

Kieselig erhaltene Spicula von Kieselschwämmen aus dem Weissen Jura der Ulmer Gegend – Überblick und Überlegungen zur Diagenese

Von ULF THEWALT und GERDA DÖRFNER, beide Ulm

Mit 93 Abbildungen

ZUSAMMENFASSUNG

Kieselig erhaltene Nadeln von Kieselschwämmen des oberen Weißen Jura kommen in den geschichteten Kalken in der Gegend von Ulm vor – bevorzugt in der Nachbarschaft ungeschichteter Schwamm-Algen-Riffe. Die beobachteten Spicula werden vorgestellt. Korrosions- und Diageneseerscheinungen an ihnen werden beschrieben und interpretiert. Besonders hervorzuheben ist die Beobachtung, dass an den Spicula häufig Abdrücke von Dolomitkristallen vorkommen. Aus der Art der Abdrücke sowie aus weiteren Beobachtungen lässt sich ableiten, dass die Quarzkristalle, aus denen die Spicula jetzt bestehen, an Ort und Stelle aus dem ursprünglichen biogenen Opal hervorgegangen sind.

Schlüsselworte: Oberjura, Kieselschwämme, Spicula, Kieselsäure, Diagenese, Ulm

ABSTRACT

Spicules of siliceous sponges from the upper Malm which now consist of silica can be found in the bedded facies in the area of Ulm (South Germany). They occur preferentially in the neighborhood of sponge-algal reefs. The spicules observed are presented here. The effects of corrosion and diagenesis on them are described and discussed. The observation that the spicules show impressions of dolomite crystals is of special interest. From the shape of the impressions and from additional observations, it can be concluded that the silica of which the spicules now consist, has been formed in situ from biogenic opal.

Key words: Upper Jurassic, siliceous sponges, spicules, silica, diagenesis, Ulm.

1. EINFÜHRUNG

Die korallenführenden Riffschuttkalke des oberen Weißen Jura der Schwäbischen Alb sind schon lange für ihren Reichtum an verkieselten Fossilien bekannt. Als einer der ersten Autoren erwähnt CARL VON LINNÉ in seinem Werk „*Natursystem des Mineralreichs*“ (1779) mehrfach verkieselte Korallen von Blaubeuren, Giengen und Heidenheim. Zu den abgebildeten und von LINNÉ noch bei den Korallen eingeordneten Fossilien gehören auch Kieselschwämme. Außer kieselig erhaltenen Schwammskeletten oder Bruchstücken von Skeletten sowie ganzkörperlich eingekieselten Schwämmen, kommen in den Korallenriffschuttkalken große Mengen einzelner Spicula (Plural von Spiculum = Schwammnadel) in SiO₂-Erhaltung vor.

Schwammspicula weisen eine große Formenvielfalt auf. Eine sorgfältig illustrierte Zusammenstellung, die dies belegt, stammt von REIF (1967). Darin sind die kieselig erhaltenen Spicula aus der Gegend von Nattheim (Württemberg; Weißer Jura zeta; Korallenriffschutt) abgebildet. Ältere Arbeiten, in denen näher auf Spicula von Kiesel Schwämmen der Alb eingegangen wird, stammen von KOLB (1910) und von SCHRAMMEN (1936). Als neuerer Überblick ist die ebenfalls reichbebilderte Veröffentlichung von PISERA (1997) zu nennen. Zu erwähnen sind weiter die Arbeiten von MOSTLER (1990) und MOSTLER u. BALOGH (1993/94, 1994), in denen spezielle Spicula aus alpinem Jura mit solchen von Nattheim verglichen werden. Allgemein über rezente und Jura-Kiesel Schwämme informieren die Arbeiten von KRAUTTER (1997) und von HARTMAN et al. (1980). Zur Systematik rezenter und fossiler Schwämme s. HOOPER u. VAN SOEST (2002) sowie FINKS et al. (2003).

Kiesel Schwämme sind auch in den epsilon und zeta Weißjurakalken (oberes Kimmeridgium und Tithonium) der näheren Umgebung von Ulm weitverbreitet (PAULSEN 1962, SCHORR u. KOCH 1985). Kieselig erhaltene Spicula oder Skelette kommen hier aber nur in Sedimentpartien von vergleichsweise geringer Ausdehnung vor. An den Schwamm-Algen-Biohermen, die in den Steinbrüchen des Blautals und der Seitentäler (Abb. 1) aufgeschlossen sind, läßt sich beobachten, daß das Skelettmaterial der Schwämme durch Kalzit ersetzt ist und daß innerhalb der Bioherme offenbar keine verkieselten Fossilien vorkommen. Gleichartige Beobachtungen liegen auch von Schwammriffen anderer Gegenden vor (vgl. FÜCHTBAUER 1988: 540). Für die hiesigen Bioherme scheint es typisch zu sein, dass sich das abgewanderte SiO_2 in Form von Konkretionen (Kieselknollen, Feuersteinen) in der geschichteten Fazies angereichert hat, die an die unteren Be-

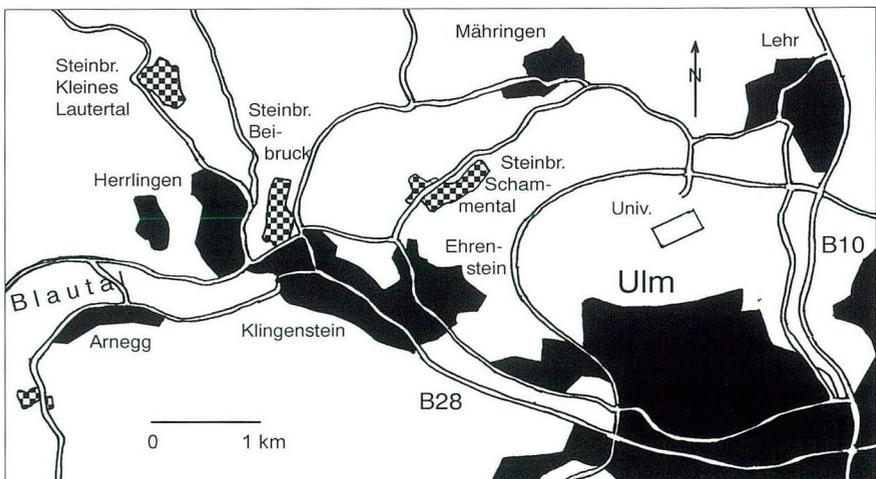


Abb. 1. Das Untersuchungsgebiet.

reiche der Bioherme angrenzt (vgl. SCHORR u. KOCH 1985 sowie BEURER 1971). In diesen Bereichen trifft man auch verkieselte Fossilien sowie kieselig erhaltene Schwammreste an – isolierte Spicula, Teile von Skeletten und in Feuersteinen eingekieselte Schwammfragmente. Neben Schwammresten in SiO_2 -Erhaltung findet man allerdings auch hier Bruchstücke von Schwämmen, deren Skelett durch Kalzit ersetzt ist. Häufig kommen Skelettreste beider Erhaltungstypen unmittelbar benachbart zueinander vor, und auch Skelette mit nur stellenweise kieselig konserviertem Skelatt. Die Beobachtung, dass man im Wesentlichen nur Bruchstücke von Schwämmen antrifft, deutet darauf hin, dass es sich um verfrachtete, beim Transport oder schon vorher zerfallene Schwämme handelt, die ursprünglich auf oder an den Schwamm-Algen-Riffen siedelten.

Im folgenden bringen wir zunächst einen Überblick über die kieselig erhaltenen Schwammspicula aus dem Oberjura der näheren Umgebung von Ulm. Anschließend beschreiben wir Beobachtungen zu ihrer Korrosion und Diagenese. Dabei versuchen wir, die Beobachtungen auf Prinzipien der SiO_2 -Chemie zurückzuführen. Auf Schwammreste, die ganzkörperlich verkieselt, in Feuersteinen eingeschlossen oder durch Eisenminerale ersetzt sind, möchten wir an anderer Stelle eingehen.

2. AUFSCHLÜSSE, UNTERSUCHUNGSMATERIAL UND PRÄPARATION

Die in der näheren Umgebung von Ulm vorkommenden Juraablagerungen gehören zum Unteren Massenkalk (Mu; Weissjura delta und epsilon, oberes Kimmeridgium) und Oberen Massenkalk (Mo; Weißjura zeta, Tithonium). Als Lithofaziestypen kommen zum einen die Bankfazies und zum anderen die Riff-Fazies vor. Erstere besteht aus geschichteten Sedimenten, letztere aus ungeschichteten Massenkalken. Die „Riff-Fazies“ entspricht nach gängiger Vorstellung Schwamm-Algen-Riffen. Nach KOCH u. SENOWBARI-DARYAN besteht sie jedoch hauptsächlich aus Peloid-Lithoklast-Ooid-Karbonatfazies und nur zum Teil aus eigentlichen Schwamm-Algen-Riffen-Biohermen (KOCH u. SENOWBARI-DARYAN 2000; dort Hinweise zu vorausgehenden relevanten Arbeiten). Charakteristisch für die Riff-Komplexe, die in den Steinbrüchen im Kleinen Lautertal, im Schammental und am Beibruckberg bei Herrlingen vorkommen (s. Abb. 1), ist das Fehlen von Korallen. In der hiesigen Gegend treten Korallen erst ab dem mittleren Weißjura zeta-1 auf. – ca. 50 m oberhalb der epsilon/zeta-Grenze (PAULSEN 1962: 41). Die in den entsprechenden Bereichen – diese liegen höher als die Steinbruchoberkanten – vorkommenden Korallen liegen teils in kalzitischer, teils in verkieselter Form vor. Wir konnten beobachten, dass in der Nachbarschaft verkieselter Korallen stets auch andere Fossilien, insbesondere Schwammspicula, in SiO_2 -Erhaltung zu finden sind. Ein im Steinbruch SW von Arnegg, westlich der Strasse (s. Abb. 1) angeschnittenes Riff stellt eine Besonderheit dar: Nachdem es zunächst als Schwamm-Algen-Riff existierte, setzte die Besiedlung mit Korallen schon kurz nach dem epsilon/zeta-Übergang ein (PAULSEN 1962, 1964). Ungewöhnlich ist auch, dass die Fossilreste aus dem zugehörigen Riffschuttgebiet offenbar ausschließlich kalzitisch erhalten sind.

Die unten vorgestellten Schwammreste stammen von den folgenden Lokalitäten (alle TK 25: 7525 Ulm-Nordwest). Für die Fundpunkte (s. Abb. 1) werden Abkürzungen benutzt.

KL2: Steinbruch der Firma H. Reischl GmbH u. Co. KG im Kleinen Lautertal (R: 3565752, H: 5366882), 2. Sohle, SW-Wand, geschichteter Bereich mit Kieselknollen am Rand eines ungeschichteten Riffkomplexes. Der Aufschluß existiert nicht mehr. Das Gesteinsmaterial zwischen der ehemaligen Steinbruchwand und der Straße wurde während der vergangenen zwei Jahre abgebaut. Wahrscheinlich Weißjura epsilon. Nach Joos (1948: 3) verläuft die delta/epsilon-Grenze im Basisbereich des Steinbruchs.

KL3: Wie KL2, jedoch 3. Sohle, Südlicher Abbaubereich, Stand März 1996, geschichteter Bereich mit Kieselknollen am Rand eines Riffkomplexes; Weißjura epsilon.

Scha1: Steinbruch der Firma Märker Kalk GmbH, ehemals Ulmer Weißkalk GmbH & Co im Schammmental, östlich der Strasse Herrlingen-Mähringen, R: 3568767, H: 5365877, tiefste Sohle, Abbaubereich im N und NE. Mehrmals zwischen 1995 und 2002 waren hier gebankte, Kieselknollen führende Kalke angesprengt. Aus Ammonitenfunden (*Virgatixioceras setatum* und *Aulacostephanus yo*) ergibt sich, dass hier Sedimente des Weißjura epsilon (ki3) vorliegen (BAIER et al. 2001: 329).

Scha3: Wie Scha1, jedoch 3. Sohle, NE-Wand, 533 m über NN; zwischen 1996 und 2000 lagen mehrmals Kieselknollen führende, an ungeschichtete Bereiche angrenzende Partien offen; wahrscheinlich schon Weißjura zeta-1.

Bei1: Steinbruch der Firma Märker Kalk GmbH, ehemals Ulmer Weißkalk GmbH & Co am Beibruckberg bei Herrlingen, R: 3566907, H: 5365617, tiefste Sohle, westliche Abbauwand; Stand April bis September 1997 (jetzt mit Abraum zugeschüttet), gebankter Bereich mit Kieselknollen; wahrscheinlich weißer Jura delta; dies entspricht der Angabe von SCHORR & KOCH (1995: 233), wonach die delta/epsilon-Grenze in der damals tiefsten (jetzt 2.) Sohle verläuft.

BeiR: Rücken des Beibruckberges bei Herrlingen. Lesesteine aus der Umgebung des in N-S-Richtung verlaufenden Waldweges bei R: 3566697, H: 5366517. Hier kommen vereinzelt Kieselknollen und verkieselte Korallen vor. Demnach handelt es sich um Sedimente aus dem höheren zeta 1-Bereich.

Die Präparation kieselig erhaltener, in Kalk eingebetteter Schwammreste ist einfach: Man legt oder hängt den betreffenden Stein in verdünnte Salzsäure (5- bis 10-prozentig; es funktioniert sogar mit Küchenessig, nur wesentlich langsamer). Unter CO₂-Entwicklung löst sich der Kalk auf und die Einschlüsse fallen zu Boden. Freigeätzte Skelette sind meist sehr zerbrechlich. Hier empfiehlt es sich, den betreffenden Kalkbrocken an einem (säureunempfindlichen, z. B. mit Plastikmaterial ummantelten) Draht hängend, nur soweit wie nötig in die Säure eintauchen zu lassen und nur soweit zu ätzen, dass das Skelett noch im Stein verankert ist. Nach dem Abgießen der Flüssigkeit sollte man die Objekte einige Minuten in ein Gefäß mit Wasser legen oder hängen, um Reste entstandener Salze zu entfernen.

3. DIE EINZELNEN NADELTYPEN

Die Zusammenstellung ist als vorläufig zu betrachten. Etliche der bei REIF (1967) für die Gegend von Nattheim (Württemberg) aufgeführten Typen wurden nicht beobachtet; andererseits kommen einige vor, die bei REIF nicht verzeichnet sind. Für Schwammspicula gibt es eine ausgefeilte Nomenklatur. Erläuterungen dazu findet man beispielsweise bei REIF (1967) und WIEDENMAYER (1994). Hinweise auf ältere Literaturstellen bezüglich der hier angetroffenen Spicula, andere Fundpunkte sowie über das Auftreten gleichartiger Spicula in anderen Erdperioden findet man bei REIF (1967), PISERA (1997), MOSTLER (1990) und MOSTLER u. BALOGH (1993/94 und 1994). Für die Mehrzahl der aufgeführten Spicula lässt sich keine Zuordnung zu einem bestimmten Schwamm durchführen, da gleich aussehende Spicula in mehreren Schwammtypen (bis zur Ebene von Ordnungen hin) vorkommen. Mit der entsprechenden Frage bezüglich der Spicula aus der Unterkreide beschäftigt sich eine Arbeit von KRÜGER (1978). Auf Diageneseerscheinungen, deren Resultate an einigen der nachfolgend abgebildeten Spicula zu sehen sind, wird zusammenfassend in Abschnitt 4 eingegangen.

Monaktine. Spicula mit ungleich entwickelten Enden. Ein Ende ist abgerundet, das andere ist zugespitzt. Dies deutet darauf hin, dass das Wachstum nur in eine Richtung erfolgte (im Gegensatz zum Wachstum bei den anschließend aufgeführten Diactinen). An Nadeln beider Typen sind die Enden häufig korrodiert oder abgebrochen.

Styl: gerades oder schwach gebogenes Spiculum mit einem spitzen und einem abgerundeten Ende; s. Abb. 2; nicht häufig. Die bei REIF (1967; Tafel 12) abgebildeten Typen sind schlanker.

Megastyl: wörtlich: großes Styl; s. Abb. 3. Alle beobachteten Exemplare waren abgebrochen; einige waren im unbeschädigten Zustand sicherlich > 4 mm; nicht selten. Auffallend ist die oftmals perfekte Halbkugelform des dicken Nadelendes.

