Loxonemen* (Spindelspitzen 40° NE gerichtet) neben schlecht eingesteuerten *Gervillien* (ca. 2,3 m im Liegenden einer Dentalienbank bei Winkel) — Strömung von NE.

Diese Beispiele zeigen eindeutige Strömungsrichtungen an, ihre Ergebnisse stimmen mit den statistisch erfaßten Erosionsrichtungen überein. Doch sind sie weniger für eine lückenlose Erfassung der allgemeinen Strömungsrichtungen geeignet als die viel häufiger zu beobachtenden Erosionsformen.

Die Schichten mit Schalenpflastern sind bedingt als Hardground zu bezeichnen (Hardground-Typ 1). Während ihrer Bildung lag die Strömungsintensität im Grenzbereich von Sedimentation — Sedimentationsunterbrechung — Erosion. Dafür sprechen:

1. Autochthoner Placunopsidenbewuchs auf Schichtflächen, Muschelpflastern (postmortaler Bewuchs) und intraformationellen Konglomeraten (Abb. 19).

2. Riffartiger Bewuchs mit *Placunopsiden* und *Serpuliten* auf fleckig angeordneten Relikten ehemals flächenhaft verbreiteter Schichten (Beispiele fanden sich in der oberen Schaumkalkbank bei Roßbrunn und den Orbicularisschichten bei Gambach).

3. Erhöht über einer Schichtfläche liegende Steinkerne eines Schalenpflasters und abgelöste obere Muschelklappen ehemals doppelklappig eingebetteter *Myophorien* (vgl. S. 42).

4. Bildung von Facettenringen an *Lima lineata*-Pflaster durch Schleifwirkung feiner Sedimentpartikel oder Auflösung (Beispiele fanden sich im unteren Wellenkalk NNE von Winkel).

## II. Autochthone Thanatocoenosen

Die im vorangegangenen Abschnitt behandelten Detritusablagerungen könnten als „fossile Massengräber" des Muschelkalkmeeres charakterisiert werden. Ihnen stehen die autochthon erhaltenen Organismenreste als „fossile Lebensgemeinschaften" gegenüber.

Zunächst soll an zwei Beispielen die Bedeutung des Ca/Mg-Verhältnisses

für die Beurteilung des Lebensraumes und der in ihm enthaltenen Fossilien in bezug auf Salinität hervorgehoben werden:

Sofern sekundäre Dolomitisierung ausgeschlossen werden kann, bestehen gesetzmäßige Beziehungen zwischen Fossilführung und dem Ca/Mg-Verhältnis der Karbonatgesteine. Niedere Ca/Mg-Verhältnisse weisen auf ein hochsalinares bis evaporitisches Environment, hohe Relationen auf ± normal marine Verhältnisse.

a) In dem meist fossilfreien Grenzgelbkalk ($mu_1$) wurden am Kallmuth bei Lengfurt erstmals Bohrgänge von *Trypanites weisei* und *Balanoglossites triaticus* beobachtet, bezeichnenderweise aber erst im Hangendteil mit hohen Ca/Mg-Verhältnissen:

| Lithologie | Ca/Mg | Fossilführung (autochthon) |
|---|---|---|
| Kalkstein, kompakt | 45,5 | *Trypanites, Balanoglossites* |
| Kalkstein, kompakt | 67,1 | *Balanoglossites*-Gänge |
| Mergelkalk, dolomitisch | 6,5 | fossilfrei |
| Dolomitmergel, gebändert | 3,3 | fossilfrei |

b) In einer makroskopisch einheitlichen Karbonatserie im Liegenden der unteren Hornsteinbank (Hangendteil des mm) an der Tiefenthaler Höhe wurden in einer ca. 0,20 m mächtigen Schicht mehrere zweiklappige Exemplare von *Myophoria vulgaris var. semicostata* HOHENST. gefunden. Die äußerlich gleich ausgebildeten älteren und jüngeren Schichten waren fossilfrei:

| Lithologie | Ca/Mg | Fossilführung (autochthon) |
|---|---|---|
| Dolomitischer Kalkstein | 7,1 | fossilfrei |
| „Dolomitischer Kalkstein" | 20,4 | *Myophoria vulgaris* |
| Dolomitischer Kalkstein | 4,1 | fossilfrei |

Natürlich ist die Salinität nur ein Umweltsfaktor neben anderen, doch vermögen selbst geringe Salinitätsänderungen die ökologischen Verhältnisse entscheidend zu beeinflussen (P. F. MEYER 1952).

Die Einbettung am Lebens- und Sterbeort ermöglicht uns Aussagen über Lebensweise, Lebensraum und Umweltsbedingungen. Unter diesem Aspekt werden aus dem Unteren Muschelkalk folgende Beispiele betrachtet:

1. Siedlungen von *Trypanites weisei* MÄGDEF.
2. Siedlungen von *Rhizocorallium commune* SCHMID.
3. Siedlungen von *Lima lineata* v. SCHLOTH.
4. Siedlungen von *Myophoria orbicularis* BRONN.
5. Siedlungen von *Placunopsis ostracina* v. SCHLOTH.

1. *Siedlungen von Trypanites*

Bohrgänge von *Trypanites weisei* MÄGDEF. fanden sich im Untersuchungsgebiet erstmals im Hangendteil des Grenzgelbkalkes. Primär finden sie sich in Hardgrounds, sekundär in intraformationellen Geröllen. Im unteren und mittleren Wellenkalk sind diese Bohrgänge weit verbreitet, im oberen Wellenkalk findet man sie seltener.

Oft sind sie mit *Balanoglossites triaticus* MÄGDEF. und *Balanoglossites eurystomus* MÄGDEF. vergesellschaftet. Ferner kommt *Trypanites* mit unregelmäßig gestalteten Wohnbauten vor, deren Wandungen von hellgrauen Höfen umgeben sind, z. B. in der Oolithbank beta bei Kembach und Steinbach. Vgl. Abbildungen auf Taf. VII, bei REIS (1910).

Die Bohrgänge von *Trypanites* bestehen aus 0,5 bis 2 mm starken und bis 5 cm langen Röhren, die ± senkrecht zur Oberfläche angeordnet sind.

Sie sind entweder hohl oder mit Ockerkalk, Ooiden und Bruchschillsplittern ausgefüllt. An ihrer Oberfläche sind nicht selten kleine Trichter ausgebildet („Mondlandschaft" nach MÄGDEFRAU 1932). Im Zusammenhang mit *Trypanites*-Bohrgängen fanden sich im Hangendteil des Grenzgelbkalkes am Kallmuth auch kleine Kothäufchen, wie sie von MÄGDEFRAU (1932) von der Oolithbank beta bei Steudnitz beschrieben wurden.

Die Besiedlungsdichte ist oft sehr verschieden. Maximal wurden 470 Bohrgänge pro $dm^2$ gezählt (Sohlbank der Oolithbank beta bei Lengfurt und Üttingen). Diese hohe Besiedlungsdichte von umgerechnet 47 000 Exemplaren pro $m^2$ wurde nur an dicken 0,18 bis 0,25 m mächtigen Hardgrounds beobachtet. Ähnliche Vorkommen beschrieb A. H. MÜLLER (1956). In standfesten Sedimenten sind derartig hohe Besiedlungsdichten auch in rezenten Flachmeeren nicht ungewöhnlich. So erreicht z. B. der Schlickkrebs *Corophium volutator* Besiedlungsdichten von 20 000 bis 40 000 Exemplaren/$m^2$ (REINECK, 1956). Überraschend ist bei der hohen Besiedlungsdichte von *Trypanites*, daß sich benachbarte Gänge nicht berühren. Nach MÄGDEFRAU (1932) handelt es sich bei diesen Organismen wahrscheinlich um Anneliden. Sie liefern ein ausgezeichnetes Beispiel für Phobotaxis.
Die Organismen konnten auch in verfestigten Sedimenten (Hardgrounds)

siedeln, was auch durchbohrte Placunopsidenschalen und Crinoidenhaftscheiben, die sich vor der Besiedlung mit *Trypanites* auf der Schichtfläche fanden und durchbohrte Muschelschalen, die im Gestein eingeschlossen waren, beweisen (A. H. MÜLLER 1956).

2. *Siedlung von Rhizicorallium*

Die Lebensspuren von *Rhizicorallium* sind auf vielen Schichtflächen des gesamten Muschelkalkes zu finden. Obwohl ohne stratigraphischen Leitwert, sind sie als Faziesfossilien für ökologische und sedimentologische Aussagen von Bedeutung.

Im Hangendteil der oberen Schaumkalkbank bei Erlabrunn fanden sich die für *Rhizocorallium jenense* typisch gerieften Gänge als Hohlformen. Solche Hohlformen — erstmals von A. H. MÜLLER (1959) beschrieben — bestätigen erneut die von RUD. RICHTER (1928) begründete Ansicht, daß es sich bei *Rhizocorallium* nicht um einen Sedimentfresser, sondern um einen Planktonfischer mit stationärem Wohnbau handelt.

Meistens findet man mit dem umgebenden Sediment ausgefüllte Bauten, öfter wurde aber auch Kalzitfüllung beobachtet.

Bei *Rhizocorallium commune* ist die innere Röhrenwand mit kleinen Kügelchen besetzt. Es handelt sich dabei um Kotkügelchen, die zur Verstärkung der Standfestigkeit dienten, worauf bereits REIS (1910) hingewiesen hat. Der charakteristische Spreitenbau zwischen den u-förmigen Umbiegungen entstand bei der Vergrößerung des Baues.

In Kalken sind die Querschnitte der Gänge meist kreisförmig, in Kalkmergeln wurden dagegen Abplattungen bis 1 : 1,8 ermittelt. Die Abplattung entspricht etwa der Sedimentsackung.

Die Besiedlungsdichten sind sehr verschieden. Im Liegenden der unteren Schaumkalkbank bei Hammelburg fanden sich durchschnittlich 8 bis 10 große Rhizocorallien pro m². Eine solche Besiedlungsdichte von Organismen mit stationärem Wohnbau weist auf einen hohen Planktongehalt hin, wie er nur in einem marinen Bereich vorkommt.

Die größte Besiedlungsdichte von *Rhizocorallien* mit 70 bis 110 Exemplaren pro m² wurde im Liegenden der unteren Schaumkalkbank bei Mittelstreu beobachtet (Abb. 17).

Die meisten Exemplare sind klein, bis zu 10 liegen dicht nebeneinander, bis zu drei übereinander. Die Umbiegungen der Wülste sind oft schwach aus der Schichtfläche herausgehoben.

Bei diesen auffallenden Größenunterschieden kann es sich handeln um:

a) *verschiedene Arten* — (bereits REIS erwähnt in seiner Arbeit über die Trias, daß die im Unteren Muschelkalk Frankens vorkommenden Rhizo-

Abb. 16a: Rhizocorallien aus dem oberen Wellenkalk bei Mittelstreu. Normale Größe, im Spreitenbau sind Kotkügelchen erkennbar.

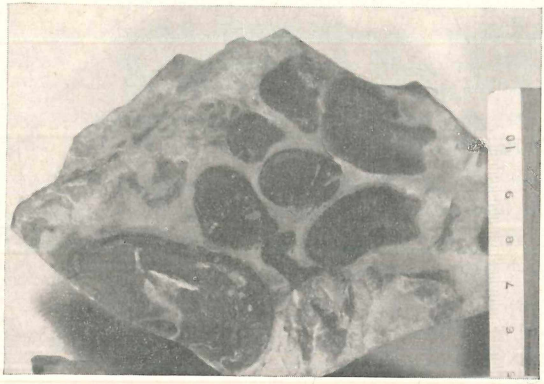


Abb. 16b: Rhizocorallien aus dem oberen Wellenkalk b. Mittelstreu. Kleinwüchsige Formen in hoher Besiedlungsdichte (bis drei Baue liegen übereinander).

corallien im allgemeinen klein sind — große und kleine Formen können vergesellschaftet vorkommen, bis auf die Größe haben beide Formen gemeinsame Merkmale).

b) Jungtiere oder auf Grund ihrer ungewöhnlich hohen Besiedlungsdichte um Kümmerformen — (auch diese Möglichkeiten hat Reis bereits in Erwägung gezogen, wenn er in seiner Beschreibung von „wie in ihrer Entwicklung gehemmten, jungen Stöcken" berichtet).

Im Hangendteil der oberen Schaumkalkbank bei Rohrbach wurden Bio-

turbationen beobachtet, die auf *Rhizocorallien* zurückzuführen sind, obwohl sie im allgemeinen nicht in oolithischen Kalken vorkommen. Die obere Schaumkalkbank ist hier durch eine geringmächtige Lage von flaserigem Wellenkalk in eine Liegend- und Hangendbank gegliedert.

Die in den Wellenkalken angelegten „Baue" wurden bei der einsetzenden oolithischen Sedimentation anscheinend nach oben verlagert, wo sie in einem dünnen Kalkbänkchen enden. Die offensichtlich zügige Verlagerung hat den Charakter eines Wühlgefüges, wie es im Wattsand häufig zu beobachten ist.

3. *Siedlungen von Lima lineata*

Auf Grund ihrer Gestalt — hohes opistoklines Gehäuse, breite Standfläche mit Auflage auf der Vorderseite und fast symmetrischen rechten und linken Klappen — zeigt *Lima lineata* rein morphologisch eine Anpassung an aufrechte, freiliegende Lebensweise. Oft findet sie sich in dieser Lage mit geschlossenen Klappen in plattige bis flaserige Wellenkalke eingebettet.

Nur selten deutet eine geringe Öffnung der Klappen (Wirkung des Ligamentes nach Erschlaffen der Schließmuskulatur) eine posthume Einbettung an.

Da die Schalen von *Lima* die Schlickflächen überragt haben, wurden sie oft von sessilen Organismen besiedelt. Sehr häufig fanden sich Epöken von *Placunopsis ostracina.*

Auch auf der Liegefläche von *Lima* fanden sich oft Schalenreste, vorwiegend einklappige Gervillienschalen. Es handelt sich hierbei um Pseudoepöken, an denen die Muschel mit Byssus verankert war.

Unter den Limen mit Pseudoepöken fand sich im unteren Wellenkalk (6,5 m über Grenzgelbkalk) eine *Lima lineata* mit einer doppelklappigen Jugendform vergesellschaftet.

Jeffries (1960) konnte bei der Untersuchung einer größeren Anzahl solcher „Epöken" zeigen, daß gesetzmäßige Lagebeziehungen von Erwachsenen- und Jugendformen auf eine echte Lebensgemeinschaft hinweisen:

Das Vorkommen von Jungtieren innerhalb der hinteren Wölbung der Standfläche von Erwachsenen dürfte auf photonegative Gewohnheiten zurückzuführen sein.

Bei den mit Byssus verankerten Formen war die Wölbung der Standfläche flach, Jungtiere konnten hier nicht einwandern. Sie fanden sich wahrscheinlich in Bereichen mit geringer Wassertiefe und größerer Wasserbewegung (Gebiet Freudenstadt).

Die freiliegenden Formen waren nicht verankert (größere Wassertiefe, relativ geringe Wasserbewegung). Sie hatten eine größere Wölbung, so daß Jungtiere hier Schutz suchen konnten (Gebiet Heidelberg—Würzburg).

Eine biostratinomische Auswertung dieser Ergebnisse dürfte jedoch nur auf

bestimmte Horizonte bezogen werden, denn im unteren Wellenkalk z. B. bei Lengfurt und Erlabrunn wurden überwiegend Limen mit Pseudoepöken, also verankerte Limen, gefunden.

Zum Schluß soll noch auf einige Erscheinungen eingegangen werden, die eine unterschiedliche Setzung des Sedimentes anzeigen:

Aus Mergel- bis Kalkmergellagen des unteren Wellenkalkes bei Lengfurt geborgene Exemplare von *Lima lineata* v. SCHLOTH. waren in Steinkernerhaltung überliefert und zeigten starke Bruchdeformation, wobei meist zwei Bruchregionen (unteres und oberes Drittel) bevorzugt vorkamen. Aus Kalklagen des oberen Wellenkalkes bei Tauberbischofsheim stammende Exemplare enthielten noch bis 0,5 mm starke Reste der Prismenschicht und zeigten nur geringe Deformationen, ebenfalls in zwei statisch bedingten Bruchregionen. Außerdem zeigten sich feine Rutschstriemen (Abb. 17a und Abb. 17b).

Abb. 17a: Seitenansicht von *Lima lineata* v. SCHLOTH. mit Rutschstriemen, die im oberen und unteren Teil auftreten und jeweils bis zu einer „neutralen Linie" im unteren Drittel an Deutlichkeit abnehmen.
Oberer Wellenkalk vom Kalkwerk Tauberbischofsheim.

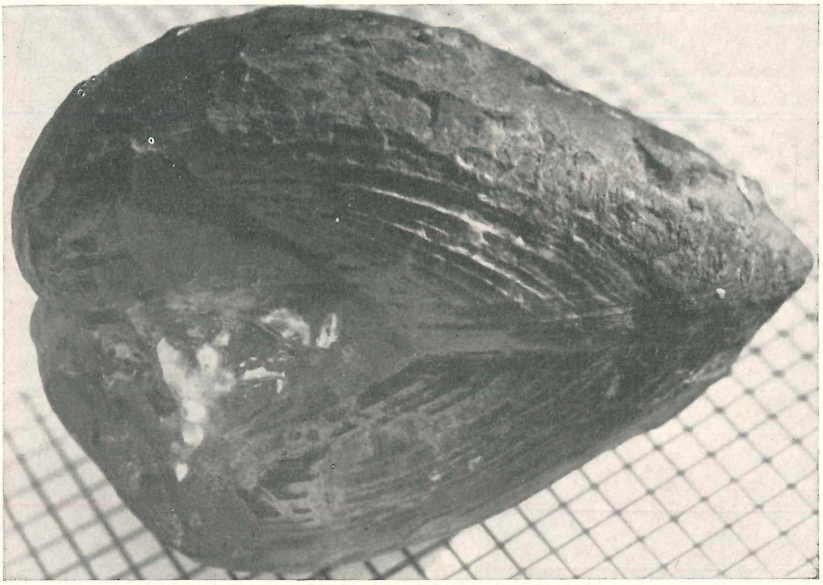


Abb. 17b: Blick auf die Standfläche von *Lima lineata* v. SCHLOTH. (Exemplar von Abb. 17a).

