

# Ein Hartgrund als neuer Aspekt bei der Interpretation der untertithonischen Solnhofener Plattenkalke

## Zusammenfassung

Beschrieben wird der Erstnachweis eines echten Hartgrundes als anormaler Übergang der Solnhofener Schichten des Malm Zeta 2b zu den Mörnsheimer Schichten des Malm Zeta 3 (Untertithon). Es werden die Ergebnisse von palökologischen Studien präsentiert, die auch neue Aussagen bezüglich der abiotischer Umweltfaktoren gegen Ende der Ablagerung der Solnhofener Plattenkalke zulassen. Zur Ablagerungszeit des Hartgrundes existierte eine teilweise lagunäre Umgebung mit schwachen Strömungen und gelegentlichen größeren Turbulenzen. Die Wassertiefe wird auf 30-50 m geschätzt. Auftretende Spurenfossilien (*Thalassinoides*) und die fleckenhafte Besiedlung des Hartgrundes mit sessilen Crinoiden (v.a. *Millericrinus*) und Bivalven der Gattung *Atreta* deutet auf zeitweilig günstige Lebensbedingungen am Boden der Solnhofener-Langenaltheimer Wanne hin. Eine Bodenzone mit Stagnatbedingungen kann während der Besiedlung nicht bestanden haben.

## Abstract

The first evidence of a genuine hardground is described as an abnormal transition from the Solnhofen Beds of the Malm Zeta 2b to the Mörnsheim Beds of the Malm Zeta 3 (early Tithonian). Paleoecological studies permit new predications about the abiotic environmental factors at the end of the Solnhofen plattenkalk deposition. At the time of formation of the hardground, a partially lagoonal environment with weak currents and occasional larger turbulences existed. The water depth is estimated at 30-50 m. The occurrence of trace fossils (*Thalassinoides*) and patches of sessile crinoids (mainly *Millericrinus*) and bivalves of the genus *Atreta* on the hardground points to temporarily favorable living conditions at the bottom of the Solnhofen-Langenaltheim Basin. A bottom zone with stagnant water conditions cannot have existed during this colonization.

## 1. Einleitung

Der vorliegende Artikel, der aus einer an der Universität Erlangen-Nürnberg durchgeführten Diplomarbeit entstand, stellt die palökologischen Ergebnisse<sup>1</sup> der Untersuchung einer in den Plattenkalken bisher einmaligen Hartgrundfläche vor.

Hartgründe eignen sich aufgrund der Erhaltung benthischer Organismen in Lebensstellung sowie dem Vorhandensein von Spurenfossilien, die auf Aktivitäten von Organismen hinweisen, hervorragend zur Rekonstruktion vergangener Lebensräume und der Ereignisse, die während einer Sedimentationsunterbrechung stattgefunden haben.

Die Geländearbeiten fanden in den Jahren 1997 und 1998 statt. Die fortlaufenden Abbauarbeiten im Steinbruch zerstörten den Aufschluss im Herbst 1998. Außer einigen Belegstücken, die im Juramu-

<sup>1</sup> Eine Veröffentlichung der sedimentologischen, mikrofaziellen und geochemischen Erkenntnisse ist in der Erlanger Zeitschrift *Facies* geplant (WINGS, 2001).

seum Eichstätt sowie in Privatsammlungen (vor allem im Stuttgarter Raum) aufbewahrt werden, wurde der Hartgrund als Abraum entsorgt und ist damit unwiederbringlich für weitere wissenschaftliche Untersuchungen verloren.

## 2. Terminologie

Da es zum Thema Hartgrund missverständliche Definitionen gibt, werden im folgenden die in dieser Arbeit verwendeten Begriffe definiert:

Das Substrat eines Weichgrundes besteht aus Sediment, das weich genug ist, um durch die Finger gequetscht zu werden (EKDALE, BROMLEY & PEMBERTON, 1984).

Omissions-Oberflächen sind sedimentäre Diskontinuitäts-Oberflächen (BROMLEY, 1975), die durch Nicht-Sedimentation bzw. eine Sedimentationsunterbrechung entstehen (FLÜGEL, 1982) und typischerweise durch einen Spurenhorizont repräsentiert werden (KENNEDY & GARRISON, 1975).

Ein Festgrund ist ein Substrat, das aus festem, plastischem Sediment besteht. Das Sediment ist dabei nicht zementiert worden (EKDALE, BROMLEY & PEMBERTON, 1984). Ein Festgrund tritt häufig bei Omissionsflächen auf und kann das Vorstadium eines Hartgrundes darstellen. EKDALE, BROMLEY & PEMBERTON (1984) beschreiben die Festigkeit mit einem anschaulichen Vergleich: das Sediment kann zwar von einem Spaten durchdrungen werden, ein Mensch sinkt aber nicht ein.

Hartgründe stellen synsedimentär lithifizierte Meeresböden auf Omissionsoberflächen dar (BROMLEY, 1975; FLÜGEL, 1999; FÜRSICH, 1979). Hartgründe sind weit verbreitet in Gebieten mit stark verlangsamter Karbonatsedimentation. Umlagerung und Wegführung der feinsten Sedimentfraktion (»winnowing«) führt zu einer minimalen Nettosedimentation, die teilweise Kondensationshorizonte entstehen lässt (FÜRSICH & WENDT, 1976). Hartgründe zeigen Anzeichen einer Exponierung an der Meeresbodenoberfläche, z.B. Bohrungen und Inkrustationen (FÜRSICH, 1979; KENNEDY & GARRISON, 1975). Obwohl Hartgründe sowohl im Tief- als auch im Flachwasser oder auch im subaerischen Bereich entstehen können (FLÜGEL, 1999), sind sie meistens auf submarine Schwellenbereiche beschränkt.

Neu in die Literatur eingeführt wird der Begriff Alternanzschicht (englisch: alternating layer). Die Alternanzschicht beschreibt die innerhalb mehrerer geringmächtiger Sedimentlagen durch raschen lateralen faziellen Wechsel entstandenen Gesteinstypen, die einen Festgrund, einen Hartgrund sowie deren Aufarbeitungsprodukte in Form von resedimentiertem Intraklastmaterial umfassen. Sedimentologisch und palökologisch unterscheidet sich die Alternanzschicht deutlich von den liegenden und hangenden Sedimenten.

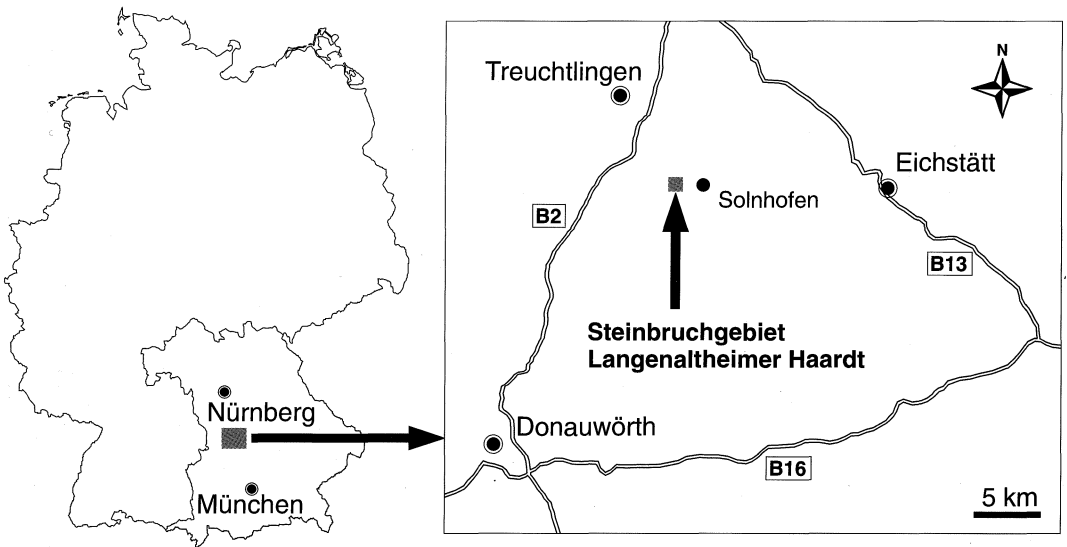
## 3. Geographische Lage des Untersuchungsgebietes

Der untersuchte Aufschluss (Taf. 1, Abb. 1) befand sich auf der Hochfläche des W' Teiles der Südlichen Frankenalb im Steinbruchrevier Langenaltheimer Haardt. Die beiden Ortschaften Langenaltheim im W und Solnhofen im E sind etwa 2,5 km bzw. 1,5 km entfernt (Abb. 1). Die GAUSS-KRÜGER-Koordinaten am Mittelpunkt des etwa 1 ha großen Untersuchungsbereiches betragen R <sup>44</sup>24125 und H <sup>54</sup>17625.

## 4. Stratigraphie

Das Liegende des Aufschlusses stellen die Oberen Schiefer der Solnhofener Schichten (Malm Zeta 2b), wogegen das Hangende aus Sedimenten der Mörnheimer Schichten (Malm Zeta 3) besteht. Den Abschluss der Solnhofener Schichten bildet normalerweise die Hangende Krumme Lage (HKL), die im Untersuchungsgebiet allerdings keine typische Ausbildung aufweist, sondern fehlt bzw. mit der Alternanzschicht verzahnt ist.

Der Hartgrund bzw. die Alternanzschicht ist mit keinem bisher beschriebenen Gestein des Malm Zeta 2b als auch des Malm Zeta 3 vergleichbar. Teilweise sitzt der Hartgrund direkt am Top einer Flnzlage (Taf. 1, Abb. 4). Die Alternanzschicht wird daher noch zum Malm Zeta 2b gezählt, da der fazielle Unterschied des Sedimentes zur Fazies der Mörnheimer Schichten größer ist als zu den mikritisch ausgebildeten Solnhofener Plattenkalken.



**Abb. 1.**  
Geographische Lage des Untersuchungsgebietes.

## 5. Fossilgehalt und Palökologie<sup>2</sup>

### 5.1 Methodik

Die Hartgrundoberfläche wurde im gesamten Ausbiß einer gründlichen makroskopischen Untersuchung unterzogen. Bei allen *Atreta*-Exemplaren wurde die Orientierung auf 10° genau bestimmt. Bei einer größeren Hartgrundscholle wurde die Fossilverteilung mittels einer quantitativen Methode untersucht. Dabei kam eine modifizierte Form des Punktzählverfahrens (Pointcount-Methode) zum Einsatz. Die Größenuntersuchung erfolgte nur an nahezu vollständigen *Atreta*-Exemplaren. Gemessen wurde der größte diagonale Durchmesser.