Criccostyl: Nadel mit mehreren ringförmigen Wülsten am dicken Nadelende; s. Abb. 4. Rezente Schwämme mit solchen Nadeln scheint es nicht zu geben. Criccostyle kommen in allen hiesigen Steinbrüchen vor. Wir haben an keinem Exemplar ein Korrosionsmuster angetroffen, das auf eine Anatomie mit strahlenförmig angeordneten Zentralkanälen (analog der Anatomie von Criccorhabden; s. unten) hindeutet. Das bedeutet, dass die Wülste nur Verdickungen des Spiculus sind. Die Zahl der Wülste hiesiger Criccostyle liegt bei sieben. Interessant ist der Befund, dass mit abnehmendem geologischen Alter die Zahl der Wülste zunimmt. Criccostyle aus der Oberkreide weisen bis zu 20 Wülste auf (GEYER 1955).

Diactine. Bei diesen sind beide Nadelenden gleich entwickelt. Dies ist als symmetrisches Wachstum in zwei Richtungen zu interpretieren.

Amphistrongyl: an beiden Enden abgerundete Nadel. Glatte und mit kleinen Dornen besetzte Exemplare kommen vor; s. Abb. 5 und 6; nicht häufig.

Amphiox: an beiden Enden spitz zulaufende Nadel; gerade oder gebogen. Repräsentanten zweier Typen sind in Abb. 7 und 8 gezeigt.

Amphityl: Spiculum mit stecknadelkopffartig verdickten Enden; s. Abb. 9; Einzelfund. Auch bei Nattheim kommen Amphityle dieses Typs nur äußerst selten vor. (REIF 1967: 89).

Ophirhabd: relativ langes (hier bis zu mehreren mm), leicht gewundenes, unverzweigtes Skelettelement, charakteristisch für Schwämme der Familie Ophirhaphididae; Abb. 10. Als einzigen und zugleich seltenen Weissjura-Schwamm mit Ophirhabden beschreibt SCHRAMMEN (1936: 70) die Spezies *Ophiodesia solivaga* (Weissjura alpha). In den Weissjura zeta-Sedimenten von Nattheim kommen Ophirhabde „sehr selten“ vor (REIF 1967: 89). In unserer Gegend kann man ausser isolierten Spicula auch körperlich erhaltene Schwammreste finden. Die in Abb. 10 gezeigten Spicula sind stark korrodiert. Stellenweise ist der eingekieselte Zentralkanal freigelegt; vgl. Abb. 11.

Kyphorhabd: gekrümmtes Spiculum; konkave Seite glatt; konvexe Seite mit halbringförmigen Wülsten. Die Enden des Spiculums mit kleinen Haken und Einkerbungen versehen; s. Abb. 12. Das dazugehörige, „recht seltene und unscheinbare Schwämmchen“ *Helminthophyllum Feifeli* gleicht unter der Lupe einem „Gewimmel durcheinander kriechender Maden“ (SCHRAMMEN 1936: 69); Abb. 13 bestätigt dies.

Triactine. Spicula mit drei von einem Punkt ausgehenden Armen. Für die Ulmer Gegend ließen bisher nur die beiden folgenden Typen nachweisen.

Anadiaen: relativ großes Spiculum, das einem Anker ähnlich sieht; daher auch die weitere Bezeichnung Ancriox; Abb. 14; nicht selten; das Rhabdom (der Hauptarm) ist häufig durch Korrosion und/oder Bruch beschädigt.

Triod: Spiculum, „dessen drei Strahlen den Kanten einer dreiseitigen Pyramide entsprechen“; so die Definition nach SCHULZE & LENDENFELD (1889: 32). Einzelfund; Abb. 15.

Dichophyllotriod: Dieses Spiculum ist als Orthodichophyllotriaen (s. u.) aufzufassen, dessen Rhabdom (Hauptarm = Arm entlang der C₃-Achse) zur Unkenntlichkeit zurückgebildet ist. Die Gabelung der Kladischen (Nebenarme) ist nur angedeutet. Zwei Exemplare sind in Abb. 16 zu sehen; selten.

Tetractine. Spicula, bei denen von einem Punkt vier Strahlen ausgehen. Zwei Typen lassen sich unterscheiden. Als Caltrope werden Spicula bezeichnet, deren Strahlen gleichlang sind und die paarweise einen Winkel von 109,5° (Tetraederwinkel) einschließen; Symmetrie T_d. Bei den Triaenen sind drei Arme gleich entwickelt; der vierte ist bezüglich Form und/oder Größe anders. Die Symmetrie ist zu C_{3v} reduziert. Während bei Nattheim viele Triaen-Typen gefunden wurden (REIF 1967), ist die Anzahl der in der Ulmer Gegend angetroffenen Typen recht beschränkt. Bemerkenswert ist, dass letztere sich deutlich von den Nattheimer Typen unterscheiden.

Caltrop, einfacher Typ: ohne Stacheln, ohne Ringwülste Abb. 17; selten.

Criccaltrop: Caltrop dessen Strahlen mit Ringwülsten versehen sind; Abb. 18; selten.

Acanthocaltrop: Caltrop, dessen Strahlen mit Dornen besetzt sind; Abb. 19; selten.

Protriaen: Triaen, dessen drei Kladischen (Nebenarme) von der Hauptachse des Spiculums um weniger als 90° abgebogen sind; Abb. 20. Die Protriaene gehören

zu den größten vorkommenden Spicula. Nicht selten sind die Kladisken so klein, dass sie erst bei höherer Vergrößerung erkennbar sind; s. Abb. 21 und 22.

Prodictotriaen: Der Name besagt, dass ein Protriaen vorliegt, dessen Nebenarme sich jeweils in zwei Ärmchen spalten: Bei dem Exemplar von Abb. 23 ist letzteres nur andeutungsweise realisiert; selten. Ausgeprägt ist die Aufspaltung bei dem Spiculum von Abb. 24; selten. Das durch Abb. 25 und 26 dokumentierte Prodictotriaen ist ein Einzelfund. Die Aufspaltung der Kladiske erfolgt so nah am Hauptarm, dass der Eindruck entsteht, es läge sechszählige Symmetrie vor.

Orthodichotriaen: Triaen mit gespaltenen Armen, wobei diese in einer Ebene senkrecht zum Hauptarm liegen; Abb. 27; selten.

Orthodichophyllotriaen: Triaen mit relativ kleinem Rhabdom und von diesem unter 90° abstehenden gegabelten Kladisken. Abb. 28 und 29. Solche Spicula mit mehr oder weniger blattartig verbreiterten Kladisken kamen im Dermalbereich lithistider Schwämme vor. Bei dem Exemplar von Abb. 28 ist nahezu C₆-Symmetrie erreicht. Möglicherweise sind bei beiden Spicula die äußeren Kiesel-schichten wegkorrodiert.

Orthodichomesotriaen: Definition für Mesotriaen: „Von dem Mitteltheil eines geraden Schaftes (Rhabdom) gehen drei Aststrahlen (Cladi) ab“ (SCHULZE u. LENDENFELD 1889: 20). Im vorliegenden Fall (Abb. 30) sind die Aststrahlen gegabelt und liegen in einer Ebene senkrecht zum Rhabdom. Einzelfund. Mesotriaene kommen bei rezenten Schwämmen der Ordnung Choristida vor und sind selten (SCHULZE u. LENDENFELD 1889: 20).

Pentactine. Die hierher gehörenden Spicula besitzen, wie der Name aussagt, fünf Arme. Sie leiten sich von den Hexactinen durch Unterdrückung des Wachstums eines Arms ab. Sie kommen bei den hexaktinelliden Schwämmen vor. Bei der Mehrzahl der angetroffenen Pentactine ist der unpaare Strahl kürzer als die übrigen Strahlen oder ähnlich lang; s. Abb. 31 – 35. Bei dem Pentactin von Abb. 36 trifft das Gegenteil zu. Pentaktine kommen nicht häufig vor.

Pentactin in seiner einfachsten Form: Sämtliche Stahlen stehen paarweise senkrecht aufeinander und sind gerade; s. Abb. 31.

Acanthopentactin: Pentactin, besetzt mit Dornen. Die Abb. 32 und 33 zeigen unterschiedlich bedornete Exemplare.

Anatetraen: Pentactin mit mehr oder weniger zum unpaaren Stahl hin gebogenen Armen. Bei den in Abb. 34 und 35 gezeigten Spicula ist der unpaare Strahl relativ kurz. Bemerkenswert ist, dass zwei der Arme des Spiculums von Abb. 35 deutlich kürzer als die beiden anderen Arme sind. Beim zweiten Typ von Anatetraenen ist der Hauptarm erheblich länger als die Nebenarme; s. Abb. 36. Entsprechende Spicula sehen aus wie Anker. Der Hauptarm ist besonders anfällig gegen Korrosion. Häufig ist er teilweise oder ganz weggelöst; s. Abb. 37.

Als Kuriosität sei hier noch das in Abb. 38 gezeigte Spiculum aufgeführt (Einzelfund): Eines der vier Kladisken ist nur ansatzweise entwickelt; das ihm gegenüberliegende ist abgeknickt. Möglicherweise handelt es sich um eine pathologische Erscheinung.

Hexactine. Die hierher gehörenden Spicula besitzen sechs Strahlen. Diese sind entsprechend den Achsen eines cartesischen Koordinatensystems ausgerichtet. Hexactine können isoliert vorkommen oder zusammengewachsen sein. Hierauf und auf der Art wie sie „verschmolzen“ sind, basiert die Einteilung der entsprechenden Schwämme (Klasse Hexactinellida) in Ordnungen. Die oben vorgestellten Pentactine leiten sich von den Hexactinen ab, indem beim Wachstum die Ausbildung eines Armes unterdrückt wird.

Oxyhexactin: Hexactin mit spitz zulaufenden Armen. Bei dem Exemplar von Abb. 39 nimmt die Dicke der Arme vom Zentrum des Spiculums zu den Enden hin kontinuierlich ab. Bei dem Exemplar von Abb. 40 sind die Arme in der Nachbarschaft des Zentrums andeutungsweise eingeschnürt. Zusätzlich ist ein Arm besonders lang. Gleiches trifft auch für das Spiculum von Abb. 41 zu, bei dem der längste Arm auch noch gekrümmt ist; Oxyhexactine sind nicht selten.

Pinulhexaktin: Hexaktin, mit einem Strahl, der zapfenartig verdickt ist; s. Abb. 42. Wir haben nur zwei Exemplare gefunden. Auch bei einem von Nattheim stammenden Exemplar (REIF 1967: Tafel 15) handelt es sich um einen Einzelfund. Häufig kommen Pinulhexactine in Sedimenten des unteren Lias der nördlichen Kalkalpen vor (MOSTLER 1990). HINDE u. HOLMES (1891: Tafel 15) bilden Pinulhexactine aus dem frühen Tertiär ab. Die in den Abb. 43 bis 45 vorgestellten Spicula können als Pinulhexactine mit nur schwach entwickeltem „Zapfen“ aufgefasst werden.

Dreidimensional kieselig erhaltene Schwammenskelette entsprechen genau genommen nicht dem Thema der vorliegenden Arbeit. Trotzdem werden mit den Abb. 46–49 einige Skelettausschnitte vorgestellt. Das Argument: Die gezeigten Skelette, die zu Schwämmen mit dictyidem und lychniskidem Bautyp gehören, sind aus zusammengewachsenen (miteinander „verschweißten“) Hexactinen, aufgebaut – um diese geht es ja im aktuellen Abschnitt. An allen in Abschnitt 2 genannten Fundstellen, kommen außer isolierten kieseligen Spicula auch unterschiedlich große Fragmente ganzer Skelette vor.

Bei den dictyiden Schwämmen resultiert durch die „Verschweißung“ der Hexactine ein kubisches Gitterwerk; s. Abb. 46. Das gezeigte Gitter ist stellenweise korrodiert, so dass die (aufgeweiteten) Zentralkanäle sichtbar werden. Der kubische Bauplan muß nicht in allen Bereichen eines dictyiden Skelettes streng realisiert sein. Auch Bereiche der in Abb. 47 gezeigten Art kommen vor. In der äußeren Zone des Skelettes (Dermalbereich) lassen sich die durch Korrosion freigelegten orthogonalen Achsenkreuze erkennen (Abb. 48). Ein zusätzliches „Gespinst“ von SiO_2 zwischen ihnen diente der Stabilisierung und dem Schutz des Schwammes.

Das Gitter der Lychniskida unterscheidet sich vom Gitter der Dictyida dadurch, dass die Gitterknoten raffinierter konstruiert sind: Jeder Kreuzungspunkt ist von 12 Querstreben umgeben; s. Abb. 49.

Polyactine. Der Name deutet an, dass viele, jedenfalls mehr als sechs Strahlen von einem Punkt ausgehen.

Oxyaster: Aster (gr.: Stern) mit etwa 15 kegelförmigen Strahlen; diese Gebilde sind selten und wegen ihrer Kleinheit leicht zu übersehen; s. Abb. 50. Bei REIF (1967: Tafel 15, Abb. 11) wird ein gleichartiges Spiculum „als vom Oxyhexactin abzuleitende Nadel“ aufgefasst; sehr selten.

Oxysphaeraster: Aster mit verdicktem Zentralbereich. Entsprechend dem Verhältnis mittlere Länge der Strahlen zu Radius der Zentralkugel variiert das Erscheinungsbild; s. Abb. 51 und 52; sehr selten.

Sterraster: Aster, dessen Strahlen nur wenig über den Kugelkörper hinausragen. Abb. 53; sehr selten; letzteres trifft auch für Nattheim zu (REIF 1967: 95).

Criccorhabd: perlschnurartig aussehende Mikroskleren. Exemplare mit drei und mit fünf Wülsten kommen vor; s. Abb. 54 und 55. Bei Criccorhabden des ersteren Typs ist die Hauptachse gerade, bei solchen des zweiten Typs geknickt. Die Wülste sind mit kleinen Hügeln besetzt. An diesen Stellen enden Kanäle, die, wie MOSTLER u. BALOGH (1994) erkannten, vom axialen Hauptkanal abzweigen. Bei der korrosiven Erweiterung der Kanälchen ergeben sich gelegentlich Lochmuster der in Abb. 56 gezeigten Art. Vorkommen in allen genannten Fundpunkten; allerdings jeweils mit nur wenigen Exemplaren. Criccorhabde mit drei Wülsten sind in der Ulmer Gegend häufiger als solche mit fünf. Für die Funde von Nattheim fand REIF (1967: 89) ein umgekehrtes Verhältnis. Bemerkenswert ist, dass es auch Criccorhabde mit einer geraden Anzahl von Ringen gibt, beispielsweise mit sechs und acht Ringen aus der Kreide von Südengland (HINDE 1885: Tafel 41).

Rhax: bohnenartig geformte Mikrosklere. Rhaxe sind die bei weitem am häufigsten und in größter Menge auftretenden Spicula. In ein und der selben Gesteinsprobe kommen häufig unterschiedlich große Exemplare vor; s. Abb. 58. Die Oberfläche besitzt ein symmetrisches Muster; gebildet durch kleine Erhebungen (Abb. 57 und 59). Weitere Details der Struktur sind bei kieselig erhaltenen Rhaxen im Laufe der Diagenese aber verloren gegangen. Die unterschiedliche Größe und vor allem die unterschiedliche Dichte der „Bedornung“ der abgebildeten Rhaxe (Abb. 57 und 59) deuten darauf hin, dass es möglicherweise zwei oder mehr Schwammarten gab, die Rhaxe produzierten. Die Schwämme zerfielen nach ihrem Tod offenbar rasch unter Freisetzung der Rhaxe, so dass eine körperliche Erhaltung nur ausnahmsweise zustande kam. HINDE (1890) beschreibt einen entsprechenden Fund aus dem oberen Jura von Yorkshire (England). Wir haben im hiesigen Jura kein solches Beispiel angetroffen. Rhaxe sind auch in Malm-Sedimenten anderer Gegenden sehr häufig; vgl. GRAMANN (1962). Wo sind Rhaxe im System der Spicula einzuordnen? Ein Hinweis, dass Rhaxe entgegen häufig geäußelter Meinung, (beispielsweise FINKS et al. 2003: 31) nicht als Sterraster zu klassifizieren sind, besteht darin, dass sich an den (uns zugänglichen) Rhaxen aus dem weißen Jura keine Korrosionsmuster erkennen lassen, die als Erweiterung radialer Zentralkanäle interpretiert werden können. Eine derartige Korrosion ist aber für Sterraster zu erwarten und wird bei Sphaerastern und Criccorhabden (die tatsächlich radial verlaufende Axialkanäle besitzen, s.o.) angetroffen. Auch Experimente zur künstlichen Korrosion verschiedenartiger rezenter kugelliger Spicula legen nahe, dass es sich bei Rhaxen

nicht um Sterraster handelt, sondern um Selenaster (monaxiale Spicula) (RÜTZLER u. MACINTYRE 1978); vgl. hierzu auch WIEDENMAYER (1994: 62). KRAUTTER et al. (im Druck) diskutieren das „Rhaxe-Problem“ ebenfalls. Sie negieren die Zuordnung der Rhaxe zu den Selenastern als auch zu den Sterrastern. Vielmehr klassifizieren sie die Rhaxe als einen eigenständigen, bislang nur fossil bekannten Nadeltyp.