Die Striemungen („Harnische") erklären sich durch die bei der Setzung des Sedimentes auftretenden Relativbewegungen gegenüber den Muschelschalen. Während das Sediment im oberen Teil an den Schalen nach unten glitt, wobei die Muschel als Ganzes etwas ins Liegende verlagert wurde, wich das Sediment im unteren Teil nach oben aus. Der Druck führte zu schwacher Bruchdeformation, das gleitende Sediment hinterließ Rutschstriemen.

Die beiden Beispiele zeigen einmal mehr, daß karbonatarme Sedimente große Setzungsbeträge, karbonatreiche dagegen geringe Setzungsbeträge aufweisen. Ebenso scheint der Erhaltungsgrad der Schalen weitgehend auch vom Nebengestein abhängig zu sein.

4. *Siedlungen von Myophoria orbicularis*

Die im oberen Wellenkalk erstmalig auftretende Muschel erreicht mit dem Ende des Unteren Muschelkalkes ihre größte Verbreitung und ihren endgültigen Abschluß. *Myophoria orbicularis* BRONN tritt in den kalkigen Bereichen (mu3) in kleineren Formen auf als in den z. T. dolomitischen Orbicularisplatten. Die in den Ca/Mg-Verhältnissen dokumentierte Salinitäts-

erhöhung hatte auf *Myophoria* eine zunächst positive Wirkung in bezug auf Wachstum und Häufigkeit, während die übrige Fauna bereits keine günstigen Lebensbedingungen mehr fand und einschneidend reduziert ist. Von gut erhaltenen Exemplaren ist bekannt, daß *Myophoria orbicularis* ein relativ kräftiges Schloß mit heterodont-schizodonter Bezahnung hat. An 145 Messungen von unverdrückten zweiklappigen Steinkernen wurde die Variationsbreite von Schalenumriß und Schalenwölbung ermittelt:

Der Umriß (Länge/Höhe) schwankt zwischen 1,0 (rund) und 3,0 (länglich), die Schalenwölbungen (Länge/Dicke) zwischen 1,0 („fette" Exemplare) und 1,9 („magere" Exemplare). Die linke Klappe ist etwas größer als die rechte. Die bedeutenden Formunterschiede hatten Anlaß zur Aufstellung mehrerer Variationen von *Myophoria orbicularis* gegeben.

Die in den Orbicularisschichten über weiteste Gebiete verbreiteten Schalenpflaster und Schillkalke, selbst mit einem größeren Anteil an doppelklappigen Exemplaren, sind als allochthone „Massengräber" zu betrachten. Es konnten aber auch autochthon im Gestein eingebettete Muscheln innerhalb der Orbicularisplatten nachgewiesen werden, z. B. am Ravensberg bei Veitshöchheim (Abb. 18), östlich Münnerstadt und im Gebiet Maßbach-Poppenlauer. Da die Gattung *Myophoria* am Ende der Trias ausgestorben ist, können über die Lebensweise verwandter Vertreter keine Vergleiche gezogen werden. Die autochthon bis maximal 1 cm unter der Schichtfläche eingebetteten Muscheln fanden sich stets mit dem siphonalen Ende zur ehemaligen Grenzfläche Sediment — Wasser gerichtet. Diese Lage im Sediment spricht nicht für aktives Graben, eher für Reaktionen einer bedrohlichen Verschlickung entgegenzuwirken. Die stets beobachtete Schrägstellung kann durch Sedimentsackung erklärt werden.

Als kurzsiphonige Muschel konnte sie höchstens sehr flach im Sediment vergraben leben. Die kriechende bzw. freiliegende Lebensweise dieser euryhalinen Muschel dürfte die am meisten verbreitete gewesen sein.

5. *Siedlungen von Placunopsis ostracina*

Die Siedlungen von Placunopsis ostracina SCHL. gehören zu den meist verbreiteten Biocoenosen des gesamten Muschelkalkes, obwohl sie nicht auffällig in Erscheinung treten.

Als sessile Organismen sind die Placunopsiden besonders gut für stratinomische Aussagen geeignet. Ihr Vorkommen im Unteren Muschelkalk des Untersuchungsgebietes erstreckt sich

1. auf *Lima lineata* als Epöken,
2. auf Schalenpflaster als postmortaler Bewuchs,
3. auf freiliegende Gerölle in intraformationellen Konglomeratlagen,
4. auf Hardgrounds in Form von Bohrwurmkalken und Erosionsflächen,
5. auf freiliegende Muschelkalkgerölle innerhalb des Wellenkalkes.

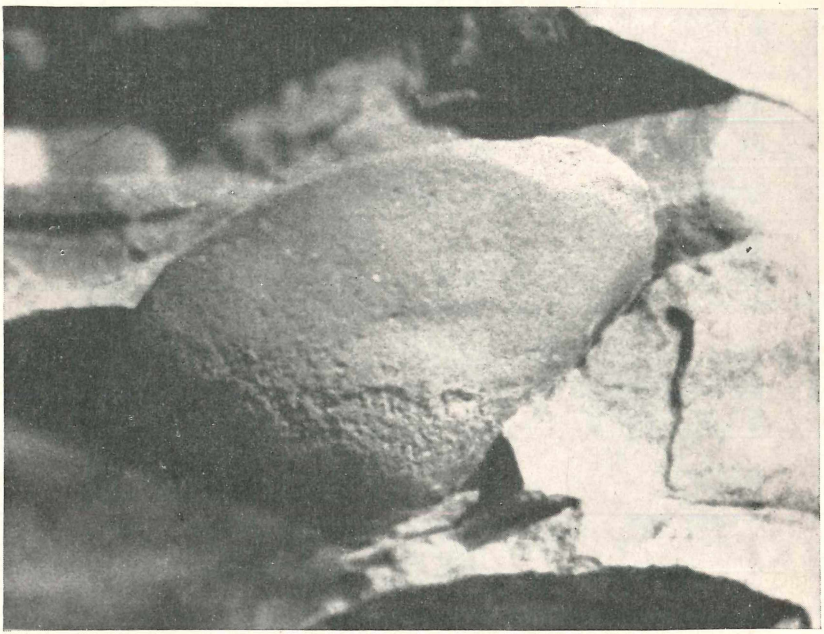


Abb. 18: *Myophoria orbicularis* BRONN in autochthoner Einbettung (Steinkernerhaltung). Der siphonale Teil zeigt nach oben, die Schräglage kann durch Sedimentsetzung erklärt werden (3-fache Vergrößerung). Orbicularisschichten am Ravensberg bei Veitshöchheim.

Die maximal 5 cm Schalendurchmesser erreichende Placunopsis ostracina wurde im Untersuchungsgebiet mit Durchmessern bis zu 2,6 cm beobachtet. Umriß und Schalenwölbung variieren stark, außer ± konzentrischen Anwachsstreifen zeigen diese Muscheln keine Eigenskulpturen. Die rechte Klappe ist auf ihrer ganzen Fläche festgewachsen und paust das Relief des Untergrundes durch. Meist fehlt die Deckelklappe (linke), die nach dem Absterben der Tiere vor der definitiven Einbettung abgelöst und verfrachtet wurde.

Zweiklappig erhaltene Exemplare sind selten, ihr Vorkommen ist Beweis für schnelle Sedimentation. Dafür ein Beispiel aus der Oolithregion beta bei Erlabrunn:

Abb. 19: Autochthoner Placunopsidenbewuchs auf einem intraformationellen Geröll einer Dachfläche der Oolithbank beta bei Üttingen (während die sessilen Muscheln auf dem Geröll einen festen Untergrund fanden, wurde die ungeschützte Schichtfläche um ca. 1 cm tiefergelegt).

Ein 26 cm x 14 cm x 11 cm großes Geröll zeigt auf der einen Seite vorwiegend doppelklappigen Placunopsidenbewuchs, auf der anderen fand sich nur die aufgewachsene rechte Klappe. Die doppelklappigen Placunopsiden zeigen Schalendurchmesser zwischen 5 und 18 mm und 3 bis 10 Anwachsstreifen. Leider fand sich das Geröll nicht mehr im Anstehenden, so daß die letzte Orientierung nicht bekannt ist. Der Sachverhalt wird dadurch aber nicht beeinträchtigt. Die Unterschiede in der Schalenerhaltung zwischen der einen und der anderen Geröllhälfte lassen sich nur so erklären, daß nach der Besiedlung der einen Hälfte das Geröll durch einwirkende Strömung umgedreht wurde und die schnelle Einbettung der Placunopsiden

ihre vollständige Überlieferung garantierte. Da alle Altersstadien vorkommen, kann auf eine kontinuierliche Besiedlung geschlossen werden. Auf der anderen Seite fehlen die Deckelklappen der Placunopsiden, was für langsamere Einbettung spricht.

Unter folgenden Voraussetzungen kann die Expositionszeit des Muschelkalkgerölls größenordnungsmäßig ermittelt werden:

a) Nach Untersuchungen von ORTON und AMIRTHALINGAM (1927, S. 949) bilden sessile Muscheln im allgemeinen zwei Anwachsstreifen pro Jahr.

Übertragen wir diese Angaben auf die Beobachtungen an doppelklappigen Placunopsiden (3 bis 10 Anwachsstreifen), so kommen wir für die eine Seite des Gerölls auf eine Expositionszeit von mindestens 5 Jahren.

b) In Übertragung von Beobachtungen an rezenten Austern wurden für Placunopsiden mit 1 cm Schalendurchmesser drei Wachstumsjahre gerechnet (A. H. MÜLLER 1950). Danach kommen wir für die Placunopsiden an der oben betrachteten Seite des Muschelkalkgerölles (Schalendurchmesser von 5 bis 18 mm) ebenfalls zu einer Expositionszeit von ca. 5—6 Jahren.

Die Gesamtdauer, während der das Geröll der Besiedlung zugänglich war, kann nicht exakt ermittelt werden. Durch Addition der ältesten (größten) Placunopsiden beider Hälften ergeben sich mindestens 10 Jahre.

Fester Untergrund, ausreichende Wasserbewegung, keine oder nur geringe Sedimentation waren Voraussetzung für die Weiterentwicklung der wahrscheinlich im Larvenstadium passiv planktonisch verfrachteten Placunopsiden.

Leichtbewegliches Sediment (z. B. Ooide) schlammiger Untergrund, stagnierendes Wasser oder ständige Sedimentation boten den Jungtieren keine Entwicklungsmöglchkeit. Danach können allein schon aus dem Vorkommen von Placunopsiden bestimmte Rückschlüsse auf Wasserbewegung, Durchlüftung und Sedimentationsgeschwindigkeit gezogen werden.

Das Überwiegen der Jungtiere gegenüber den erwachsenen Placunopsiden ist für alle beobachteten Siedlungen typisch und zugleich ein wesentliches Merkmal echter Lebensgemeinschaften.

## III. Seesinterkalke

Die einzigen Gesteine des Unteren Muschelkalkes, die sich von allen anderen Gesteinstypen strukturell grundsätzlich unterscheiden, sind die von REIS (1910) als „Seesinterkalke" bezeichneten blumenkohlartigen Kalkgebilde, die im Untersuchungsgebiet stock- und krustenbildend im oberen Teil des Wellenkalkes vorkommen.

Neben der Bezeichnung „Seesinterkalk" hielt REIS den von KALKOWSKY (1908) für ähnliche Gesteine der Rogensteinzone des Unteren Buntsand-

steins geprägten Begriff „Stromatolith" — übertragen auf seine Seesinterkalke — für eine „zutreffende und keineswegs überflüssige Bezeichnung" (Reis 1910, S. 120).

Heute sind aus fast allen Formationen vom Präkambrium bis zum Quartär Stromatolithe beschrieben worden. Als Dauerformen sagen sie stratigraphisch wenig aus, haben aber für stratinomische Fragen um so größere Bedeutung. Wegen ihrer Ähnlichkeit erscheint es erforderlich, neben den gemeinsamen auch die unterscheidenden Merkmale bereits in der Benennung zum Ausdruck zu bringen. Deshalb sei der Begriff „Seesinterkalk" für die Stromatolithe des Muschelkalkes — unabhängig von jeder genetischen Deutung — beibehalten.

1. *Vorkommen*

Die ersten Einschaltungen von Seesinterkalken treten ganz vereinzelt im oberen Wellenkalk auf und erlangen am Ende der Schaumkalkregion ihre größte, gebietsweise flächenhafte Verbreitung. Innerhalb der Orbicularisschichten werden sie wieder seltener. Eine regionale Abgrenzung ist im Untersuchungsgebiet nicht möglich (nach NW infolge Abtragung — Spessart-Sattel —, nach SE wegen der flächenhaften Überdeckung des Unteren Muschelkalkes durch jüngere Sedimente).

Während in Unterfranken die Seesinterkalke ganz überwiegend auf den Unteren Muschelkalk beschränkt bleiben — von Reis (1910) wurden lokale Vorkommen im Mittleren Muschelkalk von Birkenfeld erwähnt — erreichen sie in Thüringen im Mittleren und Oberen Muschelkalk größere Bedeutung. Sie wurden von E. Wagner (1923) aus dem oberen Teil des Mittleren Muschelkalkes und aus dem Trochitenkalk beschrieben.

2. *Lithologische Merkmale*

a. *Geochemie:* Eine typische Analyse eines Seesinterkalkes von Rohrbach bietet 89,90 % $CaCO_3$, 2,34 % $MgCO_3$, die restliche Substanz macht 7,76 % aus. Es handelt sich also um hochprozentige Kalke.

Im einzelnen ergab die Analyse:

| | | | |
|---|---|---|---|
| CaO | 50,37 % | $SiO_2$ | 5,86 % |
| MgO | 1,12 % | $Al_2O_3$ | 0,48 % |
| $CO_2$ + org. Sub. | 39,00 % | $Fe_2O_3$ | 0,46 % |
| $K_2O$, $Na_2O$, $P_2O_5$ und Spurenelemente | | | 0,29 % |

Bemerkenswert ist ein hohes Ca/Mg-Verhältnis von 53,8 und der sich in den Verbindungen von Si, Al, Fe, K, Na usw. ausdrückende geringe Anteil von detritischem Material, wobei das Verhältnis $SiO_2/Al_2O_3 + Fe_2O_3$ von 6,2 einen bedeutenden Quarzanteil vermuten läßt.

b. *Petrographie und Struktur:* Die Seesinterkalke sind aus fein- bis mikrokristallinem, feinlamelliertem Kalkstein aufgebaut. Die Kristalle sind nicht orientiert angeordnet, sondern unregelmäßig körnig.

Die Feinschichten oder Lamellen verlaufen nicht streng parallel, sondern sind meist linsenförmig aufgespalten und als hellere und dunklere Lagen im Anschliff erkennbar.

Der bogenförmige Verlauf der Lamellen (umgekehrt girlandenförmig) beruht in erster Linie auf der stärkeren Lamellendicke der blaugrauen Kalklagen in den zentralen Aufwölbungsbereichen, er ist nicht nur eine Projektion von Unebenheiten des Untergrundes.

Während die meist breiten Aufwölbungen vorwiegend aus kalkiger Substanz bestehen, ist in den schmalen Depressionen (Kerbungen) vorwiegend detritisches Material (Tonminerale, Glimmer, Quarz u. ä.) angereichert. Vereinzelt ist solches Material auch innerhalb von Aufwölbungen nestartig eingeschaltet.

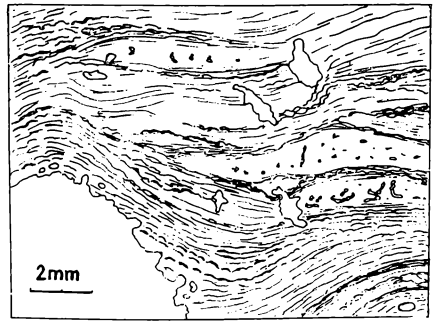



Abb. 20:
Seesinterkalk von Rohrbach (Dünnschliff, halbschematisch). Die Abbildung zeigt die Anordnung linsenförmiger Körper mit wurmförmigen kalzitisch ausgefüllten „Röhren" innerhalb der Lamellen.

Die ± konzentrisch um die Dome angeordneten Depressionen verlaufen an alleinstehenden Strukturen nach oben kegelförmig-divergierend, bei engständigen Wölbungen dagegen ringförmig-parallel bis konvergierend. Der makroskopisch erkennbare Aufbau konnte durch einige Dünnschliffe auch mikroskopisch bestätigt werden (Abb. 20):

1) Der lamellare Aufbau der Seesinterkalke geht bis zu Dimensionen von 0,1 mm. Nur bei Betrachtung kleiner Ausschnitte verlaufen die Lamellen ± parallel, sonst linsenförmig. Die konvex nach oben gerichteten Aufwölbungen gehen z. T. bis in mikroskopische Dimensionen, vereinzelt sind Glimmerblättchen eingelagert, orientierte Kristallanordnung war nicht zu beobachten, insbesondere keine Radialfaserigkeit.

2) Die Begrenzung der Lamellen ist nicht immer scharf. Je nach der Dichte der aufeinanderfolgenden hellen (breiteren) und dunkleren (schmaleren) Lamellen

wechseln hellgraue (makroskopisch blaugraue) und dunkelgraue bis graubräunliche (makroskopisch rostbraune) Lamellenbereiche ab.

3) Auffallend ist eine stets linsenförmige Anordnung der Lamellen in ± begrenzten Einheiten. Vereinzelt fanden sich solche Lamellenkörper bis zu 6 mm unterbrochen.

4) Eine Besonderheit sind hellgraue linsenförmige Körper aus homogenem, fein- bis mikrokristallinem Kalzit mit bis 1 mm langen wurmförmigen und kleinen ± kreisrunden scharf begrenzten Zonen, die sich durch reine, größere Kalkspatkristalle hervorheben.

Die spießige Anordnung der Kalzitkristalle läßt auf eine drusenförmige Hohlraumfüllung schließen; die einzelnen Formen dürften verschiedene Anschnitte von „Röhren" darstellen.

