

*Helmut Keupp ist seit seiner Gymnasialzeit als äußerst aktives Mitglied bei der Abteilung für Geologie tätig. Nach zwei Siegen bei „Jugend forscht“, schaffte er in kürzester Zeit sein Diplom als Geologe. Nun arbeitet er an seiner Dissertation. Aus dem umfänglichen Thema stellt er in Kurzform neue Erkenntnisse, die er mit Hilfe eines Raster-Elektronen-Mikroskopes gewinnen konnte, vor. Diese Arbeit gibt einen guten Einblick in das wissenschaftliche Ringen um Details in der Entstehungsgeschichte unserer Erde.*

## **Der Solnhofener Plattenkalk — Ein neues Modell seiner Entstehung**

**Von Helmut Keupp**

### **Zusammenfassung**

Nach einer kurzen Übersicht über die wichtigsten Modelle für die Entstehung der Solnhofener Plattenkalke wird aufgrund von raster-elektronenmikroskopischen Untersuchungen ein neues Modell entwickelt. Struktur und Textur des Mikrits indizieren zusammen mit der spezifischen Verteilung von Nannofossilien einen rhythmischen Wechsel von Süßwasserüberschichtung mit normal marinen Bedingungen.

### **Einführung**

Wie die bei Pfünz und Weißenburg ausgegrabenen Römerlager belegen, wurde der Solnhofener Plattenkalk bereits in der Antike für Bauzwecke verwendet. Neben der Verwendung der Platten für Boden- und Wandbeläge bis in die heutige Zeit, erreichte der feinkörnige Kalkstein seit Ende des 18. Jahrhunderts durch die Erfindung des Stein-drucks (Alois Senefelder: 1771–1834) als bestgeeigneter Lithographiestein Weltruhm. Außer der wirtschaftlichen Bedeutung mach-

### **Summary**

*A short description is given of the most important models of the Solnhofen lagoon environment. Scanning Elektron microscopic investigations of the lithographic limestones give hints to a new model of their genesis. Texture and structure of the micritic sediment in connection with the specific contribution of nannofossils indicate a cyclic change of freshwater-overlying and normal marine conditions.*

ten auch die hervorragend erhaltenen Fossilien verschiedenster Organismengruppen Solnhofen allgemein bekannt. So waren es vor allem die ersten Funde der *Archaeopteryx* (bis heute fünf Skelettexemplare), die deshalb Aufsehen erregten, weil sie als typische „Übergangsformen“ vom Reptil zum Vogel die gerade in dieser Zeit heiß diskutierten Theorien **Darwins** über die Evolution der Organismen unterstützten und ihnen vielleicht mit zum Durchbruch verhalfen.

### **Malm-Projekt Franken, 7**

*Die Arbeit wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft durch Bereitstellung eines REM Stereoscan S4–10 am Paläontologischen Institut der Universität Erlangen unter Leitung von Prof Dr. E. Flügel in dankenswerter Weise gefördert (DFG-Projekt FI 42/24a und 42/25). Der Naturhistorischen Gesellschaft Nürnberg bin ich für die Veröffentlichung zu Dank verpflichtet.*

Malm-Projekt Franken (DFG-Programm des Paläontologischen Instituts, Erlangen: FI 42/24 und 25) Veröffentlichung Nr. 6: **Keupp H.** (1976 b): Kalkiges Nannoplankton aus den Solnhofener Schichten (Unter-Tithon, Südliche Frankenalb). — N. Jb. Geol. Paläont. (in Druck).

Anschrift des Verfassers:  
Diplom-Geologe Helmut Keupp,  
Institut für Paläontologie der Univ. Erlangen-Nürnberg,  
Loewenichstraße 28 — D-8520 Erlangen

Obwohl seit 1730 (**Baier**) eine mehr oder weniger intensive Forschung im Plattenkalkrevier betrieben wurde, ist es bis heute nicht gelungen, die Entstehung dieser dünnplattigen Sedimente widerspruchsfrei zu klären. Im folgenden soll ein kurzer Abriss gegeben werden

1. über die geologische Situation,
2. die wichtigsten bisher veröffentlichten Modelle der Entstehung des Solnhofener Plattenkalkes,
3. Soll ein neues Modell vorgestellt werden, das vor allem auf Ultrastruktur-Untersuchungen des Sediments basiert.

Auf diagenetische Fragen soll hier nur insoweit eingegangen werden, wie für das Verständnis der dargestellten Genese-Theorie notwendig erscheint.

### Die geologische Situation

Plattenkalke finden sich in der Südlichen Frankenalb vom Malm delta (Ober-Kimmeridge) bis zum Malm zeta 3 (Unter-Tithon), wobei die Fazies in der Zeit von E nach W wandert (vergl. **Zeiss** 1968). Die typischen Lithographie-Kalke, die den Solnhofener Schichten (Malm zeta 2) angehören, entwickeln sich allmählich aus Bankkalken, die weitgehend Restlücken-Stellung zwischen den Schwamm-Algen-Riffen haben. Die geographische Verbreitung geht aus der Abb. 1 hervor.

An Basis und Top der im Raum Solnhofen und Eichstätt abgebauten Plattenkalke befindet sich jeweils eine sogenannte „Krumme Lage“, ein wechselnd mächtiges Schichtpaket mit Rutsch- und Stauchfalten. Diese Horizonte stellen untermeerische Gleitungen dar (**Reis** 1909, **Krumbeck** 1928). Der auslösende Faktor für die Rutschungen des noch nicht vollständig verfestigten Sediments ist nicht gesichert (vergl. **Krumbeck** 1928, **Edlinger** 1964).

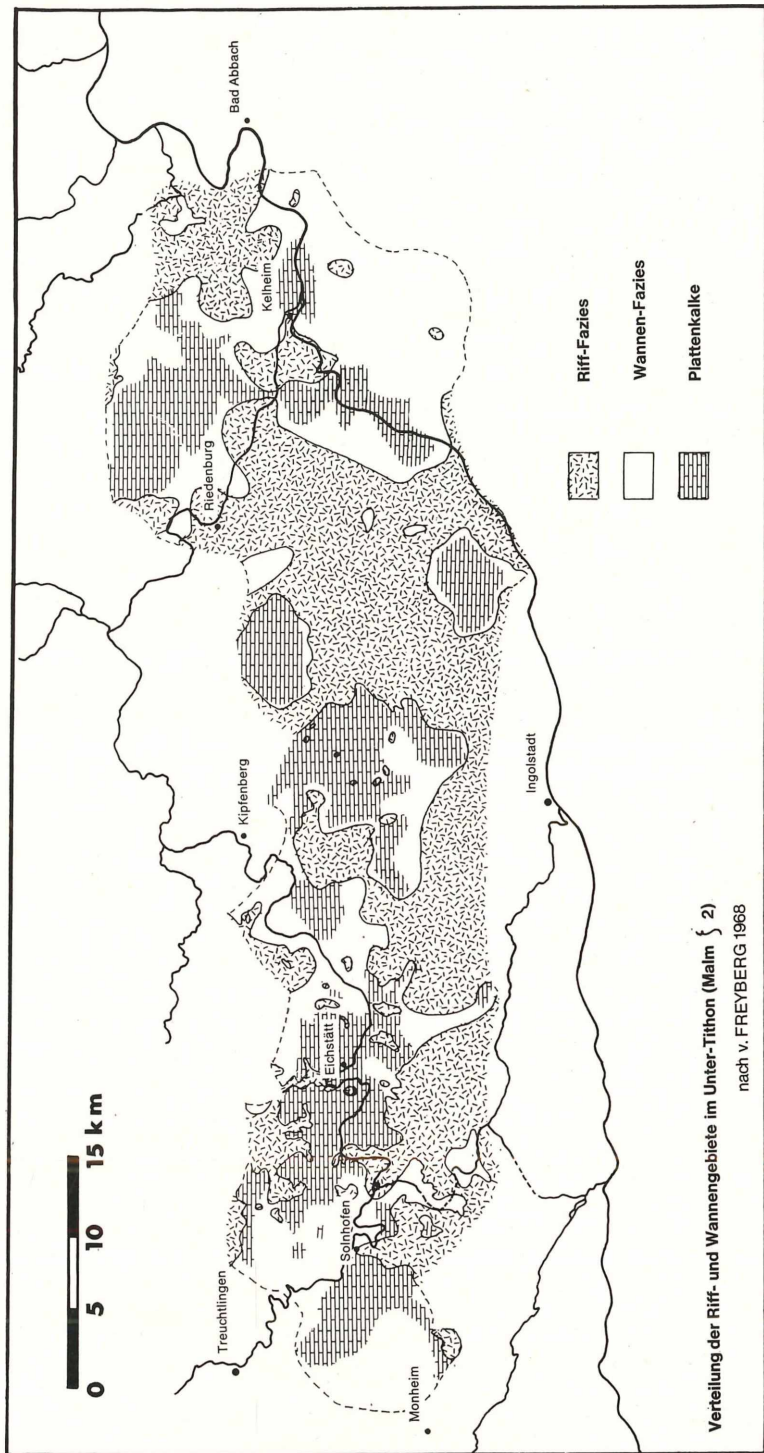
Die Aussagen über die paläogeographische Stellung des Plattenkalkreviers werden durch die erosive N-Grenze und das Abtauchen der S-Begrenzung entlang der „Donau-Flexur“ unter die alpine Molasse sehr er-

schwert. Die Ablagerung der Plattenkalke erfolgte nach **Fesefeldt** (1962) in einzelnen „Wannen“, d. h. Vertiefungen im Meeresboden, die durch die Verteilung der Schwamm-Algen-Riffe im Untergrund (Malm delta/epsilon) vorgeprägt sind. Während die Bankkalke des Malm epsilon und zeta 1 sich noch seitlich mit den Riffen verzahnen („Restlücken-Stadium“: **Roll** 1934), überlagern die Plattenkalke die inzwischen weitgehend abgestorbenen Riffe diskordant („Schüssel-Stadium“). Sie scheinen das durch flache Hänge gekennzeichnete, vorgegebene Relief allmählich aufzufüllen. In der Zusammenfassung langjähriger Kartierungsarbeiten verschiedener Mitarbeiter vermutet **Freyberg** (1968), daß z. Z. der Plattenkalkablagerung die Mitteldeutsche Schwelle sich allmählich von N nach S als Festlandsblock vorgeschoben habe, wodurch das Plattenkalkrevier in landnahe Schelfposition gelangte. Im S habe eine durchlässige Riffbarriere die Plattenkalklagune von der offenen See (= Tethys) abgeschnürt. Für die Stellung des Landes im nahen N (entgegen **Roll** 1933: Vindelizisches Land im S) sprechen nach **Freyberg** (1968):

1. Zunahme der Gesamtmächtigkeit der Tithon-Sedimente von N nach S.
2. Verteilung von „Papierschiefern“ im N und dickeren Plattenkalken im S, wobei die dünnen Platten Flachwasserzeiger sein sollen.
3. Deutliche Zunahme der Landflora und -fauna im N und E des Plattenkalkgebietes.