### 5.2 Fossilfunde

#### 5.2.1 Foraminifera

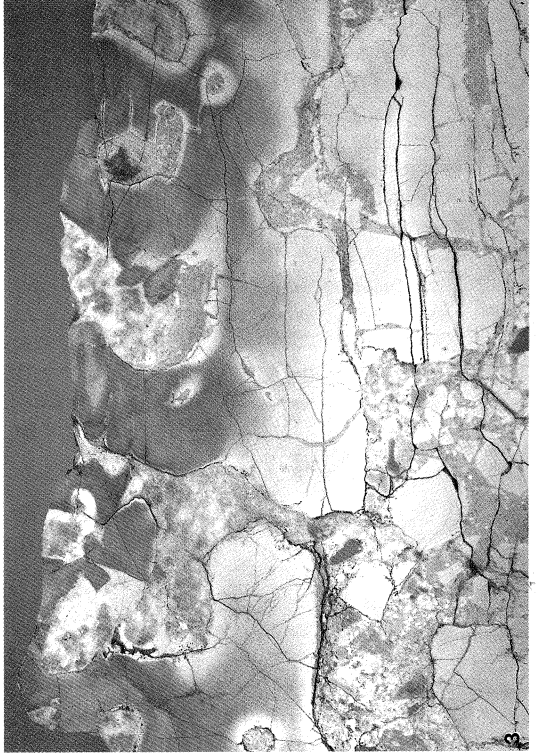
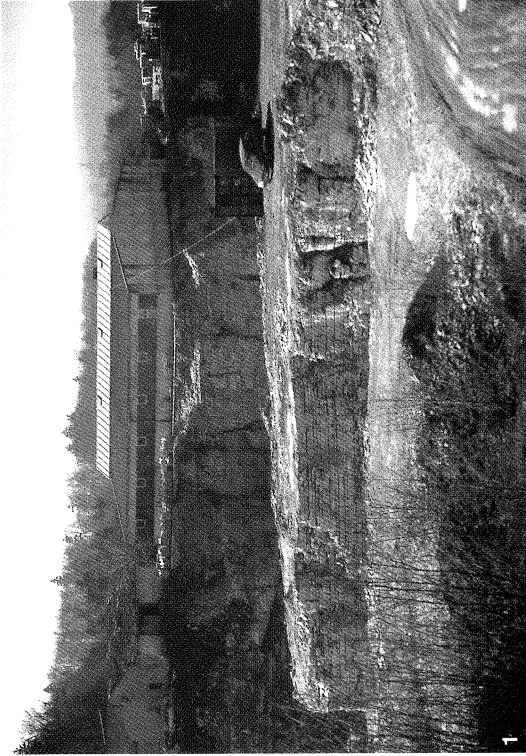
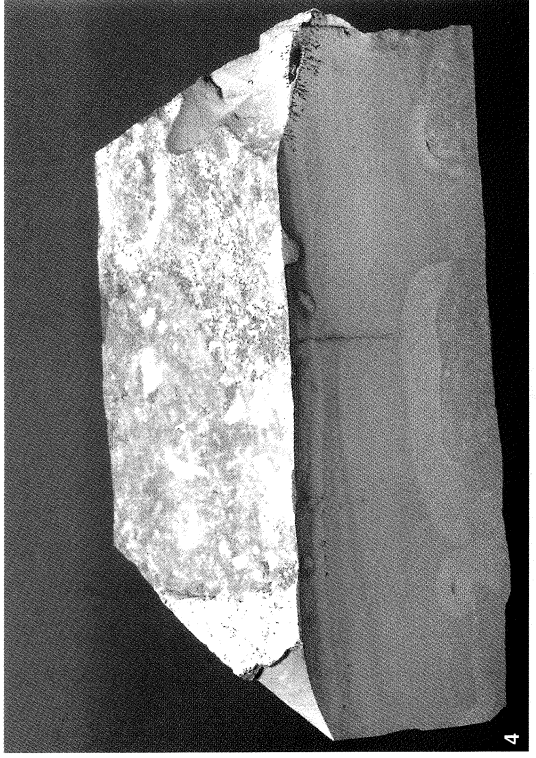
Auf dem Hartgrund wurde keine autochthone Foraminiferenfauna gefunden. Sessile autochthone Foraminiferen treten aber als postmortale Besiedler von Organismenresten (Crinoidenstielglieder, Belemnitenrohren etc.) auf (Taf. 3, Abb. 2). Die gefundenen Formen (ausschließlich Kalkschaler) dürften benthisch gelebt haben. Häufig handelt es sich um textulariide Formen.

Diskussion: Der Umstand, dass innerhalb der angefertigten Dünnschliffe auf dem Hartgrund kein Foraminiferenbewuchs entdeckt wurde, kann auch mit diagenetischer Lösung oder der Seltenheit der Tiere zusammenhängen. Die auftretenden Besiedlungen von harten Organismenresten sprechen grundsätzlich für gute Lebensbedingungen innerhalb des Ablagerungsraumes der Alternanzschicht.

#### 5.2.2 Porifera

Ein ca. 4 cm<sup>2</sup> großer, wahrscheinlich lithistider Schwammrest wurde in der Alternanzschicht gefunden. In ca. 95 % der in den Mörsheimer Schichten gefundenen Koprolithen treten Gebilde auf, die in Größe und Form an Schwammnadeln erinnern. Allerdings sind diese Koprolithen calcitisch erhalten, ein höherer Kieselsäuregehalt, der auf Reste von Kieselschwämmen hindeuten könnte, ist nicht vorhanden. Möglicherweise lassen sich auch bestimmte Bohrungen Schwämmen zuordnen.

<sup>2</sup> Bei der Beschreibung der Fossilien wurde die Bedeutung der Funde berücksichtigt. Aufgrund des beschränkten Platzes werden hier nur wichtige Fossilfunde erwähnt.



Diskussion: Schwämme scheinen generell sehr selten im Hartgrundbiotop gewesen zu sein. Wahrscheinlich wurde auch der gefundene Schwammrest nicht autochthon abgelagert, sondern eingeschwemmt.

### 5.2.3 Echinodermata

#### Crinoidea

Alle gefundenen Seelilienreste können zur Unterklasse Articulata in die Ordnungen Isocrinida und Millericrinida gestellt werden. Die bei weitem häufigste Gattung ist *Millericrinus sp.* Es sind mehrere Funde artikulierter Seelilienstiele von bis zu 2 m Länge bekannt (RÖPER & ROTHGAENGER, 1998). Ein Exemplar kann als distaler Stielabschnitt mit anhängender basaler Haftscheibe gedeutet werden. Außerdem wurde ein kompletter Kelch einer Seelilie (Gattung *Millericrinus* oder *Liliocrinus*) geborgen (Taf. 2, Abb. 1). Ein einzelnes Exemplar aus der Familie Isocrinidea mit anhaftenden Seitencirren ist ebenfalls gefunden worden. Die bisher beschriebenen Crinoidenfunde wurden ausschließlich auf der Oberseite der Festgrundlage gemacht. Einzelne Stielglieder sind als Komponente der Schuttfüllung in den Grabgängen sehr häufig, die zugehörigen Gattungen sind nicht mehr feststellbar.

Bemerkenswert ist der Umstand, dass das häufigste Fossil der Solnhofener Plattenkalke, die planktonische Seelilie *Saccocoma tenella* (früher *S. pectinata*) makroskopisch völlig fehlt, nur in Dünnschliffen finden sich entsprechende Einkristallhäkchen.

Diskussion: Alle Vorkommen im Untersuchungsgebiet zeigen eine enge Beziehung zur liegenden Schichtfläche, die Echinodermen liegen entweder direkt auf der Alternanzschicht oder nur wenige Millimeter darüber, so dass sie sich ökologisch dieser Schichtfläche zuordnen lassen. Diese Tatsache, die Häufigkeit der artikulierten Crinoidenreste sowie die außergewöhnlich gute Erhaltung sprechen für eine autochthone bis paraautochthone Fauna.

Beginnende Korrasion und vor allem postmortaler Bewuchs und Anbohrungen ist an einigen Crinoidenstielgliedern in Dünnschliffen erkennbar. Das deutet darauf hin, dass einige Crinoidenreste teilweise auch längerfristig transportiert wurden.

#### Echinoidea

Es konnten vereinzelte kleine Seeigelstacheln (*Cidaris?*) nachgewiesen werden. Diese sind bedeutend seltener als Crinoidenmaterial.

Diskussion: Wenn Seeigel durch plötzliche Sedimentüberschüttung sterben, werden sie in Lebendstellung eingebettet. Da keine kompletten Seeigel gefunden wurden, lässt sich schlussfolgern, dass entweder die Verschüttungslage wieder aufgearbeitet wurde oder aber keine Verschüttung stattfand.

Das nur kleine Stacheln entdeckt wurden, spricht nach SCHÄFER (1962) dafür, dass die Echiniden auf relativ weichem Sediment (Weichgrund, evtl. auch Festgrund) gelebt haben. Eine Besiedlung des Hartgrundbiotops durch Echiniden ist nicht allzu wahrscheinlich.