Desmen. Als Desmen (Singular Desmom) bezeichnet man die Skelettelemente der Lithistida (Steinschwämme). Die Desmen besitzen unregelmäßig gestaltete, zerlappte Auswüchse (= Zygome). Die Zygome benachbarter Desmen sind je nach Schwammtyp entweder miteinander verhakt oder enden am zentralen Bereich eines Nachbarn und passen sich dessen Form an. Günstige Einbettungs- und Fossilisationsbedingungen können dazu führen, dass die Gerüste in verkielselter Form erhalten bleiben und freipräpariert werden können. Die Formenvielfalt der Desmen ist groß. An Hand der Desmenformen lassen sich die lithistiden Schwämme in mehrere Unterordnungen aufteilen. Nicht zu allen Unterordnungen haben wir Repräsentanten gefunden.

Megaclon: relativ großes Desmom, um 1 mm lang, glatt und wenig verzweigt, charakteristisch für Schwämme der Unterordnung Megamorina; Abb. 60 und 61.
Rhizoclon: Desmom mit häufig verzweigtem und gekrümmtem Hauptarm. Dieser ist mit spitzen und/oder warzigen Auswüchsen besetzt. Länge kleiner als 1 mm. Rhizoclon sind charakteristisch für Schwämme der Unterordnung Rhizomorina. Zwei von mehreren angetroffenen Typen sind in Abb. 62 und 63 gezeigt.
Anomoclone: „Desmen, deren Clone [= Zweige] von einem unverdickten Zentrum nach allen Seiten abstrahlen; meistens sind es 6 Clone, die Clonzahl schwankt zwischen 5 und 9“. Dies ist die Definition von MOSTLER u. BALOGH (1993/94): 140). Zugehörige Unterordnung: Anomocladina [Anmerkung: Bei den als Sphaeroclonen bezeichneten Desmen sind die Arme nur im Bereich einer Halbkugel um einen verdickten Zentralbereich angeordnet]. Zwei Typen von Anomoclonen kommen vor: 1. Anomoclone, bei denen alle Zweige Zygome tragen (Abb. 64) und 2. Anomoclone, bei denen ein Teil der Zweige als Spieße ausgebildet sind; Abb. 65 bis 67. Die Skleren des 2. Typs waren im Dermalbereich der Schwämme eingebaut (MOSTLER u. BALOGH 1993/94). Die Skleren beider Typen kommen auch in den Weißjura-Sedimenten von Nattheim vor. Sie gehören zu dem Schwamm *Lecanella pateraeformis* (MOSTLER u. BALOGH 1993/94). Abb. 68 zeigt, wie der Zusammenhalt des Gerüsts zustande kommt: Die Zygome eines Desmoms enden jeweils am zentralen Bereich eines Nachbaredsmoms und passen sich dessen Kontur an.

Didymoclon: längliches Spiculum, von dessen beiden Enden mehrere Arme ausgehen. Bei den hier bisher angetroffenen Spicula sind die Enden verdickt. Diese Spicula lassen sich (nur formal?) als je zwei zusammengewachsene Sphaeroclonen auffassen; s. Abb. 69. Gleich aussehende Spicula kommen auch bei Nattheim vor (MOSTLER u. BALOGH 1994/94) und gehören zu Schwämmen der Gattung *Cylindrophyma*.

4. ZUR FOSSILISATION VON SCHWAMMSPICULA IN SiO_2 -ERHALTUNG

Eine prinzipielle Schwierigkeit bei der Diskussion von Korrosion und Diagenese biogenen Opals besteht darin, dass sich die relevanten Prozesse (Lösung, Kristallisation und Ersatz von SiO_2), die zu dem geführt haben, was jetzt vorliegt, bei Raumtemperatur im Labor nicht überprüfen lassen. Das gilt auch für andere Fossilisationsprozesse (GREGOR u. THEWALT 2001). Bei Bedingungen, die nicht stark von Normalbedingungen abweichen, laufen die Prozesse zu langsam ab. Die Natur andererseits hatte Jahrtausende bis Jahrmillionen zur Verfügung. Das hatte auch RAUFF (1893/94: 231) erkannt, als er am Ende des Kapitels „Erhaltungszustand der fossilen Spongien“ in seiner „Palaeospongiologie“ konstatierte „Die Erkenntnis des Fossilisationsprozesses ist nicht weit vorgeschritten und das Studium darüber bedarf noch gründlicher Vertiefung“. Als neuere Übersichtsarbeit, die sich mit der Diagenese von Kieselschwämmen befasst und in der man viele Angaben zu relevanten vorausgehenden Arbeiten findet, ist diejenige von ZIMMERLE (1991) zu nennen. Speziell auf die Fossilisation von Kieselschwämmen aus dem süddeutschen Jura geht BRACHERT (1991) ein.

Eine Bemerkung: Die Bezeichnung „Kieselsäure“ wird im Folgenden ausschließlich für die Verbindung H_4SiO_4 benutzt. Entgegen gängigem (aber unkorrektem) Sprachgebrauch wird die Verbindung SiO_2 hier nicht als Kieselsäure sondern (korrekt) als Siliciumdioxid bezeichnet. Eine saubere sprachliche Unterscheidung ist nötig, weil beide Verbindungen bei Verkieselungsprozessen eine Rolle spielen.

4.1 Natur der kieseligen Reste

Laut Röntgen-Pulverdiagrammen bestehen diese aus Tiefquarz; s. Abb. 71, obere Kurve. Unter dem Binokular scheinen sie zwar, wenn sie nass sind, mehr oder weniger durchsichtig zu sein, im getrockneten Zustand trifft dies jedoch nicht zu; dann sind die Spicula nur noch durchscheinend oder weiß und undurchsichtig. Dies rührt daher, dass sie aus einer Vielzahl von Quarzkriställchen aufgebaut sind. Bei geeignet hoher Vergrößerung lassen sich diese erkennen (Abb. 70).

Das Skelettmaterial fossiler Kieselschwämme war ursprünglich Opal-A (das A steht für „amorph“). Die Eigenschaften von biogenem Skelettopal lassen sich an Proben studieren, die von rezenten Kieselschwämmen stammen. Die Zusammensetzung des Materials wird durch die empirische Formel $\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ wiedergegeben. Der Wassergehalt liegt bei einigen Gewichts%. Er ist unterschiedlich für verschiedene Schwammgruppen; vgl. MINCHIN (1910). Das Material besitzt einen amorphen Bau. Röntgen-Pulverdiagramme sind dementsprechend frei von „Linien“; vgl. Abb. 71, untere Kurve. Charakteristisch für ausgewachsene, aus Opal-A bestehende Spicula sind eine glatte Oberfläche, muschelige, glatte Bruchflächen und eine hohe Transparenz des Materials. Fazit: Die kieseligen Schwammreste des Weißen Jura stellen Pseudomorphosen von Quarz nach Opal-A dar. Dass „fossile Spicule“ im „kryptokrystallinen und krystallinen Zustand“ vorliegen, war bereits zu Zeiten RAUFF's bekannt (RAUFF 1893/94: 206).

Nicht bekannt war aber, wie und warum die Opal → Quarz-Umwandlung erfolgt.

4.2 Der Übergang Opal-A → Quarz

Die amorphe Phase Opal-A besitzt ein höheres chemisches Potential (einen höheren Energieinhalt) und damit gekoppelt eine höhere Löslichkeit in Wasser als die kristalline Phase Tiefquarz. Zahlenangaben zur Löslichkeit findet man bei FÜCHTBAUER (1988: 503). Die lösungsvermittelte Transformation erfolgt in vielen Fällen nicht direkt, sondern via Opal-CT, eine weitere SiO₂-Phase, die bezüglich chemischen Potentials und Löslichkeit zwischen Opal-A und Tiefquarz liegt. „CT“ soll andeuten, dass in den (mikroskopisch kleinen) Kristallen dieser Phase alternierend Domänen mit Cristobalitstruktur und Domänen mit Tridymitstruktur vorkommen). Die Kaskade Opal-A → Opal-CT → Quarz stellt ein Beispiel zur OSTWALD'schen Stufenregel dar, wonach der energieärmste Zustand nicht direkt, sondern via Zwischenstufen erreicht wird; zur Begründung s. STRANSKI u. TOTOMANOW (1933). Zur Ausdrucksweise: Die energieärmere von zwei in der Kaskade vorkommenden Phasen besitzt einen „Reifungsvorsprung“ gegenüber der energiereicheren. Die Phasen besitzen unterschiedliche „Reifungsgrade“. Im Falle des SiO₂ erfolgen die Transformationen jeweils über die folgenden Schritte:

1. Bildung gelöster Kieselsäure, H₄SiO₄, aus festem Siliciumdioxid gemäß SiO₂(fest) + 2H₂O → H₄SiO₄(gelöst).
2. Wanderung/Diffusion der Kieselsäure-Moleküle zum wachsenden Kristall oder Kristallaggregat der weniger löslichen, stabileren Phase.
3. Dehydratisierung an der Kristalloberfläche der wachsenden Kristalle: H₄SiO₄(gelöst) → SiO₂(fest) + 2H₂O.

Entsprechend der Tatsache, dass hier eine Regel vorliegt, gibt es Ausnahmen zu ihr. Die Opal-CT-Phase kann übersprungen werden und die Kristallisation von Quarz (bei nicht wesentlich über Raumtemperatur liegenden Temperaturen) kann direkt aus einer H₄SiO₄-Lösung erfolgen, vorausgesetzt es liegt von vornherein eine geeignet niedrige Konzentration an H₄SiO₄ vor; vgl. HARDER u. FLEHMIG (1970). Quarz fällt häufig in Form von Chaledon an. Zwischen gröber kristallinem Mikroquarz und Chaledon mit seinen kleinen orientiert angeordneten Quarzkriställchen braucht hier aber nicht unterschieden zu werden. Akkumulationen von Quarz (sowie von intermediärem Opal-CT) auf Kosten weniger stabiler SiO₂-Formen lassen sich in zwei Gruppen einteilen.

(A) Akkumulationen, die in situ stattfinden. Ein Beispiel hierzu stellt die Reifung von Kieselsinter (HERDIANITA et al. 2000) dar. Die Phasenübergänge erfolgen innerhalb des Raumes, den der frisch ausgefallene Sinter einnimmt. Die Transport- bzw. Diffusionswege der H₄SiO₄-Moleküle sind kurz.

(B) Akkumulationen, bei denen Auflösung und Kristallisation an weiter auseinanderliegenden Stellen erfolgen. Der Reifungsvorsprung der kristallisierenden Phase bewirkt ein Konzentrationsgefälle, das zwangsläufig zu einer Wanderung der H₄SiO₄-Moleküle führt. Die Wanderung erfolgt durch Diffusion im Porenwasser des Gesteins oder Sediments. Ein zusätzlicher Transport durch einen Po-

renwasserstrom ist prinzipiell nicht nötig. Er kann aber die Lösungs- und Kristallisationsprozesse beschleunigen. Ausführlich wird das skizzierte Prinzip der „Mobilität durch Metastabilität“ von LANDMESSER im Zusammenhang mit der Achatgenese (LANDMESSER 1984 und 1998) und der Verkieselung von Holz (LANDMESSER 1994) diskutiert.

4.3 Beobachtungen zu Korrosion und Diagenese der kieseligen Spicula

Vorweg ist festzustellen, dass die unten genannten Prozesse bei den verschiedenen Spiculatypen offenbar nicht nach einem einheitlichen Muster erfolgten. Während bei bestimmten Nadeltypen, z. B. Triaenen der Zentralkanal häufig erweitert ist, beobachtet man bei anderen Typen (z. B. Rhizoclonen) keinerlei Aufweitung. Bei wieder anderen Spicula (z. B. Ophirhabden) ist es fast die Regel, dass der Zentralkanal gewissermaßen mit SiO_2 ausgegossen ist und dass nur dieser „Abguss“ samt einem röhrenförmigen, die Außenwand des Spiculums darstellenden Mantel erhalten ist. Vielleicht liefert ein genauerer Vergleich von Korrosionsmustern sogar Informationen zur taxonomischen Einordnung bestimmter Schwämme. PISERA (2003) belegte kürzlich durch rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen bei starker Vergrößerung, dass das Wachstum von Spicula lithistider Schwämme nicht durch kontinuierliche Opalablagerung erfolgt, sondern dadurch, dass sich 100–160 nm große Opalkörnchen, (silica granules) auf dem Spiculum bilden oder aus Lösung niederschlagen. Es ist plausibel, anzunehmen, dass die im folgenden beschriebenen Korrosionserscheinungen wenigstens zum Teil durch die Dichte und Art der Packung der initialen „silica granules“ bestimmt werden und dadurch, in welchem Ausmaß organische polymere Stoffe mit eingebaut wurden.

Erweiterung der Zentralkanäle Die wohl am häufigsten zu beobachtende Art der Korrosion von Spicula besteht in der Erweiterung der Zentralkanäle (RAUFF 1893/94: 207). An vielen isolierten hiesigen Spicula lässt sich die Aushöhlung beobachten, auch an etlichen der oben abgebildeten. Die Skelette hexaktinellider Schwämme zeigen ebenfalls diese Art der Korrosion; vgl. Abb. 46 bis 49. Die Aushöhlung kann soweit gehen, dass von einem Spiculum nur eine dünnwandige Hülse übrig bleibt. Denkbar ist, dass die Spicula mit einem schützenden Film polymerer organischer Verbindungen bedeckt waren, der offenbar während der frühen Phasen der Diagenese erhalten blieb. Denkbar ist auch, dass der Wassergehalt der äussersten Opalschicht besonders niedrig war und dass dies zu relativ hoher chemischer Resistenz führte. Die an dem Spiculum von Abb. 72 ersichtliche Art der Korrosion, die von innen und von außen erfolgte, lässt sich durch die Annahme deuten, dass der organische Schutzfilm bereichsweise verloren gegangen war.

Häufig findet man, dass verschiedene Strahlen ein und desselben Spiculums in unterschiedlichem Ausmaß ausgehöhlt sind. So ist bei den in Abb. 36 und 37 gezeigten Anatetraenen: das SiO_2 des Rhabds weit- bzw. weitestgehend weggelöst, während die Kladsiken bis zu den Spitzen erhalten sind. Abb. 73 zeigt ein entsprechend korrodiertes Protriaen.

In der Regel erfolgt die Korrosion rotationssymmetrisch zur lokalen Nadelachse. Ausnahmen kommen vor; s. Abb. 74. Unsymmetrische Korrosion ist besonders bei den Skeletten hexactinellider Schwämme zu beobachten; vgl. Abb. 46 und 48. Hier befanden sich die Zentralkanäle nicht in der geometrischen Achse des Skelettelements.

Eine spezielle Art der Aufweitung ist an den Mikroskleren von *Criccorhabden* zu sehen. Auffällig dabei ist, dass die aufgeweiteten Kanäle perfekt rund sind und dass die Lochdurchmesser gleich groß sind; Abb 56. Gleiches wurde auch an *Criccorhabden* aus dem Jura von Nattheim und den nördlichen Kalkalpen beobachtet (MOSTLER u. BALOGH 1994).

Zentralkanäle verquarzt. Es kann auch der zur Aushöhlung inverse Prozess abgelaufen sein, dass sich nämlich SiO_2 in einem (häufig zunächst erweiterten) Zentralkanal abgelagert hat. Wenn dann noch die Füllung korrosionsbeständiger (kristallin, kompakter, mit Reifungsvorsprung) war als das SiO_2 -Material des Spiculums, blieb bei späterer Korrosion bevorzugt der ausgefüllte Zentralbereich übrig. Die Abb. 75 bis 78 zeigen Beispiele zu dieser Erscheinung. Die aufbauenden Quarzkristalle der Füllungen sind durchweg kleiner als die Kristalle, aus denen (jetzt) die äußeren Partien des Spiculum bestehen. „Abgüsse“ aufgeweiteter Zentralkanäle täuschen gelegentlich intakte Spicula vor; vgl. Abb 78. Die besondere Korrosionsbeständigkeit verquarzter Zentralkanäle wurde auch an Spikula anderer Fundpunkte beobachtet. HINDE (1885; Tafel 45) bildet entsprechende Exemplare ab, die aus der Kreide von Südengland stammen.