Schon in engen Bereichen deuten sich faziesbedingte Unterschiede der Wachstums- und Erhaltungsstrukturen von Seesinterkalken an. So zeigte z. B. eine 8 bis 12 cm mächtige Seesinterkalkbank, ca. 80 cm über der oberen Schaumkalkbank am Hönigweg bei Thüngersheim folgende Ausbildungen:

a) *auf ± ebenem Untergrund:*

flachgewölbte, dünnlamellierte Strukturen — Anzeichen langsamen Höhenwachstums

b) *an einem Rillenrand, teilweise innerhalb der Rille*

stärker konvex nach oben gewölbte, dicke lamellierte Strukturen — Anzeichen verstärkten Höhenwachstums

c) *im Hangendteil der Kalkbank, teilweise auch im Rillenbereich*

Seesinterkalk-Reliktstrukturen, unregelmäßig-porös gelagert, z. T. mit intraformationellen Geröllen, in seitlicher Verbreitung auch mit Trochiten, Ooiden und Myophorienschill — Anzeichen von strömungs- und seegangsbedingten Aufarbeitungen.

c. *Lagerung:* Die im Untersuchungsgebiet maximal 0,65 m mächtigen Seesinterkalkbänke liegen mit scharfer Begrenzung meist über einer ± ebenen Erosions- oder Schichtfläche, die z. T. mit einer feinsandig-glimmerigen Kalkmergellage überzogen ist, seltener auf einer mit Bohrgängen perforierten Kalksteinbank. Bei Thüngersheim und Rohrbach fanden sich auf der Unterfläche der Seesinterkalke polygonale Netzleisten. Auch die obere Begrenzug der Seesinterkalke ist scharf, sie ist im allgemeinen nierig-höckerig ausgebildet, auch halbkugelige Höcker und weitspannige Aufwölbungen kommen vor.

Auf der Oberfläche von Seesinterkalken wurden häufig polyedrische Rißsysteme beobachtet, z. B. bei Thüngersheim, Rohrbach und Homburg.

Folgende Merkmale weisen auf Schrumpfungs- (Trocken-) risse:

a) es sind typische Polyeder bis zu 4 cm Durchmesser und bis zu 1 cm tiefe, klaffende Risse ausgebildet, sie erfassen nur eine oberflächennahe Schicht, lassen

sich von der Liegendschicht abheben — an den Rissen haben sich keine Vertikalbewegungen vollzogen.

b) die Polyeder sind bei manchen Vorkommen besonders im Bereich der bis 5 cm hohen Aufwölbungen am stärksten ausgeprägt — also in Bereichen, die z. B. bei Trockenfallen auch zuerst und am intensivsten austrocknen konnten.

Allgemeines Merkmal der Seesinterkalke, das allen Stromatolithen einschließlich der rezenten „lamellaren, marinen Algensedimente" gemeinsam ist (Ginsburg 1960, Logan 1961), ist das bogenförmige Wachstum der Lamellen konvex nach oben, das auch — bis auf eine Ausnahme — bei allen gut struierten Seesinterkalken beobachtet werden konnte.

Bei der erwähnten Ausnahme handelt es sich um einen bis 20 cm mächtigen Seesinterkalk-Rasen, der vom Untergrunde losgelöst in eine überkippte Falte gelegt war. Während der teilweise anhaftende Untergrund (Hardground) durch diesen Vorgang zerbrochen ist, erfolgte die „Faltung" des Seesinterkalkes — wahrscheinlich unter Mitwirkung von Strömungen — bruchlos (Abb. 21).

Abb. 21: Syngenetische Gleitfalte in einem Seesinterkalk bei Rohrbach (im liegenden Schenkel der „Falte" sind die Wachstumsstrukturen infolge inverser Lagerung konvex nach unten gerichtet, im hangenden Schenkel sind die Wachstumsstrukturen normal nach oben gewölbt).

Nach strukturell-texturellen Kriterien sowie den Lagerungsmerkmalen können folgende „Seesinterkalk-Varietäten" unterschieden werden:

1. *Gut struierte feinlamellierte Seesinterkalke*

a) lokale, flach-stockartige und geringmächtige Seesinterkalke, die in Wellenkalke eingeschaltet sind

b) flächenhafte, krustenartige oft über 0,5 m mächtige Seesinterkalke z. B. als Vertretung der dritten Schaumkalkbank, meist engständige Wachstumsstrukturen

2. *Schlecht struierte Seesinterkalke oder Bruchkalke*

a) ± lokale Einschaltungen von Bruchkalken in gut struierten autochthonen Vorkommen von Seesinterkalken — neben den Reliktstrukturen finden sich Schillreste, Ooide, intraformationelle Gerölle

b) bankartig-flächenhafte Bruchkalke, z .T. umkristallisiert und dicht, meist porös, unregelmäßig gelagerte Reliktstrukturen mit Detrituskomponenten wie unter 2a.

3. *Zur Deutung der Seesinterkalke*

Über die Genese der Seesinterkalke gibt es im wesentlichen drei Ansichten:
a. Eine organische Deutung wurde zuerst für die Buntsandsteinstromatolithe (Kalkowsky 1908) gegeben, die danach auch für die Seesinterkalke von verschiedenen Autoren diskutiert wurde.

So schreibt z. B. Mägdefrau (1956, S. 16), daß man die Stromatolithen sogar für anorganischen Ursprungs gehalten hat. „Wenn man aber z. B. die im thüringischen Muschelkalk vorkommenden im Anstehenden beobachtet, so erscheint diese Erklärung als ganz unmöglich. Die konkordante Schichtung des umgebenden Gesteins sagt uns, daß der Meeresboden ± eben war. Hier kann sich auf rein anorganischem Wege nur eine ebenfalls ebene Kalkschicht ablagern, niemals aber in ihrer Umgrenzung und ihrer Oberfläche morphologisch so gut charakterisierte Gebilde wie die Stromatolithen. Und die oft aufsitzenden Serpeln haben sich bestimmt nicht auf Kalkschlamm, wie er durch anorganische Fällung entstanden sein müßte, gesetzt, sondern auf feste Gebilde, wie es die Stromatolithen gewesen sein müssen."

b. Bereits 1908 hatte Reis in einem Referat über die Buntsandsteinstromatolithe Kalkowsky's organische Deutung abgelehnt. In seiner Arbeit über die fränkische Trias vertrat Reis (1910) auch für die Seesinterkalke eine anorganische Bildungsweise. Von G. Linck (1909) wurden die Stromatolithe (nach Reis's Ansichten berechtigt) mit den Karlsbader Sprudelkalken verglichen. Hierzu bemerkte Dorn (1953), daß ein genetischer Vergleich der Sprudelkalke und Stromatolithe „für jeden unvorstellbar ist, der beide Gebilde kennt".

c. In der Arbeit über Kalkalgen und „Seesinterkalke" aus dem rheinpfälzischen Tertiär zählte Reis (1924) nur solche Gesteine zu organogen

entstandenen Gebilden, in denen noch Zellstrukturen nachzuweisen waren. Da sich in den Seesinterkalken des Muschelkalkes bisher keine Zellstrukturrelikte nachweisen ließen, wurden sie von RUTTE (1957, S. 45) auch weiterhin als Problematikum bezeichnet.

Was z. B. von Buntsandsteinstromatolithen als Zellstrukturen beschrieben und abgebildet worden ist (DABER 1954), konnte bisher noch nicht bestätigt werden (MÄGDEFRAU 1956, S. 16).

Trotz gradueller morphologischer Unterschiede lassen sich die Seesinterkalke mit Stromatolithen anderer Formationen in ihren wesentlichsten Merkmalen vergleichen. Wieweit eine Gleichstellung von präkambrischen, paläozoischen, permischen und triadischen Stromatolithen und ihre Einteilung nach Wachstumsformen („Gattungen") erfolgen darf, sei dahingestellt. Die Untersuchungsergebnisse von rezenten Stromatolithen-Sedimenten, die nur in tropischen bis subtropischen Küstenbereichen vorkommen, zeigen in ihren Wachstumsformen starke Abhängigkeit von den lokalen Sedimentationsbedingungen, dagegen sind die beteiligten Algenkolonien von geringerer Bedeutung (BLACK 1933, GINSBURG 1960, LOGAN 1961).

Aus dem Auftreten von Brekzien, Kalksand und Trockenrissen in Verbindung mit Stromatolithen der Beltserie im Glacier Waterlon Park Nordamerikas schlossen FENTON & FENTON (1937) auf eine Bildung im „intertidal environment". Die neuerdings von GINSBURG (1960) und LOGAN (1961) beschriebenen rezenten marinen Stromatolithe (lamellare Algensedimente) vor den Küsten Floridas, den Bahamas und Nordwest-Australiens, die nur in geringen Wassertiefen (maximal bis 18 m) vorkommen, haben die Deutungen fossiler Stromatolithe weitgehend bestätigt.

Auch die Seesinterkalke Unterfrankens zeigen Merkmale, die für eine Bildung in geringer Wassertiefe und unter starken Wasserbewegungen sprechen:

a) Rinnen und Rillen an der Basis der Seesinterkalke (Erosionsformen)
b) Vorkommen von Bruchkalken (Aufarbeitungsprodukte)
c) Netzleisten und Schrumpfungsrisse (? Trockenlaufen)
d) Überkippte „Gleitfalten" (? Mitwirkung von Strömungen)
e) Fazielle Zusammenhänge von Stromatolithen- und Oolithvorkommen.

Nach unseren Beobachtungen an Seesinterkalken und Vergleichen mit rezenten marinen Stromatolithen sprechen für *organische Genese:*

1) Die Wachstumsformen mit lamellarem Aufbau — der meist linsenförmige Verlauf kann *pflanzliche Wachstumsschichten* abbilden, wie er an Algenrasen und -riffen im *Zusammenspiel mit der Sedimentation* entstehen kann (vgl. GINSBURG 1960, LOGAN 1961).
2) Die große Ähnlichkeit mit Stromatolithen anderer Formationen und der

lithologischen Begleitmerkmale mit rezenten marinen Algensedimenten, z. B. Brekzien, Kalksand, Ooide usw.

3) Das Vorkommen auf Hardgrounds oder Schichten, die Anzeichen längerer Sedimentationsunterbrechungen zeigen und das Auslöschen der Seesinterkalkbildungen bei Anzeichen verstärkter Sedimentation.

Für eine *anorganische Genese* können geltend gemacht werden:

1. das Fehlen von Zellstrukturen
2. der makroskopisch erkennbare lamellare Aufbau, der mit manchen anorganischen Kalksintern vergleichbar ist
3. die mikroskopisch stellenweise glatte Ausbildung der Lamellen.

Alle sonstigen Merkmale — Schrumpfungsrisse, Ablagerung des terrigenen Materials vorwiegend in den Depressionen, Aufarbeitungen usw. — geben keine spezifischen Hinweise.

Nach allen bisher bekannten Merkmalen sind die Seesinterkalke auch weiterhin in ihrer Genese problematisch:

1) Die einzelnen Kriterien sprechen weder eindeutig für organische noch für anorganische Genese. Besonders das Fehlen von Zellenstrukturen läßt keine sichere Beweisführung zu.

2) Die Mannigfaltigkeit der Formen kann im einzelnen schwer zu einer Einheit zusammengefaßt werden. Vergleiche mit Stromatolithen anderer Formationen und selbst mit rezenten Formen sind zwar gut möglich, erlauben aber keine zwingende Beweisführung.

3) Es ist nicht unmöglich, daß es sich bei den Seesinterkalken um organogene Kalkfällungen primitiver Algenpolster handeln kann, die heute hauptsächlich als Süßwasserformen vorkommen. R. Kräusel (zit. bei Dorn 1953, S. 34) hat diese Meinung für die Buntsandsteinstromatolithen geäußert und hinzugefügt, daß ihr heutiges Vorkommen im Süßwasser kein Beweis gegen ihr früheres Vorkommen in einem marinen Environment zu sein braucht.

Das Fehlen von eindeutigen Zellstrukturen ist nicht unbedingt ein Beweis gegen eine organogene Bildungsweise. „Auch die am Aufbau der Zechsteinriffe maßgebend beteiligten Stromarien, an deren Algenstruktur heute wohl nicht der geringste Zweifel mehr besteht, lassen mikroskopisch keinerlei Strukturen mehr erkennen." (Dorn 1953, S. 34).

4. *Stratinomische Bedeutung*

Je nach Deutung der Seesinterkalke ergeben sich eine Reihe stratinomischer Hinweise, aber auch weitere Fragen.

Eine rein *anorganische Genese* würde viele sedimentpetrographische Fragen aufwerfen, denn eine Erklärung durch den Austritt von heißen Quellen scheidet genauso aus wie eine Ausfüllung lateraler Hohlräume. Eine

Kalkkrustenbildung auf trockengelaufenem Meeresboden wäre eine Annahme, die schwer mit lokalen Einschaltungen von Seesinterkalkriffen in Einklang gebracht werden könnte.

Die *organische Natur* der Seesinterkalke hat m. E. trotz Fehlens eindeutiger Zellstrukturen die größere Wahrscheinlichkeit für sich. Hierbei ist zu betonen, daß die Lamellierung wahrscheinlich wie bei den meisten marinen Algensedimenten durch rhythmische Veränderung der Algen- und Sedimentmengen zu erklären ist (vgl. GINSBURG 1960). Diese Deutung schließt eine rhythmische oder periodische Sedimentzufuhr ein.

Ob es sich bei den organogenen Anteilen um einzellige Blaualgen gehandelt hat, wie das z. B. von PIA (1928) angenommen wurde, muß natürlich offen bleiben. Insofern gibt selbst die sedimentologisch-organische Deutung keine endgültige Klärung des Problems.

Bei dieser Deutung müssen die Seesinterkalke als ein *Produkt von Sedimentpartikeln und pflanzlichen Biocoenosen* aufgefaßt werden. Ihre Bildung könnte sich demnach nur in euphotischen, gut durchlichteten Wassertiefen vollzogen haben, was auch mit allen lithologischen Begleitmerkmalen in Übereinstimmung gebracht werden kann.

Die untere Grenze der bodenständigen Meerespflanzen liegt zwischen 40 und 60 m Tiefe (SVERDRUP, JOHNSON & FEMING 1946, S. 276); eine Assimilation ist zwar bis ca. 200 m Wassertiefe möglich, doch wird diese Grenze nur selten erreicht SMITH 1951, S. 314).

Für die Seesinterkalke sind aber solange keine näheren Angaben über die Bildungstiefen möglich, als ihre Natur im einzelnen problematisch bleibt.

## IV. Zur Tiefe des Muschelkalkmeeres

Die meisten Autoren, die sich mit dem Unteren Muschelkalk beschäftigt haben, sahen die Bildungen als Flachmeersedimente an, so z. B. A. TORNQUIST (1912), G. WAGNER (1919, 1934, 1956), B. v. FREYBERG (1922, 1932, 1951), E. WAGNER (1923), W. DEECKE (1922), P. VOLLRATH (1924), R. BRINKMANN (1925), R. RICHTER (1926), E. HILDEBRANDT (1928), Ph. HERBIG (1931), M. WILLFARTH (1933, 1934), L. RÜGER (1936), M. FRANK (1937) u. a.

Von O. M. REIS (1910) wurden dagegen Bildungstiefen von 400 bis 500 m für wahrscheinlich gehalten.

Detaillierte Angaben über die mutmaßliche Tiefe des Muschelkalkmeeres finden sich in der Arbeit über die Dynamik des deutschen Muschelkalkmeeresbodens von HERBIG (1931). Unter Berücksichtigung der paläogeographischen Lage und Größe des Muschelkalkmeeres hielt er Wellendimensionen von maximal 4,5 m Höhe, 67 m Länge und einer Fortpflanzungsgeschwindigkeit von 5,45 m/sec für möglich und errechnete daraus

einen theoretischen Tiefgang des Wellenschlages von 84 bis 90 m. Die Ausbildung der Schichtflächen, den Karbonatgehalt der Sedimente und die Gesteinsfarbe wurden von ihm als Tiefenkriterien gewertet. Mit dem schnellen Wechsel solcher Merkmale begründete er seine „Oscillationstheorie".

Sehen wir von den kurzen „Oscillationen" ab — denn nach neueren Beobachtungen erscheint es nicht möglich, jede Schicht und Schichtfuge bathymetrisch im Sinne von HERBIG zu definieren — so ergeben sich für den Kronacher Unteren Muschelkalk folgende Durchschnittstiefen: $mu_1$ 15 bis 35 m, $mu_2$ 60 bis 120 m, $mu_3$ um 85 m, maximale Ausnahmetiefen 150 bis 160 m.

1. *Stratinomische Auswertung faunistischer Merkmale*

Nach statistischen Faunenuntersuchungen stehen im Germanischen Muschelkalk die Lamellibranchiaten (Muscheln) mit insgesamt 167 Arten an erster, die Gastropden (Schnecken) mit 161 an zweiter und die Cephalopoden mit 47 an dritter Stelle.

Nach rezenten Beobachtungen (LOMBARD 1956, S. 151) kommen im litoralen Milieu die Gastropoden häufig, Lamellibranchiaten seltener vor. Im nereitischen Milieu sind die Verhältnisse umgekehrt, Lamellibranchiaten beherrschen große Flächen, Gastropoden bleiben relativ selten; über 72 m Tiefe beginnt die Zone der Brachiopoden. Werten wir die Verteilung von Muscheln und Schnecken für den Unteren Muschelkalk aus, so werden charakteristische Veränderungen vom Liegenden zum Hangenden erkennbar (Tab. 14), die eine Vergrößerung der Meerestiefe andeuten.