---

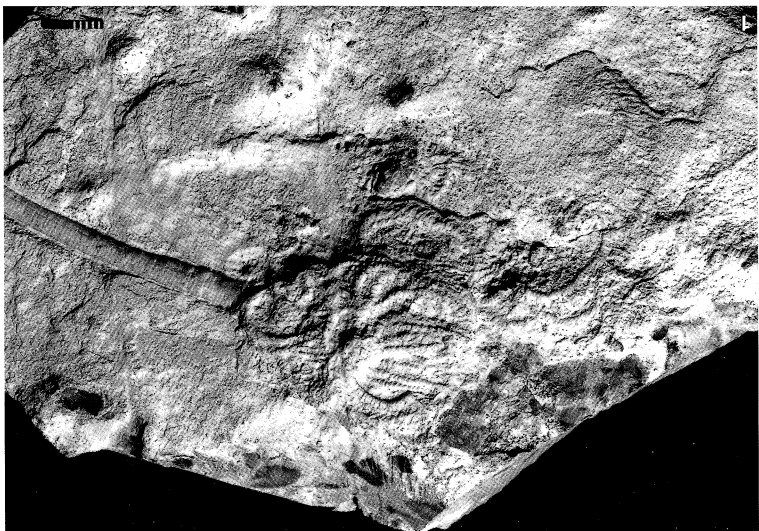
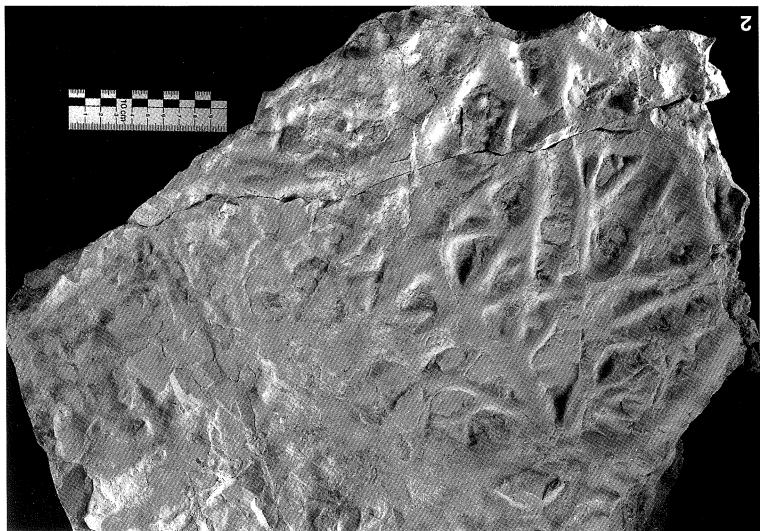
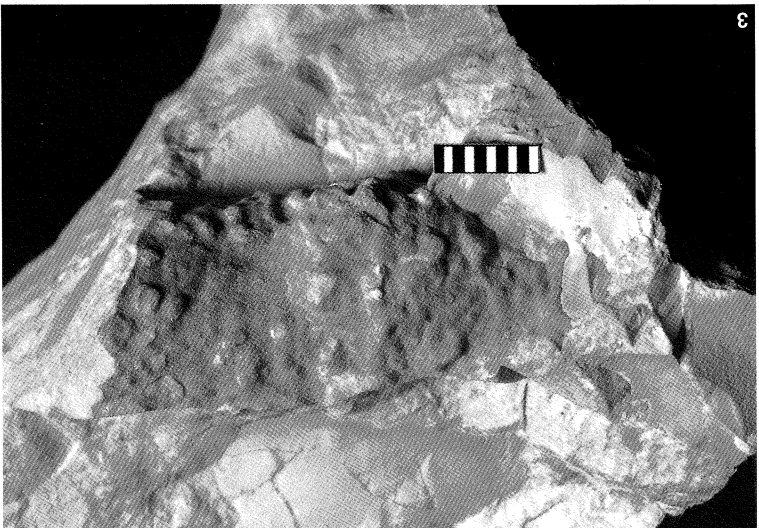
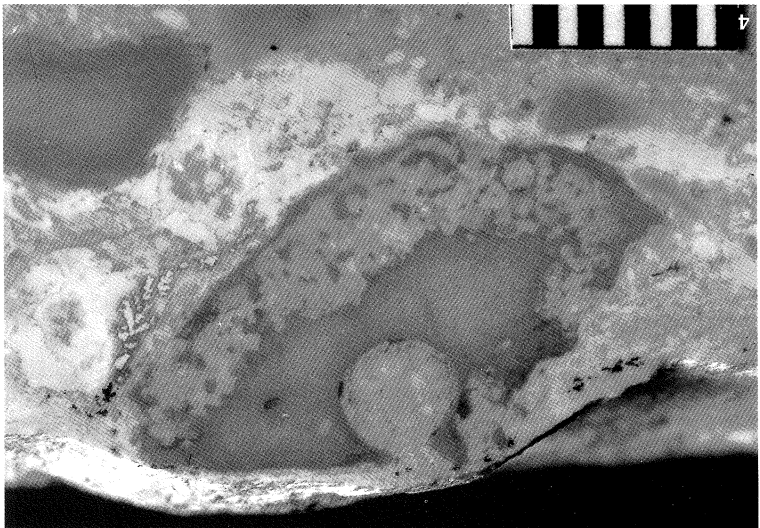
#### ◁ Tafel 1

Abb. 1 Blick nach W auf das obere Plateau der Alternanzschicht. Die Schichtfläche mit dem Fest- und Hartgrund ist nach N hin von Mörsheimer Schichten bedeckt.

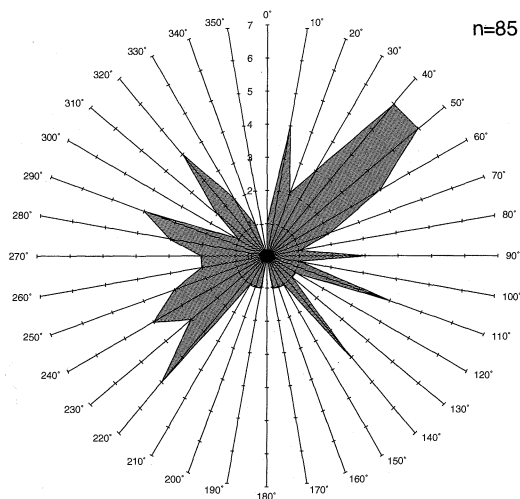
Abb. 2 Detailaufnahme einer größeren autochthonen Hartgrundschole (Länge: ca. 60 cm). Deutlich erkennbar ist die direkte Auflagerung auf dem Festgrund sowie die häufig vorkommenden Risse innerhalb der Hartgrundschole. Einzelne inkrustierende Bivalven der Gattung *Atreta* sind ebenfalls sichtbar.

Abb. 3 Polierter Querschnitt des Festgrundes. Teilweise existieren Ausbleichungen entlang der verfüllten Gänge. Die nahe der Oberfläche liegenden Grabgänge sind meist mit Sparit gefüllt. Teilweise sind Geopetalgefüge sichtbar. Die Verfüllung der tiefer liegenden Gangsysteme erfolgte mit echinodermenschuttreichem mikritischen Material, das auch vereinzelt Intraklasten enthält. Die Aufnahme ist orientiert. (Bildbreite: ca. 19,5 cm)

Abb. 4 Hartgrund mit allmählichem Übergang in einen Flinz des Solnhofener Plattenkalkes. Im unteren Bildteil ist eine senkrecht zur Oberfläche geschnittene und polierte Fläche zu sehen, auf der erkennbar ist, dass die Färbung des mikritischen Sedimentes nicht gleichmäßig verläuft. Im oberen Bereich der vertikalen Schnittfläche treten Bohrungen auf. Die Hartgrundoberfläche ist von *Atreta* besiedelt. Die Aufnahme ist orientiert. (Bildbreite: ca. 12 cm)







**Abb. 2.**  
Orientierung der an der Hartgrundoberfläche festzementierten *Atrreta*-Exemplare.

### 5.2.4 Brachiopoda

Im Bereich der Alternanzschicht konnten zwei körperlich erhaltene Brachiopoden der Ordnung Rhynchonellida gefunden werden. Auf einer Schichtoberfläche der Mörsheimer Schichten wurden mehrere Brachiopoden der Gattung *Lacunosella* entdeckt. Schalenreste von Brachiopoden (rhynchonellide oder terebratulide Arten) sind in Dünnschliffen relativ häufig.

**Diskussion:** Aufgrund ihrer Lebensweise und Verbreitung sind Brachiopoden ökologisch schwer deutbar (FÜRSICH, 1971). Wenn man aber der Interpretation von LEINFELDER et al. (1994) bezüglich der Sedimentkonsistenz von *Lacunosella* folgt, stammen die gefundenen Brachiopoden wahrscheinlich aus der Umgebung des Hartgrundes. Möglicherweise siedelten diese Tiere aber auch auf dem Festgrundsstrat, denn die geringe Fragmentationsrate sowie der schwache Abrieb an den Schalen deuten auf keine allzu hohe Turbulenz bzw. große Transportwege hin.

### 5.2.5 Bryozoa

Bryozoenreste konnten nicht eindeutig nachgewiesen werden, da nur kleine Fragmente gefunden wurden, die ausschließlich andere Organismenreste inkrustierten.

**Diskussion:** Falls es sich tatsächlich um Bryozoenreste handelt, können es ausschließlich primitive Formen gewesen sein, die im gut durchlüfteten Litoralbereich vorkommen (FÜRSICH, 1971).

### 5.2.6 Serpulidae

Serpeln konnten im Rahmen dieser Untersuchungen nicht gefunden werden. Allerdings berichtet RÖPER (freundl. mündl. Mitt.) von einem Fund, der die Hartgrundoberfläche besiedelte. Funde sind also extrem selten.

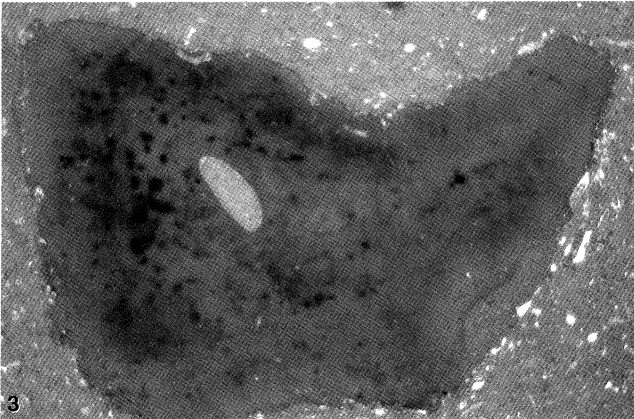
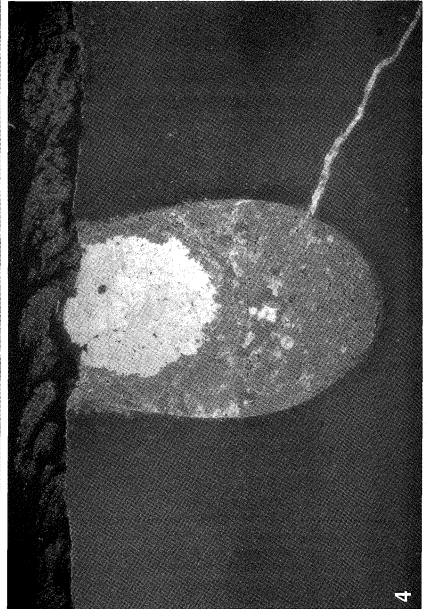
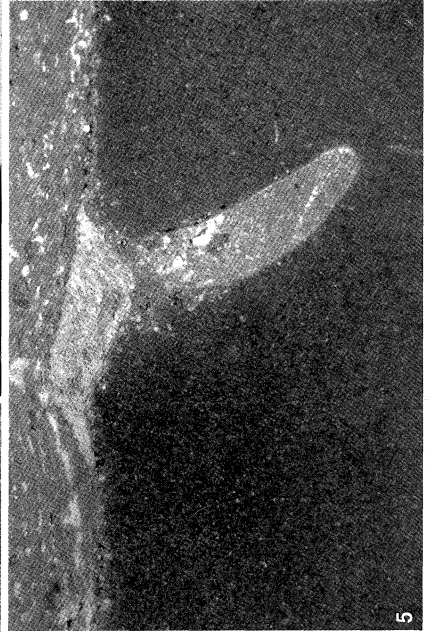
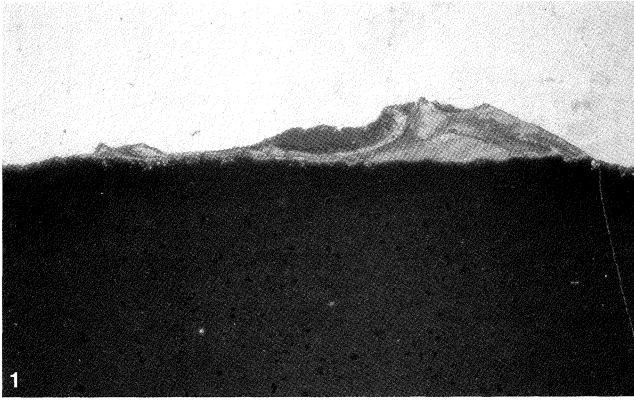
## ◁ Tafel 2

Abb. 1 Einziger bekannter Crinoidenkelch (*Millericrinus* oder *Liliocrinus*) aus der Alternanzschicht. (Maßstab = 2 cm)

Abb. 2 Festgrundoberfläche mit gut erhaltenem Netzwerk von Grabbauten des Typs *Thalassinoides suevicus*. Oberhalb dieses Gangsystems war eine autochthone Hartgrundscholle abgelagert.