**Hückel** (1974) postuliert ebenfalls Küstennähe aufgrund des hohen Kaolinitgehaltes in der Tonfraktion (**Bausch** 1969 dagegen gibt den Plattenkalken eine Sonderstellung wegen ihres auffallend geringen Kaolinitgehaltes!). Wenn auch Bedenken gegen die Stellung des Landes im N geäußert wurden, wie etwa von **Zeiss** (1968), der aufgrund von speziellen Ammonitenfaunen eine Meeresverbindung nach NW-Deutschland fordert, ist die Landnähe kaum zu leugnen (s. u.). Zu der N-S-Zonierung Land-Lagune-Riff kommt eine zweite, die von E nach W geht.





Verteilung der Riff- und Wannengebiete im Unter-Tithon (Malm } 2)  
nach v. FREYBERG 1968

Abb. 1 Lageplan

So deuten die Plattenkalke von Kelheim-Painten durch Einlagerungen von Flachwasserdetritus und durch Strömungsmarken (**Streim** 1961, **Seilacher** 1963, **Janicke** 1967, **Zeiss** 1968) eine Sedimentation nahe der Wellenbasis an, während die ungestörten Schichtlagen und die feine Kornfraktion der eigentlichen Solnhofener Platten Stillwasserbedingungen belegen. Gehen wir weiter nach W, so gelangen wir schließlich jenseits des Rieses in die zeitgleichen Zementmergel, die ein noch tieferes Wasser vermuten lassen.

Vereinfacht läßt sich also das Plattenkalkrevier als große Lagune (mind. 70x30 km) mit einer Interngliederung in Wannens und Schwellen bezeichnen. Über die Bathymetrie (= Wassertiefe) ist damit jedoch noch nichts ausgesagt. Zu ihrer Rekonstruktion können das paläogeographische Relief (**Barthel** 1970: 30–60 m), die benthonische Mikrofauna (**Groiss** 1967: ca. 50 m), die Ammonitenverteilung (**Zeiss** 1968: mind. 30 m) und die fehlenden Spuren einer stärkeren Wasserbewegung (**Bantz** 1969, v. **Straaten** 1971: Unterhalb der Wellenzone) herangezogen werden. Hinsichtlich Bathymetrie und Dimension erscheint die rezente Rifflagune durchaus vergleichbar, die sich bei einer Breite von 10–32 km entlang der E-Küste von Britisch Honduras zieht (vergl. **Scholle & Kling** 1972, **Kling** 1975).

Die Ausbildung der Plattenkalke ist innerhalb der einzelnen Wannens (Abb. 1) recht unterschiedlich. So ist die „Eichstätter Fazies“ durch eine geringe Gesamtmächtigkeit (20–25 m) bei Bankstärken im mm- bis cm-Bereich charakterisiert, während die „Solnhofener Fazies“ bei Plattenstärken im cm- bis dm-Bereich 30–60 m mächtig ist. Die Unterscheidung zwischen „Bankkalken“, „Plattenkalken“ und „Schiefern“, wie sie **Freyberg** (1968) aufgrund der Flinzdicke trifft, erscheint schwierig. Es empfiehlt sich eher, nur die Plattenkalke (= Lithographiekalke) mit ebenen Schichtflächen und häufiger Latentschichtung von Bankkalken mit unebenen Schichtflächen und ohne Latentschichtung zu unterscheiden (vergl. **Keupp** 1975).

Solnhofen ist das Paradebeispiel für Mikrit (= mikro-kristalliner Kalk) im Sinne **Folks** (1959, 1962), d. h. für einen Kalk, dessen Einzelkristallite überwiegend kleiner als 4 Mikron sind. Obwohl nur im Raum Solnhofen selbst Steine vorkommen, die wegen ihrer gleichmäßigen Feinkörnigkeit für lithographische Zwecke geeignet sind, können alle Plattenkalke der Südlichen Frankenalb nach **Hadding** (1958) als Lithographiekalke angesprochen werden. Zwischen die Kalklagen (= „Flinze“) mit 97–99 %  $\text{CaCO}_3$  sind in unregelmäßigen Abständen etwas tonreichere Partien (= „Fäulen“) mit einem Karbonatgehalt von 80–90 % zwischengeschaltet. Makroskopisch sind die Flinze dicht, eben begrenzt. Die Farbe ist weiß bis gelb. Einzelne Platten im tieferen Profilabschnitt von Solnhofen sind durch erhöhten Kohlenstoffgehalt (**Gümbel** 1891, **Hüchel** 1974) grau gefärbt.

## Organismeninhalt

Auf die Gesteinsmassen umgerechnet sind die Solnhofener Plattenkalke sehr arm an Megafossilien. Die vorkommenden Organismen sind im allgemeinen hervorragend erhalten, was sich z. B. im Vorkommen fossiler Weichteile (Quallen, Insekten, Muskelgewebe verschiedener Tintenfische, Fische u. a.) dokumentiert. Die Faunen- und Florenzusammensetzung ist sehr heterogen, was sich nicht nur in der Zahl der systematischen Taxa (**Kuhn** 1961 stellt ca. 665 Arten von Megafauna bzw. -flora zusammen. Hinzu kommen zahlreiche Mikroorganismen), sondern auch in der Variabilität ihrer Ökologie widerspiegelt. Die Faunen sind mit wenigen Ausnahmen (z. B. *Leptolepis sprattiformis* **Agassiz**, *Saccocoma tenella* **Goldfuß**) individuuenarm und artenreich. Neben den marinen Organismen, die mengenmäßig nach **Walther** (1904) 99 % der Fossilien ausmachen, finden sich aber auch Süßwasser- und Landorganismen. Folgende ökologische Gruppen können unterschieden werden:



Marines Plankton: Coccolithophoriden, Calcisphaeren, Radiolarien, Echinodermen z. T. (*Saccocoma*), Medusen von Scyphozoen und Hydrozoen.

Pseudoplankton: An Tang angeheftete Gastropoden, Pelecypoden, Foraminiferen z. T.

Nekton: Ammoniten, Belemniten, andere Tintenfische, Echinodermen z. T. (*Antedon*), Crustaceen z. T., Fische, Reptilien z. T.

Vagiles Benthos: Foraminiferen, Ostracoden, Crustaceen z. T., vereinzelt Pelecypoden, Anneliden, Echinodermen z. T. (Seeigel, See- und Schlangensterne).

Terrestrische Organismen: Landpflanzen, Insekten, Reptilien z. T. (Flugsaurier, *Homoiosaurus*, *Compsognathus*), Vögel (*Archaeopteryx*).

Abgesehen von dem zu den Protisten gehörenden Benthos sind ausschließlich bodenlebende Organismen nur in wenigen Einzel-exemplaren bekannt geworden. Im großen und ganzen ist deshalb wohl richtig, daß Megabenthos längere Zeit hindurch in der Lagune nicht lebensfähig war. Ein Umstand, dem zu verdanken ist, daß die primäre Feinschichtung unverwühlt erhalten geblieben ist. So gibt es mit wenigen Ausnahmen außer den vermutlichen Häutungsspuren von *Mesolimulus* (Zeiß 1975) und gelegentlichen Spuren von *Mecochirus* kaum sichere Lebensspuren im Plattenkalk. Münch (1955) und Barthel (1964, 1970, 1972) sehen darin ein wesentliches Indiz für Faulschlamm-Bedingungen. Dieser Theorie, der sich bisher viele Autoren angeschlossen haben, steht das doch recht reiche Vorkommen benthonischer, autochthoner Mikroorganismen (vergl. Groß 1967, 1975) und das Fehlen von Pyrit entgegen.

Entsprechend den Faziesunterschieden variiert auch die Erhaltung und Artenverteilung der Organismen von Wanne zu Wanne (Abb. 1) (vergl. Walther 1904). So kommen beispielsweise die gut erhaltenen Quallen nur in der Gegend von Pfalzpaint, die Schlangensterne *Geocoma carinata* Goldfuß fast ausschließlich bei Zandt, die See-

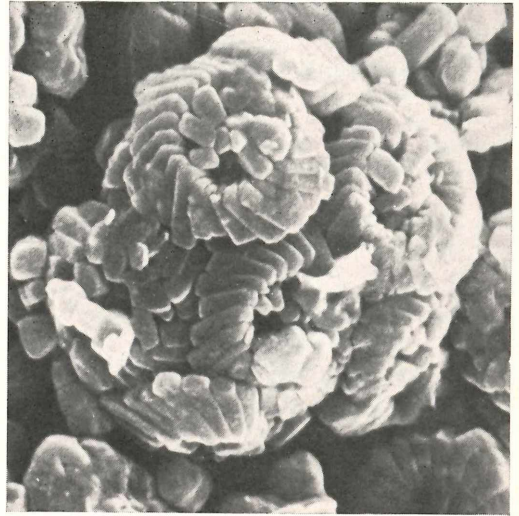


Abb. 3 Coccusphaere der Geißelalge *Cyclagelosphaera* von Schernfeld bei Eichstätt (Foto-Nr. 2184, REM-Probe S 70u-8, vergr. 6000 x).