Im Oberen Muschelkalk werden die Tiefenverhältnisse bereits durch die

Tabelle 14: Statistische Verteilung der Muschel- und Schneckenarten innerhalb des Germanischen Muschelkalkes

| Stratigraphischer Bereich | Anzahl der Arten | | c. |
|---|---|---|---|
| | a. Muscheln | b. Schnecken | Quotient a/b |
| Ceratitenschichten ($mo_2$) | 95 | 53 | 1,79 |
| Trochitenkalk ($mo_1$) | 93 | 68 | 1,37 |
| Mittlerer Muschelkalk (mm) | 34 | 38 | 0,89 |
| Oberer Wellenkalk ($mu_3$) | 94 | 45 | 2,08 |
| Mittlerer Wellenkalk ($mu_2$) | 90 | 57 | 1,58 |
| Unterer Wellenkalk ($mu_1$) | 86 | 62 | 1,38 |

lithologischen Unterschiede zwischen Trochitenkalk (geringe Tiefe) und Ceratitenschichten (größere Tiefen) deutlich. Im Unteren Muschelkalk liegen die Verhältnisse anders. Zwar konnte ein allgemeiner Rückgang der

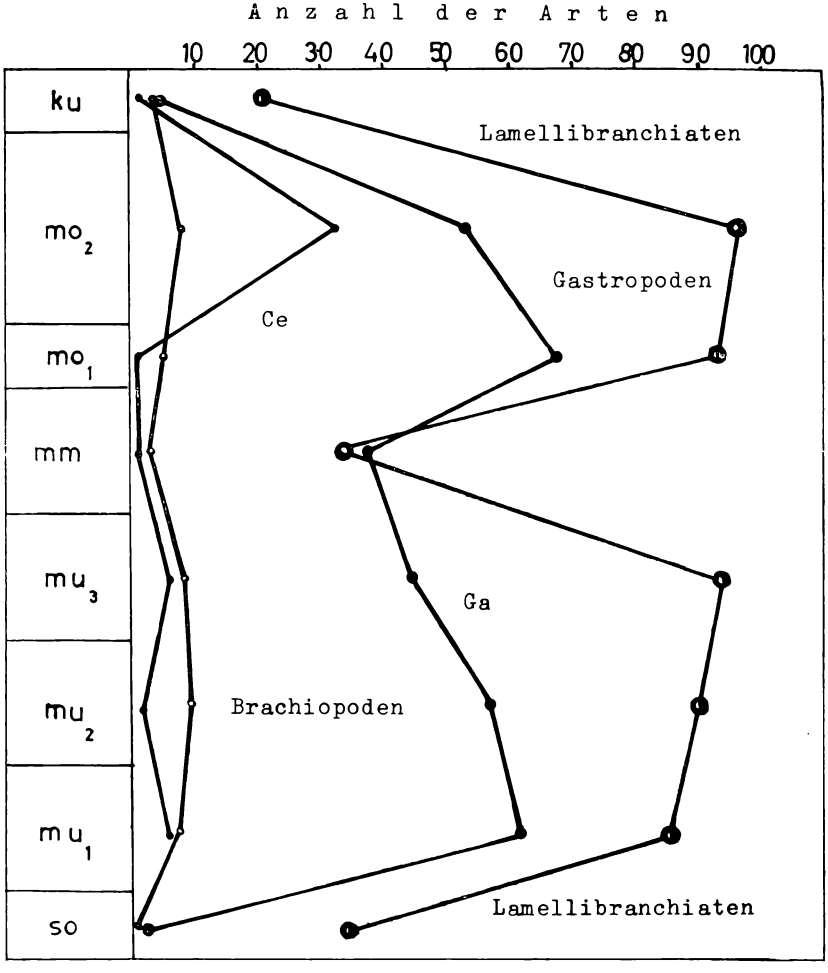



Abb. 22: Statistische Faunenuntersuchung über die Verteilung der Arten von Lamellibranchiaten (Muscheln), Gastropoden (Schnecken), Brachiopoden und Cephalopoden im Germanischen Muschelkalk (ohne Oberschlesien). Die Gliederung des Unteren Muschelkalkes in mu1, mu2 und mu3 entspricht der auf S. 10 angegebenen.

terrestrischen Bestandteile vom Liegenden zum Hangenden ermittelt werden, jedoch tritt z. B. in den Wellenkalktexturen kein charakteristischer, mit den Verhältnissen im Oberen Muschelkalk vergleichbarer Wandel ein. Daher sollte jeder neue Hinweis auf die Tiefenschwankungen im Verlauf des Unteren Muschelkalkes beachtet werden.

Wie aus Tab. 14 und Abb. 22 ersichtlich, erreichen die Gastropoden bereits im $mu_1$ ihren Höhepunkt und nehmen im weiteren Verlauf des Unteren Muschelkalkes ab. Die Lamellibranchiaten nehmen dagegen im gleichen Zeitraum zu, erreichen also erst im $mu_3$ ihre größte Artenentfaltung. Diese Verteilung spricht für eine allgemeine Vertiefung des Wellenkalkmeeres.

Im Mittleren Muschelkalk geht die Artenzahl für alle Formen stark zurück, im Oberen Muschelkalk wiederholt sich die Tendenz des Unteren Muschelkalkes.

Diese Entwicklung spiegeln die Quotienten aus der Artenanzahl von Muscheln und Schnecken (Tab. 14). Die Werte dürfen selbstverständlich nur als Hinweise gelten *).

---

*) FÜCHTBAUER (1950 S. 242) kam bei seinen Untersuchungen der nichtkarbonatischen Bestandteile des Göttinger Muschelkalkes zu dem Ergebnis, daß das Zufuhrverhältnis der Leichtminerale durch den ganzen Muschelkalk ± gleich geblieben ist. In den Korngrößenquotienten Orthoklas/Plagioklas machte sich dagegen eine auffallend gleiche Änderung der authigenen Feldspatneubildung bemerkbar: An der Basis des mu überwiegen bei den Kalifeldspaten reine Neubildungen, während der Plagioklas detritisch ist. Das Or/Plag-Verhältnis ist daher größer als es dem Verhältnis der detritischen Feldspate entspricht. Gegen den oberen Wellenkalk geht die Kalifeldspatneubildung zurück, nimmt im Mittleren Muschelkalk aber wieder zu. Mit dem Trochitenkalk verlagert sich die Feldspatneubildung auf Albit. Über die Ursache der sukzessiven Änderung äußert sich FÜCHTBAUER nicht, doch stellt er heraus, daß sie für verschiedene Teile des von ihm untersuchten Gebietes etwa gleichzeitig erfolgte.

Daß die Quotienten der Artenanzahl Muscheln/Schnecken umgekehrt wie die von FÜCHTBAUER ermittelten Quotienten Orthoklas/Plagioklas verlaufen, sei hier durch einen Zahlenvergleich hervorgehoben:

| Stratigraphie | Orthoklas/Plagioklas | Muscheln/Schnecken |
|---|---|---|
| $mo_2$ | ca. 0,3 | ca. 1,7 |
| $mo_1$ | ca. 0,1 | ca. 1,3 |
| mm | ca. 2,0 | ca. 0,8 |
| $mu_3$ | ca. 0,3 | ca. 2,0 |
| $mu_2$ | ca. 0,8 | ca. 1,5 |
| $mu_1$ | ca. 1,1 | ca. 1,3 |

Dies könnte nach den oben abgeleiteten Tiefenverhältnissen bedeuten, daß mit dem Rückgang der kontinentalen Beeinflussung des Muschelkalkmeeres (Tieferwerden) die authigene K-Feldspatbildung mehr und mehr zurückging und daß die noch relativ hohen Salinitätsverhältnisse im Grenzgelbkalk (Or/Plag ca. 3,5) wie die wieder hohen Salinitätsgrade im Mittleren Muschelkalk (Or/Plag ca. 2,0) die authigene K-Feldspatbildung begünstigt haben.

In einer speziellen Betrachtung der Oolith-, Terebratel- und Schaumkalkzone ergeben sich gegenüber den restlichen Wellenkalkserien ($mu_1$, $mu_2$, $mu_3$ i. e. S.) geringere Verhältniszahlen:

1,65 — 1,59 — 2,25 gegenüber 2,35 — 2,28 — 2,36; im Durchschnitt also 1,83 für die Zonen mit organogenen Detrituskalken gegenüber 2,33 für die Wellenkalke i. e. S.; man kann hierin einen weiteren Hinweis auf relativ geringere Wassertiefen zur Bildungszeit von Oolith-, Terebratel- und Schaumkalkzone sehen, was mit den geochemisch-lithologischen und stratinomischen Ergebnissen übereinstimmt.

Danach dürften sich im Verlauf des Unteren Muschelkalkes die Tiefenverhältnisse, wenn auch mehrfach durch rückläufige Tendenzen unterbrochen, allgemein vergrößert haben. Nach allen Hinweisen gilt das speziell für das Untersuchungsgebiet Unterfranken.

Zu den gleichen Ergebnissen kam auch VOLLRATH (1924) auf Grund von Mächtigkeitsvergleichen. Danach hielt die Senkung — unterbrochen durch kurze Hebungen — sowohl in Thüringen als auch in Süddeutschland bis zur Oolithzone an. Nach der Terebratelzone zeichnet sich im Norden eine Hebung ab, die Tiefenzone verlagert sich immer weiter nach Süden.

Die Faziesverteilung des Unteren Muschelkalkes und der Orbicularisschichten spiegelt diese Entwicklung ebenfalls wider. So liegt die Kalk-Dolomit-Grenze in manchen Teilen Thüringens bereits innerhalb der Schaumkalkregion (JUBITZ 1958). Im Untersuchungsgebiet ist der Untere Muschelkalk generell noch kalkig ausgebildet, die Orbicularisschichten vorwiegend dolomitisch. In den sich nach Süden anschließenden Faziesbereichen sind die Verhältnisse umgekehrt — mu dolomitisch, Orbicularisschichten kalkig. Auch hierin kommt die gerichtete Tiefenverlagerung von NE nach SW zum Ausdruck. Die Orbicularisschichten als vermittelndes Glied zwischen Unterem und Mittlerem Muschelkalk nehmen natürlich auch in faunistischer Hinsicht eine Sonderstellung ein.

2. *Zusammenfassung*

Für das Untersuchungsgebiet können folgende Tiefenverhältnisse als wahrscheinlich angenommen werden:

1) Im unteren Wellenkalk bis zur Oolithbank alpha wirkten sich bei geringen Tiefen die Tiefenschwankungen noch deutlich im Gesamtkarbonat-Gehalt und im Ca/Mg-Verhältnis aus.

Lokal konnte es noch zu Emersionen kommen. Intraformationelle Konglomerathorizonte sind für diesen Abschnitt typisch. Nach einer Vertiefung wird die Wasserbedeckung im Bereich der Oolithbank beta wieder geringer. Mutmaßliche Wassertiefe bis 30 m.

2) Im mittleren Wellenkalk bis zur Terebratelregion fehlen die typischen intraformationellen Konglomerate, dagegen werden submarine Gleitungen häufig, doch ist der detritische Anteil besonders im Liegendteil noch stärkeren Schwankungen unterworfen. In bezug auf Ca/Mg wirkten sich diese

Schwankungen nicht so extrem aus wie im unteren Wellenkalk, was auf eine weitere Vergrößerung der Wassertiefe schließen läßt. Im Bereich der Terebratelbänke nahm die Wassertiefe relativ ab. Für den $mu^2$ wird die Wassertiefe im allgemeinen über 75 m betragen haben.

3) Im oberen Wellenkalk bis zur Schaumkalkregion fehlen im Untersuchungsgebiet ebenfalls Hinweise auf geringe Wassertiefen. Der terrestrische Einfluß nimmt weiter ab und in der Zusammensetzung der Fauna setzt sich die im gesamten Unteren Muschelkalk gleichgerichtete Tendenz auch im $mu^3$ fort. Für den Unteren Muschelkalk erreichen die Wassertiefen hier wohl ihre höchsten Werte. Mutmaßlich über 75 m.

4) In der Schaumkalkregion macht sich der Rückgang der Wassertiefen in mehrfacher Weise bemerkbar: Zunahme der Oolithe und Auftreten von „Seesinterkalken" bei noch geringem terrestrischen Einfluß. Die mutmaßlichen Wassertiefen dürften unter 75 m betragen haben, sie waren für die eigentlichen Schaumkalke wohl wesentlich geringer.

5) Innerhalb der Orbicularisschichten kommt es zu einer bedeutenden Erhöhung der Salinität, die auf geringe Wassertiefen und teilweise Abschnürung vom offenen Ozean schließen läßt. Lokal konnte es zu Trockenlegungen führen und am Ende der Orbicularisschichten kam es auch im Untersuchungsgebiet zur Bildung von intraformationellen Konglomerat- und Brekzienlagen. Wassertiefe bis ca. 30 m.

Die meisten Dokumente (Rippelmarken, intraformationelle Konglomerate, fast alle Organismen) geben uns in bezug auf ihre Bildungstiefe keine absoluten Werte. Selbst quantitativ erfaßbare Merkmale gestatten letztlich nur qualitative Hinweise. Nach unseren heutigen Kenntnissen läßt sich lediglich die Tendenz der Entwicklung angeben. Unter diesem Aspekt sind auch die oben angeführten Tiefenverhältnisse zu betrachten.

# E. Stratinomischer Teil

## I. Erosionsformen und -richtungen

Der marine Typus der Trias (Wellenkalk) ist „durch eine sandige Küstenzone ausgezeichnet, deren Form, Mächtigkeit und Lage im einzelnen durch die Strömungsverhältnisse geregelt wird, während beckeneinwärts ein allmählicher Ersatz der terrigenen durch chemische Sedimente stattfindet. Hierbei ist klar, daß Gebiete starker Senkung sich faziell oft nur ungenau abzuzeichnen vermögen. Nach der Küste, im Gebiet von vorwiegend klastischer Sedimentation, können sie durch größere Mächtigkeiten auffallen, in den zentralen Teilen jedoch häufen sich auf rasch sinkendem Boden keineswegs ohne weiteres mehr chemische Sedimente." (BRINKMANN 1926).

Bei bekannten Tiefenverhälnissen und gegebenem Kraftfeld sind die Strömungsverhältnisse eindeutig bestimmt und jede Änderung zieht bestimmte Konsequenzen nach sich (HANSEN 1958). Diese Voraussetzungen sind uns

für den Unteren Muschelkalk unbekannt. Durch eine statistische Auswertung von Erosionsrichtungen sollen im folgenden unsere Vorstellungen über den Strömungsverlauf präzisiert werden.

Es wurden nur solche Rinnen und Rillen gewertet, die eine einwandfreie Richtungsbestimmung ermöglichten. Gemessen wurde nur an solchen Stellen, die durch tektonische Verstellung nicht oder nur gering beeinträchtigt waren. Die flächenmäßig erschlossenen Erosionsformen (z. B. Abbauflächen von Steinbrüchen) waren für die Messungen am aufschlußreichsten.

1. *Erosionsformen*

a) Rinnen: Als Rinnen bezeichnen wir linear gerichtete, breite Erosionsformen innerhalb des Wellenkalkes, die von wenigen Dezimetern bis ca. 1,5 m tief und über 1 m breit sind.

Die Böschungswinkel erreichen 45° — Häufungen bestehen bei 15—20° und 3—6° (SCHMITT 1934).

Die Rinnen sind mit Wellenkalken der verschiedensten Strukturen und Texturen ausgefüllt und durch „schräge Parallelschichtung" ausgezeichnet. Es handelt sich hierbei um Anlagerungsschichtung, die parallel zum ehemaligen Strömungsverlauf innerhalb der Rinne streicht. Wir können damit von longitudinaler Schrägschichtung sprechen (Klassifizierung nach REINECK 1958).

Im Böschungsbereich zeigen diese Schichten oft submarine Gleitungen die zur Rinnenmitte ausklingen. Die Gleitfalten verlaufen parallel zur Rinne, ihre Vergenz ist zur Rinnenachse gerichtet.

Daneben kommen submarine Gleitungen in verschiedenen Dimensionen von kleinen Runzeln über Fältelungen bis zu Stauchungen mehrerer Meter mächtiger Komplexe („Gekrösekalke") vor. Häufig finden sie sich im Wellenkalkzwischenmittel der Terebratelzone, wo die Gleitfalten oft durch flächenhafte Erosion abgeschnitten sind und durch die obere Terebratelbank direkt überlagert werden (z. B. bei Karlstadt, Bad Neustadt, westlich Heustreu). Aber auch im Hangenden der Oolithzone sind submarine Gleitungen geradezu typisch (z. B. bei Lengfurt, Erlenbach u. a. O.) sowie an vielen Stellen im unteren Wellenkalk (Kallmuth/Main, Lengfurt, Kembach, Hammelburg).

Diese als „Gekrösekalke", „Wurstelkalke" u. ä. in der Literatur beschriebenen flächenhaft verbreiteten Gleitungen im Unteren Muschelkalk zeigen im Beobachtungsbereich keine erkennbaren Beziehungen zu primär schrägen Ablagerungsflächen. Sie sind im Gegensatz zu den durch ihre geometrischen Beziehungen zu Rinnen charakterisierten Fältelungen unregelmäßig in ihrer Form und Richtung.

b) Rillen: Als Rillen bezeichnen wir linear gerichtete, schmale Erosions-

formen innerhalb des Wellenkalkes, deren Tiefen und Breiten im Dezimeterbereich liegen.

Die Böschungswinkel schwanken in weiten Grenzen von 5° bis über 90°; es kommen also überhängende Böschungen vor. Die Querschnitte sind entsprechend vielgestaltig; Böschungswinkel über 35° sind vorherrschend. Für die räumliche Anordnung der entweder mit Schill- bis Bruchschill oder homogenen, z. T. feingeschichteten Kalkmergeln bis Kalken ausgefüllten Rillen sind charakteristisch:

1. V-förmiger Querschnitt
2. schnelles erosives Einschneiden in den Schichtenverband, im weiteren Verlauf ohne meßbare Vertiefung
3. schwaches Mäandrieren, gelegentliche Verzweigungen und oft ein auffallend äquidistanter Verlauf in Abständen von einigen dm bis zu mehreren m.