Abb. 3 Aufsicht auf Festgrundmaterial mit Grabgang *Thalassinoides?*, der *Ophiomorpha nodosa* ähnelt. Die Wand des Ganges scheint mit Kotpillen ausgekleidet worden zu sein. (Maßstab = 1 cm)

Abb. 4 Angebohrter Intraklast in einer Gangfüllung. Die große, kreisförmige Bohrung wurde wahrscheinlich von einer Bohrmuschel (*Lithophaga?*) verursacht. Als Erzeuger der unregelmäßigen Strukturen im unteren Klastbereich werden Bakterien, Algen, Pilze oder Schwämme vermutet. (Maßstab = 1 cm)



### Tafel 3

- Abb. 1 Auf dem Hartgrund zementierte *Atrypa*. Der dunklere Fleck im linken oberen Bereich der Schale besteht aus Sediment. (Vergrößerung:  $\times 15,6$ )
- Abb. 2 Inkrustierende Foraminifere auf einem Crinoidenstielglied aufgewachsen. (Vergrößerung:  $\times 15,6$ )
- Abb. 3 Im Außenbereich von Mikrobohrem stark angegriffener Intraklast. Der länglich ovale weiße Bereich ist ein sparitisch verfüllter Makrobohrung. Orientierung: Hangendes ist oben. (Vergrößerung:  $\times 13,2$ )
- Abb. 4 Charakteristische tropfenförmige Bohrung in einer Hartgrundscholle. Die Form der Bohrung deutet auf lithophagide Bohrmuscheln (*Lithophaga*) als Erzeuger hin. Aufnahme mit gekreuzten Nicols. (Vergrößerung:  $\times 7,8$ )



### 5.2.7 Lamellibranchia

Schalenreste von Muscheln sind nur in Form der Gattung *Atreta* von der Oberfläche des Hartgrundes bekannt (Taf. 1, Abb. 2+4). Diese Muscheln sind mit der rechten Klappe auf der Hartgrundlage festzementiert, wobei die Schale exakt der Oberflächenmorphologie des Hartgrundes folgt (Taf. 3, Abb. 1). Die linke, obere Klappe ist bei keinem Exemplar erhalten geblieben.

Generell treten Individuen mit einer Größe von 1 bis zu 12 mm auf, wobei der am häufigsten vorkommende Größenbereich zwischen 5 und 7 mm liegt. Selten treten auch kleinere Exemplare direkt auf der erhaltenen Schale eines größeren Individuums auf. Damit ist ein eindeutiger Beweis für verschiedene Generationen gegeben, da die obere Klappe bereits entfernt war, bevor die zweite Bivalve sich ansiedelte.

Auf der flachen Oberfläche des Hartgrundes ist eine Orientierung der Bivalven feststellbar, die auf eine bidirektionale Strömung hindeutet (Abb. 2).

Verfüllte Bohrlöcher in der Hartgrundlage können teilweise als Spuren der Aktivität von Bohrmuscheln gedeutet werden (vgl. Kap. 5.2.8.). Die Form, ein keulenförmiges Loch mit engem Eingang, ist typisch für lithophagide Pelecypoden (z.B. *Lithophaga*) (SELLWOOD, 1992).

Diskussion: Generell sind *Atreta*-Funde mit zusammenhängenden Klappen äußerst selten (HODGES, 1991), so dass der Erhaltungszustand auf dem Hartgrund normal ist. Da der von FÜRSICH (1979) geschilderte Fall von kleinwüchsigen Adultstadien aufgrund von Platzmangel nicht gegeben ist, kann man aufgrund der unterschiedlichen Größe der Schalenreste auf juvenile und adulte Exemplare schließen. Allerdings könnte die Kleinwüchsigkeit der zweiten Generation auch durch bedeutend schlechtere Umweltbedingungen hervorgerufen worden sein.

Durch die weite Verbreitung von *Atreta* in unterschiedlichen marinen Habitaten lassen sich keine Schlüsse auf den genauen Lebensraum ziehen. Allerdings kann man eine gute Durchlüftung bei leichter Strömung vermuten.

Das akkurate Anliegen der Muschelschale an die Morphologie des Substrates deutet darauf hin, dass das Sediment bereits bei Beginn der Besiedlung komplett erhärtet war, da bei einer nicht vollständigen Lithifikation die Bivalvenschalen leicht in das Sediment eingedrückt worden sein müssten (GRUSCZYNSKI, 1986).

### 5.2.8 Spurenfossilien

Hierzu zählen die Grabgänge und Wohnbauten verschiedener Crustaceen (*Thalassinoides*) und alle Bohrungen.

Spurenfossilien treten im Untersuchungsgebiet in den obersten Metern der Solnhofener Plattenkalke häufig und in der Alternanzschicht sehr häufig auf (Taf. 1, Abb. 3). Im Hangenden, d.h. in den Mörsheimer Schichten, sind Spurenfossilien selten.

Diskussion: Die Häufigkeit der Bioturbation im Festgrund deutet auf eine enorme Entwicklung der Kolonisierer oder auf eine längere Expositionsdauer hin. Ein weiterer abrupter Wechsel innerhalb des Bodenmilieus fand beim Übergang von der Alternanzschicht zu den Mörsheimer Schichten statt. Die Spurenhäufigkeit im Festgrund ist auf eine gegenüber dem Weichboden verringerte Sedimentationsrate zurückzuführen.

#### ***Thalassinoides***

Die gefundenen Wohnbauten (Taf. 2, Abb. 2) weisen einen Durchmesser zwischen 8 und 25 mm auf, an Kreuzungspunkten sind Durchmesser bis 35 mm vorhanden. Damit liegen die Durchmesser der hier untersuchten Gänge in der Norm der bei MYROW (1995) erwähnten *Thalassinoides*-Bauten. In dem untersuchten Festgrund kommen sowohl *Thalassinoides suevicus* (meist horizontale Bauten) als

- ◁ Abb. 5 Längliche Bohrung, die zu *Trypanites* gestellt wird. Interessant ist der Umstand, dass an der Hartgründoberfläche direkt oberhalb der Bohrung ein Schalenrest (Brachiopode?) erhalten geblieben ist. Das Schalenfragment ist möglicherweise in dem etwas tiefer als die Hartgründoberfläche befindlichen Bohrungsausgang vor einem Weitertransport durch Strömungen geschützt gewesen. Eine autochthone Zementation dieses Schalenrestes (*Atreta*) ist nicht möglich, da unterhalb der Schale fossilfeinschuttartiges Sediment auftritt. (Vergrößerung: × 15,6)

auch *T. paradoxicus* (vertikale Bauten) vor. Ein Fundstück aus dem intraklastreichen Faziestyp der Alternanzschicht weist eine mit Pellets? ausgekleidete Wand auf (Taf. 2, Abb. 3), die an *Ophiomorpha nodosa* erinnert (EKDALE, BROMLEY & PEMBERTON, 1984). Es treten keine Anzeichen von Kompaktion an den Spurenfossilien auf.

Diskussion: Die in der Alternanzschicht gefundenen *Thalassinoides*-Spurenfossilien sind der *Glossifungites* Ichnofazies (FREY & SEILACHER, 1980) zuzurechnen, die auch auf festen, aber nicht lithifizierten marinen, litoralen und sublitoralen Omissionsoberflächen oder stabilen kohärenten Substraten (PEMBERTON & FREY, 1985) vorkommen kann. *Thalassinoides*-Bauten können nur bei einem normalen bis leicht abgesenkten Sauerstoffgehalt entstanden sein (EKDALE, BROMLEY & PEMBERTON, 1984). Die rezente Garnele *Callinassa californiensis*, die *Thalassinoides*-artige Gänge anlegt, kann allerdings auch unter Bedingungen mit reduzierter Salinität und geringem Sauerstoffgehalt überleben (SWINBANKS & LUTERNAUER, 1987). Bezüglich der Wassertiefe ermöglicht *Thalassinoides* wenig Rückschlüsse.

Die Intensität der Bioturbation im Liegenden der Alternanzschicht war nicht sehr hoch, da die Schichtung der liegenden Plattenkalke noch vollständig vorhanden ist. Bemerkenswert ist, dass ausschließlich *Thalassinoides*-Bauten gefunden wurden. Die ansonsten für einen lagunären Ablagerungsraum ebenfalls typischen Spurenfossilien *Rhizocorallium*, *Teichichnus*, *Planolites*, *Cylindrichnus* und *Chondrites* (EKDALE, BROMLEY & PEMBERTON, 1984) sind nicht vorhanden.

Da *Ophiomorpha-Domichnia* im allgemeinen in lockerem, bewegtem Sand entstanden (EKDALE, BROMLEY & PEMBERTON, 1984), der im untersuchten Material nicht vorkommt, handelt es sich wohl bei dem in Taf. 2, Fig. 3 dargestellten Stück auch um *Thalassinoides*, allerdings mit eigenartiger Erhaltung.

### **Bohrungen**

Die Intraklasten innerhalb der Alternanzschicht weisen teilweise Mikrobohrungen auf, die mikritisch verfüllt sind (Taf. 2, Abb. 4; Taf. 3, Abb. 3). Aufgrund ihrer Dimensionen können diese Bohrungen nur durch Algen, Pilze und Bakterien verursacht worden sein. Systematische Arbeiten zu Mikrobohrungen fehlen bisher, so dass eine genauere Zuordnung der Mikrobohrlöcher nicht möglich ist.

Im Hartgrund treten Bohrungen vom *Lithophaga*-Typ (Taf. 3, Abb. 4) und vom *Trypanites*-Typ (Taf. 3, Abb. 5) auf. Die Bohrungen sind 4-30 mm lang und 1-9 mm breit. Fast ausschließlich handelt es sich um Makrobohrungen mit 5-20 mm Tiefe. Die Bohrungen sind nicht eindeutig zuzuordnen, da ihre Erzeuger nicht fossilisiert wurden. In Frage kommen bohrende Muscheln, Würmer, Schwämme, Cirripedier.

Nur ca. 3 % der Hartgrundoberfläche weist Spuren bohrender Organistentätigkeit auf, verglichen mit anderen untersuchten Hartgründen ist die Häufigkeit der Bohrungen extrem gering (GRUSZCZYNSKI, 1986; FÜRSICH, 1979).

Diskussion: Alle Hartgrundbohrungen sind ohne überlieferte Erzeuger zur Rekonstruktion der Umweltbedingungen nicht sehr aussagekräftig. Das Spurenfossil *Trypanites* kann beispielsweise von Mitgliedern aus einem halben Dutzend verschiedener Stämme erzeugt worden sein (PALMER, 1982). Aufgrund der generellen Verbreitung von Bohrungen muss trotz ihrer Seltenheit vermutet werden, dass Bohrorganismen gute Lebensbedingungen vorfanden.

### **5.3 Diversität der Hartgrundfauna**

Ein prinzipiell limitierender Faktor der Diversität von überlieferten Hartgrundgemeinschaften ist das fast ausschließliche Bestehen aus sessilen Arten. Vagile Organismen des Hartgrundbiotops wurden meist postmortal verdriftet und sind nicht erhalten geblieben. Die wahre Diversität des Biotopes Hartgrund kann daher wesentlich höher gewesen sein, als es aufgrund der überlieferten Fossilien scheint.