Durchgepauste Inhomogenitäten des ehemaligen biogenen Opals? Der Opal frischer Spicula ist nicht völlig homogen. Die konzentrische Schichtung ist auf variierenden Wassergehalt des Opals zurückzuführen (SCHWAB u. SHORE 1971). Nach neueren Untersuchungen spielen Schwankungen der Packungsdichte der Opalpartikel, die auf wachsenden Spicula abgelagert werden, eine wesentliche Rolle (PISERA 2003). Möglicherweise hängt hiermit auch die spezielle, an den Spiculafragmenten von Abb. 79 bis 81 erkennbare Korrosion zusammen: Schichtweise wurden unterschiedlich korrosionsresistente Zonen freigelegt. Es ist allerdings nicht auszuschließen, dass der sichtbare röhrenförmig-zonare Bau nur unterschiedliche Phasen des Überganges von Opal in Quarz repräsentiert und wenig mit dem ehemaligen Feinbau der Spicula zu tun hat. Noch unklar ist auch der Grund für das nicht seltene gemeinsame Vorkommen verquarzter Zentralkanäle und innerer offenbar relativ beständiger SiO_2 -Schichten eines Spiculums; vgl. Abb. 79 und 80.

Korrosionsspuren auf Spicula-Oberflächen. Beim Durchmustern von Ätzrückständen stößt man gelegentlich auf Spicula (z.B. *Triaena*) mit runden napfförmigen Vertiefungen; Abb. 82. Wir nehmen an, dass sich die Vertiefungen gebildet haben, als die Spicula noch aus Opal bestanden. Hierfür spricht der experimentelle Befund, dass bei der Einwirkung warmer alkalischer Lösungen (mit beispielsweise 1 g NaOH pro Liter; 14 Tage; 60°C) auf rezentes Skelettmateriale ähnliche Vertiefungen entstehen; s. Abb. 83 (T. ESPOSITO u. U. THEWALT; unveröffentlicht). Dünne, runde, bohrlochartige, tief in die Spicula gehende Löcher

haben wir an hiesigem Skelettmaterial bisher nicht angetroffen. Eine solche Art der Korrosion wurde an rezenten Spicula beobachtet; sowohl an solchen, die aus der Tiefsee stammen (DUNCAN 1881), als auch an solchen aus der Nachbarschaft von Korallenriffen (LAND 1976). Die genannten Autoren nehmen eine Beteiligung von Mikroorganismen an.

Mit Korrosion gekoppelte Kristallisation von SiO_2 . Besonders die langen Spicula (z. B. Triaene) zeigen im Bereich ihres größten Durchmessers häufig eine mehr oder weniger starke Korrosion; vgl. Abb 21 und 84. In den betroffenen Bezirken ist durch Lösung mehr SiO_2 -Material abgeführt worden als durch Kristallisation von Quarz gebunden wurde. Hier kommen oft besonders schön gewachsene doppelendig ausgebildete Quarzkristalle vor; Abb 86. Die bei mittlerer Vergrößerung warzig wirkende Oberfläche des Spiculums (Abb. 85) entspricht einer Anhäufung von Paketen scharenweise nahezu parallel orientierter Kristalle. Bei dem in Abb. 87 gezeigten Spiculum ist die SiO_2 -Kristallisation rotations-symmetrisch um den verquarzten Zentralkanal erfolgt. Diese Art der Kristallisation kommt nur selten vor.

4.4. Abdrücke von Dolomitkristallen in kieselig erhaltenen Spicula

Die im folgenden beschriebene Erscheinung scheint bisher nicht beachtet worden zu sein, obwohl eine Stereolupe reicht, um auf sie aufmerksam zu werden: Spicula aus Weißjurasedimenten zeigen häufig Abdrücke eines in Form von Rhomboedern kristallisierenden Minerals. Die ersichtliche Morphologie der erzeugenden Kristalle deutet darauf hin, dass es sich um Abdrücke von Dolomitkristallen handelt. Es gibt keine bevorzugte relative Orientierung der Kristallabdrücke gegenüber den Spiculaoberflächen; Abb. 88–92. Auch an einigen in Abschnitt 3 gezeigten Spicula kommen solche Abdrücke vor.

Die Abdrücke haben sich gebildet, als die Spicula noch aus Opal-A bestanden. Dies ergibt sich aus der Beobachtung, dass die Wände – jedenfalls eines Teils – der Hohlformen glatt sind; vgl. Abb. 89 und 90. Hätte das Spiculum bereits aus Quarzkristallen bestanden, so müssten die Wände der Hohlformen durch Quarzkristalle in ähnlicher Weise wie die freie Spiculumoberfläche aufgeraut sein. Unsere Beobachtungen passen zu den Befunden von SCHAUER (1998: 77), wonach Dolomitkristalle sich in einer frühen Phase der Diagenese gebildet haben, gekoppelt mit einem „frühdiagenetischen Zerfall der Kieselschwämme“.

Daß die Dolomitkristalle überhaupt in die Spicula eindringen konnten, lässt sich durch das Bestreben von Opal-A begründen, via Lösung in eine stabilere SiO_2 -Phase überzugehen. Ein anliegender fertiger oder wachsender Dolomitkristall konnte gewissermaßen nachrücken. Dieser Prozess ist dem der Drucklösung verwandt. Dem „Nachrücken“ waren aber offensichtlich Grenzen gesetzt. Besonders Dolomitkristalle mit zur Spiculumoberfläche tangentialen Kristallflächen drangen nicht tief ein; Abb. 91 und 92. Der Befund, dass die Eindringtiefe der Dolomitkristalle relativ zum Durchmesser eines Spiculums nicht groß ist, beweist, dass das Spiculum während der Bildung der Eindrücke nicht als Hohlform vorgelegen hat. Denn wäre es so gewesen, so hätten die Dolomitkristalle keinen me-

chanischen Widerstand vorgefunden und müssten auch innerhalb der Spicula vorkommen.

Zu erwähnen ist hier, dass Dolomit auch auf andere Weise mit Schwammspicula interagieren kann: WIRSING (1988: 55) beobachtete an Weissjura-Gesteinen von der Hochwanger Steige (Straße von Unterlenningen nach Hochwang, ca. 30 km südöstlich von Stuttgart), dass der Opal-A von Desmen lithistider Schwämme, der zunächst durch Kalzit ersetzt worden war, selektiv durch Dolomit ersetzt (und später wieder rekalkzitiert) worden ist. Da die Dolomitekristalle relativ groß waren, wurden die Desmen nur grob abgeformt.

4.5. Der Quarz der Spicula: Produkt „sekundärer Verkieselung“ oder Original-SiO₂?

Für die Transformation des Opal-A in Quarz sind zwei Szenarien denkbar.

(A) sekundäre Verkieselung: der Opal-A des im carbonatischen Sediment eingebetteten Spiculums löste sich auf und es blieb eine Hohlform zurück. In der Hohlform schied sich später (direkt oder via eine SiO₂-Vorstufe) Quarz ab. Denkbar ist auch, dass in der Hohlform zunächst eine carbonatische Phase kristallisierte, die sich bezüglich Löslichkeit und Reaktivität vom einbettenden Sediment unterschied und später wieder selektiv gelöst und durch SiO₂ ersetzt wurde. In beiden Fällen stammen das Original- und das resultierende SiO₂ eines Spiculums aus unterschiedlichen Quellen.

(B) Das Quarzmaterial, aus dem heute die hiesigen Weissjura-Spicula bestehen, ist an Ort und Stelle aus dem biogenen Opal hervorgegangen. Wir favorisieren diese Vorstellung und bringen hierzu die folgenden Beobachtungen und Argumente.

1. Wäre das in der Carbonatmineralmatrix eingebettete Spiculum unter Bildung einer Hohlform aufgelöst worden, in der später von außen zugewandertes SiO₂ auskristallisierte, so wäre die Erhaltung des Zentralkanal kaum vorstellbar; denn das organische Material des Zentralfadens wäre sicherlich weder in seiner ursprünglichen Lage geblieben noch hätte es den ablaufenden Redox-Prozessen standgehalten. Mit anderen Worten: es wäre verschwunden und mit ihm die Möglichkeit, den Zentralkanal nachzuformen. Diese Vorstellungsschwierigkeiten treten nicht auf, wenn man annimmt, dass der durch Korrosion mehr oder weniger aufgeweitete Zentralkanal zunächst mit einem Carbonat plombiert wurde und die Opal → Quarz-Transformation an Ort und Stelle ablief.

2. Freipräparierte Spicula weisen ein auffällig einheitliches Erscheinungsbild auf: feinkristallin, weiß; Längsachse der aufbauenden Quarzkristalle i. a. kleiner als 2 µm. Reste anderer Organismen in SiO₂-Erhaltung wie die von Brachiopoden, Serpeln, Foraminiferen oder Echinodermen dagegen variieren bezüglich der Größe der Quarz-Kristalle erheblich. Besonders hinzuweisen ist auf die Vielfalt der Varietäten und Abmessungen der SiO₂-Kristalle, die an verkieselten Korallen aus dem Weißen Jura beobachtet werden (NAGEL u. LAUXMANN 1990). Bei den genannten Organismen erfolgte ein Ersatz von Carbonatmaterial durch SiO₂.

Hätten die Spicula der Kieselschwämme intermediär aus Kalzit bestanden, so müssten auch sie stark variierende Konservierungsmuster zeigen.

3. Die Entstehung der in Abschnitt 4.4 beschriebenen Abdrücke von Dolomitkristallen in Spicula lässt sich zwanglos durch die Annahme deuten, dass die Auflösung des Opal-A und die Kristallisation des Quarzes am gleichen Ort, d. h. im Randbereich des Spiculums, erfolgten. Inwieweit dabei die Opal-CT-Phase eine Rolle gespielt hat, ist noch unklar.

Nun ist noch die Frage zu klären, warum bzw. unter welchen Bedingungen das SiO_2 von Skeletten und Spicula in der Nachbarschaft von Kieselknollen überhaupt erhalten bleiben konnte. Es hätte sich ja zu Gunsten der wachsenden Kieselknollen auflösen können. Die Antwort ist einfach: Spicula bzw. Skelette, die kieselig erhalten sind, besaßen ab dem Zeitpunkt ihrer Einbettung in die geschichtete Fazies einen zumindest gleich hohen Reifungsgrad (im Sinne der Ausführungen von Abschnitt 4.2) wie die wachsenden Kieselknollen und konnten ihren Reifungsvorsprung über die Zeit hin aufrechterhalten. Skelettelemente, für die dies nicht zutraf, mußten ihr SiO_2 abgeben. In diesem Fall erfolgte ein Ersatz durch Kalzit. Es ist unerheblich, ob das primäre SiO_2 der Kieselknollen als amorpher Opal, Opal-CT oder Chalcedon/Quarz vorlag. Nur auf die über die Zeit hin bestehenden Unterschiede im Reifungsgrad der „Reaktionsteilnehmer“ kam es an. Außer durch dieses sehr allgemeine Prinzip wurde die Art der Fossilisation durch lokale Gegebenheiten gesteuert. Das in Abschnitt 1 erwähnte Auftreten kalzitisch erhaltener Schwammenskelette direkt neben kieselig erhaltenen in der geschichteten Fazies wird verständlich, wenn man die Abwanderung der Kieselsäure aus den Schwammriffen in die geschichtete Fazies sowie die Vorgeschichte der Schwammfragmente berücksichtigt: Je nach dem, wie lange die Schwämme nach ihrem Tod an ihrem Wachstumsort (Schwammriff) lagerten, löste sich ihr Skelettopal kaum, teilweise oder vollständig auf. Nach der Verfrachtung der (wohl mehr oder weniger durch Carbonatzement verfestigten) Schwammbruchstücke in die geschichtete Fazies konnten zwangsläufig nur diejenigen Skelette kieselig erhalten bleiben, die zum Zeitpunkt der Verfrachtung noch aus SiO_2 bestanden. Entsprechend gilt für isolierte Spicula: Nur wenn sie bald nach dem Tod des Schwammes vom Riff in die geschichtete Fazies gelangten, hatten sie eine Chance, als Kieselnadeln (im wörtlichen Sinn) erhalten zu bleiben.

DANK

Herrn Prof. Dr. M. KRAUTTER, z. Zt. am Institut für Geologie und Paläontologie, Universität Hannover, danken wir herzlich für eine kritische Durchsicht des Manuskripts sowie für die Bereitstellung von Skelettmaterial rezenter Kieselschwämme für Korrosionsversuche. Herrn Prof. Dr. P. WALTHER, Bereich Elektronenmikroskopie, Universität Ulm, danken wir für die Bereitstellung eines Rasterelektronenmikroskops und Frau E. TOOMING für die Bearbeitung eines Teils der Photos. Zu danken haben wir den Herren F. MÜHLEN, H. REISCHL und Dr. G. MERKLE für die Erlaubnis, die jeweiligen Steinbrüche aufsuchen und Material mitnehmen zu dürfen sowie Herrn Dipl.-Chem. T. ESPOSITO und Dipl.-Biol. H.

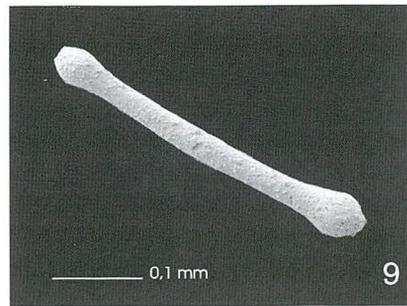
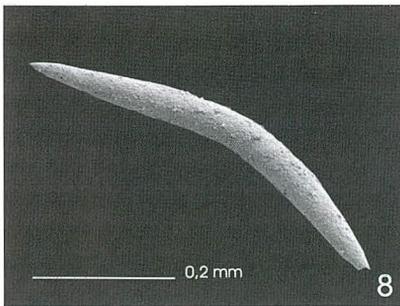
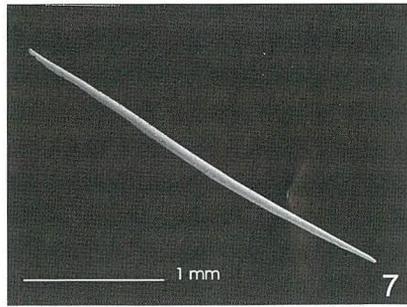
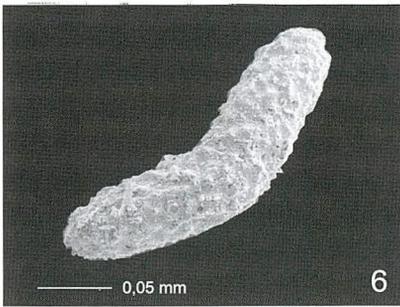
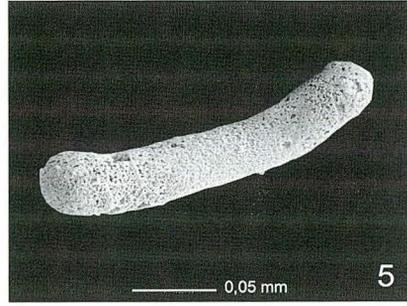
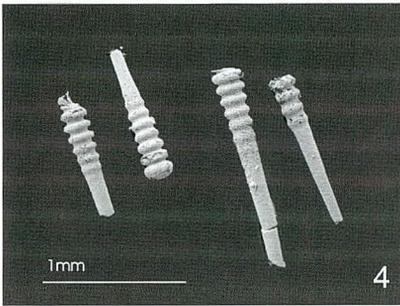
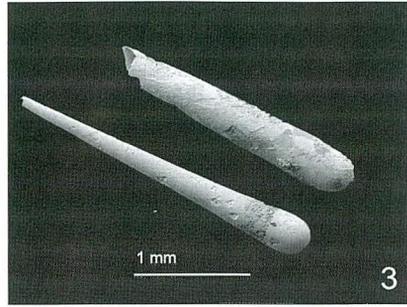
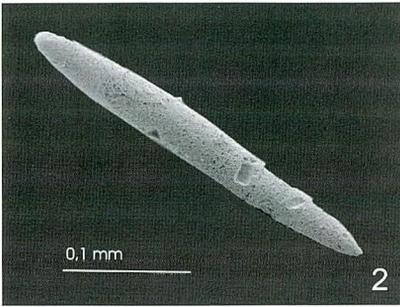
WERTH für die Durchführung von Korrosionsversuchen an rezenten Schwamm-skeletten bzw. das „Fischen“ von Mikroskieren aus Ätzrückständen von Kalkproben.