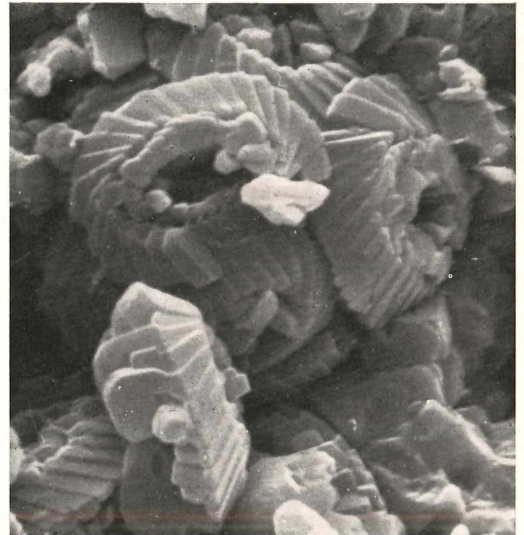
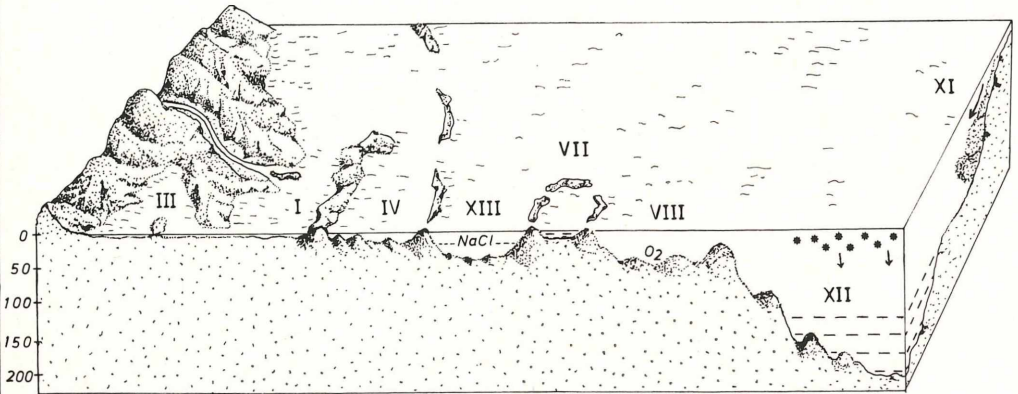
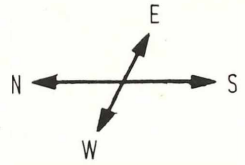


Abb. 4: Coccusphaere von *Ellipsagelosphaera* auf einer Fäulen-Latentschicht von Schrandel bei Lagenaltheim. Der isolierte Coccolith im Vordergrund zeigt deutliche diagenetische Kornvergrößerung (Foto-Nr. 3966, REM-Probe FE-1, vergr. 5650 x).

lilien *Saccocoma* überwiegend bei Eichstätt vor. Andererseits wird etwa der Fisch *Lepotolepis knorri* Blainville bei Solnhofen-Lan-

Einige Modelle für die Entstehung der Solnhofener Plattenkalke



I NEUMAYR 1887

VII BARTHEL 1964

XII BUISSONJE 1972

III SCHWERTSCHLAGER 1919

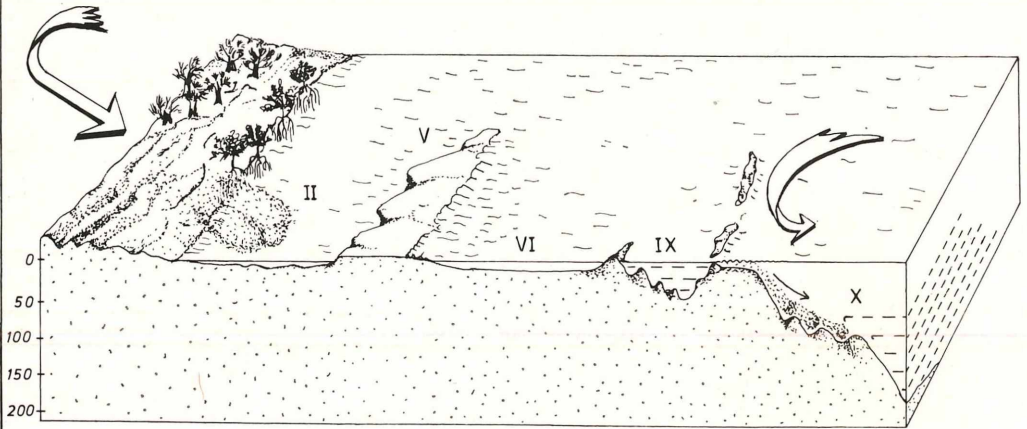
VIII GROISS 1967, BANTZ 1969

XIII JORDAN 1974

IV GÜMBEL 1891, v. FREYBERG '68

XI GOLDRING & SEILACHER 1971

\* \* \* phytoplankton



II WALTHER 1904, ABEL 1922

VI FESEFELDT 1962

X v. STRAATEN 1971

V WILFARTH 1937

IX BARTHEL 1970

— H<sub>2</sub>S-water

H. Keupp 1975

Abb. 2 Modelle verschiedener Genese der Solnhofener Plattenkalke (nach Keupp 1975)



genaltheim meist als „Gräte“ gefunden, während er bei Eichstätt eher mit vollständigem Körperumriß erhalten ist. Die Liste von Unterschieden ließe sich noch beliebig erweitern.

Für die spätere Deutung der Plattenkalkgenese ist eine seit langem bekannte Beobachtung (**Walther** 1904) wichtig: Die Fossilien liegen praktisch alle auf den Schichtflächen, wobei das Positiv, also der Organismus selbst, in der Hangendplatte vertieft ist.

## Die Entstehung der Plattenkalke aus der Sicht verschiedener Autoren (Abb. 2)

Seit etwa 250 Jahren wird mit wechselnder Intensität versucht, die Entstehung der Plattenkalke zu ergründen. Die wichtigsten Modelle sollen kurz umrissen werden. Die Abb. 2 versucht die Darstellung der von den verschiedenen Autoren erarbeiteten Vorstellung vom Ablagerungsraum Solnhofen.

Eine der ersten Deutungen gab **Baier** (1730). Er führt die Verbiegung vieler Fisch-Fossilien auf einen gewaltsamen, unnatürlichen Tod zurück, der in den plötzlich hereinbrechenden Wasser- und Schlamm-Massen während der Sintflut begründet ist.

**Frischmann** (1853) stellte erstmals alle bis dahin bekannten Fossilien aus dem Plattenkalk tabellarisch zusammen. Er meint, die Plattenkalke seien marinen Ursprungs und in ruhigen, küstennahen Gewässern abgelagert worden.

**Neumayr** (1887) vergleicht Solnhofen mit rezenten Lagunen des Barrierriffs. Er glaubt, daß der feine Karbonatstaub terrestrisch sei und fluviatil in extrem flachen Becken abgelagert wurde, die keine Verbindung zum offenen Ozean hatten.

**Gümbel** (1889, 1891) tendiert dagegen wieder zu einer normal marinen Entwicklung. Er läßt die Sedimentation in ruhigen, von Riffen begrenzten Buchten erfolgen, wobei Coccolithen einen hohen Anteil an der Sedimentbildung haben sollen. Aufgrund einer Fehlinterpretation der *Mesolimulus*-Spuren hält er kurze Austrocknungsperioden für möglich.

Mit **J. Walther** (1904) beginnt eine neue Periode der Solnhofen-Forschung. Er erkannte, daß sich die einzelnen Abbaugebiete in Fazies und Fossilführung z. T. erheblich unterscheiden. Er entwickelt das Modell des rhythmischen Wechsels

von Meeresüberflutung (Flinzbildung) und Trockenfallen der Lagune. Die Fäulen sieht er als äolisches Sediment während der Trockenperioden an. Zu dieser Zeit soll außerdem der Einfluß von Regenwasser zu einer raschen Kalzit-Zementation geführt haben, welche die hervorragende Erhaltung der am feuchten Schlamm „kleben geliebten“ Insekten ermöglichte.

**Rothpletz** (1909) ändert aufgrund einer Massenbilanz die **Walthersche** Theorie ab. Er hält die Flinze für das äolische und die Fäulen für das marine Sediment. Die Trockenlegungs-Theorie wurde noch weiter modifiziert. So führt **Schwert-schlager** (1919) den Vergleich mit einem Watt ein, während **Abel** (1922) stimmungsvoll die Dünen-Theorie schildert. Danach werden von nahen Sanddünen die feinen Kalkpartikel ausgeblasen und durch seewärtige Winde in die flache Lagune geweht. Auch er nimmt Süßwasser-Zementation für die äolischen Flinze an.

**Wilfarth** (1937) verwirft die äolische Entstehung ebenso wie das Watt. Er postuliert „Großgezeiten“, welche den Kalkschlamm von einer großen Erosionsfläche zwischen der offenen See und dem Sedimentationsraum der Plattenkalke mitgerissen hätten. Dieselbe Flut habe auch die Fauna mitgebracht.

**Caster** (1940) entkräftet das Hauptargument für extremes Flachwasser. Er zeigt, daß die vermeintlichen Wirbeltierspuren (**Oppel** 1862, **Figuier** 1866, **Abel** 1911, **Nopcsa** 1923) alle auf *Mesolimulus* zurückführbar sind.