FÜRSICH (1979) beschreibt Hartgründe, die wie der untersuchte Hartgrund in flachen Lagunen oder geschützten Buchten entstanden sind, generell als gering divers. Die von FÜRSICH (1979) genannte Fauna aus Algenbohrungen, Algenfilmen, Serpuliden, Austern und inkrustierenden Ectoprocta ist allerdings nicht anzutreffen. Die Diversität ist somit, verglichen mit der Fauna anderer Hartgründe (FÜRSICH, 1979; PALMER, 1982), äußerst niedrig. Die mittlere Anzahl zementierender Arten auf jurassischen Hartgründen liegt bei 7,1, die der Bohrer bei 2,2 (FÜRSICH 1979). Bei dem hier

untersuchten Hartgrund konnte nur eine zementierende Art gefunden werden und es treten zwei Bohrlochtypen auf.

Da die von inkrustierenden Organismen bedeckte Hartgrundoberfläche bei unter 5 % liegt, gehört dieser Hartgrund zu den von FÜRSICH (1979) aufgestellten Hartgründen mit niedriger Biomasse. Das monospezifische Auftreten von *Atreta* wäre eher typisch für Hartgründe mit hoher Biomasse, ebenso wie die sehr niedrige Diversität (FÜRSICH, 1979). Darin kann sich aber auch nur ein Opportunismus von *Atreta* widerspiegeln.

Die einfache, flache Morphologie des Hartgrundes gestattete es nur wenigen zementierenden und inkrustierenden Arten hier zu siedeln. Eine wellige Oberfläche mit Überhängen und Hohlräumen hätte dagegen eine größere Anzahl an Mikrohabitaten aufgewiesen (FÜRSICH, 1979), die auch von troglionten Arten besiedelt worden wären. So sind beispielsweise Serpel vor allem von Überhängen, d.h. von wenig exponierten Stellen bekannt (HALLAM, 1969).

Die Ursache für die geringe Dichte der Besiedlung kann zum einem in einer unreifen Lebensgemeinschaft infolge einer Erstbesiedlung oder Neubesiedlung nach einer Erosionsphase liegen. Zum anderen kann die extrem spärliche Hartgrundfauna durch hohen physiologischen Stress infolge ungünstiger, instabiler abiotischer Umweltfaktoren oder infolge einer Interaktion von biotischen und abiotischen Faktoren erklärt werden (GRUSZCZYNSKI, 1986). Abiotische Faktoren beinhalten die hydrodynamische Aktivität (Wellen und Strömungen), Schwankungen von Salinität, pH-Wert, Wasserchemie sowie Sedimentations- und Zementationsraten. Weiterhin kommen Schwankungen des vorhandenen Nahrungsangebotes (biotischer Faktor), des Sauerstoffgehaltes, der Durchleuchtung oder temporäres Auftauchen des Hartgrundes für die wenig diverse Fauna in Frage.

Eine Ablagerung oberhalb der Wellenbasis ist aufgrund sedimentologischer Kriterien wenig wahrscheinlich. Daher muss die geringe Diversität, statt auf hohe Turbulenz, auf eine andere Ursache zurückzuführen sein. Für ungünstige Umweltbedingungen spricht nach FÜRSICH (1979) der Umstand, dass *Atreta* ausgewachsen ist und sogar mehrere Generationen unterschieden werden können. Die opportunistische Bivalve *Atreta* ist für solche Hartgründe mit niedriger Biomasse generell typisch. Die Verteilung der juvenilen und adulten Stadien ist regelmäßig bis aggregiert. Aggregierte Verteilung kommt bei kleinen Hartgrundschohlen vor und ist durch die ungleichmäßige Verteilung besiedelbaren Substrates bedingt (ETTER, 1994). Es gibt keine Anzeichen für intraspezifische Konkurrenz (wie beispielsweise höhere Ränder bei nebeneinander wachsenden Individuen). Die Bohrungen, speziell *Trypanites*, treten ebenfalls aggregiert auf, was nach FÜRSICH (1979) die Regel zu sein scheint.

Der wahrscheinlichste Grund für die geringe Diversität ist eine sehr unreife Lebensgemeinschaft. Die Sukzession wurde wahrscheinlich bereits bald nach der Erstbesiedlung wieder unterbrochen. Eine Einteilung der suspensionsabhängigen Hartgrundarten in feeding levels oder Ernährungszonen (PALMER, 1982) bestätigt die Vermutung einer unterbrochener Sukzessionsabfolge.

#### 5.4 Zusammenfassung der Palökologie

Das Auftreten der Hartgrundfauna zeigt zum Abschluss der Solnhofener Schichten des Malm Zeta 2b stark verbesserte Umweltbedingungen an und kann mit den Theorien über einen relativ lebensfeindlichen Ablagerungsraum der Solnhofener Plattenkalke nicht erklärt werden. Geht man von einer autochthonen bis parautochthonen Ablagerung der Crinoiden aus, deuten die vorliegenden Indizien auf längerfristig vorhandene Strömungen und klares Wasser mit Nährstoffen und planktonischen Kleinstlebewesen hin.

Obwohl viele der für jurassische Hartgründe typischen Faunenelemente fehlen, konnten sessile Organismen in der Bodenzone der Lagune überleben. Die vorhandene Muschel *Atreta* ist für jurassische Hartgründe charakteristisch, ebenso wie vorkommende *Trypanites*- und *Lithophaga*-Bohrungen (FÜRSICH, 1979). Die Faunenbestandteile, die nur während ihres Lebens mit dem Hartgrund verbunden waren (z.B. byssate Muscheln) bzw. die zur vagilen Epifauna (z.B. Gastropoden) gehörten, sind wahrscheinlich durch erosive Ereignisse vor der Verschüttung beseitigt worden.

Eine plötzlich erhöhte Sedimentationsrate verschüttete dann die auf dem Fest- und Hartgrund lebende Fauna. Die Seltenheit anderer Tiergruppen (z.B. Bryozoen, Serpeln) deutet auf ökologische Ursachen hin. Aufgrund des artikulierten Erhaltungszustandes der Crinoiden sowie verschiedener

Altersstadien bei den Bivalven können die fossilen Organismen als partielles Abbild einer Biozönose betrachtet werden (Abb. 3).

## 6. Diskussion bisheriger Literaturerwähnungen des Hartgrundes

Die untersuchte Alternanzschicht wurde bisher von GERHARD (1992), RÖPER (1992) sowie von RÖPER & ROTHGAENGER (1998a, 1998b) erwähnt.

Im folgenden soll nur RÖPER & ROTHGAENGER (1998a) diskutiert werden, da die entsprechende Schicht hier erstmalig als Hartgrund ausführlicher erwähnt worden ist. Die Autoren beschreiben die Alternanzschicht als reinen Hartgrund und stellen mehrere Hypothesen zur Taphonomie der gefundenen Echinodermen auf, die allerdings überwiegend auf falschen Annahmen und falschen sedimentologischen Befunden beruhen. Die folgenden Verbesserungen sind daher notwendig<sup>3</sup>.

1. »Erosionsrinnen« gegen Ende der Solnhofener Plattenkalke sind im Untersuchungsgebiet nicht sicher nachweisbar, es handelt sich dabei eher um Gleitmassen der HKL.
2. Hartgründe sind nicht an regressive Einschnitte gebunden, wahrscheinlicher ist Strömungseinfluss. RÖPER & ROTHGAENGER (1998a) erwähnen die vielfältigeren Lebensbedingungen auf dem Hartgrund-Biotop, klären jedoch den entstandenen Widerspruch zu ihrer Regressionstheorie nicht auf.
3. Die Grabganglabyrinth können nicht im Hartgrund angelegt worden sein, da dieser ja bereits lithifiziert worden war.
4. Die auf dem Hartgrund zementierten Bivalven *Atreta* sind keine Austern. Nach HODGES (1991) gehört *Atreta* zur Familie Dimyidae und damit zur Ordnung Pectinoidea.
5. Die Sedimentfüllung der Grabgänge ist zwar reich an Echinodermenresten, allerdings nicht vorzugsweise von sessilen gestielten Seelilien. Es treten auch häufig Echiniden- und Saccocomenreste auf.
6. Die Crinoiden sanken auf dem plastischen Sediment des Festgrundes zum Teil sehr wohl ein (wenn auch nur 2-3 mm). Außerdem liegen sie ohne Ausnahme auf dem Festgrund und nicht auf dem (darauffolgenden) Hartgrund.
7. Die Crinoiden sind nicht durch Kieselplattenkalke der Mörsheimer Schichten zudeckt worden, sondern von einer kieselsäurefreien dünnen Mergellage.
8. Durch den Fund eines kompletten Seelilienkelches (Taf. 2, Fig. 1) kann man die Möglichkeit einer autochthonen Ablagerung der Crinoiden nicht ausschließen. RÖPER & ROTHGAENGER (1998a) klären nicht auf, was unter »unmittelbarer Nähe« bezüglich des Lebensraumes zu verstehen ist und wo dieser liegen könnte.
9. Es muss aufgrund der Konsistenz des Sedimentes unklar bleiben, ob die Grabgänge im Festgrund (nicht im Hartgrund!) tatsächlich alle von der gleichen Gruppe Organismen (wahrscheinlich Krebse) gebildet werden konnten.
10. Die Abb. 42 in RÖPER & ROTHGAENGER (1998a) zeigt nur den Festgrund, aber nicht den Hartgrund.
11. Die Abb. 43 in RÖPER & ROTHGAENGER (1998a) ist wahrscheinlich falsch orientiert. Die dunklen Intraklasten (keine Grabgänge!) sind nur im oberen Bereich der Schicht anzutreffen. Es handelt sich auch nicht um den Hartgrund, sondern um bioturbierten Plattenkalk mit Intraklastmaterial.

## 7. Entstehungsmodell des Hartgrundes

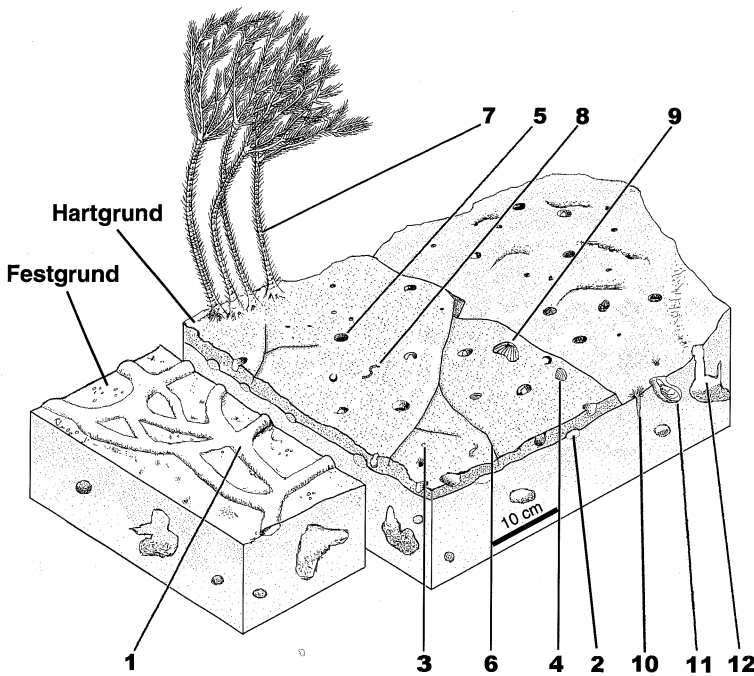
Im folgenden Kapitel wird versucht, die Bildungsumgebung des Hartgrundes zu rekonstruieren. Relevante Fragestellungen werden nach der Diskussion möglichst knapp beantwortet.