Tabelle 15: Haupterosions- bzw. Strömungsrichtungen im Unteren Muschelkalk von Unterfranken

| Diagr. Nr. | Stratigraphischer Bereich der Messungen | Anzahl d. Messungen | Prozentuale Verteilung d. Hauptrichtungen | Gesamt-Tendenz |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Region der intraformat. Konglomerat- und Dentalien-Bänke | 114 | 47,8 %: 0— 30°<br>29,8 %: 30— 60°<br>7,4 %: 170—180° | NE<br>(SW) |
| 2 | Region der Oolithbank beta bzw. Hauptkonglomeratbank | 52 | 73,3 %: 0— 30°<br>13,3 %: 170—180° | NE/NNE<br>(S/SSW) |
| 3 | Region der Terebratelbänke bis zur Spiriferina-Bank | 60 | 49,0 %: 0— 30°<br>25,6 %: 160—180° | N/NNE<br>(S/SSW) |
| 4 | Region der Schaumkalkbänke bis zur Spiriferina-Bank | 180 | 34,4 %: 0— 30°<br>24,3 %: 150—180° | NNW/N/NNE<br>(SSE/S/SSW) |
| 5 | Region der Orbicularisschichten | 164 | 33,4 %: 0— 20°<br>23,1 %: 20— 40°<br>19,8 %: 40— 65°<br>12,1 %: 160—180° | N/NNE/NE<br>(S/SSW/SW) |

2. *Erosionsrichtungen*

Für die statistische Auswertung wurden die gemessenen Richtungen aller Erosionsformen in Richtungsdiagrammen dargestellt. Bei allen Diagrammen erlaubt ein 15 % der Gesamtzahl der Messungen markierender Kreis eine schnelle Orientierung über die Anteile der bevorzugten Richtungen, (siehe Abb. 23). In Tab. 15 sind die wichtigsten Daten zusammengefaßt.

In den Erosionsformen und ihren Richtungen spiegeln sich die Strömungsverhältnisse im Unteren Muschelkalk. An Hand der Messungen ergibt sich vom Liegenden zum Hangenden:

1) Im unteren Wellenkalk bis zur Oolithbank alpha herrschten NNE bis NE/SSW bis SW gerichtete Strömungen vor. Untergeordnet waren ENE/WSW und NW/SE Strömungen. Aus verschiedentlich an Dentalien und Loxonemen, sowie an Schüttungskegeln von Crinoidenbruchstücken im Strömungsschatten größerer Gerölle ermittelten Einregelungen kann auf vorwiegend südlich gerichtete Strömungen geschlossen werden; dies schließt nicht aus, daß auch nach N bzw. NE gerichtete Strömungen vorhanden waren.

2) Im Bereich der Oolithzone ist eine geringe Drehung der allgemeinen Strömungen in die Nord-Süd-Richtung erfolgt. Hauptrichtung ist NNE/SSW, daneben treten untergeordnet NW/SE-Richtungen auf. Eine Gegenüberstellung der Streichrichtungen von Erosionsformen und Wellenrippeln ist aufschlußreich: Zunächst fällt auf, daß das Richtungsdiagramm der Rippelmarken wesentlich uneinheitlicher ist als das der Erosionsformen. Nur für die Haupterosionsrichtung (NNE-SSW) existiert eine etwa senkrecht verlaufende Wellenrippelrichtung (WNW-ESE), für die NNW-SSE und NNE-SSW verlaufenden Rippelmarken konnten keine korrespondierenden Erosionsrichtungen beobachtet werden.

3) In der Terebratelregion setzt sich die Drehung der Strömungsrichtungen gleichsinnig in Richtung N bzw. S fort. Das Maximum der Erosionsrichtungen liegt im Bereich NNE bis N/SSW bis S. Ein kleiner Teil des Hauptmaximums befindet sich bereits im NNW- bzw. SSE-Sektor. NE-SW und E-W-Richtungen sind untergeordnet.

4) In der Schaumkalkregion tritt eine stärkere Streuung der Strömungs- bzw. Erosionsrichtungen auf. Die gegenüber dem unteren Wellenkalk konstatierte Drehungstendenz von Ost über Nord setzt sich weiter fort und endet zugleich. Das 1. Teilmaximum liegt bei 5° N (185° S), das 2. bei 25° NNE (205° SSW) und das 3. bei 135° SE (315° NW). Daneben treten flach NW-SE und ENE-WSW gerichtete Strömungen auf. Interessant ist wieder der Vergleich mit den Wellenrippelrichtungen. Hier zeigt der statistische Vergleich eine deutliche Zuordnung der annähernd Nord-Süd gerichteten Erosionsformen mit den West-Ost gerichteten Wellenrippelsystemen. Aber auch für die untergeordneten Erosions- bzw. Strömungsrichtungen

sind korrespondierende, senkrecht dazuverlaufende Richtungen im Diagramm der Rippelmarken vorhanden.

5) Die bereits angedeutete Umkehr der Drehungsrichtungen, die möglicherweise mit einer Umkehr der Strömungsvektoren gekoppelt war (das Beckentiefste hat sich nach Süddeutschland verlagert), sehen wir in der Richtungsverteilung der Erosionsformen innerhalb der Orbicularisschichten. Neben einem deutlichen Hauptmaximum bei 5° N (185° S) finden wir eine relativ breite Streuung bis 35° NE (215° SW); in dem Nebenmaximum bei 55° NE (235° SW) ist nur eine geringe Streuung festzustellen. Daneben tritt noch die NNW-SSE-Richtung hervor; untergeordnet sind NW-SE gerichtete Erosionsformen.

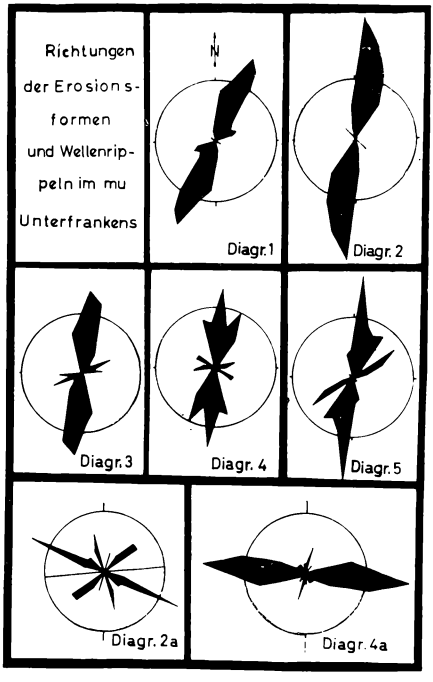



Abb. 23:
Richtungsdiagramme von linearen Erosionsformen und Wellenrippeln im Unteren Muschelkalk von Unterfranken.
Die Diagramme 1—5 beziehen sich auf Erosionsformen der in Tab. 15 angegebenen stratigraphischen Bereiche, die Diagramme 2a und 4a auf Richtungen von Wellenrippeln der Bereiche 2 und 4. Erläuterung im Text.

In den oben dargestellten Richtungsbeziehungen zwischen Erosionsformen und den symmetrischen bis schwach asymmetrischen Wellenrippeln bestehen geometrische Zusammenhänge. Es ist daher wahrscheinlich, daß neben anderen möglichen Faktoren (Gezeiten, thermische Ausgleichsströmungen u. ä.) die durch Wind erzeugten Meeresströmungen mit allen Auswirkungen auf Materialtransport, Sedimentation und Ablagerungsstruktur der Sedi-

mente zur Zeit des Unteren Muschelkalkes eine bedeutende Rolle gespielt haben.

Die allgemeinen Strömungsbahnen bzw. Erosionsrichtungen im Unteren Muschelkalk lassen sich aber nicht von der im paläogeographischen Bild der gesamten Trias Süddeutschlands immer wieder hervortretenden NE-SW-Richtung der fränkischen Tiefenlinie — Meiningen—östliches Rhönvorland—Bad Kissingen—Odenwald — trennen (vgl. hierzu VOLLRATH 1924, CRAMER 1954, KNETSCH u. a. 1960).

Im Gebiet von Unterfranken vollzog sich — nach den jeweils vorherrschenden Erosionsrichtungen zu urteilen — vom unteren zum oberen Wellenkalk eine Schwenkung der Strömungsrichtungen aus NE/SW in die Nord-Süd-Richtung, die am Ende des Unteren Muschelkalkes wieder in die NE-SW-Richtung einschwenkt.

## II. Frühdiagenetische Sedimentstrukturen

1. *Setzungserscheinungen*

Abb. 24a

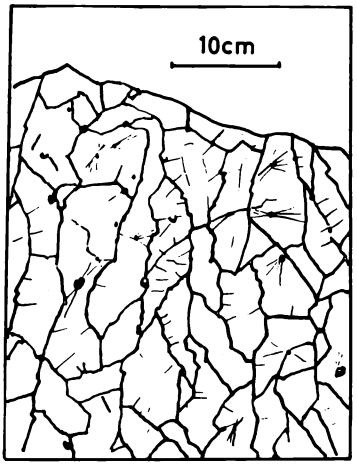



Abb. 24b

Abb. 24: Bruchstrukturen in frühdiagenetisch verfestigten Kalkstein- bis Kalkmergellagen auf Dachflächen von organogen-klastischen Detrituskalken (Hardground-Typ 5).

a) begrenzte Einbruchstrukturen, über der unteren Schaumkalkbank bei Thüngersheim (an den Bruchlinien ist das Zentrum der „kleintektonischen Mulde" staffelförmig ca. 5 cm abgesunken).

b) flächenhaft verbreitete kleine Bruchstrukturen über der mittleren Schaumkalkbank bei Erlabrunn (an den Bruchlinien haben sich Abschiebungen bis 1 cm Sprunghöhe vollzogen).

Hierunter werden verschiedene atektonische — nicht durch Austrocknung entstandene — Bruchstrukturen zusammengefaßt.

a) Kleine Einbruchstrukturen im Dezimeterbereich — mit Kleinschollenkippungen und deutlichen Haupt- und Nebenlinien (Abb. 24a).
Diese Strukturen finden sich nicht selten in 1 bis 2 cm mächtigen Kalksteinbis Kalkmergelschichten unmittelbar im Hangenden von oolithischen Bruchschillkalken, typisch ausgebildet über der unteren Schaumkalkbank bei Thüngersheim. Sie sprechen für eine inhomogene örtlich begrenzte Sackung der liegenden Detritusablagerungen, die noch andauerte, als die im Hangenden abgelagerte Schicht (Hardground) bereits soweit verfestigt war, daß sie auf die Setzungen mit Bruchbildungen reagieren mußte.

b) Flächenhaft verbreitete kleine Bruchstrukturen mit unregelmäßig verlaufenden Bruchlinien, an denen z. T. Abschiebungen bis 1 cm Sprunghöhe erfolgt sind (Abb. 24b).

Abb. 25: Bruchstrukturen auf plattigen Wellenkalken, Schichtfläche 1,4 m unter der Oolithbank beta bei Erlenbach. (Die wellig bis bogenförmig verlaufenden Bruchlinien erfassen nur eine Schicht, die Scherflächen sind schaufelförmig und laufen horizontal in der unteren Schichtfuge aus, Abschiebungsbeträge 0—2 cm).

Solche Strukturen finden sich als 2 bis 3 cm starke, z. T. mit Bohrgängen durchsetzte homogene Kalklagen (Hardground) auf oolithischen Bruchschillkalken und Kalkmergelpartien, typisch ausgebildet im Gebiet Erlabrunn—Oberleinach. Diese Strukturen sind durch flächenhafte, ± inhomogene Setzung des Untergrundes zu erklären, auf die die verfestigte Hangendplatte durch Bruchbildung reagierte.

c) Flächenhaft verbreitete, große bogenförmige, teilweise durch geradlinige Scherflächen unterbrochene Abschiebungsstrukturen auf 4 bis 5 cm mächtigen, plattigen Wellenkalkschichten (Abb. 25):
Die Abschiebungen erfassen nur eine Schicht. Die Abschiebungsbeträge schwanken zwischen 0 und 2 cm, ihr Einfallswinkel erreicht maximal 45° und verflacht sich zum Liegenden. Es entstanden so antithetische Abschiebungen mit schaufelförmiger Scherfläche, die mit atektonischen Gravitationswirkungen an Böschungen zu vergleichen sind (vgl. REINECK 1958, S. 77). Direkte Lagebeziehungen zu Rinnen konnten jedoch nicht beobachtet werden.

2. *Querplattungserscheinungen*

Die erste zusammenfasende Beschreibung der Querplattungsformen stammt von LOTZE (1932). Durch die Beschreibung der Primärklüfte (SCHMITT 1935) wurde der Formenkreis der Querplattung erweitert, worunter feine latente Klüfte verstanden werden, die bei Verwitterung eine Striemung hervorrufen (Lösungsrippeln).

Das von LOTZE festgestellte Bewegungsbild konnte immer wieder bestätigt werden: 1. einseitige Abschiebungen (Scherflächen) an schrägen bis sigmoidalen Klüften („Dislokationssysteme") bei horizontal liegenden Schichten, also Zerscherung an Klüften, aber auch an Schichtflächen und 2. echt gefaltete Querplattung („Faltensysteme"), also echte Biegung unter Sehnenverkürzung.

Beide Vorgänge, Zerrung in der Horizontalen (Dehnung) und Pressung in der Vertikalen (Verkürzung) bewirken eine Ausdünnung der Schichten.

Die Querplattung erfaßt maximal ca. 30 cm mächtige Partien und geht bis zu mm-dünnen Lagen. Die statistisch ermittelten Richtungskonstanzen (vorwiegend NNE-SSW, WNW-ESE und in Unterfranken ENE-WSW) wurden von STRAUSS (1938) mit der syngenetischen Bildung von Becken und Beulen im Sedimentationsgebiet in Zusammenhang gebracht, während nach ENGELS (1958) zwischen der Querplattung des Wellenkalkes und der varistischen Tektonik wahrscheinlich ursächliche Zusammenhänge bestehen.

Daß die Querplattung jedoch auf eine frühdiagenetische Anlage zurückzuführen ist, die möglicherweise „mit einer embryonalen Schieferung in den allerersten Anfängen vergleichbar ist" (ENGELS 1958), konnte durch weitere Beobachtungen erhärtet werden:

a) Ebene Querplattung zeigt häufig Übergänge zu flexur- und faltenähnlichen Formen. Dabei liegen die stärksten Verbiegungen meist im

Inneren einer solchen Kalkbank, während die Klüfte an der Liegend- und Hangendgrenze steil ansetzen. Ein mehrfach festgestellter geringerer Karbonatgehalt und nicht selten beobachtete Cölestinkristalle bzw. -negative lassen auf einen geringeren Verfestigungsgrad der mittleren Partien schließen, die stärkere Verformung erklärt. Andererseits muß aber das Bankinnere bereits kluftfähig gewesen sein. Gleitbrettartige Zerscherung und Biegung treten z. T. zusammen auf (Abb. 26).

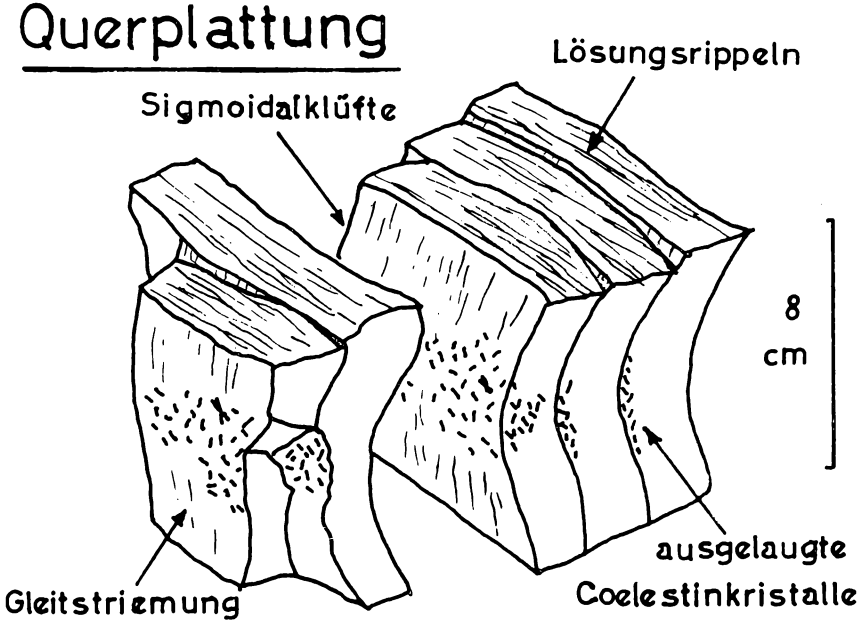



Abb. 26: Querplattung mit einseitigen Abschiebungen an Scherflächen (Sigmoidal- und Primärklüfte bzw. Lösungsrippeln) und echter Biegung (Faltung unter Sehnenverkürzung mit Rutschstriemen und z. T. fächerförmiger Anordnung der Schichtflächen). Cölestin wurde in den tonreicheren Partien ausgeschieden, die auch am stärksten verbogen sind. Zerrung in der Horizontalen und Pressung in der Vertikalen führten zu einer Ausdünnung der Schichten.