Nach **Hadding** (1958) können die Solnhofener Plattenkalke ebenso wie die übrigen Lithographiekalke als Lagunensedimente der Litoralzone aufgefaßt werden. Das Karbonat bezieht er aus einer biochemischen Fällung durch Algen und Bakterien.

In Verbindung mit der geologischen Kartierung der Südlichen Frankenalb durch **Freyberg** und seine Mitarbeiter schreibt **Fesefeldt** (1962), daß die Plattenkalke in „Wannen“ abgelagert wurden (s. o.). Für Solnhofen nimmt er ruhiges, marines Flachwasser an. Lokales Trockenfallen des Meeresbodens hält er für möglich. 1968 faßt **Freyberg** die Ergebnisse der Kartierung zusammen. Auch er glaubt, beeinflusst von **Mayr** (1967), noch an sporadisches Trockenfallen infolge des ungleichmäßigen Vorrückens der Mitteldeutschen Schwelle nach S.

Eine erneute Wende in der Betrachtungsweise des Solnhofener Ablagerungsraumes setzt mit **Barthel** (1964) ein. Er entwickelt das Modell einer sehr flachen Atoll-Lagune mit Stagnat-Bedingungen. In späteren Publikationen, in denen er experimentell Fragen der Fossilisation diskutiert





Abb. 5: Das Innere einer Fäulenlage mit überwiegend kantengerundeten Körnern. Die großen Hohlräume gehen auf umkristallisierte Calcisphaeren (*Pithonella*) zurück (vergl. **Keupp** 1976b) (Foto-Nr. 1854, REM-Probe S 18/19-9, vergr. 1800 x).

(**Barthel** 1966, 1970, 1972) fordert er 30 bis 60 m Wassertiefe. Die Faulschlamm-Theorie wird gestützt durch **Janicke** (1969), **Hückel** (1974) und anderen Autoren.

**Bantz** (1969) plädiert für ein tieferes, normal marines Environment, ausgehend vom primären Bodenrelief. Den Wechsel Flinz - Fäule erklärt er mit Zeiten hoher bzw. geringer Sedimentationsraten.

**Janicke** (1969) macht die letzten „Beweise“ für zumindest gelegentliches Trockenfallen zunichte, indem er die vermeintlichen Trockenrisse als Synärese-Strukturen beschreibt. Unter Synärese versteht man eine subaquatische Entwässerung des Sediments.

**Jordan** (1974) weist darauf hin, daß auch eine Salzschiichtung mit übersalzene Bodenbedingungen zu einer Benthosverarmung und günstigen Fossilhaltung führen können. Für den Raum Solnhofen läßt er jedoch die Frage nach der Herkunft der Salzkonzentration offen.

**Golding & Seilacher** (1971) postulieren aufgrund der speziellen Erhaltung der *Mesolimulus*-Spuren eine Turbidit-Schüttung des Sediments, wie dies **Temmler** (1964) bei den völlig anders gearteten Nusplinger Plattenkalken (Württemberg) beschreibt.

**Van Straaten** (1971) modifiziert das Turbidit-Modell. Er stellt sich vor, daß Hurrikans oder ähnliche Stürme das feine Sediment in einer nahen, flachen Schelfsee aufwühlen. Die Suspension gleitet dann aufgrund ihrer höheren Dichte der Schwerkraft folgend in die tiefer gelegenen Plattenkalk-Wannen ab. Die Benthosarmut auch in den Fäulen versucht er durch Kommunikation des Bodenwassers mit sauerstoff-armem Wasser der offenen Tethys zu erklären. Sein Modell setzt Wassertiefen von ca. 100 m voraus.

Schließlich sei noch das Modell von **Buissonje** (1972) dargestellt: Ausgehend von der Vorstellung, daß das Kalksediment überwiegend ein Coccolithenschlamm sei (**Flügel & Franz** 1967), glaubt er an periodische „red tides“. Das plötzliche Aufblühen von Coccolithophoriden führt danach zunächst zu einer erheblichen Karbonatproduktion (Flinze!), die zusätzlich erzeugten Stoffwechselprodukte zu einer Vergiftung des Wassers und nach Absterben der Organismen einschließlich der Coccolithophoriden selbst, zu Faulschlammbedingungen am Meeresboden infolge der massenhaft anfallenden organischen Substanzen. Aus Rezentvergleichen mit Dinoflagellaten-red tides benötigt er zur ausreichenden Nährstoffversorgung eine Wassersäule von etwa 200 m.

Diese wichtigsten Genese-Theorien basieren alle auf Interpretationen der geologischen und paläogeographischen Situation, der Fossilführung und -erhaltung und der weitgehend makroskopisch erkennbaren Faziesmerkmale. Neue Fakten, die den Interpretationsspielraum einengen, sollen durch Untersuchungen der Ultrastruktur des Sediments gewonnen werden.

### Ultrastruktur der Plattenkalle

Da die Korngröße des Sediments (1–6 Mikron) eine lichtoptische Betrachtung anhand von Dünnschliffen unergiebig macht, wurde ein Raster-Elektronenmikroskop (Stereoscan S 4–10) eingesetzt. Die Proben wurden im Naturbruch belassen, die Gesteinssplitter (max. 5 x 5 mm) mit Leitsilber auf den Probenteller aufgekittet und mit Gold gesputtert.

Getrennt nach Fäulen, die als „Normalsediment“ (**Buissonje** 1972) den Faktor Zeit repräsentieren, und nach Flinzen, die wohl das Ergebnis einer raschen, episodischen Karbonatanlieferung darstellen, lassen sich folgende Beobachtungen registrieren:



## Die Fäulen

1. Sie bestehen aus 80–90 %  $\text{CaCO}_3$ . Der Rückstand setzt sich überwiegend aus Tonmineralien zusammen (**Hückel** 1974: 20–45 Prozent Illit, 5–12 % Montmorillonit, 25–30 % Kaolinit). **Hückel** (1974) postuliert aufgrund des hohen Kaolinitgehaltes Landnähe für den Ablagerungsort, (**Bausch** 1969 dagegen sieht in den Solnhofener Pattenkalken aufgrund ihres extrem geringen Kaolinitgehaltes eine Sonderfazies).

2. Die einzelnen Kalzitkristallite sind kantengerundet (Anlösung!). Neomorphe Veränderungen sind kaum feststellbar.

3. Die Körner sind nicht längsorientiert.

4. Sammelkristallisation ist nur in geringem Umfang feststellbar. Innerhalb von Hohlräumen tritt Niedermagnesium-Blockzement nur im Anfangsstadium auf.

5. Der relativ hohe Porenraum ist deshalb kaum zementiert.

6. Die Schichtflächen sind sehr stark angelöst, die Konturen der einzelnen Kristallite weitgehend verwischt, während die direkt auflagernden Körner der hangenden Schicht nur geringfügig angelöst sind.

7. Falls Coccolithen auftreten, liegen sie mit überwiegender Mehrheit auf den Schichtflächen (**Keupp** 1976 a, b).

8. Die Fäulenlagen selbst enthalten im Inneren mit Ausnahme von Calcisphaeren-Ansammlungen kaum Fossilien.

## Die Flinze

1. Sie bestehen zu 97–98 % aus  $\text{CaCO}_3$ . Die Korngröße der einzelnen Kristallite liegt zwischen 1 und 6 Mikron.

2. Die Korngestalt innerhalb der Flinze ist überwiegend euhedral. Die einzelnen Kristallite lassen sich auch unter Berücksichtigung der Diagenese, d. h. der Möglichkeit

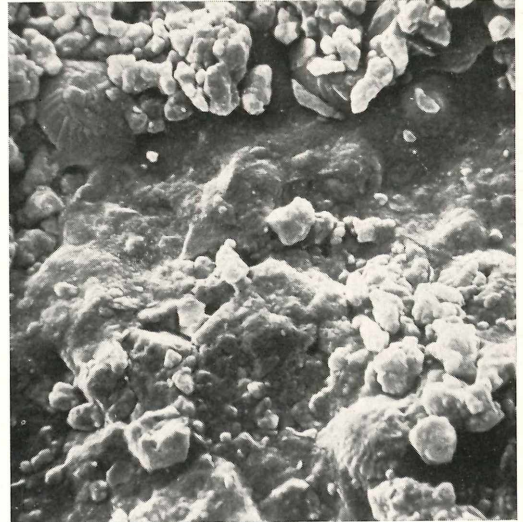


Abb. 6: Auflage der Sedimentpartikel der hangenden Lage auf einem ausgeprägten intersedimentären Lösungshorizont (Foto-Nr. 1295, REM-Probe S 18-6, vergr. 2600 x).

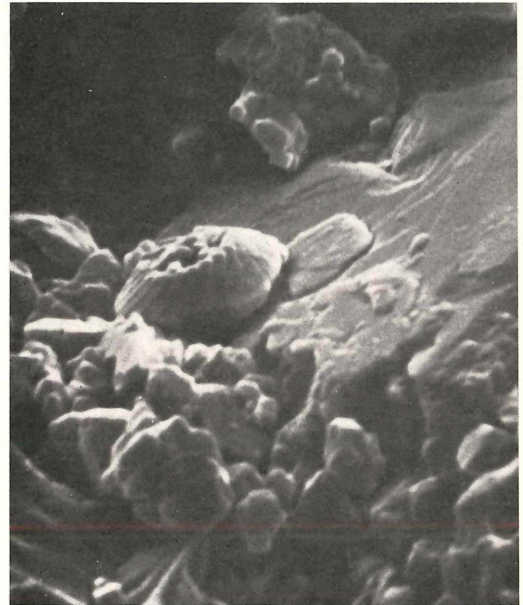


Abb. 7: Coccolith auf großem Kalzit-Kristall (= *Saccocoma*-Rest) (Foto-Nr. 2732, REM-Probe S 37-8, vergr. 5250 x).

teilweisen „Aufzehrens“ von Coccolithen durch Neomorphismus (vergl. **Scholle** 1974, S. 188–189), nur schwer auf einen Coccolithenursprung zurückführen.