### 7.1 Dimension

Welche Ausmaße hatte der Hartgrund?

Prinzipiell können Hartgründe riesige Ausmaße annehmen. KENNEDY & JUIGNET (1974) berichten z.B. von einem stark mineralisierten Hartgrund aus der Oberen Kreide in Haute Normandie, der über

<sup>3</sup> Obwohl sich die Mehrzahl der Fehler auf sedimentologische Befunde bezieht, die an anderer Stelle erörtert werden (WINGS, 2001), erfolgt die Diskussion von RÖPER & ROTHGAENGER (1998a, S. 30) in dieser Publikation, da die Zeitschrift *Archaeopteryx* das geeignetere Medium dafür darstellt.



**Abb. 3.**

Rekonstruktion der Lebensgemeinschaft des Fest- und Hartgrundes (umgezeichnet nach SELLWOOD, 1992). 1+2: Grabgänge vom *Thalassinoides*-Typ; 3: Juvenilstadium von *Atreta*; 4: Adultstadium von *Atreta*; 5: verlassene Bohrung; 6: frühdiagenetisch entstandene Risse; 7: Seellilien der Gattung *Pentacrinus* (diese Gattung ist nicht nachgewiesen; die Abb. soll vielmehr die Gattung *Millericrinus* symbolisieren, von der keine Rekonstruktion existiert); 8: inkrustierende Foraminifere; 9: Brachiopode; 10: bohrende Würmer; 11: Bohrmuschel *Lithophaga*; 12: verlassene Grabgänge verschiedener Organismengruppen.

mindestens 1500 km<sup>2</sup> verfolgt werden kann. Rezent beschreibt SHINN (1969) im Persischen Golf ein submarin zementiertes Areal von 70000 km<sup>2</sup>. Innerhalb der sehr kleinräumigen Faziesräume der Plattenkalkwannen können einzelne Omissionsflächen natürlich nicht über größere Distanzen hinweg bestanden haben. Im regionalen Umfeld der Langenaltheimer Haardt bzw. in allen Plattenkalkvorkommen des Malm Zeta 2 ist bisher kein anderer Hartgrund entdeckt worden. Strömungen, Erosion und frühe Zementation sind absolute Ausnahmen innerhalb der Plattenkalkbildung gewesen.

Die heutigen Aufschlussverhältnisse erlauben aufgrund der relikthaften Überlieferung des Überganges von Solnhofener Schichten zu Mörmshheimer Schichten nur bedingt Aussagen über die Gesamtgröße des Hartgrundareals. Man kann davon ausgehen, dass die Crinoiden ebenfalls auf dem Hartgrund siedelten. Obwohl keine autochthonen Basalplatten dieser Tiere gefunden wurden, sollte der entsprechend besiedelte Hartgrund in der näheren Umgebung, d.h. maximal mehrere 10er Meter vom Fundpunkt entfernt, gelegen haben. Der Hartgrund wird das gesamte Areal von einigen 100 Quadratmetern nicht komplett bedeckt haben, eine fleckenhafte Verteilung ist wahrscheinlicher. Die Funde einzelner Hartgrundplatten sprechen für diese These.

Fazit: Der Hartgrund war größer als in der heutigen Ausdehnung, er besaß aber nicht mehr als einige ha Größe.

## 7.2 Lebensbedingungen

Wie lebensfeindlich war der Ablagerungsraum für normalmarine Organismen? Das Auftreten von Spurenfossilien in den obersten 5 m der Solnhofener Schichten zeigt deutlich veränderte Umweltbedingungen an. Anhand der Größe und Form der durchwühlten Lagen kommen als Verursacher Crustaceen, möglicherweise auch Würmer in Frage. Diese Organismen stellen an ihren Lebensraum bezüglich Salinität und Sauerstoffgehalt des Wassers nur geringe Anforderungen. Im klassischen Solnhofener Plattenkalk waren die Umweltparameter jedoch zu extrem für das Überleben von benthischen Organismen.

Es lässt sich nicht mehr feststellen, ob Spurenfossilien im gesamten oberen Bereich des Malm Zeta 2b des Steinbruches Langenaltheimer Haardt vorhanden waren, da die entsprechenden Schichten bereits abgebaut wurden. So kann nur spekuliert werden, ob die gesamte Langenaltheimer

Wanne gegen Ende des Malm Zeta 2 bessere Lebensbedingungen aufwies, oder ob es sich bei dem untersuchten Bereich um eine lokal erhöhte Position innerhalb der Wanne handelte, die über die toxische Bodenwasserschicht hinausragte. Auch lokal durch Strömungen zugeführtes, frisches normalsalines sauerstoffhaltiges Wasser kann die Bewohnbarkeit ermöglicht haben.

Im Niveau des Festgrundes treten Grabgänge besonders häufig in Erscheinung. Eindeutig identifizierbar sind die horizontalen Spuren von *Thalassinoides suevicus*. Auch vertikale Bauten sind vorhanden.

Die Besiedlung des Hartgrundes mit Echinodermen und Bivalven verlangt zumindest für einen kurzen Zeitraum normalmarine Verhältnisse in bewegtem Wasser. Die hypersalinare lebensfeindliche Bodenzone mit anoxischer Stagnationszone (VIOHL, 1998) muss daher unterbrochen worden sein. Bereits KEUPP (1978) nimmt auf Grund der Coccolithen-Vergesellschaftungen für das Untertithon einen Wechsel von Restriktion und normalmarinen Bedingungen an. Auf Grund der Mächtigkeit der spurenführenden Schichten im Liegenden des Hartgrundes ist der Zeitraum der normalmarinen Verhältnisse relativ lang anzusetzen (mehrere tausend Jahre). Kurzzeitige »Bioevents« (VIOHL, 1998) können die vorhandenen Bioturbationen nicht erklären.

Die Crinoiden, die sehr hohe Ansprüche an ihren Lebensraum stellen, sind Beweis für partiell und temporär hervorragende Lebensbedingungen am Boden der Langenaltheimer Wanne. Diese eigentliche Hartgrundbesiedlung durch sessile Organismen war allerdings sehr kurzzeitig (maximal mehrere Jahrzehnte) und kann somit als »Bioevent« angesehen werden.

Fazit: Die Häufigkeit und Vielfalt stenohaliner Organismen, insbesondere der Crinoiden, verlangt normalmarine Salinität. Die Anwesenheit von Suspensionsstrudlern und grabenden Organismen bedingt oxische Bodenverhältnisse.

### 7.3 Wasserbewegung

Wie turbulent war der Ablagerungsraum?

Die meisten fossilen Hartgründe treten in karbonatischen Flachmeersedimenten auf, gewöhnlich auf Karbonatplattformen in geringen Breiten (PALMER, 1982). Die Mikrofazies der Mehrzahl jurassischer Hartgründe ist typisch für flache hochenergetische Wasserbereiche (FÜRSICH, 1979).

Die zur Hartgrundentstehung benötigte Omission wird hauptsächlich durch zwei Möglichkeiten verursacht. Erstens kann die primäre Sedimentationsrate nahe Null liegen. Zweitens kann durch auftretende Strömungen vorhandenes Sediment weggeführt werden. Da im vermuteten teilagunären Bildungsbereich ein Aussetzen der kontinuierlichen Sedimentation unwahrscheinlich erscheint, war das Bestehen von Strömungen eher anzunehmen.

Jedoch lassen sich keine Schrägschichtung oder andere Arten strömungsbedingter Sedimentstrukturen nachweisen. Dieser Umstand kann allerdings darauf zurückgeführt werden, dass bei mikritischen Sedimenten häufig keine Unterscheidungsmöglichkeiten (wie Korngrößenunterschiede oder Farbgebung) für einen Strömungsnachweis anhand des sedimentierten Materials existieren.

Die Ausrichtung der festzementierten *Atrreta* Exemplare zeigt eine auffällige NE-SW Orientierung. Als Ursache kann z.B. ein Strömungskanal innerhalb der Langenaltheimer Wanne angenommen werden, in dem – vielleicht durch Gezeiten- oder Monsuneinfluss – ein häufiger, entgegengesetzter Richtungswechsel der Strömung auftrat. Auch die gefundenen Crinoidenstiele weisen häufig eine NE-SW Ausrichtung auf (RÖPER, freundl. mündl. Mitt.). In den darüber abgelagerten Mörsheimer Schichten konnte durch Einmessen gefundener Fossilien (Fische, Belemniten, Landpflanzen) ebenfalls eine vorherrschende Strömung aus NE festgestellt werden.

Umgelagerte, mitunter beidseitig inkrustierte Hartgrundschollen bezeugen das Vorhandensein einer gelegentlichen höheren Turbulenz. Zwar können Grundseen, von hurrikanartigen Stürmen ausgelöst, eine solche kurzzeitige kräftige Umlagerung bewirken, sie führen meist aber auch zur Mächtigkeitsreduktion und gradierten Resedimentation (FÜRSICH & WENDT, 1976), die nicht nachweisbar ist. Dagegen sind die gerundeten, sortierten Intraklasten ein weiterer Beweis für vorhandene Strömungen. Fazit: Der Ablagerungsraum war nicht hochturbulent, es gab aber schwache Strömungsaktivität und kurzzeitige, möglicherweise durch Stürme ausgelöste, kräftige Erosion.



## 7.4 Bathymetrie

Welche Tiefe ist für die Langenaltheimer Wanne wahrscheinlich?

Die Möglichkeit, dass die Alternanzschicht im extremen Flachwasser (Intertidal – flaches Subtidal) gebildet wurde und zeitweise subaerisch exponiert war, ist nicht völlig auszuschließen, aber aufgrund aller sedimentologisch gegebenen Indizien höchst unwahrscheinlich. Ein hochenergetischer Flachwasserbereich wäre neben dem vorhandenen Hartgrund und den umgelagerten Bereichen auch charakterisiert durch starke stratigraphische Kondensation, Limonitkrusten und Algenmatten (FÜRSICH & WENDT, 1976). Diese letzten drei Kriterien werden bei dem untersuchten Objekt jedoch nicht erfüllt. Das generelle Vorhandensein von Bioturbation und das Fehlen einer Schichtung deuten auf subtidale Entstehung hin (KHALAF, MILLIMAN & DRUFFEL, 1987). Ergänzend müssten nach FÜRSICH (1971) bei einem zweimaligen Gezeitendurchgang täglich die *Thalassinoides*-Gänge stärker gekappt worden sein. Im allgemeinen ist es dennoch sehr schwierig zwischen intertidaler und subtidaler Hartgrundentstehung zu unterscheiden (KHALAF, MILLIMAN & DRUFFEL, 1987). Aufgrund des Alters und der diagenetischen Veränderungen sind Rückschlüsse auf die Wassertiefe aus (hauptsächlich primär aragonitischen) hartgrundfestigenden Zementen im Gegensatz zu rezenten Hartgründen nicht möglich.