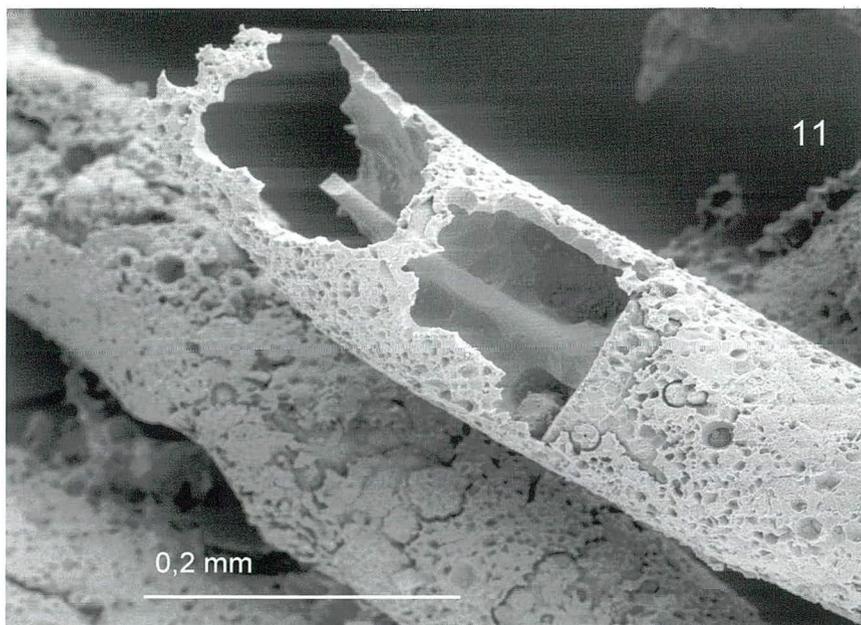
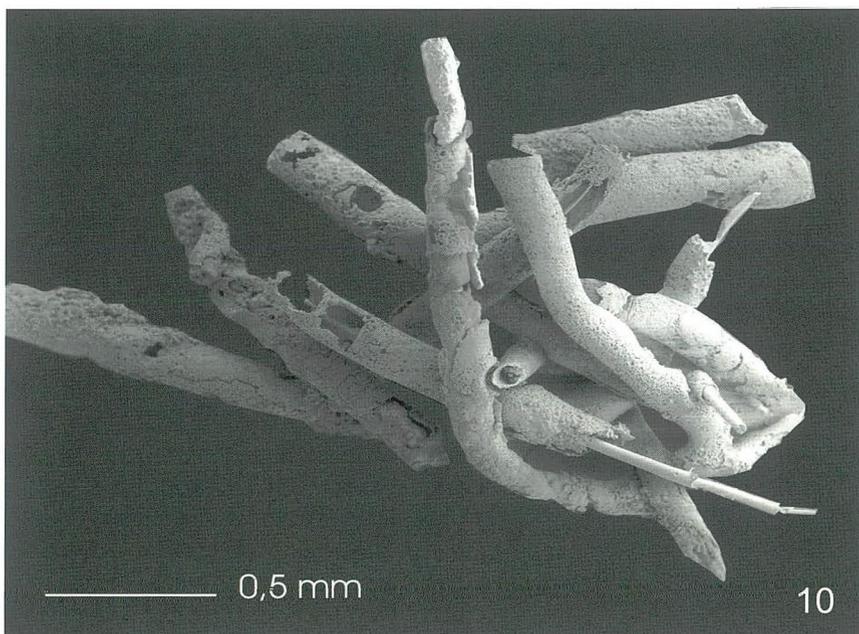
ZU DEN ABBILDUNGEN:

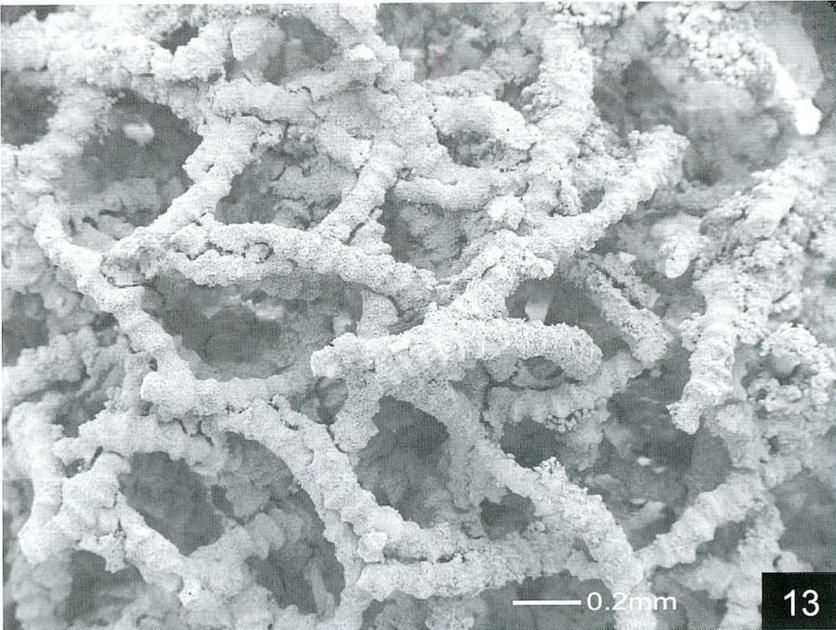
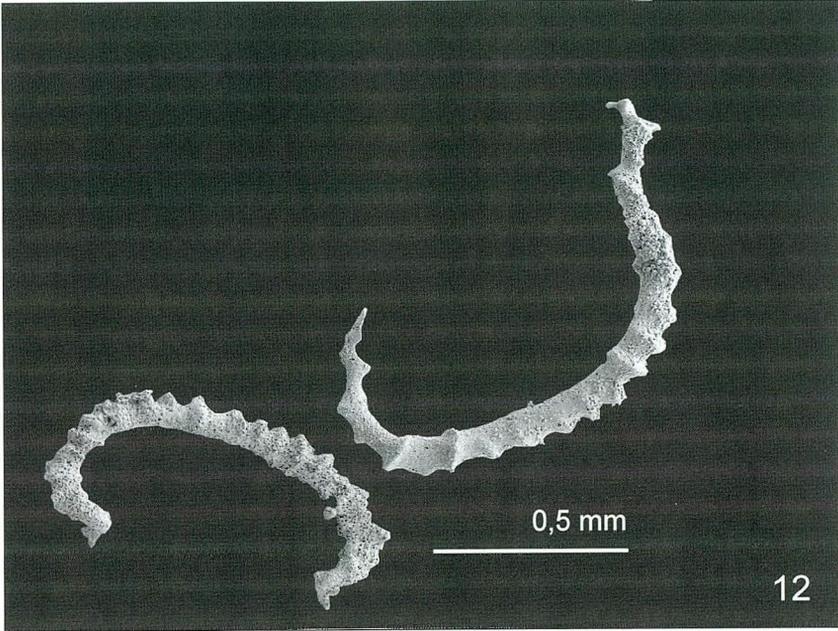
- Abb. 2. Monaktin; Bei1.
 Abb. 3. Megastyl; Scha1.
 Abb. 4. Bruchstücke von Criccostylen; BeiR.
 Abb. 5. Amphistrongyl; Bei1.
 Abb. 6. Mit kleinen Dornen besetztes Amphistrongyl; Bei1.
 Abb. 7. Lange gerade Amphiox.; Scha3.
 Abb. 8. Kurze gekrümmte Amphiox; Scha3.
 Abb. 9. Amphityl; Bei1.
 Abb. 10. Mehrere Ophirhabde mit starken Korrosionsspuren; BeiR.
 Abb. 11. Ophirhabd; Ausschnitt aus Abb. 10; BeiR.
 Abb. 12. Einzelne Kyphorhabde; Scha3.
 Abb. 13. Noch zusammenhängende Kyphorhabde; Scha3.
 Abb. 14. Anadiaen. Der Hauptarm ist abgebrochen; BeiR.
 Abb. 15. Triod; Scha3.
 Abb. 16. Dichophyllotriode; BeiR.
 Abb. 17. Caltrop; BeiR.
 Abb. 18. Criccaltrop; Bei1.
 Abb. 19. Acanthocaltrop; Bei1.
 Abb. 20. Protriaen; Hauptarm unvollständig; Bei1.
 Abb. 21. Protriaen mit sehr kleinen Nebenstrahlen; Scha1.
 Abb. 22. Ausschnittsvergrößerung des Protriaens von Abb. 21; Scha1.
 Abb. 23. Prodichotriaen; die Gabelung der Nebenstrahlen ist nur angedeutet; BeiR.
 Abb. 24. Prodichotriaen; BeiR.
 Abb. 25. Prodichotriaen; Scha1.
 Abb. 26. Prodichotriaen; Ausschnittsvergrößerung von Abb.25; Scha1.
 Abb. 27. Orthodichotriaen; BeiR.
 Abb. 28. Orthodichophyllotriaen; KL3.
 Abb. 29. Orthodichophyllotriaen; KL3.
 Abb. 30. Orthodichomesotriaen; BeiR.
 Abb. 31. Pentctin; Scha3.
 Abb. 32. Acanthopentactin; Bei1.
 Abb. 33. Acanthopentactin; mehrere Arme sind abgebrochen; Bei1.
 Abb. 34. Anatetraen mit relativ kurzem Hauptarm; Bei1.
 Abb. 35. Anatetraen mit relativ kurzem Hauptarm und unterschiedlich langen Nebenarmen; Bei1.
 Abb. 36. Anatetraen mit relativ langem Hauptarm; BeiR.
 Abb. 37. Anatetraen, gleicher Typ wie der von Abb 36; Hauptarm weitgehend wegkorrodiert; BeiR.

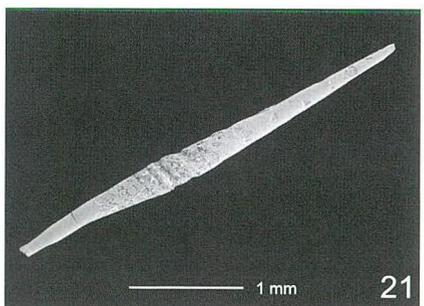
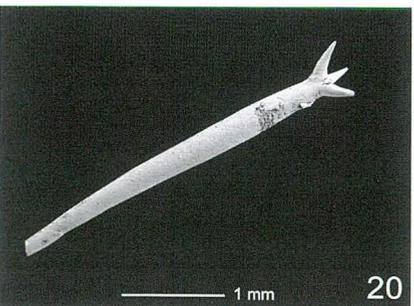
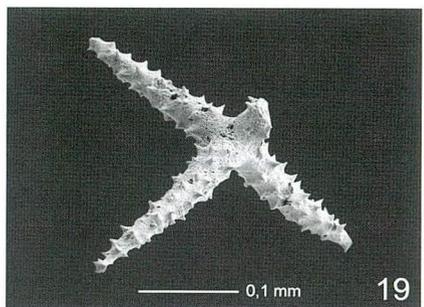
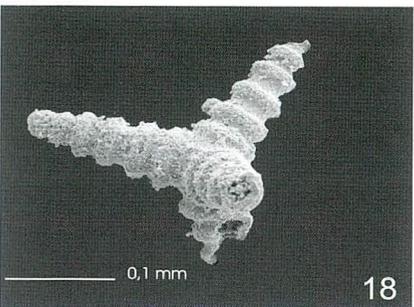
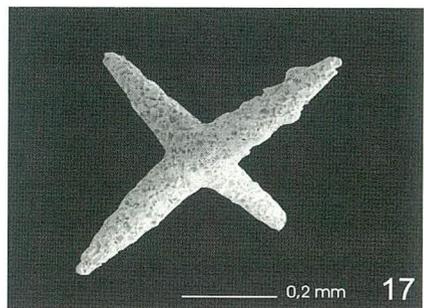
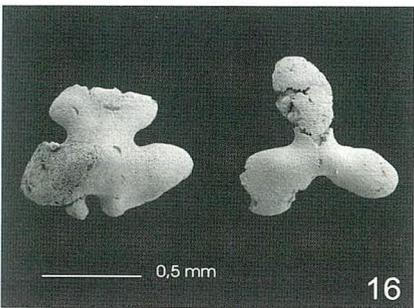
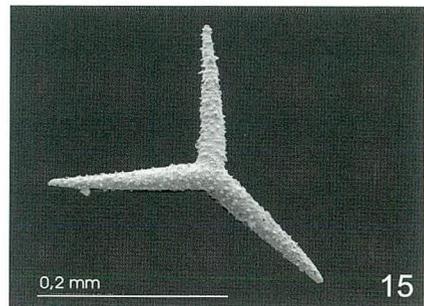
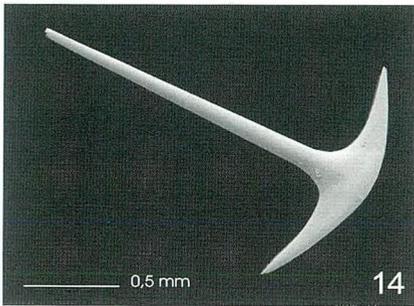
- Abb. 38. Ungewöhnliches Pentactin; eventuell pathologisch abgewandelt; BeiR.
Abb. 39. Oxyhexactin; BeiR.
Abb. 40. Oxyhexactin mit unterschiedlich langen Armen; BeiR.
Abb. 41. Oxyhexactin; ein Arm gekrümmt; BeiR.
Abb. 42. Pinulhexactin; Bei1.
Abb. 43. Pinulhexactin mit relativ kleinem Pinul (Zapfen); Bei1.
Abb. 44. Pinulhexactin mit relativ kleinem Pinul; Bei1.
Abb. 45. Pinulhexactin-ähnliches Spiculum; Scha1.
Abb. 46. Ausschnitt aus dem Skelett eines dictyiden Kieselschwammes; BeiR.
Abb. 47. Ausschnitt aus dem Skelett eines dictyiden Kieselschwammes; BeiR.
Abb. 48. Skelettfragment aus dem Dermalbereich eines dictyiden Kiesel-
schwammes; Bei1.
Abb. 49. Ausschnitt aus dem Skelett eines lychniskiden Schwammes; Scha1.
Abb. 50. Oxyaster; Bei1.
Abb. 51. Oxysphaeraster; KL3.
Abb. 52. Oxysphaeraster mit relativ kurzen Strahlen; KL3.
Abb. 53. Sterraster; Scha3.
Abb. 54. Criccorhabd mit drei Wülsten; Bei1.
Abb. 55. Criccorhabd mit fünf Wülsten; BeiR.
Abb. 56. Korrodiertes dreiwülstiges Criccorhabd; Scha1.
Abb. 57. Rhax mit vergleichsweise dichter „Bedornung“; Scha1.
Abb. 58. Rhaxe; BeiR.
Abb. 59. Rhax mit vergleichsweise wenig dichter „Bedornung“; Scha1.
Abb. 60. Megaclon; Scha3.
Abb. 61. Megaclon; Scha3.
Abb. 62. Rhizoclon; Bei1.
Abb. 63. Rhizoclon; Bei1.
Abb. 64. Anomoclon; alle Arme tragen Zygome; BeiR.
Abb. 65. Anomoclon; ein Arm als Spieß entwickelt; BeiR.
Abb. 66. Anomoclon; zwei Arme als Spieße entwickelt; BeiR.
Abb. 67. Anomoclon mit neun Armen; davon einer als Spieß entwickelt; BeiR.
Abb. 68. Zwei miteinander verhakte Anomoclone; BeiR.
Abb. 69. Didymoclon; BeiR.
Abb. 70. Oberfläche eines Spiculums bei starker Vergrößerung; Bei1.
Abb. 71. Röntgenpulverdiagramme (Cu K alpha-Strahlung; Abszisse: $2\theta/^\circ$;
Ordinate: Intensität) von Schwammspicula; obere Kurve: Spicula aus hiesigem
Weißen Jura; untere Kurve: Skelettmaterial eines rezenten hexactinelliden Kie-
selschwammes (*Heterochone calyx*).
Abb. 72. Korrosion eines Spiculums von innen und aussen; Scha1.
Abb. 73. Protriaen mit ausgehöhltem Hauptarm; BeiR.
Abb. 74. Unsymmetrische Korrosion eines Pentactins; BeiR.
Abb. 75. verquarzter Zentralkanal eines Spiculums; Scha1.
Abb. 76. Bereichsweise freiliegende verquarzte Zentralkanäle verschiedener Spi-
culum-Typen; BeiR.