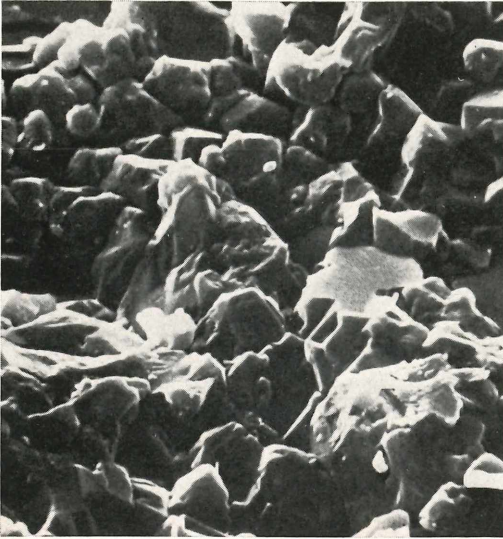


Abb. 8: Bruchfläche eines Flinzes (Foto-Nr. 2197, REM-Probe S 70u-7, vergr. 6100 x).

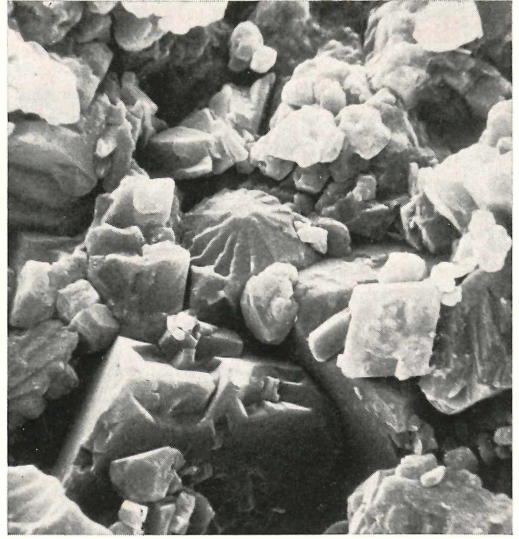


Abb. 9: Im Flinzel selten vorkommende Coccolithen: *Cyclagelosphaera* (Foto-Nr. 1192), REM-Probe S 18-1, vergr. 6400 x).

3. Die Kristalle sind gedrungene Rhomboeder (Niedermagnesium-Kalzit), ein längenbetontes Wachstum ist nicht feststellbar.

4. Trotz erhöhter Sammelkristallisation (i. S. **Füchtbauer** 1974), wohl ausgelöst durch stärkere Kompaktion gegenüber den Fäulen, ist der Porenraum noch groß (Saugfähigkeit!). Beginnende Bildung von Niedermagnesium-Blockzement in den Hohlräumen ist oft nur schwer von gleichgestalteten Sammelkristallen unterscheidbar.

5. Die Schichtflächen sind mit zunehmender Deutlichkeit der Schichtung stärker angelegt. Die Körner sind gerundet, die Konturen weitgehend verwischt.

6. Coccolithen finden sich überwiegend im Bereich der Schichtflächen, während im Inneren des Flinzes kaum identifizierbare Reste vorkommen.

### Schlußfolgerungen

Die obigen Beobachtungen lassen folgende Rückschlüsse zu:

1. Die Wechselschichtung Flinzel-Fäule ist primäres Ablagerungsprodukt. Wären die Fäulen aufgrund einer diagenetischen Tonanreicherung durch sekundäre Karbonatlösung entstanden, müßte sich der Kalküberschuß in einer sparitischen Zementation der Flinzel bemerkbar machen (vergl. **Eder** 1975).

2. Die weitgehend fehlende Zementation und infolgedessen der hohe Porenraum, schließen m. E. zusammen mit der Gestalt der einzelnen Körner eine bedeutendere primäre Anlieferung von Aragonit aus. Diese Theorie bedarf einer kurzen Erläuterung:

Der instabile Aragonit, wie er in marinem Milieu (Mg-Gehalt!) gefällt wird, kann während der Diagenese auf unterschiedliche Weise umgesetzt werden. Entweder wird er restlos ausgelöst oder unter Aufgabe der primären Aragonitgestalt in Kalzit umgewandelt. Im ersten Fall führt jedoch das mit Karbonat angereicherte Porenwasser i. a. zu einer stärkeren Kalzitcementation, im zweiten Fall zu einem völligen Strukturwandel des Sediments auf Kosten des Porenraumes (Volumenzunahme!). Trotz der verblüffenden Ähnlichkeit des vorliegenden





Abb. 10: Massenvorkommen von *Cyclagelosphaera* neben weitgehend angelösten Sedimentkörnern auf der Flinz-Oberfläche (Foto-Nr. 2171, REM-Probe S 70u-8, vergr. 4000 x).

Mikrits mit experimentell aus Aragonit erzeugten Gesteinen (**Hathaway & Robertson** 1961) scheint mir angesichts der hervorragenden Erhaltung zartester Fossilien (z. B. Insekten) auch diese Möglichkeit unwahrscheinlich. Die dritte Art der Umwandlung von Kalzit nach Aragonit wäre eine ganz allmähliche, bei der die einzelnen längsorientierten Aragonit-Kristalle mehr oder weniger pseudomorph in Kalzit übergehen. Im Solnhofener Plattenkalk finden sich aber kaum stengelige Kristallite. Die Sedimentanlieferung war deshalb wohl primär kalzitisch. Dem entspricht die weitgehende

Übereinstimmung in der Diagenese mit dem White Limestone von Nordirland und dem ebenfalls oberkretazischen Upper Chalk von Yorkshire (**Scholle** 1974). Die Annahme, der Plattenkalk sei wegen der gleichen Diagenese ebenfalls ein veränderter Coccolithenschlamm (**Wise & Hsü** 1971), ist nicht zwingend. Gegen eine oberflächliche Lösung eventuell angelieferten Aragonits vor der Überdeckung durch neues Sediment spricht das zahlreiche Auftreten fossiler Ammoniten, die eine Auslösung der Aragonitschale erst nach völliger Einbettung oft durch mehrere Flinzlagen belegen.



Abb. 11: Trotz starker neomorpher Bildungen erhalten gebliebener Coccolith (Foto-Nr. 3809, REM-Probe FE-5, vergr. 7400 x).

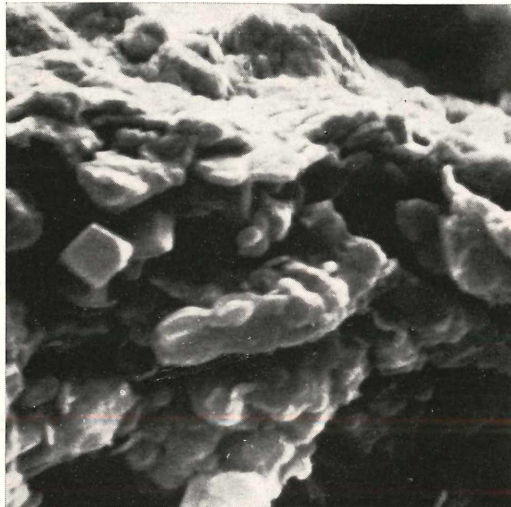


Abb. 12: Profil einer Fäule mit sehr dünner „Hardground“-Lage an der Schichtfläche (Foto-Nr. 2539, REM-Probe S 112/113-1, vergr. 7500 x).

Niedermagnesium-Kalzit kaum am Aufbau der Flinze und Fäulenlagen selbst beteiligt ist. Die Bildung des primären Kalzitsediments ist also in der Genese nicht mit ähnlich feinkörnigen Sedimenten, wie z. B. den Oberalmer Schichten in den N-Alpen oder der Schreibkreide NW-Europas vergleichbar. Die weitgehende Beschränkung der Coccolithen auf die Schichtflächen zeigt ferner, daß z. Z. des sicher marinen Einflusses außer dem Nannoplankton kaum Karbonat zur Ablagerung gelangte.

4. Da eine primäre (bio-)physikochemische Fällung von Kalzit im größeren Umfang außer aus übersalzenem Milieu (hoher Na- und  $\text{NH}_4$ -Karbonat-Gehalt!) nur aus dem Süßwasser bekannt ist (geringe Mg-Konzentration!) (vergl. **Milliman** 1974), kann für die Solnhofener Plattenkalke ein Süßwasser-einfluß vermutet werden.

5. Das Kalzitsediment wird früh bis zur plastischen Tragfähigkeit von Organismen entwässert, kompaktiert (vergl. **Wilson** 1975) und angelöst. Die  $E_H$ -Werte sind demnach gegenüber dem Oberflächenwasser, wo Kalk gefällt wird, unterschieden. Ursache dafür kann einmal der Zerfall organischer Substanzen sein, die in den Zeiten geringer Sedimentation angeliefert werden (Coccolithen!) und/oder eine Wasserschichtung. Für eine solche scheint die spezialisierte, autochthone Foraminiferenfauna, die **Groiß** 1967 aus Fäulen des Eichstätter Plattenkalkes beschreibt, zu sprechen. Das bedeutet: normal marin in Bodennähe mit Süßwasserüberschichtung. Gegen eine diagenetische Anlösung beispielsweise in Verbindung mit  $\text{H}_2\text{S}$ -Bildung in tieferen Sedimentschichten spricht die Konzentration der Lösung auf dünne Schichtflächen und die fehlende Zementation in den darüberliegenden Schichten. Es kommt also kurz nach der Sedimentation zur Bildung eines „Hardground“ mit intersedimentärer Oberflächenlösung. Inwieweit die primären Lösungsflächen durch zirkulierendes Grundwasser, das sich naturgemäß an die vorgegebenen Trennflächen hält, überprägt wird, bleibt weiteren Untersuchungen vorbehalten.