Abb. 26 wurde nach einem Handstück aus dem oberen Wellenkalk bei Retzstadt gezeichnet.

b) Jede Schicht hat ihr eigenes Primärkluft-System, das Streichen wechselt oft von einer Schicht zur anderen sprunghaft. Im Gebiet Tiefenthal wurde versucht, Streichrichtungsdiagramme von Lösungsrippeln als feinstratigra-

phisches Merkmal auszuwerten. An vier- maximal 750 m voneinander entfernten Aufschlüssen einer 1,65 bis 2,25 m mächtigen Serie von flaserigem Wellenkalk über der unteren Schaumkalkbank ergaben sich durch kontinuierliche Messungen jeweils 3 Abschnitte mit übereinstimmenden Streichrichtungen:

| Abschnitte über der unteren Schaumkalkbank (4 Aufschlüsse) | Mächtigkeitsschwankungen der einzelnen Abschnitte im flaserigen Wellenkalk | Streichen der Lösungsrippeln |
|---|---|---|
| III. (oberer) | 0,30 bis 0,45 m | 92° bis 125° |
| II. (mittlerer) | 0,30 bis 0,50 m | 165° bis 180° |
| I. (unterer) | 1,05 bis 1,30 m | 95° bis 112° |

Über dieses Gebiet hinaus konnten keine feinmorphologischen Korrelationen vorgenommen werden, obwohl die statistischen Hauptrichtungen im Untersuchungsgebiet nahezu konstant bleiben.

c) Primärklüfte sind an Fremdkörpern (Fossilien, Geröllen, Wurmspuren usw.) scharf unterbrochen. Die Feststellung von STRAUSS (1938) konnte bestätigt werden, doch gibt es auch gewisse Ausnahmen; z. B. wurden Steinkerne von Myophorienpflastern beobachtet, bei denen z. T. feine Lösungsrippeln über Schichtfläche und Steinkerne ohne Hiatus laufen. Die Bildung der Primärklüfte dürfte hier erst nach der Auflösung der Muschelschalen eingetreten sein.

d) Primärklüfte bzw. Wellenrippeln sind teilweise durch Gleitbewegungen wellenförmig verbogen. Diese Erscheinungen weisen darauf hin, daß das Sediment nach der Anlage der Primärklüfte noch eine gewisse Plastizität gehabt haben muß. Ganz ähnliche Verbiegungen — wenn auch großzügiger — konnten jetzt auch an Sigmoidalklüften beobachtet werden, typisch ausgebildet im Hangenden des oberen Schaumkalkes bei Retzstadt.

e) Im Bereich submariner Gleitungen ist die Richtungskonstanz der Lösungsrippeln gestört. Ein gutes Beispiel wurde im Liegenden der Oolithbank alpha bei Kembach beobachtet. Auf dem nicht von submarinen Bewegungen beeinflußten Teil einer Schichtfläche streichen die Lösungsrippeln 115 bis 125°, im Bereich einer lokalen, bruchlosen Aufwölbung der gleichen Schicht wurden dagegen 72 bis 145° gemessen.

Wir erhalten damit einen weiteren Hinweis für die frühe Anlage der Primärklüfte: Sie muß vor der endgültigen Verfestigung erfolgt sein, denn die abweichenden Richtungen entstanden durch kuppelförmige Aufwölbungen im Zusammenhang mit submarinen Bewegungen.

f) Bei schneller Erhärtung infolge Sedimentationsunterbrechung oder Emersion bildeten sich im allgemeinen keine Primärklüfte. Dies zeigte z. B. eine ca. 1,3 m über der oberen Schaumkalkbank liegende Kalkmergelschicht innerhalb der Orbicularisschichten bei Wenkheim. Während der Liegendteil dieser Schicht beim Anschlagen in rhomboedrische Bruchstücke zerfiel, die der Querplattung folgten, brach der durch schnelle Verfestigung ausgezeichnete Teil in polyedrische Bruchstücke, die den Schrumpfungsrissen folgten und sich konkav von der Liegendfläche lösten. Damit ist wahrscheinlich, daß relativ langsame Erhärtung eine Voraussetzung für die Ausbildung von Querplattung ist.

Schillablagerungen, intraformationelle Konglomerathorizonte oder oolithische Kalke zeigen dementsprechend nie eine Spur von Querplattung, selbst wenn sie als dünne Bänkchen innerhalb einer durch Querplattung beanspruchten Wellenkalkserie liegen. Ihre verfestigten Einzelkomponenten können durch gegenseitige Verschiebung kleinere Beanspruchungen ausgleichen. Die erst im Verlauf der Diagenese zu kompakten Sedimenten verfestigten Detrituskalke reagierten nur auf kräftige tektonische Beanspruchung mit Bruchbildung.

g) Erosionsrelikte von sigmoidalgeklüfteten Schichten innerhalb von nicht durch Querplattung beanspruchten Wellenkalkserien können ebenfalls als Hinweis auf eine frühdiagenetische Anlage der Querplattung gelten.

## III. Diagenetische Veränderungen

1. *Umkristallisationen*

Der größte Teil der organogenen Hartteile des Unteren Muschelkalkes ist in Steinkernerhaltung überliefert. Es kann angenommen werden, daß das zumeist sauerstoffreiche Wasser des Muschelkalkmeeres die Zerstörung des Periostracums der Schalen bewirkte, wodurch die diagenetische Auflösung der Schalen selbst in karbonatreichem Sediment rasch erfolgen konnte. An Stelle der organogenen Schalen wurde sekundär oft Kalzit ausgeschieden. Bei dicken Schalen sind die rekristallisierten Kalkspatkristalle stets senkrecht zur Schalenbegrenzung orientiert. Die Crinoidenstielglieder bestehen aus einem einzigen Kalkspatkristall, dessen kristallographische c-Achse mit der „Rotationsachse" der Stielglieder identisch ist.

In fast allen Regionen des Unteren Muschelkalkes sind stengelige oder garbenförmige, auf Cölestin zurückzuführende Hohlräume nachzuweisen. Sie finden sich hauptsächlich im $mu_1$, besonders häufig im Liegenden der Oolithbank beta z. B. bei Lengfurt, ferner fand sich Cölestin in Bohrgängen im Inneren und in der Standflächenwölbung von zweiklappigen Limen, aber auch im $mu_2$, z. B. am Bergsturz zwischen Karlstadt und Gambach (hier auch im Zusammenhang mit erhaltenen Cölestinkristallen), sowie im $mu_3$ z. B. in sigmoidalgeklüfteten Wellenkalken bei Retzstadt

und in den häufig zu beobachtenden Rillen innerhalb der Schaumkalke und Orbicularisschichten z. B. bei Bad Neustadt und Mühlbach.

Die irrtümlich als Korallen beschriebenen Negativformen von Cölestinkristallen (SCHAUROTH 1855, SANDBERGER 1867, BLANCKENHORN 1904) wurden neuerdings von RUTTE (1958) als anorganische Bildungen bestätigt, wodurch die aufgestellten „Korallenarten" entfallen.

### 2. *Bewertung der geochemischen Parameter Ca/Sr und Ca/Mg*

Nach Untersuchungen der Sauerstoffisotopenverhältnisse, der Strontium- und Magnesiumgehalte von rezenten und fossilen Brachiopoden (LOWENSTAM 1961) ist anzunehmen, daß auch der Strontiumgehalt des mu1 im Anhydrit, Kalkspat, vor allem aber im Aragonit und in den organogenen Hartteilen gebunden war. Bei den diagenetischen Prozessen (z. B. Umwandlungen von Aragonit in Kalzit, Umkristallisationen von Kalkspat) wurden die freiwerdenden Sr-Bikarbonatlösungen besonders in langsamer erhärteten Sedimenten (Mergeln) oder in Hohlräumen (Bohrgängen, Limen, Lösungsregionen im Kalkstein) entsprechend den lokalen physiko-chemischen Bedingungen ausgeschieden.

Die Überschneidungen von primär ausgeschiedenen, sekundär- also diagenetisch angereicherten und schließlich durch Verwitterung vollkommen oder teilweise wieder gelösten Cölestins, lassen keine Schlüsse mehr auf die primären Konzentrationen zu.

Deshalb kann das Ca/Sr-Verhältnis nicht genetisch — etwa in Hinblick auf Wassertemperatur und Salinität — interpretiert werden, wie dies nach den positiven Ergebnissen bei geochemischen Untersuchungen an rezenten und fossilen Kalkschalen von PILKEY & HOWER (1960) und LOWENSTAM (1961) auch für den Unteren Muschelkalk versucht werden könnte. Generell scheinen sich aber die Veränderungen der Sedimentliefergebiete zur Muschelkalkzeit noch abzuzeichnen, da der Cölestin des Unteren Muschelkalkes im Mittleren und Oberen Muschelkalk weitgehend durch Baryt vertreten wird (FISCHER 1908).

Das Kalk/Dolomit-Verhältnis der Muschelkalkgesteine, das durch das Ca/Mg-Verhältnis des HCl-Löslichen wiedergegeben wurde, dürfte dagegen durch die Diagenese stabilisiert sein und im wesentlichen die primären geochemischen Relationen aufweisen. Nur bei stärkerer Verwitterung oder Einfluß zirkulierender Wässer auf Klüften muß mit bedeutenden Veränderungen geochemischer Parameter gerechnet werden.

# F. Literatur


ALBERTI, F. v.: Überblick über die Trias. — Stuttgart 1864

ANDREE, K.: Geologie des Meeresbodens. — Leipzig 1920

BARTH, F. W., CORRENS, C. W. & ESCOLA, P.: Die Entstehung der Gesteine. — (2. Teil: Die Sedimentgesteine, 116—262), 1960

BARTHOLOMÄ, H. D.: Über eine Erläuterung des SO-Teiles des Blattes Marktheidenfeld unter besonderer Berücksichtigung der Stratigraphie des Unteren Muschelkalkes in Unterfranken. — Unveröffentl. Dipl.-Arbeit, Heidelberg 1955

BARTZ, J.: Das Liegende des Muschelkalkgipslagers bei Obrigheim/Neckar. — Mitt. Bl. Bad. geol. L.-A. 1949, 24—27, Freiburg 1950

BECKENKAMP, J.: Über die geologischen Verhältnisse der Stadt Würzburg und der nächsten Umgebung von Würzburg. — Sitz. Ber. phys. med. Ges., Würzburg 1907

BLACK, M.: The algae sediments of Andros Island. — Royl Soc. London Philos. Trans., ser. B., **122**, 165—192, 1933

BLOCH, H.: Zur Geologie des Gebietes zwischen Ermsleben und Nienstedt am nördlichen Harzrand (feinstratigraphische Untersuchungen im Unteren Muschelkalk). — Unveröff. Dipl.-Arb., Geol. Inst. d. Humbold-Univ. Berlin, 1956. — Auszug in Geologie **6**, 320—321, Berlin 1957

BRINKMANN, R.: Tektonik und Sedimentation im deutschen Triasbecken. — Z. deutsch. geol. Ges., **78**, 52—92, Berlin 1926

BUDZINSKI, H.: Zum Problem der wässrigen Bildung von Dolomit. — Fortschr. Miner. **39**, 27—33, Stuttgart 1961

CHILINGAR, G. V.: Use of Ca/Mg ratio in limestone as a geochemical tool. — Compass, **30**, 202, 1953

CHILINGAR, G. V.: Classification of limestones and dolomites on the basis of Ca/Mg ratio. — J. Sed. Petr., **27**, 187, 1957

CORRENS, C. W.: Der Eisengehalt der marinen Sedimente und seine Entstehung. — Arch. Lagerstättenforsch., **75**, 47, 1942

CORRENS, C. W.: Petrographie der Tone. — Naturwiss., **24**, 117, 1936

CORRENS, C. W. & ENGELHARDT, W. v.: Neue Untersuchungen über die Verwitterung des Kalifeldspates. — Chemie der Erde, **12**, 1, 1939/40

CRAMER, P.: Die Trias in Nordwestbayern. — Erl. Geol. Karte v. Bayern 1:500 000, 36—48, München 1954

DABER, R.: Stromatolith aus dem Unteren Buntsandstein. — Geologie **3**, 604—609, 1954

DACQUE, E.: Vergleichende biologische Formenkunde der fossilen niederen Tiere. — Berlin 1921

DEECKE, W.: Der paläogeographische Charakter des germanischen Muschelkalk-Binnenmeeres. — Verh. nat. forsch. Ges., **33**, 1—22, Basel 1921—1922

DEGENS, E. T.: Geochemische Untersuchungen zur Faziesbestimmung im Ruhrkarbon und im Saarkarbon. — Glückauf, **94**, 513—520, 1958

DEGENS, E. T.: Die Diagenese und ihre Auswirkungen auf den Chemismus von Sedimenten. — N. Jb. Geol. Paläont., Mh., 72—84, 1959

DEGENS, E. T., KNETSCH, G. & REUTER, H.: Ein geochemisches Buntsandsteinprofil vom Schwarzwald bis zur Rhön. — N. Jb. Geol. Paläontol., Abh. **111**, 181—233, 1960

DORN, P.: Problematik des Vindelizischen Landes. — Geologie **7**, 237—860, Berlin 1958

DORN, P.: Die Stromatolithen des Unteren Buntsandsteins im nördlichen Harzvorland. — N. Jb. Geol. Paläontol., Abh. **97**, 20—38, 1953

DREVERMANN, F.: Das erste Skelett des Pflasterzahn Placodus, ein Geschenk von Arthur von Gwinners. — Natur und Museum, **61**, 150—156, 1931

ENGELS, B.: Zur Deutung der Querplattung (Sigmoidalklüftung). — Mitt. Geol. Staatsinst. Hamburg, **25**, 5—25, 1956

ERNST, W.: Bestimmung der Salinitätsfacies tertiärer Tone der Niederrheinischen Bucht mit Hilfe des Bor-Gehaltes. — Fortschr. Geol. Rheinld.-Westf., **1**, 93—94, 1958

ERNST, W., KREJCI-GRAF, K. & WERNER, H.: Parallelisierung von Leithorizonten im Ruhrkarbon mit Hilfe des Borgehaltes. — Geochim. et Cosmochim. Acta, **14**, 211, London 1958

FENTON, C. L. & FENTON, M. N.: Belt Series of North Stratigraphy, Sedimentation, Palaeontology. — Geol. soc. America Bull. **48**, 1873—1970, 1937

FENTON, C. L. & FENTON, M. N.: Primitive Algae as Environment Indicators. — Pan American Geol., **70**, New York 1938

FIEGE, K.: Die Epirogenese des Unteren Muschelkalks in Nordwestdeutschland, I. Teil. — Centralbl. f. Min. etc., B., 143—171, 1938

FIEGE, K.: Sedimentationszyklen und Epirogenese. — Z. deutsch. geol. Ges., **103**, 17—22, 1951, Hannover 1952

FIEGE, K., LAMBRECHT, L. & LECKWIJK, W. van: Stratinomie des Oberkarbons des Aachener Gebietes und des belgischen Grenzlandes. — N. Jb. Geol. Pal., Abh., **104**, 299—358, 1957

FISCHER, H.: Beitrag zur Kenntnis der unterfränkischen Triasgesteine. — Geogn. Jh., **21**, 1—58, München 1908

FRANK, M.: Marine Straßen und Faunenwanderwege in Süddeutschland zur Triaszeit. — Geol. Rdsch., **22**, 1—11, 1931

FRANK, M.: Ergebnisse neuer Untersuchungen über Facies und Bildung von Trias und Jura in Südwestdeutschland. — Geol. Rdsch. **28**, 465—498, 1937

FRANTZEN, W. & KOENEN, A. v.: Über die Gliederung des Wellenkalks im mittleren und nordwestlichen Deutschland. — Jb. preuß. geol. L.-A., 440—452, Berlin 1888

FREYBERG, B. v.: Zur Genese des Wellenkalks. — Naturw. Wochenschr. **20**, 1919

FREYBERG, B. v.: Der Aufbau des unteren Wellenkalks im Thüringer Becken. — N. Jb. f. Min. etc., Beil. Bd. B, **45**, 214—274, Stuttgart 1922

FREYBERG, B. v.: Die Röt-Muschelkalkgrenze bei Eisfeld und im Schalkauer Muschelkalkplateau. — Geol. Paläont. Abh., N. F., **19**, 203—233, Jena 1932

FREYBERG, B. v.: Meeresböden des Muschelkalks bei Kulmbach. — Geol. Bl. NO-Bayern, **3**, 98—195, Erlangen 1951

FÜCHTBAUER, H.: Die nichtkarbonatischen Bestandteile des Göttinger Muschelkalks mit besonderer Berücksichtigung der Mineralneubildungen. — Heidelberger Beitr. z. Min. und Petrogr., **2**, 235—254, 1950

GENSER, C.: Zur Stratigraphie und Chemie des Mittleren Muschelkalks in Franken. — Geol. Paläontol., Abh. N. F., **17**, 381—492, 1930

GINSBURG, R. N.: Recent stromatolitic sediments from south Florida (Abstr.). — Journ. Palaeontology, vol. **29**, 723, 1956

GINSBURG, R. N.: Ancient analogues of recent stromatolites. — Report of the twenty First Sedd. Norden. Port. XXII, Intern. Paleontological Union, 26—36, Copenhagen 1960

GOLDSMITH, J. R.: Some of the Chemistry of Carbonates. — Researches in Geochemistry, New York, John Wiley & Sons Inc., 336, 1959

GOLDSMITH, J. R. & GRAF, D. L.: Subsolidus in the System $CaCO_3$ — $MgCO_3$ — $MnCO_3$. — Journ. of Geology, **68**, 324—335, 1960

GRAF, D. L. & GOLDSMITH, J. R.: Some hydrothermal syntheses of dolomit and protodolomite. — J. Geol., **64**, 173, 1956

GRIPP, K.: Das Watt; Begriff, Begrenzung und fossile Vorkommen. — Senck. leth. **37**, 149—181, Frankfurt/M. 1956

GRIPP, K.: Rezente und fossile Flachmeerabsätze, petrologisch betrachtet und gedeutet. — Geol. Rdsch., **47**, 83—99, 1958

GRUPE, O.: Beiträge zur Kenntnis des Wellenkalks im südlichen Hannover und Braunschweig. — Jb. preuß. geol. L.-A., **26**, 436—467, Berlin 1905

GRUPE, O.: Zur Stratigraphie der Trias im Gebiet des oberen Wesertales. — 4. Jb. d. Nieders. geol. Ver., Abh., 1—102, Hannover 1911

HAACK, W.: Bemerkungen zu den Stromatolithen Kalkowsky's. — Z. deutsch. geol. Ges., **61**, 221—223, Berlin 1909

HABER, H.: Beitrag zur Geochemie des Bors, II. Teil (Bor in Sedimenten). — Nachr. Akadem. d. Wiss. z. Göttingen, Math. phys. Kl. **6**, 1959

HALTENHOF, M.: Beitrag zur Kenntnis des nordöstlichen Schlotheim—Tennstedter Gewölbes (Thüringer Becken). — Unveröff. Diplomarbeit, Jena 1958

HANSEN, W.: Der Einfluß der Tiefengestalt der Meeresbecken auf die Strömungsgeschwindigkeit und deren Rückwirkung auf die Bodenform. — Geol. Rdsch., **47**, 177—186, 1958