Die Orientierung der *Atrreta*-Muscheln ist ein weiterer Beweis für eine Besiedlung des Hartgrundes in einer Wassertiefe unterhalb der normalen Wellenbasis. Die meisten jurassischen Hartgrund-Faunen weisen keine Anzeichen von Orientierung auf und sind daher wohl im hochturbulenten Wasser oberhalb der Wellenbasis entstanden (FÜRSICH, 1979). Neben der Einregelung kann auch die Seltenheit von doppelklappigen Schalenresten als Indiz für Strömungsaktivität gesehen werden (FÜRSICH & WENDT, 1976).

Allerdings muss der nahe Lebensraum der Seelilien oberhalb der Sturmwellenbasis gelegen haben, da diese Organismen mit Gewalt vom Untergrund losgerissen wurden, wie der Fund einer Basalplatte nahe legt. Der allmähliche Übergang der normalen Solnhofener Plattenkalkfazies in einen Hartgrund (Taf. 1, Abb. 4) lässt keine Rückschlüsse auf Höhenunterschiede im Ablagerungsraum zu. Ein Paläorelief wird allerdings vermutet.

Fazit: Unter Berücksichtigung der faunistischen Zusammensetzung der Hartgrundumgebung kann die Entstehung der Alternanzschicht auf einer kleinen submarinen Erhebung angenommen werden. Die geschätzte Wassertiefe für den Hartgrundbiotop liegt im Sublitoral bei 30 bis 50 m. Der Wannengrund der Langenaltheimer Wanne befand sich wenige Meter darunter.

## 7.5 Bildungszeitraum und Sedimentationsrate

Welcher Zeitraum kann für die Entstehung des Hartgrundes veranschlagt werden? Die Vorstellungen über mögliche Bildungszeiträume und Expositionszeiten von Hartgründen reichen von ca. 100 Jahren bis zu mehreren Millionen Jahren. Untersuchungen an rezenten Hartgründen (ALEXANDERSSON, 1969; DE GROOT, 1969; GEVIRTZ & FRIEDMAN, 1966; SHINN, 1969) haben gezeigt, dass eine Verhärtung von relativ grobkörnigen Sedimentoberflächen im flachmarinen Bereich bereits nach einigen hundert Jahren vorkommen kann. Mikritische lithifizierte Sedimente sind rezent nur aus Wassertiefen unter 200 m bekannt (FISCHER & GARRISON, 1967). Fe/Mn-Anreicherungen weisen eine hohe Wachstumsgeschwindigkeit auf. MANHEIM (1965) erwähnt Bildungsraten zwischen 20 und 100 mm pro 1000 Jahre für Flachmeer-Manganknollen. Ausgehend von diesen Werten ist die nur oberflächliche Lithifikation des Langenaltheimer Hartgrundes sehr schnell abgelaufen.

BARTHEL (1978) schätzt die Ablagerungsdauer der Unteren und Oberen Solnhofener Plattenkalke auf maximal 500 000 Jahre. Nach einer Schätzung von KUHN (1977) sind die gesamten Solnhofener Schichten in einer Periode von ca. 150 000 Jahren gebildet worden. Das Untertithon dauerte nach neueren Berechnungen (GRADSTEIN et al., 1995) während eines Zeitraumes von 2 Millionen Jahren an. Die *Gravesiana*-Ammonitenzone, zu der die Röglinger Bankkalke, die Solnhofener Schichten sowie die Mörnshheimer Schichten gestellt werden (Malm Zeta 1 bis Malm Zeta 3), umfasst einen Zeitraum von ca. 700 000 Jahren (GRADSTEIN et al., 1995). Unter Berücksichtigung der Mächtigkeiten der einzelnen Schichtglieder ergibt sich daraus für die Oberen Schiefer (Malm Zeta 2b) ein (berechneter) Ablagerungszeitraum von ca. 215 000 Jahren. Andererseits setzen GRADSTEIN et al. (1995) die Ammonitenzone *Hybonoticerias hybonotum* (Leitfossil des Malm Zeta 2) bereits an die Kimmeridge /

Tithon-Grenze. Bei der Berücksichtigung dieses Befundes würde sich die Zeitspanne der Ablagerung der Solnhofener Plattenkalke um mehrere 100000 Jahre erhöhen. Für die weitere Diskussion wird jedoch sowohl für den Malm Zeta 2b als auch für den Malm Zeta 3 ein Ablagerungszeitraum von jeweils 250000 Jahren angenommen.

Die Oberen Schiefer der Solnhofener Plattenkalke im Raum Langenaltheimer Haardt, inklusive dem Hartgrund-Areal, weisen eine Mächtigkeit von ca. 30 m auf (FESEFELDT, 1962) und sind damit im Vergleich mit anderen Wannen relativ mächtig. Ein Fehlen bestimmter Schichten des Malm Zeta 2b ist nicht nachweisbar, der Hartgrund bildete sich erst am Übergang zum Malm Zeta 3. Da die hangenden Mörsheimer Schichten in einer Mächtigkeit von ca. 5 m vorhanden sind, muss im Malm Zeta 3 die Bildung des Hartgrundes bereits abgeschlossen gewesen sein.

Wahrscheinlich ist auch davon auszugehen, dass die Diskordanz zwischen Malm Zeta 2b und Malm Zeta 3 maximal wenige Meter umfasst. Aussagen über die Gesamtmächtigkeit der Mörsheimer Plattenkalke im Langenaltheimer Gebiet lassen sich leider nicht machen, da ein Großteil des Malm Zeta 3 bereits erodiert wurde. Die Schichtlücke, die durch den Hartgrund repräsentiert wird, liegt aber vermutlich unter einem Zehntel der geschätzten Gesamtmächtigkeit der Mörsheimer Schichten von 60 m (MEYER & SCHMIDT-KALER, 1983). Setzt man nun für den Bildungszeitraum der Mörsheimer Schichten eine Zeitspanne von 250000 Jahren an, so ist für die Entwicklung der Alternanzschicht ein Abschnitt von unter 25000 Jahren (ein Zehntel der Gesamtdauer) möglich. Wahrscheinlich stand aber für die Genese des Hartgrundes ein wesentlich kürzerer Zeitraum von nur mehreren 100 Jahren zur Verfügung. Die Lithifikation des Sedimentes geschah demnach sehr rasch. Der gebildete Hartgrund hatte auch als besiedelbare Omissionsfläche nicht lange Bestand (Jahre bis Jahrzehnte), wie aus der geringen Besiedlungsdichte und der geschätzten Lebenserwartung von *Atreta* abgeleitet werden kann.

Fazit: Der Hartgrund entstand sehr rasch binnen mehrerer Jahrhunderte. Die Besiedlung des Hartgrundes erfolgte in einem noch kürzeren Zeitraum von wenigen Jahren bis Jahrzehnten.

## 7.6 Paläogeographie und Sequenzstatigraphie

Wie veränderte sich der Ablagerungsraum der Plattenkalke in der Zeit der Genese des Hartgrundes?

Der Faziesraum der Langenaltheimer Wanne entsprach teilweise den von GRUSZCZYNSKI (1986) aufgestellten Ablagerungsmodellen II und IV:

Ein flacher Ozeanboden mit lokalen kleinen Erhebungen war der Ablagerungsraum von feinkörnigem Sediment. Zeitweilige Wiederaufarbeitung durch schwache Strömungen sowie geringe Sedimentations- und Zementationsraten waren geeignet zur Ansiedelung benthischer Organismen.

Die hydrodynamische Aktivität muss nichtsdestotrotz zeitweise relativ hoch gewesen sein und auch die Sedimentationsrate war Schwankungen unterworfen. Der Ablagerungsraum war teilweise vom offenmarinen Bereich abgeschottet, was zu leichten Stagnatbedingungen im Becken führte, die sich in hypersalinaren Verhältnissen widerspiegeln konnten. Der ruhige Ablagerungsraum der Wannen wurde manchmal gestört durch Stürme, die für eine Wiederaufarbeitung des Materials sorgten. Die parallele Lamination der Gesteine des Malm Zeta 3 deutet auf eine dominierende Ablagerung der Sedimente aus Suspensionen hin.

Die Entstehung einer Omission kann verschiedene, teilweise gegensätzliche Ursachen haben. Die Genese von Hartgründen kann sowohl an ein Ansteigen als auch ein Absinken des Meeresspiegels gekoppelt gewesen sein. Omission kann aber auch ohne jeden Zusammenhang mit einer Änderung der Meeresspiegelhöhe stattfinden.

Beispielsweise könnte die reduzierte Sedimentanlieferung im distalen Bereich (Plattenkalkwannen, speziell Hartgrund) direkt mit einem erweiterten Raumangebot für Organismen im proximalen Bereich (Schwamm-Algen-Bioherme) gekoppelt gewesen sein (HAQ et al., 1988). Unter dieser Annahme würde der Hartgrund tatsächlich während der von KEUPP & MATYSZKIEWICZ (1997) vermuteten maximum flooding surface entstanden sein. Die Sedimentzufuhr wäre durch eine Vertiefung des Meeres verringert worden. Andererseits würde auch bei einem regionalen Meeresspiegelabfall die tiefer liegende Wellenbasis zur Erosion am Meeresboden führen. Das bereits angelieferte Sediment würde dann abgetragen (HALLAM, 1969).

FÜRSICH (1979) erwähnt, dass nahezu alle von ihm untersuchten Hartgründe als Top regressiver Sequenzen abgelagert wurden oder zumindest eine Transgression nachfolgt. Die Annahme einer Transgression während des Malm Zeta 3 ist auf Grund der Indizien für offeneren Verhältnisse in dieser Zeit gerechtfertigt. Die Mörsheimer Schichten weisen einen bedeutend größeren Fossilreichtum auf, der auf eine gute Verbindung zum offeneren Bereich schließen lässt.

Fazit: Der Meeresspiegel stieg bereits gegen Ende des Malm Zeta 2b an, die Schwamm-Algen-Bioherme verloren langsam ihre Barrierenfunktion für die Plattenkalkwanen.

## 8. Danksagung

Folgenden Personen, waren an dem Gelingen meiner Diplomarbeit und damit auch dieser Veröffentlichung beteiligt: Dipl.-Geol. D. FLEISCHER, Dr. B. FOHRER, Prof. Dr. E. FLÜGEL, Prof. Dr. F. FÜRSICH, Dipl.-Geol. R. VAN GELDERN, Prof. Dr. J. TH. GROISS, Direktor HERTRICH, Dr. M. JÄGER, Dr. M. JOACHIMSKI, Dipl.-Geol. W. JOYCE, Prof. Dr. R. KOCH, Dr. S. KRUMM, B. LEIPNER, R. MÜCKE, M.-L. NEUFERT, Dr. M. RÖPER, Hr. STEIL, CH. SPORN, Dipl.-Geol. C. TRÖGL, Dr. G. VIOHL, P. VÖLKL, Prof. Dr. A. ZEISS sowie die gesamte Mannschaft der Freiwilligen Feuerwehr Langenaltheim. Herzlichen Dank an alle!