3. Die spezifische Verteilung der Coccolithen im Sediment zeigt, daß der organische



6. Der „Hardground“ ist so widerstandsfähig, daß auch größere Organismen, die abgestorben angeliefert werden, kaum einsinken. Die darauf folgende Kalkfällung deckt sie rasch zu. Der Kontakt des Fossils zur zwar noch plastischen Unterlage ist relativ gering, was sich in der Tatsache bemerkbar macht, daß das Positiv stets in der Hangendplatte vertieft bleibt.

7. Aus der guten Fossilerhaltung – z. B. Echiniden mit Stachelkleid – geht hervor, daß die Sedimentanlieferung während der Flinzbildung sehr rasch erfolgte (**Banz** 1969: maximal wenige Tage). Zumindest bei den feinkörnigen Kalken im Ablagerungsbereich von Solnhofen und Eichstätt fehlt innerhalb eines Flinzes eine Gradierung nach Korngrößen. Die Möglichkeit zunächst thixotropen Verhaltens des feinkörnigen Sediments läßt aufgrund der fehlenden Gradierung allein eine Suspensionsschüttung nicht ausschließen. Fehlende Turbulenzzeiger jedoch, die m. E. auch bei langsamem gravitativem Abgleiten einer Kalksuspension auftreten müßten, zumal wenn sie imstande war, größere Organismen mitzureißen (**v. Straaten** 1971), machen diese Möglichkeit der Sedimentanlieferung unwahrscheinlich. Weist doch die gut erhaltene Feinschichtung, zusammen mit vollständigen, bzw. an Ort und Stelle zerfallenen Coccusphaeren (vergl. **Keupp** 1976 a, b) auf den Schichtflächen auf eine zumindest nicht partikelbewegende Strömungsenergie hin. Der Anteil an erkennbarem organogenen Karbonatdetritus ist auch innerhalb der diagenetisch wenig veränderten Fäulen gering. All diese Beobachtungen machen im Verein mit dem Fehlen stärkerer Strömungsindikatoren eine vom nahen Flachwasser ausgehende Turbidit-Schüttung (**Goldring & Seilacher** 1971, **v. Straaten** 1971) unwahrscheinlich. Als Ursache für die Karbonatbildung muß daher eine physikochemische Kalzitfällung im Ruhigwasser angenommen werden (**Hadding** 1958), wobei der Anteil der Fällung durch Organistentätigkeit unbestimmt ist.

## Ein neues Modell für die Genese der Solnhofener Plattenkalke

Die bisher dargestellten Argumente und Schlußfolgerungen lassen sich zu folgendem Modell der Plattenkalk-Entstehung von Solnhofen und Eichstätt vereinen:

Eine große Lagune (mind. 70 x 30 km) wird im S durch eine durchlässige Riffbarriere bzw. Plattform von der offenen See weitgehend aber nicht vollständig abgeschnürt. Die N-Begrenzung bildet der Festlandsblock der Mitteldeutschen Schwelle. Entsprechend der Schelflagune von Britisch Honduras (**Scholle & Kling** 1972), die von N nach S an Tiefe zunimmt, wird die durch ein seichtes Internrelief gegliederte Solnhofener Lagune von E nach W tiefer. Vielleicht jahreszeitlich bedingt, gewinnt während der Regenzeit (Winter) Süßwassereinfluß vom Festland her an Bedeutung. Zumindest im Oberflächenwasser erfolgt eine Aussüßung, während in Bodennähe mehr oder weniger normal marines Milieu erhalten bleiben kann. Vorbedingung für eine solche Wasserschichtung ist eine Wassersäule von mindestens 20 m (**Schmalz** 1969, **Barthel** 1970). Bei Annahme einer solchen Dichteschichtung bereitet die Gegenwart der benthonischen Mikrofauna (**Groiß** 1967) keine Deutungsschwierigkeiten. Die Süßwasserüberschichtung bringt auch die Landorganismen, wie mumifizierte Flugechsen und Urvögel (vergl. **Wellnhöfer** 1974), ferner Süßwasserinsekten, Landpflanzen u. a. mit.

(Bio ?-)physikochemische (z. T. Erwärmung!) Kalzitfällung im kalkgesättigtem Süßwasser (karbonatreiches Hinterland!) führt zu einer raschen Sedimentproduktion. Einen etwa vergleichbaren Vorgang beschreiben **Busson, Ludlam & Noel** (1972) vom Green Lake, wo rezente Süßwasserlaminite entstehen. Jedoch können in diesen Vergleich nur die weißen Kalzitlagen einbezogen werden, die physikochemisch während der Sommermonate gefällt werden. Die gerade am Boden der Solnhofener Lagune liegenden Organismen (z. T. vielleicht durch den Süßwassereinfluß abgestorben: z. B. *Saccocoma*) wer-



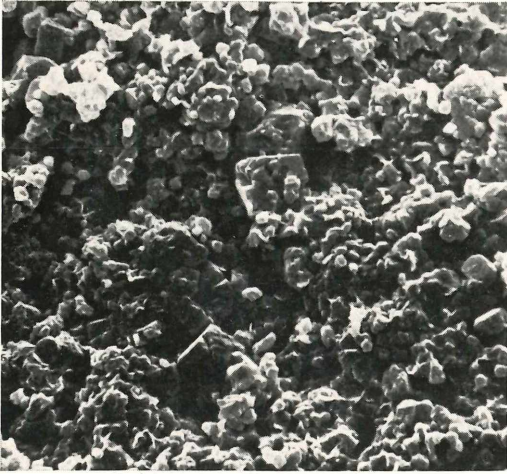


Abb. 14: Oberfläche einer Latentschicht mit größerem Anteil idiomorpher Kalzitkristallite (Foto-Nr. 2627, REM-Probe S 117-9, vergr. 1100 x).

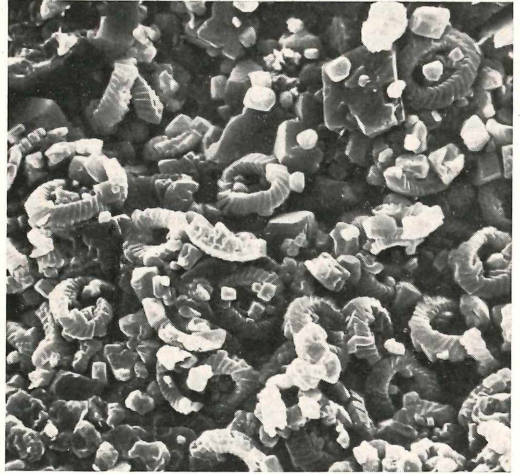


Abb. 15: Coccolithenanhäufung auf einer Latentschicht. Deutlich sind die durch Sammelkristallisation entstandenen Kalzit-Rhomboeder erkennbar. (Foto-Nr. 2241, REM-Probe S 70u-4, vergr. 3600 x).



Abb. 13: Vier Coccospaeren von *Watznaueria barnesae* (Black 1959) auf einer Flinz-Schichtfläche. Die ausgezeichnete Erhaltung der Coccospaeren macht wahrscheinlich, daß die Solnhofener Lagune Lebensraum der Coccolithophoriden war (Foto-Nr. 382, REM-Probe E1/T-9, vergr. 2200 x).

den in ihrem momentanen Verwesungs-  
zustand eingebettet. Der im Sommer allmählich versiegende Süßwassernachschub ermöglicht über die Barriere im S, z. T. über Kanäle, die Wiederherstellung normal ma-

ruiner Bedingungen auch im Oberflächenwasser. Marines Plankton und Nekton zieht wieder ein, um dort zu leben. Gerade von Coccolithophoriden haben **Scholle & Kling** (1972) und **Kling** (1975) bekannt gemacht, daß sie auch bei schwankendem Salzgehalt in vergleichbaren Lagunen lebensfähig sind.

Die  $E_H$ -Werte in Bodennähe sind während der Fällungsperiode gegenüber dem überschichtenden Wasser verändert. Es kommt unmittelbar nach der Ablagerung der Kalzitkörner zu ihrer Anlösung. In den dünnen Fäulenlagen ist dieser Vorgang wohl durch den erhöhten Tongehalt und der deshalb geringeren Porenwasserzirkulation kaum durch diagenetische Sammelkristallisation rückgängig gemacht. An der Oberfläche jeder Sedimentlage, wo das Meerwasser und die Oberflächenverwesung von Organismen angreifen können, erfolgt unterschiedlich starke Anlösung. Je nach Zeitintervall bis zur nächsten Kalzitfällung ist der Anlösungseffekt stark oder schwach, entstehen leicht spaltende deutliche Schichtflächen oder Latentschichten. Je nach Zeitintervall wird zudem mehr oder weniger Tontrübe sedimentiert, die eine spätere Sammelkristallisation, und somit Verzahnung der einzelnen Schichtflächen, in unterschiedlichem Maße zuläßt.