HÄNTSCHEL, W.: Schichtungsformen rezenter Flachmeer-Ablagerungen im Jade-Gebiet. — Senckenberiana **18**, 316—356, Frankfurt/M. 1936

HÄNTSCHEL, W.: Bau und Bildung von Großrippeln im Wattenmeer. — Senckenbergiana **20**, 1—48, Frankfurt/M. 1938

HÄNTSCHEL, W.: Schlickgerölle und Muschelklappen als Strömungsmarken im Wattenmeer. — Natur und Volk **69**, 412—417, 1939

HÄNTSCHEL, W.: Wattenmeer-Beobachtungen am Ringelwurm Nereis. — Natur und Volk, **70**, 144—148, 1940

HÄNTSCHEL, W.: Zur Frage der Kennzeichen fossiler Wattablagerungen. — Natur und Volk, **83**, 255—263, Frankfurt/M. 1953

HÄNTSCHEL, W.: Lebensspuren als Kennzeichen des Sedimentationsraumes. — Geol. Rdsch. **43**, 551—562, 1955

HÄNTSCHEL, W.: Rückschau auf die paläontologischen und neontologischen Ergebnisse der Forschungsanstalt „Senckenberg am Meer". Senck. leth. **37**, 3/4, 319—330, Frankfurt/M. 1956

HECHT, F.: Ausgeworfene Muscheln (Mya arenaria) in Lebensstellung zur Beurteilung eines Beweismittels in der Küstensenkung. — Senckenbergiana **12**, 274—278, 1930

HEIDE, F. & THIELE, A.: Zur Geochemie des Bors. — Chemie der Erde, **19**, 329—337, 1958

HEIMLICH, K.: Zum Karbonatgehalt des Hauptanhydrits (Zechstein 3) im nördlichen Harzvorland und Unstrutgebiet. — Z. angew. Geol. **5**, 442—445, Berlin 1959

HENKEL, L.: Beitrag zur Kenntnis des Muschelkalkes der Naumburger Gegend. — Jb. preuß. geol. L.-A., **22**, 408—438, Berlin 1901

HENKEL, L.: Beobachtungen über das Verhältnis des fränkischen unteren Muschelkalkes zum thüringischen. — Z. deutsch. geol. Ges., **54**, 82—83, 1902

HENKEL, L.: Der Wellenkalk im nördlichen Harzvorland. — Z. deutsch. geol. Ges., **57**, 384—392, Berlin 1905

HENKEL, L.: Studien im süddeutschen Muschelkalk. — Z. deutsch. geol. Ges., **56**, 218—226, 1904

HENKEL, L.: Über den Wellenkalk an der unteren Tauber. — Z. deutsch. geol. Ges., **59**, 266—270, 1907

HERBIG, Ph.: Die Dynamik des deutschen Muschelkalkmeeresbodens. — Beitr. zur physik. Erforsch. d. Erdrinde, **4**, preuß. geol. L.-A., Berlin 1931, 6—225

HERRMANN, A. & RICHTER-BERNBURG, G.: Frühdiagenetische Störungen der Schichtung und Lagerung im Werra-Anhydrit (Zechstein 1) am Südharz. — Z. deutsch. geol. Ges., **105**, 689—702, 1953

HILDEBRANDT, E.: Geologie und Morphologie der Umgebung von Wertheim a. M., 1—79, Freiburg i. B. 1924

HILDEBRANDT, E.: Der Aufbau des Wellenkalks. — Geol. Paläontol. Abh., N. F. **16**, 233—304, Jena 1928

HILDEBRANDT, E.: Über die chemisch-physikalischen Bedingungen der Knollenkalkbildung. — Z. deutsch. geol. Ges., **80**, 308—342, Berlin 1929

HUNGER, R.: Zur Petrogenese des Unteren Muschelkalks. — Nat.-wiss. Rdsch. **7**, 61—65, Stuttgart 1954

Illies, H.: Die Schrägsichtung in fluviatilen und litoralen Sedimenten, ihre Ursachen, Messung und Auswertung. — Mitt. Geol. Staatsinst. Hamburg, **9**, 89—109, 1949

Jeffries, R. P. S.: Photonegative youg in the triassic lamellibranch Lima lineata (Schlotheim). — Palaeontology, **3**, 362—369, London 1960

Jessen, W.: Allgemeine Erkenntnisse aus feinstratigraphisch erarbeiteten Faunen und Sediment-Zyklen des Ruhrkarbons. — Z. deutsch. geol. Ges., **45**, 119—126, 1956

Jubitz, K. B.: Zur feinstratigraphisch-geochemischen Horizontierungsmethodik in Kalksedimenten (Trias). — Geologie **7**, 863—923, 1958

Kalkowsky, E.: Über Oolith und Stromatolith im norddeutschen Buntsandstein. — Z. deutsch. geol. Ges., **60**, 68—125, Berlin 1908

Kessler, F. J.: Chemismus der Bausteinverwitterung. — Diss. Würzburg 1960

Kiston, R. E. & Mellon, M. G.: Colorimetric determination of phosphorus as molybdivanadophosphoric acid. — Ind. Eng. Chem. Anal. Ed., **16**, 378, 1944

Kleinsorge, H.: Paläogeographische Untersuchungen über den Oberen Muschelkalk in Nord- und Mitteldeutschland. — Mitt. Geol. Staatsinst. Hamburg, **15**, 57—107, 1935

Knetsch, G.: Beiträge zur Kenntnis von Krustenbildungen. — Z. deutsch. geol. Ges., **89**, 177—192, 1937

Knetsch, G., Degens, E. T., Welte, D. & Reuter, H.: Untersuchungen und Schlüsse von Strahlungsträgern in Sedimenten Frankens. — Glückauf, **96**, 172—182, 1960

Kräusel, R.: Ein Stromatolith vom Kalkplateau in Südwest-Afrika. — Senck. leth. **37**, 25—37, 1956

Kuenen, Ph. H.: Turbidity currents of high density. — Intern. Geol. Congr. Rep., XVIIIe Sess. proceedings, 365—385, 1948

Kuenen, Ph. H.: Marine Geology. — New York 1950

Kuenen, Ph. H.: No geology without marine geology. — Geol. Rdsch., **47**, 1—10, 1958

Langbein, R. & Seidel, G.: Zur Geologie im Gebiet des Holunger Grabens (Ohmgebirgsgrabenzone). — Geologie **9**, 36—57, 1960

Linck, G.: Über die Bildung der Oolithe und Rogensteine. — Jenaische Z. f. Naturwiss., **45**, 267—278, Jena 1909

Linck, G.: Bildung des Dolomits und Dolomitisierung. — Chemie der Erde, **11**, 278—286, Jena 1938

Lodemann, W.: Stratigraphie des Unteren Muschelkalks am südwestlichen Odenwald südlich Heidelberg. — Jh. geol. Landesamt Baden-Württemberg, **3**, 139—163, Freiburg i. B. 1958

Lodemann, W.: Die Konglomeratbänke des Wellendolomits (mu1) im Mosbacher Faciesbereich. — Jb. und Mitt. oberrh. geol. Ver., N. F., **42**, 1—13, 1960

Logan, B. W.: Cryptozoon and associated stromatolites from the recent, Shark Bay, Weston Australia. Journ. Geology **69**, 517—533, 1961

LOMBARD, A.: Geologie sedimentaire — Les séries marines. — 661, Paris et Liège, 1956

LORETZ, H.: Notizen über Buntsandstein und Muschelkalk in Südthüringen. — Jb. preuß. geol. L.-A., 137—148, 1880

LOTZE, F.: Zur Erklärung der Querplattung (Sigmoidalklüftung) im Wellenkalk. — Centralbl. f. Min. etc. B., 300—307, Stuttgart 1932

LOWENSTAM, H. A.: $O^{18}/O^{16}$ ratios and strontium and magnesium contents of calcareous skeletons of recent and fossil brachiopods and their bearing on the history of the oceans. — Journ. Geology, **69**, 241—260, 1961

LÜDERS, K.: Sediment und Strömung. — Senckenbergiana **14**, 387—390, Frankfurt/M. 1932

MÄGDEFRAU, K.: Über einige Bohrgänge aus dem Unteren Muschelkalk von Jena. — Paläontol. Z., **14**, 150—160, 1932

MÄGDEFRAU, K.: Paläobiologie der Pflanzen. — 3. Auflage, Jena 1956

MEYER, P. F.: Die mutmaßlichen Ursachen der biologischen und fischereilichen Veränderungen in der Baltischen Ostsee. — Natur und Volk, **82**, 307—313, 1952

MOSEBACHER, R.: Wäßrige $H_2S$-Lösungen und das Verschwinden kalkiger tierischer Hartteile aus werdenden Sedimenten. — Senckenbergiana **33**, 13—22, Frankfurt/M. 1952

MÜLLER, A. H.: Stratinomische Untersuchungen im Oberen Muschelkalk des Thüringer Beckens. — Geologica **4**, 1—72, Berlin 1950

MÜLLER, A. H.: Grundlagen der Biostratinomie. — Abh. deutsch. Akad. d. Wiss. Berlin, Klass. f. Math. und allgem. Naturwiss., **3**, 1—147, 1950, Berlin 1951

MÜLLER, A. H.: Beiträge zur Stratinomie und Ökologie des germanischen Muschelkalkes. — Geologie **4**, 285—297, 1955

MÜLLER, A. H.: Weitere Beiträge zur Ichnologie, Stratinomie und Ökologie der germanischen Trias. — Teil I — Geologie **5**, 405—423, 1956

MÜLLER, A. H.: Lehrbuch der Palöozoologie, Bd. I, Allgemeine Grundlagen, Jena 1957

MÜLLER, A. H.: Weitere Beiträge zur Ichnologie, Stratinomie und Ökologie der germanischen Trias, II. Teil. — Geologie **8**, 239—262, Berlin 1959

MÜLLER, H.: Die Petrographie der Röt-Muschelkalkschichten bei Steudnitz nördlich Jena. — Chemie der Erde, **19**, 392—435, 1958

MURR, K. S.: Stratigraphie und Genese des Unteren Muschelkalks (Wellenkalk) im nördlichen Harzvorland. — Diss. Braunschweig 1957

MUSSTOFF, R.: Zur Feinstratigraphie des Unteren Muschelkalkes im Gebiet der Naumburger Mulde und südöstlichen Finne (Thüringen). — Unveröff. Dipl.-Arb., Humboldt-Univ. Berlin 1958, Auszug in Geologie **8**, 339, Berlin 1959

NEWELL, N. D., PURDY, E. G. & IMBRIE, J.: Bahamian öolitic sand. — Journal of Geology **68**, 481—497, 1960

NEY, P.: Zum gegenwärtigen Stand des Magnesitproblems. — Z. deutsch. geol. Ges. **108**, 203—217, 1956

NIENHOFF, W.: Die primär geschichteten Sedimentstrukturen, insbesondere die Schrägschichtung, im Koblenzquarzit am Mittelrhein. — Geol. Rdsch. **47**, 252—321, 1958

NIESLUCHOWSKI, P.: Die Geologie im nördlichen Vorland des Ostharzes und der Halle-Hettstedter Gebirgsbrücke (Raum südöstlich Aschersleben-Bernburg). — Unveröff. Dipl.-Arb., Humboldt-Univ. Berlin, 1957, Auszug in Geologie **8**, 337, Berlin 1959

ORTON, J. H. & AMIRTHALINGAM: Notes on shell-deposition in oysters. With a note on the chemical composition of „chalky" deposits in shells of O. edulis. By H. O. Bull. — J. Marine Biol. Assoc. Unit. Kingd., N. S. **14**, 935, 1926—1927, Plymouth 1927

PETTIJOHN, F. J.: Sedimentary Rocks. — Harpers & brothers, New York 1949

PHILIPPI, E.: Über ein interessantes Vorkommen von Placunopsis ostracina (SCHL.). — Z. deutsch. geol. Ges., **51**, 67—69, Berlin 1899

PFAFF, F. W.: Über die quantitative Bestimmung des Quarzes im Ton und über Tonelektrolyse. — Geogn. Jh., **40**, 105—108, 1927

PFAFF, F. W. & REIS, O. M.: Erläuterungen zur Geologischen Karte des Königreiches Bayern, Blatt Mellrichstadt, München 1917

PIA, J. v.: Pflanzen als Gesteinsbildner. — Berlin 1926

PIA, J. v.: Die Kalkbildung durch Pflanzen. — Beih. z. bot. Cbl. **52**, A, 1—72, 1934

PIA, J. v.: Die rezenten Kalksteine. — TSCHERMAKS Mineralog. Mitteil., Erg. Bd., 1—420, Leipzig 1933

PILKEY, O. H. & HOWER, J.: The effect of environment on the concentration of skeletal magnesium and strontium in DENDRASTER. — Journal of Geology **68**, 203—214, 1960

PRATJE, O.: Schlickgebiete in der deutschen Bucht und die Beziehungen zwischen Strömung und Sediment. — Geol. Rdsch. **25**, 145—160, Berlin 1934

QUIRING, H.: Oolithentstehung. — Z. deutsch. geol. Ges., **96**, 75—87, 1944

REMANE, A.: Einführung in die zoologische Ökologie der Nord- und Ostesee. — in GRIMPE, WAGLER, REMANE: Tierwelt der Nord- und Ostsee. — Leipzig 1940

REMANE, A.: Die biologischen Grenzen Meer — Süßwasser und Meer — Land. — Geol. Rdsch. **47**, 11—24, 1958

REINECK, H. E.: Der Wattboden und das Leben im Wattenboden. — Natur und Volk, **86**, 268—284, 1956

REINECK, H. E.: Longitadinale Schrägschichtung im Watt. — Geol. Rdsch., **47**, 73—82, 1958

REINECK, H. E.: Sedimentbewegungen an Kleinrippeln im Watt. — Senck. leth. **42** 1/2, 51—67, Frankfurt/Main 1961

REIS O. M.: Der mittlere und untere Muschelkalk im Bereich der Steinsalzbohrungen zwischen Burgbernheim und Schweinfurt. — Geogn. Jh., **13**, 23—136, 1900, München 1901

REIS, O. M.: Über Oolith und Stromatolith. — N. Jb. f. Min. etc. II, 114—138, 1908

Reis, O. M.: Beobachtungen über Schichtenfolge und Gesteinsausbildungen in der fränkischen Unteren und Mittleren Trias. — Geogn. Jh., **20**, 1909, 1—284, München 1910

Reis, O. M.: Erl. zur geologischen Karte des Königreichs Bayern 1:25 000, Blatt Kissingen Nr. 41. — München 1914

Reis, O. M.: Erl. zu Blatt Ebenhausen d. geol. Karte v. Bayern 1:25 000. — München 1914

Reis, O. M.: Erl. zu Blatt Euerdorf d. geol. Karte von Bayern 1:25 000. — München 1915

Reis, O. M.: Kalkalgen und Seesinterkalke aus dem rheinpfälzischen Tertiär. — Geogn. Jh., **36**, 103—130, München 1923

Reis, O. M.: Über Bohrröhren in fossilen Schalen und über Spongeliomorpha. — Z. deutsch. geol. Ges., **3**, 224—236, 1921

Reis, O. M.: Erl. zum Blatt Würzburg Nr. 23 der Geognost. Karte von Bayern 1:100 000 Teilblatt Würzburg. — München 1928

Reuter, H.: Geochemische Untersuchungen an Rötsedimenten Süddeutschlands. — Diss. Würzburg 1961

Richter-Bernburg, G.: Über salinare Sedimentation. — Z. deutsch. geol. Ges. **105**, 593—645, 1955

Richter-Bernburg, G.: Zeitmessung und geologische Vorgänge über salinare Sedimentation im Zechstein. — Geol. Rdsch., **49**, 132—160, 1960

Richter, Rud.: Flachseebeobachtungen zur Geologie u. Paläontologie. — Senckenberiana **6**, 119—165, Frankfurt/M. 1924 und Senck., **8**, 200—224, 297—315, Frankfurt 1926

Richter, Rud.: Die fossilen Fährten und Bauten der Würmer, ein Überblick über biologische Grundformen. — Paläontol. Z., **9**, 183—235, 1928

Richter, Rud.: Risse durch Innenschrumpfung und Risse durch Lufttrocknung. — Senckenbergiana **23**, 165—167, Frankfurt/M. 1941

Richter, Rud.: Die Einkippungsregel. — Senckenbergiana **25**, 181—206, 1942

Ruchin, L. B.: Grundzüge der Lithologie. — (Ausgabe in deutscher Sprache von A. Schüller), Berlin 1958

Rücklin, H.: Die Grenzschichten Buntsandstein-Muschelkalk im Saarland — ein fossiles Watt. — Ober. und Mitt. Oberrh. geol. Ver., N. F. **35**, 26—52, Stuttgart 1953

Rüger, L.: Der Wellenkalk. — Beitr. z. Geol. v. Thür., **4**, 137—156, Jena 1936

Rutte, E.: Zur Geologie von Unterfranken. — Z. deutsch. geol. Ges., **108**, 73—85, 1956

Rutte, E.: Einführung in die Geologie von Unterfranken. — Würzburg 1957

Rutte, E.: Sandberger's Chaetetes aff. recubariensis Sachuroth im Würzburger Wellenkalk ein Cölestinkristallrelikt. — N. Jb. Geol. Paläontol., Mh., **1**, 8—12, Stuttgart 1958

Rutte, E.: Über Myophoria orbicularis Bronn aus dem Germanischen Wellenkalk. — Ber. Naturf. Ges. Freiburg i. B., **48**, 147—157, Freiburg 1958

RUTTE, E.: Kalkkrusten im östlichen Mittelmeergebiet. — Z. deutsch. Geol. Ges. **112**, 81—90, 1960

SANDBERGER, F. v.: Die Gliederung der Würzburger Trias und ihre Äquivalente. — Würzb. Naturwiss. Z. **6**, 131—208, Würzburg 1867

SANDBERGER, F. v.: Übersicht der Versteinerungen der Trias-Formation Unterfrankens. — Verh. phys. med. Ges. Würzburg, **23**, 1—46, Würzburg 1890