Außerdem schulde ich allen hier nicht genannten Freunden und freiwilligen Grabungshelfern meinen Dank für die uneigennütige Hilfe und die schöne Zeit im Gelände.

## 9. Literatur

- ALEXANDERSSON, T. (1969): Recent littoral and sublittoral high-Mg calcite lithification in the Mediterranean. – *Sedimentology*, **12**: 47-61, 2 Taf., 6 Abb.
- BARTHEL, K. W. (1978): Solnhofen – Ein Blick in die Erdgeschichte. – 393 S., 16 Farbtaf., 64 Taf., 50 Abb.; Thun (Ott Verlag).
- BROMLEY, R. G. (1975): Trace fossils at omission surfaces. – In: FREY, R. W. [Hrsg.]: *The Study of Trace Fossils*: 399-428, 18 Abb.; Berlin-Heidelberg-New York (Springer Verlag).
- DE GROOT, K. (1969): The chemistry of submarine cement formation at Dohat Hussain in the Persian Gulf. – *Sedimentology*, **12**: 63-68, 2 Tab., 1 Abb.
- EKDALE, A. A., BROMLEY, R. G. & PEMBERTON, S. G. (1984): *Ichnology: The Use of Trace fossils in Sedimentology and Stratigraphy*. – *SEPM Short Course 15*: 317 S., 95 Abb., 18 Tab.; Tulsa.
- ETTER, W. (1994): *Palökologie: eine methodische Einführung*. – 294 S., 207 Abb., 8 Tab.; Basel – Boston – Berlin (Birkhäuser Verlag).
- FESEFELDT, K. (1962): Schichtenfolge und Lagerung des oberen Weißjura zwischen Solnhofen und der Donau (Südliche Frankenalb). – *Erlanger geol. Abh.*, **46**: 80 S.
- FISCHER, A. G. & GARRISON, R. E. (1967): Carbonate lithification on the sea floor. – *J. Geol.*, **75**: 488-496, 4 Taf., 1 Abb.
- FLÜGEL, E. (1982): *Microfacies Analysis of Limestones*. – 633 S., 53 Taf., 78 Abb., 58 Tab.; Berlin – Heidelberg – New-York (Springer Verlag).
- (1999): *Fazies-Lexikon. Mikrofazielle Untersuchungsmethoden von Karbonatgesteinen*. – Unveröffent. Arbeitsblätter Institut für Paläont. Erlangen: 137 S., 17 Taf., 106 Abb., 26 Tab.; Erlangen.
- FÜRSICH, F. T. (1971): Hartgründe und Kondensationen im Dogger von Calvados. – *N. Jb. Geol. Paläont. Abh.*, **138**, 3: 313-342, 14 Abb., 2 Tab.
- (1979): Genesis, environments, and ecology of Jurassic hardgrounds. – *N. Jb. Geol. Paläont. Abh.*, **158**: 1-63, 5 Taf., 30 Abb.
- FÜRSICH, F. T. & WENDT, J. (1976): Hartgründe und Kondensations-Lagerstätten. – *Zbl. Geol. Paläont. Teil II*, **1976**, 5-6: 238-245, 4 Abb.
- FREY, R. W. & SEILACHER, A. (1980): Uniformity in marine invertebrate ichnology. – *Lethaia*, **13**: 183-207, 17 Abb.; Oslo.
- GERHARD, U. (1992): Beitrag zur Deutung des Ablagerungsraumes der Plattenkalke der Altmühlalb (Malm Epsilon 2 bis Malm Zeta 3). – *Diss. Univ. Bonn*: 75 S., 4 Taf., 29 Abb., 2 Anl.; Bonn.
- GEVIRTZ, J. L. & FRIEDMAN, G. M. (1966): Deep-sea carbonate sediments of the Red Sea and their implications on marine lithification. – *J. Sediment. Petrol.*, **36**: 143-151, 13 Abb.
- GRADSTEIN, F. M., AGTERBERG, F. P., OGG, J. G., HARDENBOL, J., VAN VEEN, P., THIERRY, J. & HUANG, Z. (1995): A Triassic, Jurassic and Cretaceous time scale. – In: BERGGREN, W. A., KENT, D. V., AUBRY, M.-P. & HARDENBOL, J. [Hrsg.]: *Geochronology, time scales and global stratigraphic correlation*. – *SEPM Spec. Publs.* **54**: 95-126; Tulsa.
- GRUSZCZYNSKI, M. (1986): Hardgrounds and ecological succession in the light of early diagenesis (Jurassic, Holy Cross Mts., Poland). – *Acta Palaeont. Polonica*, **31**, 3-4: 163-212, 21 Taf.
- HALLAM, A. (1969): A pyritized limestone hardground in the Lower Jurassic of Dorset (England). – *Sedimentology*, **12**: 231-240, 6 Abb.

- HAQ, B. U., HARDENBOL, J. & VAIL, P. R. (1988): Mesozoic and Cenozoic chronostratigraphy and cycles of sea level change. – In: WILGUS, C. K., HASTINGS, B. S., KENDALL, G. ST. C., POSAMENTIER, H. W., ROSS, A. C. & VAN WAGONER, J. C. [Hrsg.]: *Sea-Level Changes: an Integrated Approach*, SEPM Spec. Publ., **42**: 71-108; Tulsa.
- HODGES, P. (1991): The relationship of the mesozoic bivalve *Atreta* to the *Dimyidae*. – *Palaeontology*, **34**, 4: 963-970, 1 Taf.
- KENNEDY, W. J. & GARRISON, R. E. (1975): Morphology and genesis of nodular chalks and hardgrounds in the Upper Cretaceous of southern England. – *Sedimentology*, **22**: 311-386, 37 Abb.
- KENNEDY, W. J. & JUIGNET, P. (1974): Carbonate banks and slump beds in the Upper Cretaceous (Upper Turonian-Santonian) of Haute Normandie, France. – *Sedimentology*, **21**: 1-42, 36 Abb.
- KEUPP, H. (1978): Das kalkige Nannoplankton der "Roten Mergel" (Tithon-Basis) in der Südlichen Frankenalb und ein assemblage-Vergleich mit anderen Proben der oberen Weißjura. – *Geol. Bl. NO-Bayern*, **28**, 2/3: 80-117.
- KEUPP, H. & MATYSZKIEWICZ, J. (1997): Zur Faziesrelevanz von Saccocoma-Resten (Schwebcrinoiden) in Oberjura-Kalken des nördlichen Tethys-. – *Geol. Bl. NO-Bayern*, **47**, 1-4: 53-70, 1 Taf., 3 Abb.
- KHALAF, F., MILLIMAN, J. D. & DRUFFEL, E. M. (1987): Submarine limestones in the nearshore environment off Kuwait, northern Arabian Gulf. – *Sedimentology*, **34**: 67-75, 5 Abb.
- KUHN, O. (1977): Die Tierwelt des Solnhofener Schiefers. – 140 S., 173 Abb.; Wittenberg (A. Ziemsen Verlag).
- LEINFELDER, R. R., KRAUTTER, M., LATERNSE, R., NOSE, M., SCHMID, D. U., SCHWEIGERT, G., WERNER, W., KEUPP, H., BRUGGER, H., HERMANN, R., REHFELD-KIEFER, U., SCHROEDER, J. H., REINHOLD, C., KOCH, R., ZEISS, A., SCHWEIZER, V., CHRISTMANN, H., MENGES, G. & LUTERBACHER, H. (1994): The Origin of Jurassic Reefs: Current Research Developments and Results. – *Facies* **31**: 1-56, 4 Taf., 31 Abb.
- MANHEIM, F. T. (1965): Manganese-iron accumulations in the shallow marine environment. – *Symp. Marine Geochem., Narragansett Marine Labor., Univ. Rhode Island, Occ. Publ.* **3**: 217-276.
- MEYER, R. K. F. & SCHMIDT-KALER, H. (1983): Erdgeschichte sichtbar gemacht Ein geologischer Führer durch die Altmühlalb. – 260 S., 260 Abb., 2 Beil.; München (Bayerisches Geologisches Landesamt).
- MYROW, P. M. (1995): Thalassinoides and the Enigma of Early Paleozoic Open-Framework Burrow Systems. – *PALAIOS*, **10**, 1: 58-74.
- PALMER, T. J. (1982): Cambrian to Cretaceous changes in hardground communities. – *Lethaia*, **15**: 309-323, 9 Abb.
- PEMBERTON, S. G. & FREY, R. W. (1985): The Glossifungites ichnofacies: modern examples from the Georgia coast, USA. – In: CURRAN, H. A. [Hrsg.]: *Biogenic Structures: Their Use in Interpreting Depositional Environments*, SEPM Special Publication **35**: 237-259; Tulsa.
- RÖPER, M. (1992): Beitrag zur Deutung des Ablagerungsraumes der Plattenkalke der Altmühlalb (Malm Epsilon 2 bis Malm Zeta 3). – Diss. Univ. Bonn: 14 Taf., XVII + 96 S., 10 Abb., 5 Tab.; Bonn.
- RÖPER, M. & ROTHGAENGER, M. (1998a) Die Plattenkalke von Hienheim. – 110 S., 8 Taf., 148 Abb.; Eichendorf (Eichendorf Verlag).
- (1998b) Die Plattenkalke von Solnhofen, Langenaltheim, Mörsheim. – 96 S.; Treuchtlingen (Keller Verlag).
- SCHÄFER, W. (1962): *Aktuopaläontologie nach Studien in der Nordsee*. – 36 Taf., 666 S., 277 Abb.; Frankfurt (Kramer Verlag).
- SHINN, E. A. (1969): Submarine lithification of Holocene carbonate sediments in the Persian Gulf. – *Sedimentology*, **12**: 109-144, 36 Abb., 2 Tab.
- SELLWOOD, B. W. (1992): Der Jura. – In: MCKERROW, W. S. [Hrsg.]: *Ökologie der Fossilien*: 140-180, 21 Abb.; Stuttgart (Franckh-Kosmos Verlag).
- SWINBANKS, D. D. & LUTERNAUER, J. L. (1987): Burrow distribution of thalassinidean shrimp on a Fraser Delta tidal flat, British Columbia. – *Journal of Paleontology*, **61**, 2: 315-332, 11 Abb.
- VIOHL, G. (1998): Die Solnhofener Plattenkalke – Entstehung und Lebensräume. – *Archaeopteryx*, **1998**: 37-68.
- WINGS, O. (2001): Sedimentology, microfacies and geochemistry of a hardground in the Solnhofen plattenkalks. – *Facies* **44**; (in Vorber.).

Adresse des Autors:

Dipl.-Geol. O. WINGS, Institut für Paläontologie der Universität Bonn, Nussallee 8, D-53115 Bonn.

E-Mail: oliver.wings@web.de