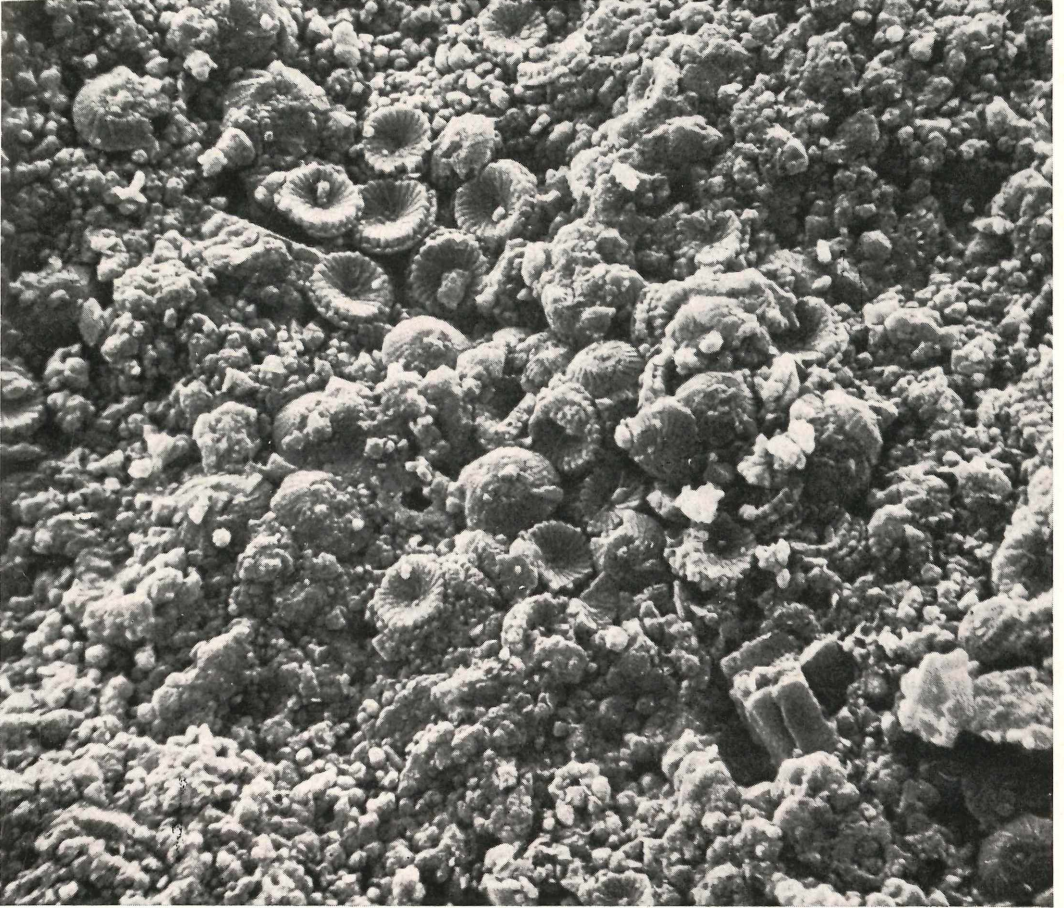


Abb. 16: Anhäufung (= zerfallene Coccospaeren) von *Cyclagelosphaera margereli* Noel 1965 auf einer Flinz-Oberfläche (Foto-Nr. 868, REM-Probe S 18-1, vergr. 1650 x).

Auf die sehr interessanten Detailfragen der Diagenese in den Plattenkalken soll an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden. Ihre Darstellung bleibt einer späteren Publikation vorbehalten.

Der zeitlich sicher nicht streng regelmäßige, aber stetig wiederkehrende Zyklus Salzwasser-Süßwasserüberschichtung führt schließlich zu dem bekannten Bild der Plattenkalke. Jeder Fällungsperiode entspricht eine Sedimentlage, d. h. ein Flinz repräsentiert so viele Sedimentationsphasen, wie Latentschichten vorhanden sind, und eine Fäule so viele, wie einzelne Lagen auftreten. Die

Tatsache, daß Flinzstärken bis 30 cm auftreten, veranlaßte **Rothpletz** (1909) und **v. Straaten** (1971) nicht an eine chemische Kalkfällung zu glauben. Setzt man jedoch jeder Latentschicht eine Fällungsperiode gleich, erscheint die Massenbilanz wesentlich günstiger. So besteht z. B. ein 10,5 cm dicker Flinz vom Maxberg bei Solnhofen aus 34 einzelnen Latentschichten.

Der wohl im allgemeinen in rascher Sequenz wiederkehrende Sedimentanfall kann einer der Gründe dafür sein, daß sich trotz  $O_2$ -führender Bodenverhältnisse Megabenthos kaum ansiedeln kann. Sicher spielt hier

auch die spezifische Konsistenz des Bodens eine Rolle. So beschreibt **Groß** (1967) in Anlehnung an **Schmidt** (1935), daß Foraminiferen auf Weichböden existieren können, auf denen für größere Benthonten eine Besiedlung unmöglich ist. Inwieweit die speziellen (bio-?)-physikalisch-chemischen Prozesse, welche zur frühen submarinen Verfestigung des Sediments führten, sich auf mögliche Benthonten auswirken konnte, muß offen bleiben, da rezent keine vergleichbaren Bedingungen bekannt sind (**Wilson** 1975, S. 279).

Der Vergleich mit der rezenten Lagune von Britisch Honduras (**Scholle & Kling** 1972) gilt nur für die Geomorphologie und die Möglichkeit einer Süßwasser-Überschichtung, nicht aber für den Sedimentationsmechanismus.

## Vorbehalte

Das vorgestellte Modell der Plattenkalk-Lagune von Solnhofen ist als Arbeitstheorie aufzufassen. Sollte sich herausstellen, daß die paläogeographischen und sedimentologischen Voraussetzungen für das Modell, die überwiegend auf den Ergebnissen anderer Autoren und Untersuchungen basieren, revidiert werden müssen, ist das Modell entsprechend zu verändern oder ganz zu verwerfen. So muß es fallen, wenn:

1. eine größere Verbreitung zeitgleicher Plattenkalke in Bohrungen unter der alpinen Molasse angetroffen wird, da eine kalkbringende Oberflächenwasser-Aus-süßung nur auf einem relativ begrenzten Areal denkbar ist.
2. sich die südlich begrenzende Barriere als nicht so relevant erweist, daß sie einen teilweisen Abschluß der Lagune bewirken konnte.
3. ein Diagenese-Prozeß gefunden wird, der bei Aragonit-haltigen Sedimenten ein ähnliches Erscheinungsbild erzeugt, wie bei primär kalzitischen.
4. ein Mechanismus für primäre Kalzitfällung auch im marinen Milieu gefunden wird.
5. sich die Calcisphaeren als weitgehender Sedimentlieferant, wie sich dies für die Fäulen z. T. herausgestellt hat, auch für die Flinze bei weiteren Untersuchungen bestätigen sollte.

Eingang des Manuskriptes: 15. 12. 1975

Fotos: H. Keupp

## Literaturverzeichnis

- Abel, O.** (1911): Die Vorfahren der Vögel und ihre Lebensweise. — Verh. Zool. Bot. Ges. Wien, **61**, 144–191, Wien.
- Abel, O.** (1922): Lebensbilder der Vorzeit. — 643 S., Jena.
- Baier, J. J.** (1730): Sciagraphia Musei sui accedunt Supplementa Oryctographiae Noricae. — 64 S., 3 Taf., Nürnberg.
- Bantz, U.** (1969): Echinoidea aus Plattenkalken der Altmühlalb und ihre Biostratonomie. — Erlanger geol. Abh., **78**, 35 S., 7 Taf., Erlangen.
- Barthel, K. W.** (1964): Zur Entstehung der Solnhofer Plattenkalke (unteres Untertithon). — Mitt. Bayer. Staatssamml. Paläont. hist. Geol., **4**, 37–69, 4 Taf., München.
- Barthel, K. W.** (1966): Concentric marks: current indicators. — J. Sed. Petrol., **36**, 1156–1162, Tulsa.
- Barthel, K. W.** (1970): On the deposition of the Solnhofen lithographic limestone (Lower Tithonian, Bavaria, Germany). — N. Jb. Geol. Pal. Abh., **135**, 1, 1–18, 4 Taf., Stuttgart.
- Barthel, K. W.** (1972): The genesis of the Solnhofen lithographic limestone (Low. Tithonian): further data and comments. — N. Jb. Geol. Paläont. Mh., Jg. 1972, **3**, 133–145, Stuttgart.