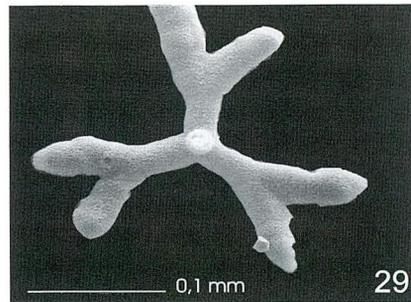
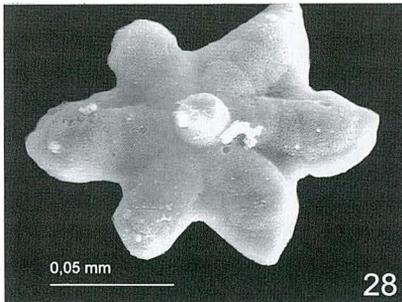
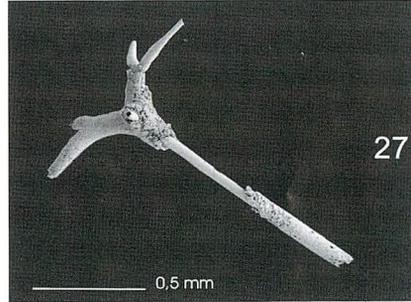
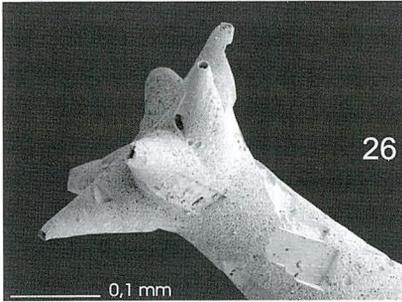
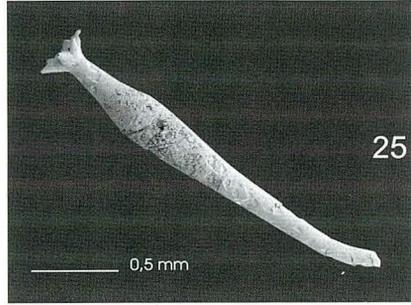
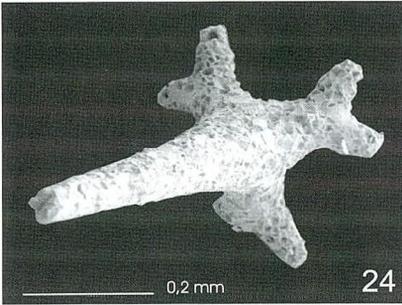
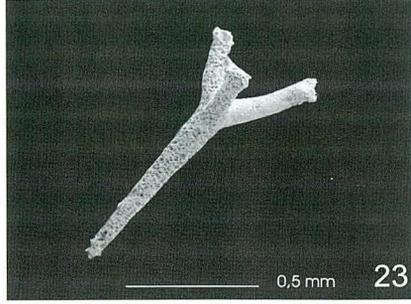
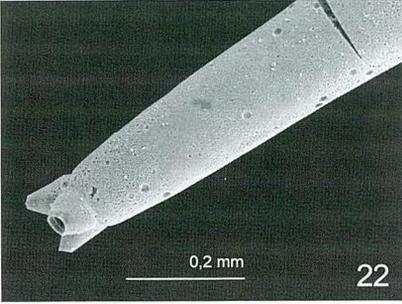
- Abb. 77.** Bereichsweise freiliegendes verquarztes Zentralkanalssystem eines *Triaens* (*Caltrop?*); BeiR.
- Abb. 78.** Fragment eines *Orthodichotriaens*. Vor der Ausfüllung mit Quarzmaterial war eine korrosive Aufweitung der Zentralkanal erfolgt. An zwei Stellen läßt sich die ursprüngliche Dicke des Spiculums abschätzen; BeiR.
- Abb. 79.** Reste eines Spiculums mit verquarztem Zentralkanal und schichtweise unterschiedlich korrosionsresistentem SiO_2 -Material; BeiR.
- Abb. 80.** Spicula mit verquarzten Zentralkanälen und schichtweise erfolgter Korrosion; BeiR.
- Abb. 81.** Spiculum mit unterschiedlich korrosionsanfälligen Bereichen; Scha3.
- Abb. 82.** Schüsselförmige Korrosionsgruben auf der Oberfläche eines Spiculums; Scha1.
- Abb. 83.** Durch Behandeln mit verd. NaOH auf rezentem Skelettmaterial (von *Heterochone calyx*) erzeugte Ätzgruben.
- Abb. 84.** Langes Spiculum mit starken Korrosionsspuren im mittleren Bereich; Scha1.
- Abb. 85 und 86.** Mittlerer Bereich des Spiculums von Abb. 84 bei zunehmender Vergrößerung.
- Abb. 87.** Verquartzter Zentralkanal eines Spiculums mit zusätzlichen rotations-symmetrischen SiO_2 -Ablagerungen; Bei1.
- Abb. 88.** Abdrücke mehrerer Dolomitkristalle an einem Spiculum; Scha1.
- Abb. 89.** Einer der Abdrücke von Abb. 88 bei höherer Vergrößerung.
- Abb. 90.** Abdrücke zweier Dolomitkristalle an einem Spiculum; BeiR.
- Abb. 91.** *Anatriaen* mit mehreren Abdrücken von Dolomitkristallen; Scha3.
- Abb. 92.** *Rhax* mit Abdrücken von Dolomitkristallen; Scha1.
- Abb. 93.** Ein *Rhizoklon* mit Abdrücken von Dolomitkristallen; Bei1.

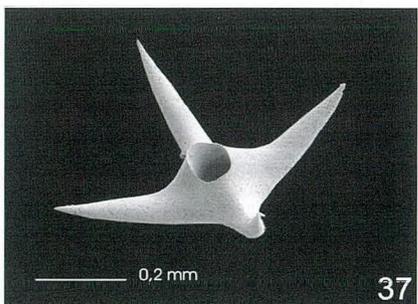
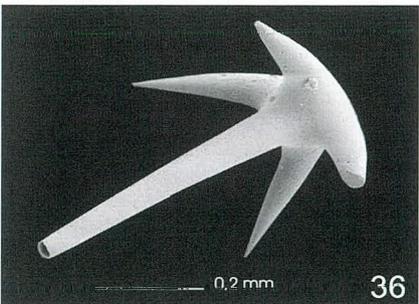
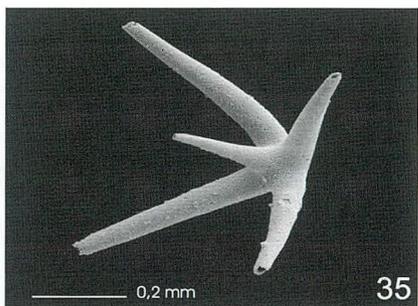
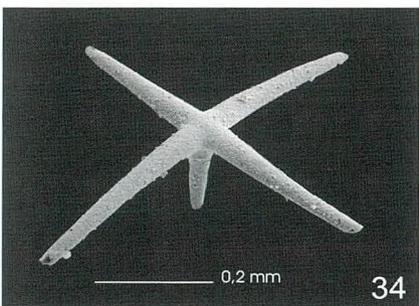
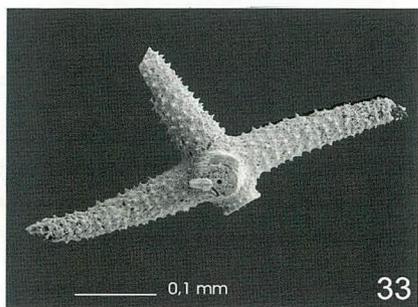
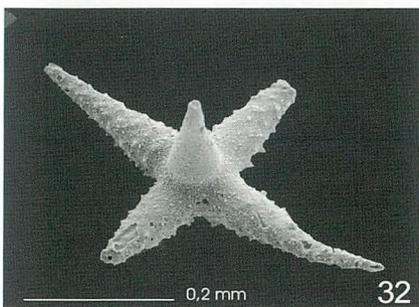
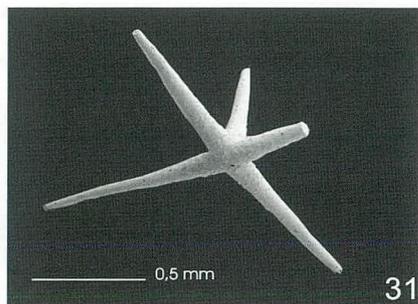
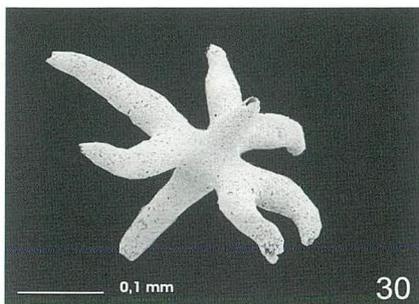


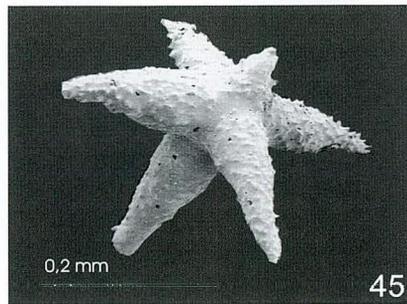
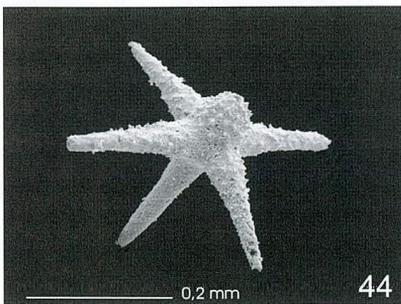
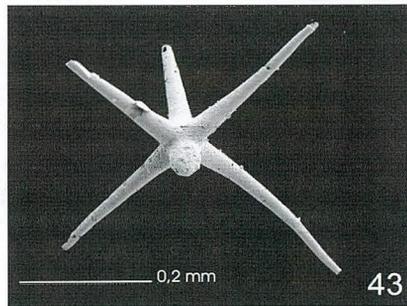
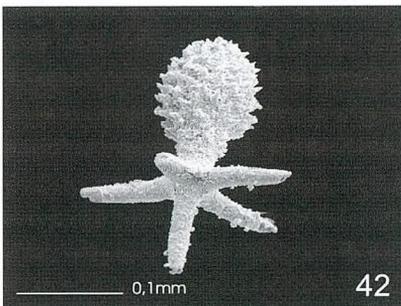
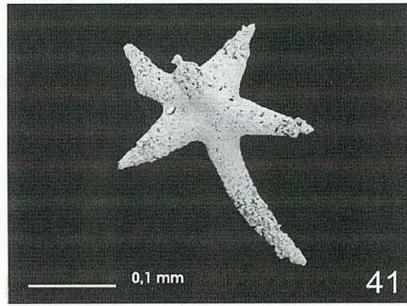
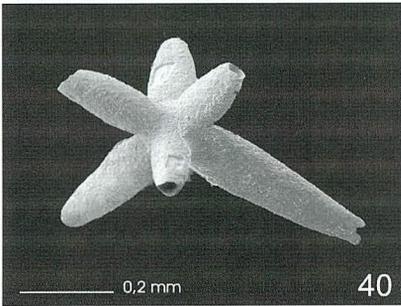
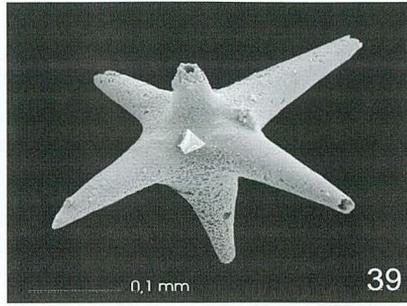
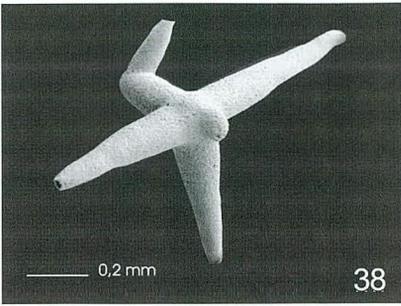


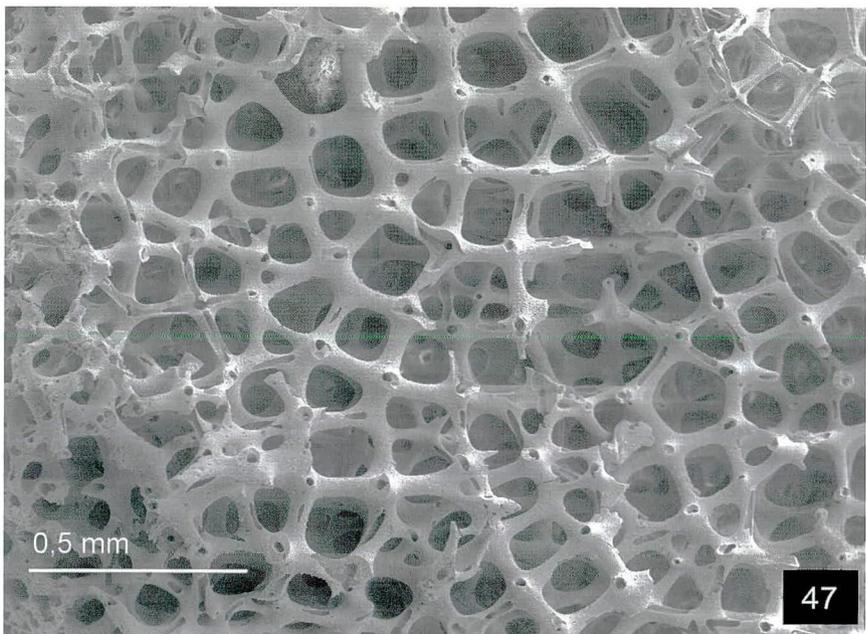
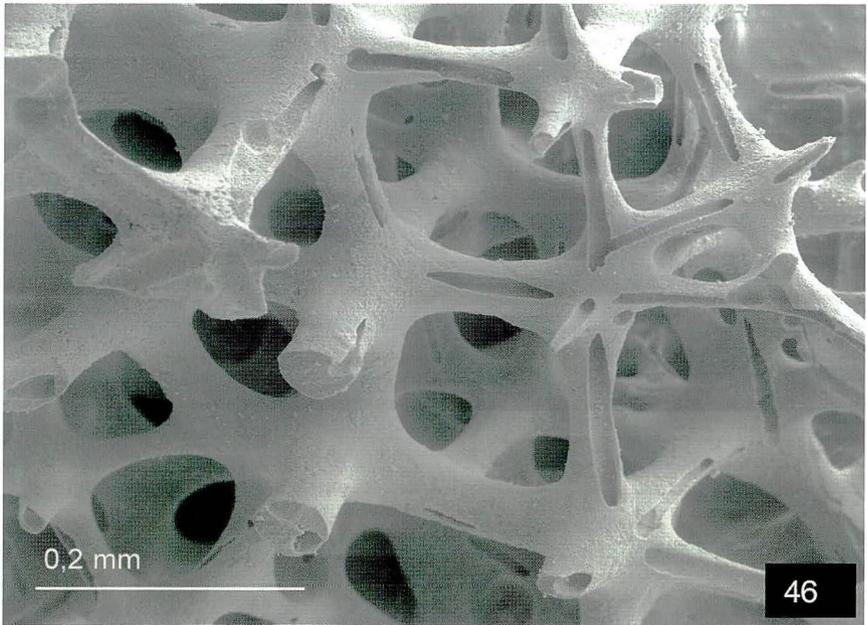