SCHÄFER, W.: Palökologische Beobachtungen an sessilen Tieren der Nordsee. — Senckenbergiana, **20**, 323, Frankfurt/M. 1938

SCHÄFER, W.: Zur Fazieskunde des deutschen Wattenmeeres. 1. Dangast und die Ufersäume des Jadebusens. 2. Mellum, eine Düneninsel der deutschen Nordseeküste. — Abh. Senckenberg. Naturforsch. Ges., **457**, 1941

SCHÄFER, W.: Biogene Sedimentation im Gefolge von Bioturbation. — Senckenbergiana **33**, 1—12, Frankfurt/M. 1952

SCHÄFER, W.: Zur Unterscheidung gleichförmiger Kot-Pillen meerischer Evertebraten. — Senckenbergiana **34**, 81—93, 1953

SCHÄFER, W.: Wirkungen der Benthos-Organismen auf den jungen Schichtverband. — Senckenbergiana **37**, 183—263, 1956

SCHÄFER, W.: Gesteinsbildung in Flachseebecken, am Beispiel der Jade. — Geol. Rdsch., **45**, 71—84, 1956

SCHLACH, F.: Die Gliederung des Buntsandstein, Muschelkalkes und des Unteren Keupers nach der Aufnahme auf der Section Mosbach und Rappenau. — Mitt. bad. geol. L.-A., **2**, Heidelberg 1893

SCHMIDT, H.: Die bionomische Einteilung der fossilen Meeresböden. — Fortschr. Geol. und Pal. **12**, 1—154, Berlin 1935

SCHMIDT, H.: Bionomische Probleme des deutschen Lias-Meeres. — Geol. d. Meere und Binnengewässer **3**, 238—256, Berlin 1939

SCHMIDT, H.: Ökologie und Erdgeschichte. — Z. deutsch. geol. Ges., **96**, 114—123, Berlin 1944

SCHMIDT, M.: Über Beziehungen des Wellengebirges in Mittel- und Südwestdeutschland. — Z. deutsch. geol. Ges. **60**, 60—62, Berlin 1908

SCHMIDT, M.: Die Lebewelt unserer Trias. — Öhningen 1928. Nachtrag. — Oehningen 1938

SCHMITT, Ph.: Zur Petrogenese des fränkischen Wellenkalks. — Chemie der Erde **9**, 331—364, Jena 1935

SCHNEIDER, E.: Beiträge zur Kenntnis des Trochitenkalkes des Saarlandes und der angrenzenden Gebiete. — Annales Univeritas Saraviensis, **VI**, 185—235, 1957

SCHNITTMANN, F. X.: Erläuterungen zu Blatt Hammelburg-S d. geol. Karte von Bayern, 1:25 000. — München 1931

SCHUSTER, M.: Die geologischen Verhältnisse der südlichen Rhön zwischen dem Büchelberg und der Saale. — Habil. Schrift d. TH München, München 1921

SCHUSTER, M.: Abriß der Geologie von Bayern rechts des Rheins. — Abh., **6**, München 1928

SCHUSTER, M.: Erl. zur geologischen Karte von Bayern 1:25 000, Blatt Neustadt a. d. Saale Nr. 26. — München 1933

SCHUSTER, M.: Die nutzbaren Mineralien und Gesteine Bayerns. — München 1936

SCHWARZ, A.: Spannungswirkungen an raumschwündigen Stoffen. — Senckenbergiana **14**, 300—331, Frankfurt/M. 1932

SEIFERT, H.: Röt und Muschelkalk bei Göschwitz a. d. Saale. — Beitr. z. Geol. v. Thür. **2**, 28—38, Jena 1928

SEILACHER, A.: Studien zur Palichnologie. — N. Jb. Geol. Paläontol., Abh. **96**, 421—452, Stuttgart 1953

SEILACHER, A.: Ökologie der triadischen Muschel Lima lineata (SCHLOTH.) und ihrer Epöken. — N. Jb. Geol. Paläontol., Mh., 163—183, 1954

SEILACHER, A.: An-aktualistisches Wattenmeer? — Paläontol. Z., **31**, 199—206, Stuttgart 1957

SHEPARD, P. H.: Submarine geology. — Harpers, New York 1948

SMITH, GILBERT, M.: Manual of Physiology. — Waltham (Mass.), 357, 1951

SPITZ, W.: Erläuterungen zur geol. Karte 1:25 000, Blatt Tauberbischofsheim, München 1933

STRAATEN, L. M. J. K. van: Composition and strukture of recent marine sediments in the Netherlands. — Leidens geol. Med. **19**, 1—108, 1954

STRAKHOV, N. M. (STRACHOW, N. M.): Diagensis of sediments and its significance for sedimentary or formation. — Akad. Naik. SSSR, Geol. Ser. **6**, 3, 1958 (russ.)

STRACHOW, N. M.: Tatsachen und Hypothesen zum Problem der dolomitischen Gesteine. — Nachr. d. Akad. d. Wiss. d. UdSSR, Geol. Reihe Nr. **6**, 3—22, 1958 (russ.). Auszug in Z. f. angew. Geol. **5**, 78—79, 1959, Ref. W. OESTERREICH

STRAUSS, K.: Zur Petrogenese des süddeutschen Wellenkalks. — Jb. preuß. geol. L. A., **58**, 485—546, Berlin 1938

SVERDRUP, H. U., JOHNSON, M. W. & FLEMING, R. H.: The Ocean, their Physics, Chemistry and general Biology. — Prentic Hall., 1059, 1946

TORNQUIST, A.: Die Binnenmeerfacies der Trias. — Geol. Rdsch. **3**, 111—129, 1912

TRAUTWEIN, I.: Feinstratigraphische und kleintektonische Untersuchungen im Unteren Muschelkalk der Nietlebener-Lieskauer Muschelkalkmulde. — Unveröff. Dipl.-Arb., Geol. Pal. Inst. d. Martin-Luther-Univ. Halle-Wittenberg, Halle 1957

TRUSHEIM, F.: Zur Bildungsgeschichte geschichteter Sedimente im Wattenmeer, besonders solcher mit schräger Parallelschichtung. — Senckenbergiana **11**, 47—55, Frankfurt/M. 1929

TRUSHEIM, F.: Versuche über Transport und Ablagerung von Moluskenschalen. — Senckenbergiana **13**, 124—139, 1931

TRUSHEIM, F.: Eine bedeutsame Schichtfläche aus dem Muschelkalk und ihre Auswertung durch die Meeresgeologie. — Natur und Volk, **64**, 333—340, 1934

TRUSHEIM, F.: Kleine Beobachtungen an Rippeln. — Natur und Volk, **66**, 288—293, 1936

TWENHOFEL, W. H.: Principles of Sedimentation. — McGrae-Hill Book Company, Inc. New York, Toronto, London 1950

VITALJ, D. A.: Zur Frage der Karbonatbildung im Eltensee. — Centralbl. Min. etc. II, 617, Stuttgart 1953

VOGEL, K.: Wachstumunterbrechungen bei Lamellibranchiaten und Brachiopoden. Beitrag zur Beurteilung fossiler Kleinfaunen und zur Frage „Bio-Taphocoenose". — Neues Jb. Geol. Paläontol., Abh., **109**, 109—129, Stuttgart 1959

VOIGT, E.: Der Nachweis des Phytals durch Epizoen als Kriterium der Tiefe vorzeitlicher Meere. — Geol. Rdsch., **45**, 97—119, 1956

VOIGT, E.: Die ökologische Bedeutung der Hartgründe („Hardgrounds") in der oberen Kreide. — Paläontol. Z., **33**, 129—147, 1959

VOIGT, H.: Feinstratigraphische und kleintektonische Untesuchungen des Unteren Muschelkalkes im nordwestlichen Teil der Querfurter Muschelkalkmulde. — Unveröff. Dipl.-Arb., Geol. Pal. Inst., Martin-Luther-Univ. Halle-Wittenberg, Halle 1957

VOLLRATH, P.: Beiträge zur Stratigraphie und Paläogeographie des fränkischen Wellengebirges. — Neues Jb. Min. etc. B., **50**, 120—288, Stuttgart 1924

WAGNER, E.: Beitrag zur Bionomie und Faziesbildung des Muschelkalkes bei Jena. — Jb. preuß. geol. L.-A. **42**, 381—432, Berlin 1923

WAGNER, G.: Zur Stratigraphie und Bildungsgeschichte des oberen Hauptmuschelkalkes Frankens und der unteren Lettenkohle in Franken. — Geol. Pal. Abh. Nr. **12**, 273—452, 1913

WAGNER, G.: Deutscher Muschelkalk (Wellenkalk) am Toten Meer. — Natur und Volk, **64**, 449—454, Frankfurt/M. 1934

WAGNER, G.: Riffbildungen als Maßstab geologischer Zeiträume. — Aus der Heimat **49**, 156—165, 1936

WAGNER, G.: Muschelkalkmeer und Tethys. — Jber. und Mitt. Oberrh. geol. Ver. N. F., **38**, 77—81, 1956

WAGNER, R.: Neue Beobachtungen aus dem Muschelkalk und Röt von Jena. — Abh. preuß. geol. L.-A. 1921, **42**, 1—16, Berlin 1923

WAGNER, R.: Beitrag zur genaueren Kenntnis des Muschelkalkes bei Jena. — Abh. preuß. geol. L.-A., N. F., **27**, 1—105, 1897

WASMUND, E.: Biocoenose und Thanatocoenose. — Arch. Hydrobiol., **17**, 1, 1926

WATTENBERG, H.: Das chemische Beobachtungsmaterial und seine Gewinnung — Kalziumkarbonat und Kohlensäuregehalt des Meerwassers. — Wiss. Erg. d. Deutsch. Atlantischen Expedition auf dem Vermessungsschiff „Meteor". Bd. **III**, 1925—1927

WATTENBERG, H.: Die Bedeutung anorganischer Faktoren bei der Ablagerung von Kalziumkarbonat im Meere. — Geol. d. Meere und Binnengewässer, **1**, 237—256, 1937

WATTENBERG, H.: Zur Chemie des Meerwassers. Über Spuren der vorkommenden Elemente. — Z. angew. allgem. Chemie, **236**, 339—360, 1938

WEIGELT, J.: Geologie und Nordseefauna. — Der Steinbruch **14**, Leipzig 1919

WEIGELT, J.: Die Flachmeersäume und die Gesetzmäßigkeiten ihres Baues. — Z. deutsch. geol. Ges., **77**, 14—15, 1920

WEIGELT, J.: Angewandte Geologie und Paläontologie der Flachseegesteine und das Erzlager von Salzgitter. — Fortschr. Geol. und Paläontol., **1**. H. 4, 1—128, Berlin 1923

WEIGELT, J.: Über Biostratonomie. Eine Betrachtung zu Dollos 70. Geburtstag. — „Der Geologe", **42**, 1069, Leipzig 1927

WELLER, J. M.: The conception of cyclical Sedimentation during the Pennsylvanian Period. — Illinois State. Geol. Surv., Bull., **60**, 163, Urbana 1931

WELLER, J. M.: Argument for diastrophic control of late palaeozoic cyclothems. — Bull. Amer. Soc. Petr. Geologist, **40**, 1, 51 S. 1956

WELTE, D.: Sedimentologische Untersuchung uranhaltiger Keupersedimente aus der Umgebung von Lichtenfels bei Coburg. — Diss. Würzburg 1959

WERNER, H.: Der Nachweis mariner Beeinflussung von niederrheinischen Braunkohlen mit Hilfe des Ca/Mg-Verhältnisses. — Fortschr. Geol. Rheinld. und Westf., **1**, 95—99, 1958

WILLFARTH, M.: Sedimentationsprobleme in der germanischen Senke zur Perm-Triaszeit. — Geol. Rdsch. **24**, 349—376, 1933

WILLFARTH, M.: Strömungserscheinungen im Wellenkalkmeer. — Z. deutsch. geol. Ges. **86**, 265—285, 1934

WINTER, O.: Feinstratigraphische Untersuchungen in der mittleren Trias des nördlichen Subhercyns (Weferlingen-Schönebecker Triasplatte). — Unveröff. Dipl.-Arb. Humboldt-Univ. Berlin, 1957. — Auszug in Geologie **8**, 336, Berlin 1959

WURM, A.: Über einige neue Funde aus dem Muschelkalk der Umgebung von Heidelberg (Ptychites dux GIEB und Velopecten ALBERTI (GOLDF.) PHILIPPI. — Z. deutsch. geol. Ges. **66**, 444—448, Berlin 1915

WURSTER, P.: Geometrie und Geologie von Kreuzschichtungskörpern. — Geol. Rdsch. **47**, 332—358, 1958

WÜST, G.: Über Strömungsgeschwindigkeiten und Stromengen in der atlantischen Tiefsee. — Geol. Rdsch. **47**, 187—195, 1958

YOUANG, R. B.: A comparison of certain stromatolitic rocks in the dolomit series of South Africa with marine algal sediments in the Bahamas. — Geol. Soc. South Africa Trans., **37**, 153—162, 1935

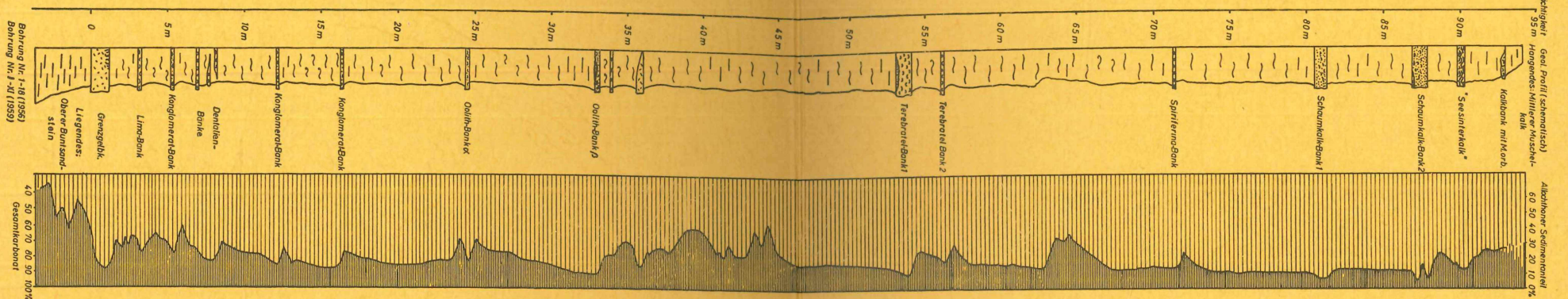
ZIPPERLICH, K.: Das untere Wellengebirge des Kraichgaues in der Mosbacher und Freudenstädter Facies. — Verh. naturhistor. med. Ver. Heidelberg, N. F., **18**, Heidelberg 1935

ZOBELL, C. E.: Studies on redox potential of marine sediments. — Bull. Amer. Assoc. Petr. Geol., **30**, 477, 1946

Tafel 1, Fig. 1:

## Zyklischer Sedimentsverlauf im Unteren Muschelkalk von Unterfranken

Geochemisches Richtprofil des Gesamtkarbonatgehaltes aus dem Gebiet Homburg—Lengfurt—Erlenbach (zusammengestellt nach Karbonatbestimmungen aus Bohrungen mit dem Salzgittergerät H-60).



WEIGELT, J.: Angewandte Geologie und Paläontologie der Flachseegesteine und das Erzlager von Salzgitter. — Fortschr. Geol. und Paläontol., **1**. H. 4, 1—128, Berlin 1923

WEIGELT, J.: Über Biostratonomie. Eine Betrachtung zu Dollos 70. Geburtstag. — „Der Geologe", **42**, 1069, Leipzig 1927

WELLER, J. M.: The conception of cyclical Sedimentation during the Pennsylvanian Period. — Illinois State. Geol. Surv., Bull., **60**, 163, Urbana 1931

WELLER, J. M.: Argument for diastrophic control of late palaeozoic cyclothems. — Bull. Amer. Soc. Petr. Geologist, **40**, 1, 51 S. 1956

WELTE, D.: Sedimentologische Untersuchung uranhaltiger Keupersedimente aus der Umgebung von Lichtenfels bei Coburg. — Diss. Würzburg 1959

WERNER, H.: Der Nachweis mariner Beeinflussung von niederrheinischen Braunkohlen mit Hilfe des Ca/Mg-Verhältnisses. — Fortschr. Geol. Rheinld. und Westf., **1**, 95—99, 1958

WILLFARTH, M.: Sedimentationsprobleme in der germanischen Senke zur Perm-Triaszeit. — Geol. Rdsch. **24**, 349—376, 1933

WILLFARTH, M.: Strömungserscheinungen im Wellenkalkmeer. — Z. deutsch. geol. Ges. **86**, 265—285, 1934

WINTER, O.: Feinstratigraphische Untersuchungen in der mittleren Trias des nördlichen Subhercyns (Weferlingen-Schönebecker Triasplatte). — Unveröff. Dipl.-Arb. Humboldt-Univ. Berlin, 1957. — Auszug in Geologie **8**, 336, Berlin 1959

WURM, A.: Über einige neue Funde aus dem Muschelkalk der Umgebung von Heidelberg (Ptychites dux GIEB und Velopecten ALBERTI (GOLDF.) PHILIPPI. — Z. deutsch. geol. Ges. **66**, 444—448, Berlin 1915

WURSTER, P.: Geometrie und Geologie von Kreuzschichtungskörpern. — Geol. Rdsch. **47**, 332—358, 1958

WÜST, G.: Über Strömungsgeschwindigkeiten und Stromengen in der atlantischen Tiefsee. — Geol. Rdsch. **47**, 187—195, 1958

YOUANG, R. B.: A comparison of certain stromatolitic rocks in the dolomit series of South Africa with marine algal sediments in the Bahamas. — Geol. Soc. South Africa Trans., **37**, 153—162, 1935

ZIPPERLICH, K.: Das untere Wellengebirge des Kraichgaues in der Mosbacher und Freudenstädter Facies. — Verh. naturhistor. med. Ver. Heidelberg, N. F., **18**, Heidelberg 1935

ZOBELL, C. E.: Studies on redox potential of marine sediments. — Bull. Amer. Assoc. Petr. Geol., **30**, 477, 1946