- Bausch, W.** (1969): Tonmineralprovinzen in Malmkalken. — Habilitationsschrift (unveröffentl.), Universität Erlangen.
- Buissonje, P. H. de** (1972): Recurrent red tides, a possible origin of the Solnhofen limestone. — Koninkl. Nederl. Akad. Wet., Ser. B, **75**, 2, 152–177, Amsterdam.
- Busson, G., Ludlam, S. D. & Noel, D.** (1972): L'importance des Diatomées dans les dépôts actuels varvés (alternance de couches annuelles) de Green Lake (près Fayetteville N. Y.), modèle de sédimentation confinée. — C. R. Acad. Sc., **274**, Sér. D, 3044–3047, Paris.
- Caster, K. E.** (1940): Die sogenannten „Wirbeltierspuren“ und die Limulus-Fährten der Solnhofener Plattenkalke. — Pal. Z., **22**, 19–29, Berlin.
- Eder, F. W.** (1975): Riffe und Riff-detritogene Plattenkalke. — Ber. SFB 48, Projektber. A (varisk. Geosynklinale), 117–143, Göttingen.
- Edlinger, G. v.** (1964): Faziesverhältnisse und Tektonik der Malmtafel nördlich Eichstätt/Mfr. — Erlanger geol. Abh., **56**, 75 S., 2 Taf., Erlangen.
- Fesefeldt, K.** (1962): Schichtenfolge und Lagerung des oberen Weißjura zwischen Solnhofen und der Donau (Südliche Frankenalb). — Erlanger geol. Abh., **46**, 80 S., 2 Taf., Erlangen.
- Figuer, L.** (1866): La terre avant dé luge. — Paris.
- Flügel, E. & Franz, H. E.** (1967): Elektronenmikroskopischer Nachweis von Coccolithen im Solnhofener Plattenkalk (Ober-Jura). — N. Jb. Geol. Paläontol. Abh., **127**, 3, 245–263, Taf. 24–26, Stuttgart.
- Folk, R. L.** (1959): Practical petrographic classification of limestones. — Bull. Am. Assoc. Petrol. Geol., **43**, 1–38, Tulsa.
- Folk, R. L.** (1962): Spectral subdivision of limestone types. — In W. E. Ham: Classification of carbonate rocks, Am. Assoc. Petrol. Geol., 62–84, Tulsa.
- Freyberg, B. v.** (1968): Übersicht über den Malm der Altmühlalb. — Erlanger geol. Abh., **70**, 40 S., Erlangen.
- Frischmann, L.** (1853): Versuch einer Zusammenstellung der bis jetzt bekannten fossilen Thier- und Pflanzenüberreste des lithographischen Kalkschiefers in Bayern. — Lyceumsprogramm, 46 S., Eichstätt.
- Füchtbauer, H.** (1974): Sedimentary Petrology-Part II: Sediments an Sedimentary Rocks 1. — 464 S., Stuttgart (Schweizerbart'scher Verlag).
- Goldring, R. & Seilacher, A.** (1971): Limulid undertracks and their sedimentological implications. — N. Jb. Geol. Paläont. Abh., **137**, 3, 422–442, Stuttgart.
- Groiss, J. TH.** (1967): Mikropaläontologische Untersuchungen der Solnhofener Schichten im Gebiet um Eichstätt (Südliche Frankenalb). — Erlanger geol. Abh., **66**, 75–93, Taf. 5, Erlangen.
- Groiss, J. TH.** (1975): Eine Spurenplatte mit Kouphichium (Mesolimulus) walchi (Desmarest, 1822) aus Solnhofen. — Geol. Bl. NO-Bayern **25**, 2/3, 80–95, 1 Taf., Erlangen.
- Gümbel, C. W. v.** (1889): Kurze Erläuterungen zu dem Blatte Ingolstadt (No. XV) der geognostischen Karte des Königreiches Bayern. — Cassel.
- Gümbel, C. W. v.** (1891): Geognostische Beschreibung des Königreiches Bayern-IV Geognostische Beschreibung der Fränkischen Alb (Frankenjura). — 763 S., Cassel.
- Hadding, A.** (1958): Origin of the lithographic limestones. — Kungl. Fysiogr. Sällsk. I Lund Förhand., **28**, 4, 21–32, Lund.
- Hathaway, J. C. & Robertson, E. C.** (1971): Microtexture of artificially consolidated aragonitic mud. — U. S. Geol. Survey Professional Paper **426-C**, Art. 257, 301–304, Washington.
- Hüchel, U.** (1974): Vergleich des Mineralbestandes der Plattenkalke Solnhofens und des Libanon mit anderen Kalken. — N. Jb. Geol. Paläont. Abh., **145**, 2, 153–182, Stuttgart.
- Janicke, V.** (1967): Fossil-Sediment-Strukturen in unterthionischen Plattenkalken der südlichen Frankenalb. — Inaugural-Dissertation, München.
- Janicke, V.** (1969): Untersuchungen über den Biotop der Solnhofener Plattenkalke. — Mitt. Bayer. Staatssamm. Paläont. hist. Geol., **9**, 117–181, Taf. 6–10, München.
- Jordan, R.** (1974): Salz- und Erdöl/Erdgas-Austritt als faziesbestimmende Faktoren im Mesozoikum Nordwest-Deutschlands. — Geol. Jb. A, **13**, 1–64, Hannover.
- Keupp, H.** (1975): Solnhofen Lithographic Limestones. — Guide book, 1. Intern. Symp. Fossil Algae, 178–188, Erlangen.
- Keupp, H.** (1976a): Neue Coccolithen aus dem Solnhofener Plattenkalk I. — Geol. Bl. NO-Bayern, **26**, 1/2 (in Druck), Erlangen.
- Keupp, H.** (1976b): Kalkiges Nannoplankton aus den Solnhofener Schichten (Unter-Tithon, Südliche Frankenalb). — N. Jb. Geol. Paläontol. Mh. (in Druck), Stuttgart.
- Kling, S. A.** (1975): A lagoonal coccolithophore flora from Belize (British Honduras). — Micropaleontology, **21**, 1, 1–13, Taf. 1–3, New York.
- Krumbeck, L.** (1928): Faltung, untermeerische Gleitfaltung und Gleitstauchung im Tithon der Altmühlalb. — N. Jb. Min. etc., Beil. — Bd. **60**, Abt. B, 113–166, Taf. 6–11, Stuttgart.
- Kuhn, O.** (1961): Die Tier- und Pflanzenwelt des Solnhofener Schiefers. — Geol. Bav. **48**, 68 S., München.
- Mayr, F. X.** (1967): Paläobiologie und Stratonomie der Plattenkalke der Altmühlalb. — Erlanger geol. Abh., **67**, 40 S., Taf., Erlangen.
- Milliman, J. D.** (1974): Recent Sedimentary Carbonates 1: Marine Carbonates. — 375 S., Berlin-Heidelberg-New York (Springer).
- Münch, W.** (1955): Beitrag zur Kenntnis der Solnhofener Plattenkalke. — Diplomarbeit (unveröff.), München, Inst. f. Petrographie.
- Neumayr, M.** (1887): Erdgeschichte — Bd. 2 — 879 S., 12 Taf., 2 Karten, Leipzig.

- Nopcsa, F. v.** (1923): Die Familien der Reptilien. — Fortschr. Geol. Palaeontol., **2**, 1–210, Berlin.
- Oppel, A.** (1862): Über Fährten im lithographischen Schiefer (Ichnites lithographicus). — Palaeontol. Mitt. Mus. Bayer. Staates, 121–125, Taf. 39, Stuttgart.
- Reis, O.** (1909): Beobachtungen über Schichtenfolge und Gesteinsausbildung in der fränkischen Unteren und Mittleren Trias. — Geogn. Jh., **22**, 1–285, Taf. 1–11, München.
- Roll, A.** (1933): Über den Oberen Malm der südwestlichen Frankenalb. — N. Jb. Min. etc., Abt. B, Jg. 1933, 553–564, Stuttgart.
- Roll, A.** (1934): Form, Bau und Entstehung der Schwammstolzen im süddeutschen Malm. — Paläontol. Z., **16**, 197–246, Berlin.
- Rothpletz, A.** (1909): Über die Einbettung der Ammoniten in die Solnhofener Schichten. — Abh. Bayer. Akad. Wiss., 2. Kl., **24**, 2, 313–337, 2 Taf., München.
- Schmalz, R. F.** (1969): Deep-Water Evaporite Deposition: A Genetic Model. — Bull. Am. Assoc. Petrol. Geol., **53**, 4, 798–823, Tulsa.
- Schmidt, H.** (1935): Die binomische Einteilung der fossilen Meeresböden. — Fortschr. Geol. Paläontol., **12**, 1–154, Berlin.
- Scholle, P. A.** (1974): Diagenesis of Upper Cretaceous chalks from England, Northern Ireland and the North Sea. — In **K. J. Hsü & H. C. Jenkyns**: Pelagic Sediments: on Land and under the Sea, Spec. Publ. Int. Ass. Sediment., **1**, 177–210, Oxford.
- Scholle, P. A. & Kling, S. A.** (1972): Southern British Honduras: Lagoonal coccolith ooze. — J. Sed. Petrol., **42**, 1, 195–204.
- Schwertschlag, J. J.** (1919): Die lithographischen Plattenkalke des obersten Weißjura in Bayern. — 36 S., München (Verl. Natur und Kultur).
- Seilacher, A.** (1963): Umlagerung und Rolltransport von Cephalopoden-Gehäusen. — N. Jb. Geol. Paläontol. Mh., **1963**, **11**, 593–615, Stuttgart.
- Straaten, L. M. J. U v.** (1971): Origin of Solnhofen limestone. — Geol. Mijnbouw, **50**, 1, 3–8.
- Streim, W.** (1961): Stratigraphie, Fazies und Lagerungsverhältnisse des Malm bei Dietfurt und Hemau (Südliche Frankenalb). — Erlanger geol. Abh., **38**, 49 S., 1 Karte, Erlangen.
- Templer, H.** (1964): Über die Schiefer- und Plattenkalke des Weißen Jura der Schwäbischen Alb (Württemberg). — Arb. Geol. Paläont. Inst. Univ. Stuttgart (TH), N. F. **43**, Stuttgart.
- Walther, J.** (1904): Die Fauna der Solnhofener Plattenkalke. Bionomisch betrachtet. — Festschr. Mediz. Naturw. Ges. Jena, **11**, 135–214, 1 Taf., Jena.
- Wellenhofer, P.** (1974): Das fünfte Skelettexemplar von Archaeopteryx. — Palaeontogr., A, **147**, **169–216**, 4 Taf. Stuttgart.
- Wilfarth, M.** (1937): Die Gezeiten im Meere des Malm bei Solnhofen. — Z. dt. geol. Ges., **88**, 57–61, Berlin.
- Wilson, J. L.** (1975): Carbonate Facies in Geologic History. — 471 S., 30 Taf., Berlin-Heidelberg-New York (Springer).
- Wise, S. W. & Hsü, K. J.** (1971): Genesis and Lithification of a Deep Sea Chalk. — Eclogae geol. Helv. **64**, 2, 273–278, Basel.
- Zeiss, A.** (1968): Untersuchungen zur Paläontologie der Cephalopoden des Unter-Tithon der Südlichen Frankenalb. — Bayer. Akad. Wiss. Mathem.-naturw. Kl., Abh. NF., **132**, 191 S., 27 Taf., München.
- Zeiss, A.** (1975): Zur ätiologischen Deutung der großen Erlanger Limulusfährte. — Geol. Bl. NO-Bayern, **25**, 2/3, 95–99, Erlangen.



# ZOBODAT - [www.zobodat.at](http://www.zobodat.at)

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Natur und Mensch - Jahresmitteilungen der naturhistorischen Gesellschaft Nürnberg e.V.](#)

Jahr/Year: 1975

Band/Volume: [1975](#)

Autor(en)/Author(s): Keupp Helmut

Artikel/Article: [Der Solnhofener Plattenkalk — Ein neues Modell seiner Entstehung 19-36](#)