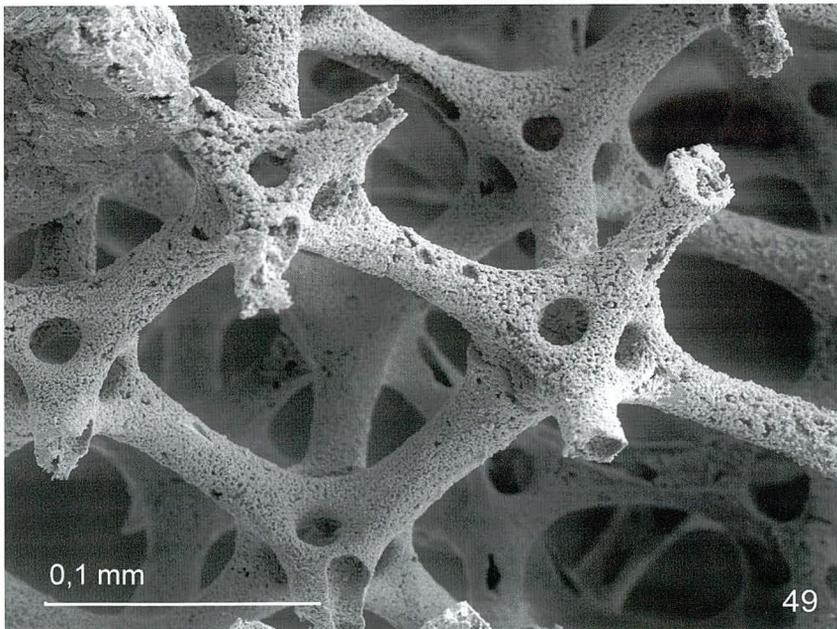
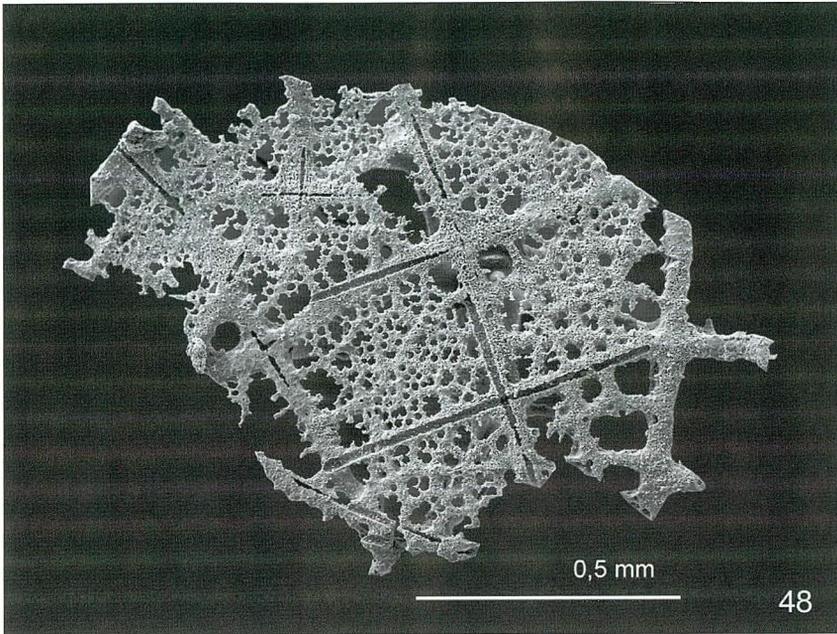


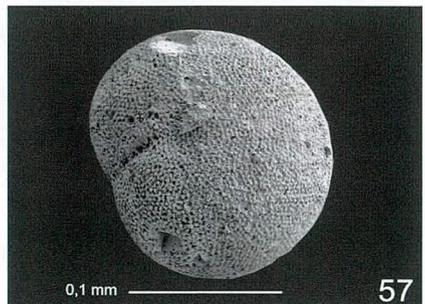
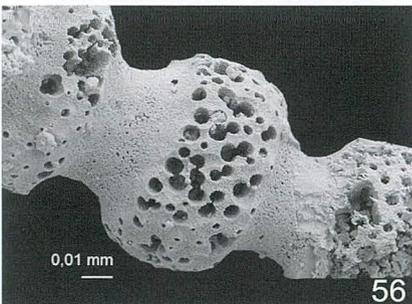
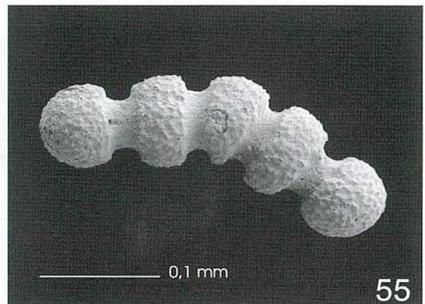
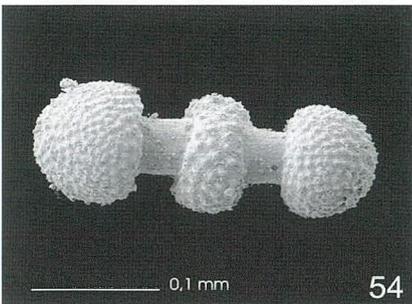
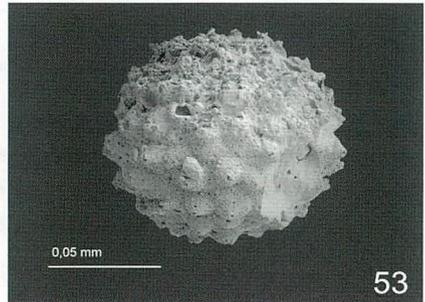
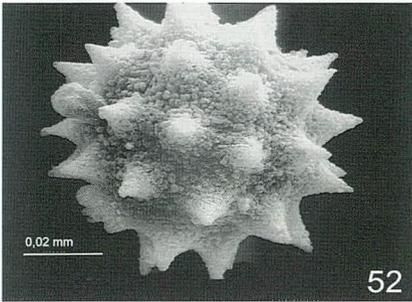
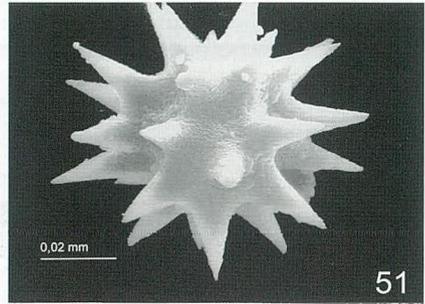
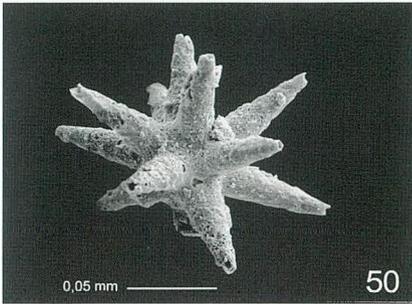


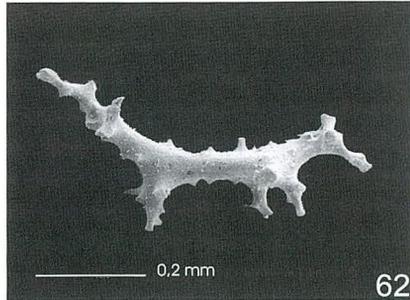
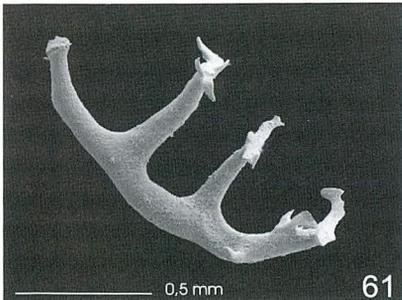
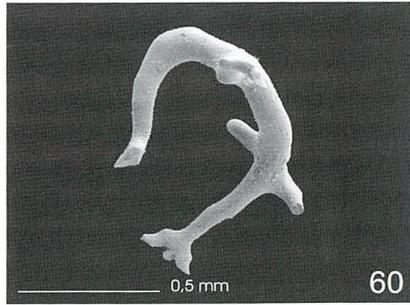
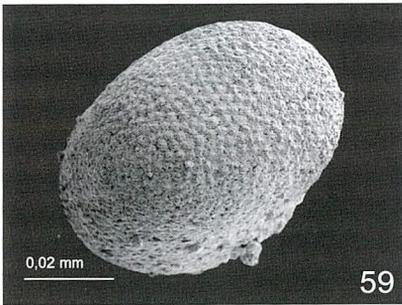
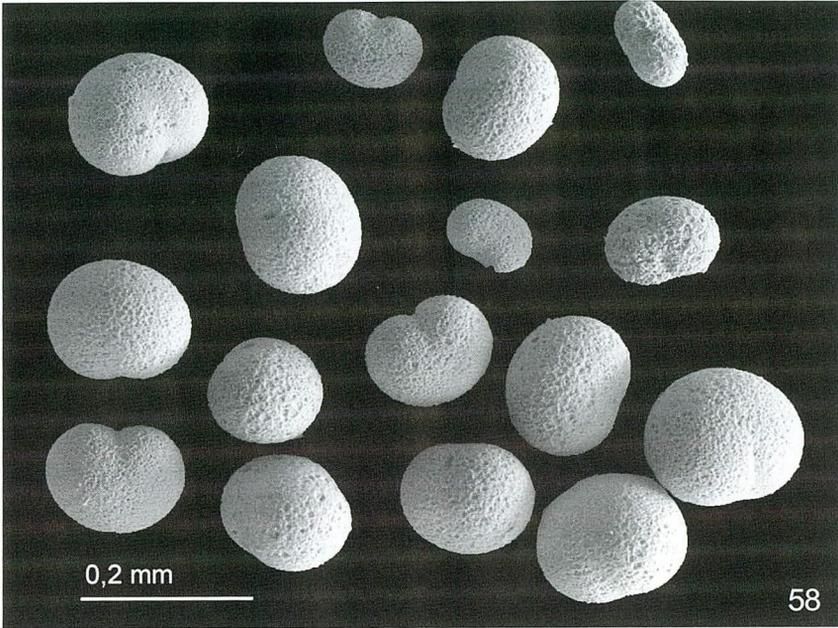


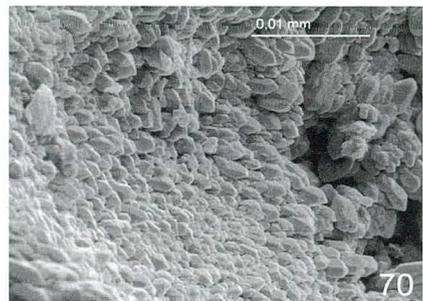
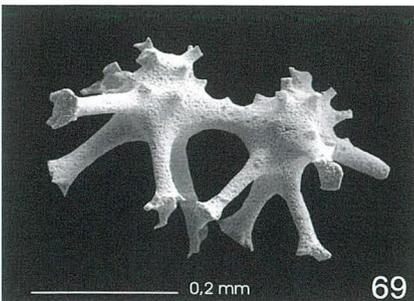
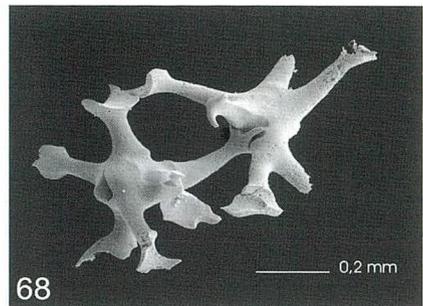
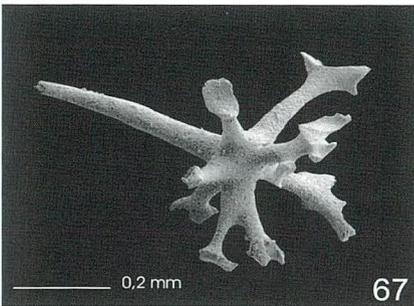
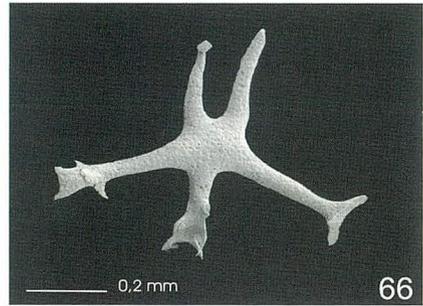
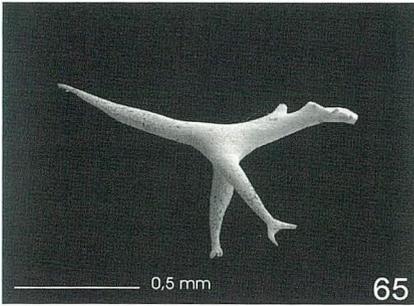
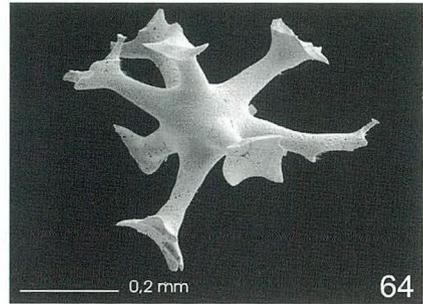
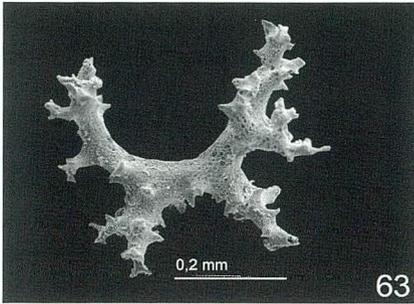


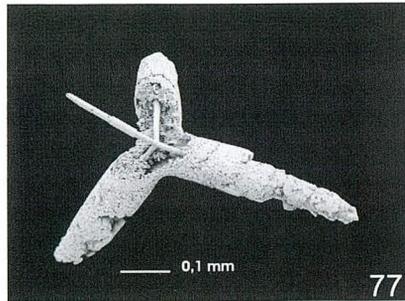
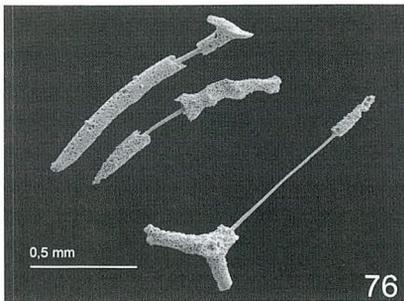
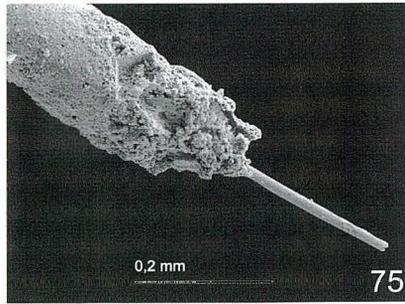
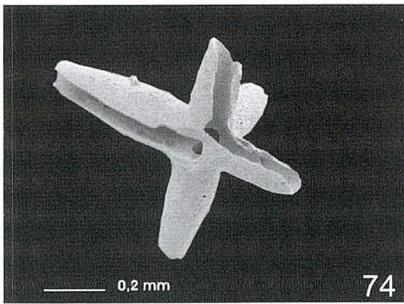
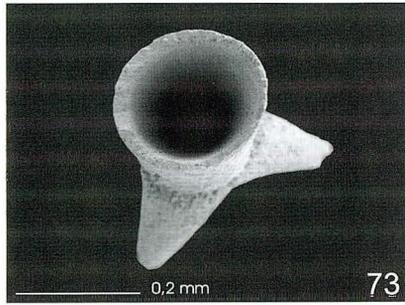
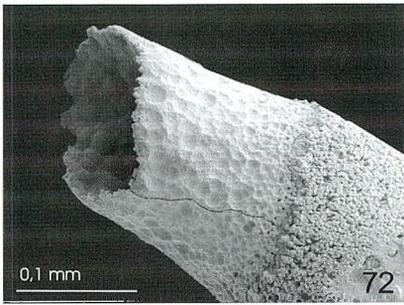
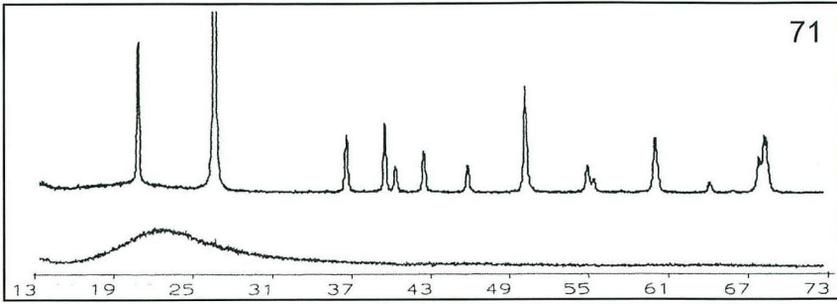


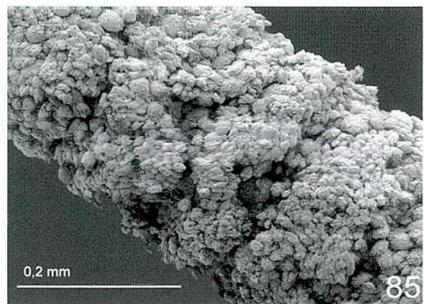
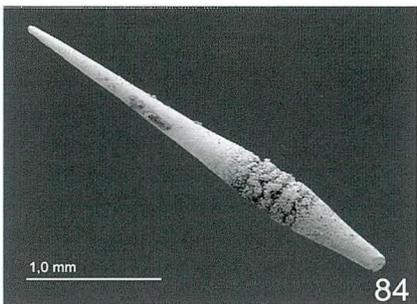
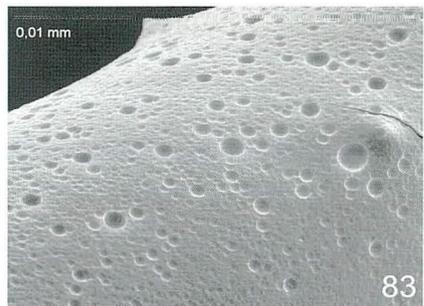
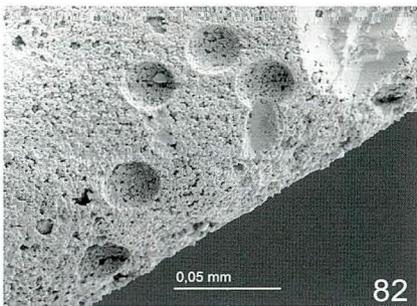
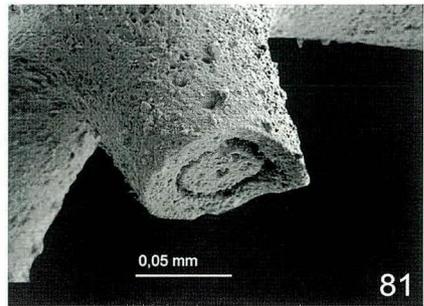
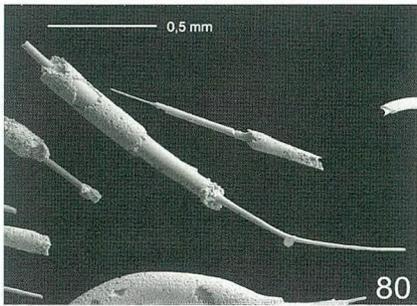
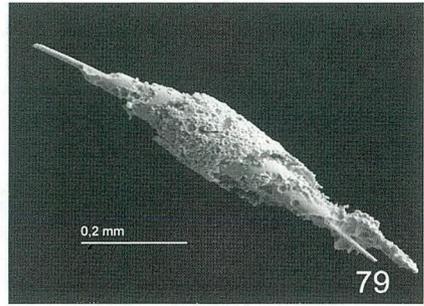
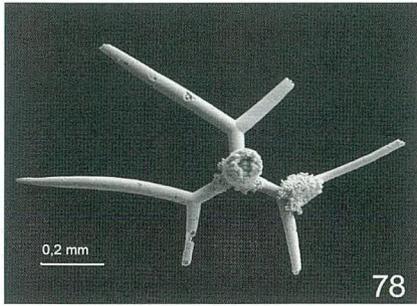


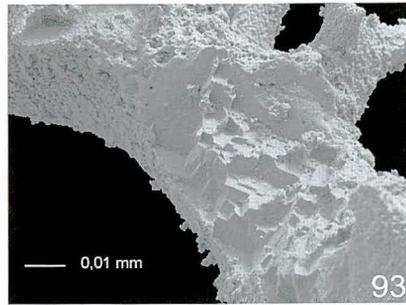
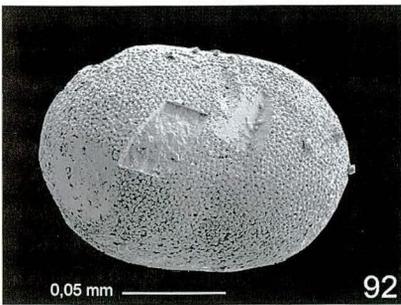
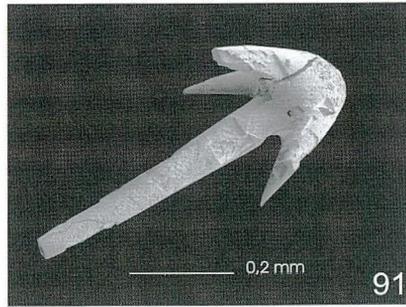
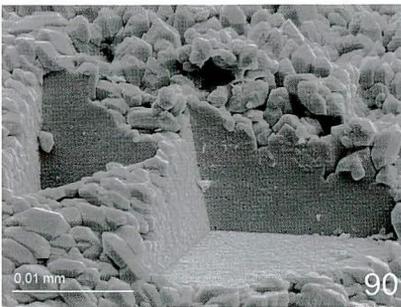
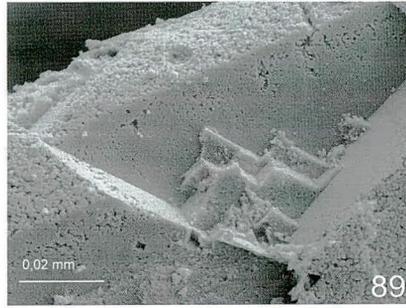
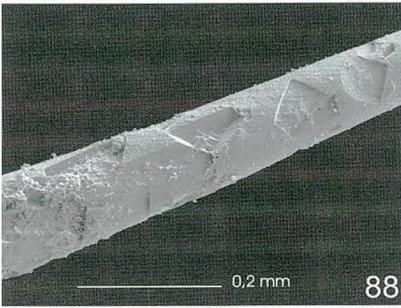
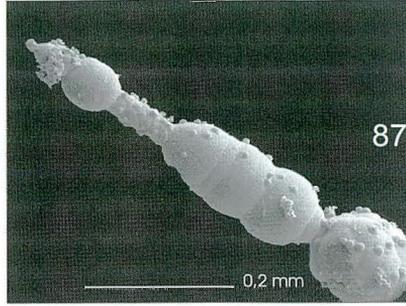
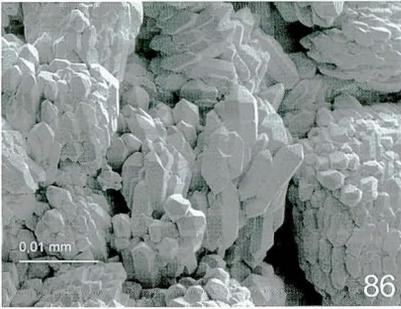












LITERATUR

- BAIER, J., M. FRANZ, F. HOFMANN u. U. THEWALT (2001): Erstnachweis von graupensandhaltigen Spaltenfüllungen im Bereich des Blautals. – Jahresberichte und Mitteilungen des oberrheinischen geologischen Vereins, Neue Folge, 83: 327–337.
- BEURER, M. (1971): Kieselensäureanreicherungen in den oberjurassischen Sedimenten der Schwäbischen Alb. – Beihefte zum Geologischen Jahrbuch, Heft 109. 69 S. einschl. 5 Taf.; Hannover.
- BRACHERT, T. C. (1991): Environmental Control on Fossilization of Siliceous Sponge Assemblages: A Proposal. – In: REITNER, J. u. H. KEUPP (Eds.): Fossil and Recent Sponges: 543–553; Berlin (Springer Verlag).
- DUNCAN, P. M. (1881): On remarkable Enlargements of the axial Canal of Sponge Spicules and their Causes. – Journal of the Royal Microscopical Society, Ser. 2, 1: 557–572, Taf. 7 und 8; London.
- FINKS, R. M., R. E. H. REID u. J. K. RIGBY (2003): Porifera. – In: KAESLER, R. L. (Ed.): Treatise on Invertebrate Paleontology, Band E2. 349 S.; Boulder and Lawrence (The Geological Society of America & the University of Kansas).
- FÜCHTBAUER, H. (1988): Sedimente und Sedimentgesteine, 4. Aufl., 1141 S.; Stuttgart (E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung).
- GEYER, O. F. (1955): Über querverringelte Spiulae (Silicospongiae) aus dem schwäbischen Malm. – Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Monatshefte., 1955: 391–395.
- GRAMANN, F. (1962): Schwamm-Rhaxen und Schwamm-Gesteine (Spongiolithe, Spiculite) aus dem Oxford NW-Deutschlands. – Geologisches Jahrbuch., 80: 213–220, 1 Taf.
- GREGOR, H.-J. u. U. THEWALT (2001): Fossilisation: Mineralchemische Aspekte und auftretende Minerale. – Documenta Naturae, 137, Teil 2, 45 S.
- HARDER, H. u. W. FLEHMIG (1970): Quarzsynthese bei tiefen Temperaturen. – Geochimica et Cosmochimica Acta, 34: 295–305.
- HARTMAN, W. D., J. W. WENDT u. F. WIEDENMAYER (1980): Living and Fossil Sponges – Notes for a short course. 274 S.; The University of Miami, Florida.
- HERDIANITA, N. R., P. R. L. BROWNE, K. A. RODGERS u. K. A. CAMPBELL (2000): Mineralogical and textural changes accompanying ageing of silica sinter. – Mineralium Deposita, 35: 48–62.
- HINDE, G. J. (1885): On Beds of Sponge-remains in the lower and upper Greensand of the South of England. – Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Part II, 1885: 403–453, Taf. 40–45.
- HINDE, G. J. (1890): A new Genus of Siliceous Sponges from the Lower Calcareous Grit of Yorkshire. – Quarterly Journal of the geological Society of London., 46: 54–61, einschl. 1 Taf.
- HINDE, G. J. u. W. M. HOLMES (1892): On the sponge-remains in the lower tertiary Strata near Oamaru, Otago, New Zealand. – Journal of the Linnean Society, Zoology, 24: 177–262, Taf. 7–15.
- HOOPER, J. N. A. u. R. W. M. VAN SOEST (2002): Systema Porifera: A Guide to the Classification of Sponges, 1810 S.; New York (Kluwer Academic/ Plenum Publishers).
- JOOS, O. (1948): Stratigraphisch-tektonische Untersuchungen zwischen Kliff und Donau

bei Ulm. – Neues Jahrbuch Mineralogie, Geologie und Paläontologie, Abhandlungen, Abteilung B, 89: 1 – 42, 6 Taf.

KOCH, R., B. SENOWBARI-DARYAN (2000): Die fazielle Entwicklung im Steinbruch Blaubereun/Altental („Michelreibershalde“); Mittlere Schwäbische Alb, Blautal). Karbonat-sandfazies des Malm epsilon und Riff-Rutschblöcke des Malm zeta 2. – Jahresberichte und Mitteilungen des Oberrheinischen Geologischen Vereins, Neue Folge, 82: 439–467, 7 Taf., Stuttgart.

KOLB, R. (1910): Die Kieselspongien des Schwäbischen Weissen Jura. – Palaeontographica, 57: 142–256, 6 Tafeln; Stuttgart.

KRAUTTER, M. (1997): Aspekte zur Paläökologie postpaläozoischer Kieselschwämme. – Profil, 11: 199–324; Stuttgart.

KRAUTTER, M., G. SCHWEIGERT u. G. DIETL (im Druck): Über *Rhaxella* und andere rhaxetragende Schwämme in oberjurassischen Plattenkalken Süddeutschlands. – Paläontologische Zeitschrift.

KRÜGER, S. (1978): Zur Taxionomie und Systematik isolierter Schwammskleren mit Beispielen aus der Unter-Kreide Ostniedersachsens. – Mitteilungen aus dem Geologischen Institut der Technischen Universität Hannover, Heft 15: 3–84.

LAND, L. S. (1976): Early Dissolution of Sponge Spicules from Reef Sediments, North Jamaica. – Journal of Sedimentary Petrology, 46: 967–969.

LANDMESSER, M. (1984): Das Problem der Achatgenese. – Mitteilungen der POLLICHIA 72: 5–137.

LANDMESSER, M. (1994): Zur Entstehung von Kieselhölzern. – extra Lapis, 7: 49–80.

LANDMESSER, M. (1998): „Mobility by Metastability“ in Sedimentary and Agate Petrology: Applications. – Chemie der Erde, 58: 1–22.

LINNÉ, C., VON (1779): Vollständiges Natursystem des Mineralreichs nach der zwölften lateinischen Ausgabe in einer freyen und vermehrten Übersetzung von J. F. GMELIN, vierter Theil, 584 S., 30 Taf.; Nürnberg (G. N. Raspe).

MINCHIN, E. A. (1910): Sponge-spicules. A summary of present knowledge. – Ergebnisse und Fortschritte der Zoologie, 2: 171–274.

MOSTLER, H. (1990): Hexactinellide Poriferen aus pelagischen Kieselkalken (Unterer Lias, nördliche Kalkalpen). – Geologische und Paläontologische Mitteilungen Innsbruck, 17: 143–178, 14 Taf.

MOSTLER, H. u. Z. BALOGH (1993/94): Zur Skelettarchitektur, Entwicklung und stratigraphischen Bedeutung ausgewählter lithistider Schwämme aus dem Oberjura. – Geologische und Paläontologische Mitteilungen Innsbruck, 19: 133–153, 6 Taf., Innsbruck.

MOSTLER, H. u. Z. BALOGH (1994): Spätsedimentäre bis frühdiagenetische Veränderungen an Mikroskleren criccomorpher Demospongien aus dem Oberjura. – Geologische und Paläontologische Mitteilungen Innsbruck, 19: 155–163, 2 Taf.

NAGEL, R. u. U. LAUXMANN (1990): Zur Verkieselung der oberjurassischen Korallen von Württemberg. – Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Monatshefte, 1990: 622–638.

PAULSEN, S. (1962): Die Geologie des Blattes Ulm-Nordwest (Nr. 7525) 1:25000. – Arbeiten aus dem geologisch-paläontologischen Institut der TH Stuttgart, Neue Folge 35, 72 S., 2 Taf.

- PAULSEN, S. (1964): Aufbau und Petrographie des Riffkomplexes von Arnegg im höheren Weißen Jura der Schwäbischen Alb. – Arbeiten aus dem geologisch-paläontologischen Institut der TH Stuttgart, Neue Folge 42, 99 S., 22 Taf.
- PISERA, A. (1997): Upper Jurassic Siliceous Sponges from the Swabian Alb: Taxonomy and Paleocology. – *Palaeontologia Polonica*, 57, 216 S, einschl. 54 Taf.
- PISERA, A. (2003): Some Aspects of Silica Deposition in Lithistid Demosponge Desmas. – *Microscopy Research and Technique*. – 62: 312–326.
- RAUFF, H. (1893/94): Palaeospongiologie, erster oder allgemeiner Theil und zweiter Theil, erste Hälfte. – *Palaeontographica*, 40: 1–346, Taf. 1–17.
- REIF, W.-E. (1967): Schwammspicula aus dem weißen Jura zeta von Nattheim (Schwäbische Alb). – *Palaeontographica*, Abteilung A, 127: 85–102, Taf. 12–15.
- RÜTZLER, K. u. I. G. MACINTYRE (1978): Siliceous Sponge Spicules in Coral Reef Sediments. – *Marine Biology*, 49: 147–159.
- SCHAUER, M. (1998): Dynamische Stratigraphie, Diagenese und Rohstoffpotential des Oberjura (Kimmeridge 1–5) der mittleren Schwäbischen Alb. – Tübinger geowissenschaftliche Arbeiten, Reihe A, 36: 153 S., einschl. 12 Taf.
- SCHORR, M. u. R. KOCH (1985): Fazieszonierung eines oberjurassischen Algen-Schwamm-Bioherms (Herrlingen, Schwäbische Alb). – *Facies*, 13: 227–269, einschl. 6 Taf.
- SCHRAMMEN, A. (1936): Die Kieselspongien des Oberen Jura von Süddeutschland. – *Palaeontographica*, 84: 149–194, Taf. 14–32 und 85: 1–114, Taf. 1–17.
- SCHULZE, F. E. u. R. VON LENDENFELD (1889): Die Bezeichnung der Spongiennadeln. – Abhandlungen der königlich preussischen Akademie der Wissenschaften, Physikalische Abhandlungen II, 35 S.
- SCHWAB, D. W. u. R. E. SHORE (1971): Mechanism of the internal Stratification of siliceous Sponge Spicules. – *Nature*, 232: 501–502.
- STRANSKI, I. N. u. D. TOTOMANOW (1933): Keimbildungsgeschwindigkeit und OSTWALD-sche Stufenregel. – *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, A163: 399–408.
- WIEDENMAYER, F. (1994): Contributions to the knowledge of post-Palaeozoic neritic and archibenthal sponges (Porifera). – *Schweizerische Paläontologische Abhandlungen*, 116: 1–147.
- WIRSING, G. (1988): Mikrofazielle und diagenetische Entwicklung einer oberjurassischen Karbonatabfolge (Weißjura beta bis delta 4, Mittlere Schwäbische Alb) mit Berücksichtigung der chemischen Diagenese ausgewählter karbonatischer Bestandteile. – *Heidelberger Geowissenschaftliche Abhandlungen*, Band 15. III + 337 S., 20 Taf., 10 Tab.
- ZIMMERLE, W. (1991): Stratigraphic Distribution, Lithological Paragenesis, Depositional Environments and Diagenesis of Fossil Siliceous Sponges in Europe. – In: REITNER, J. u. H. KEUPP (Eds.): *Fossil and Recent Sponges*: 554–577; Berlin (Springer-Verlag).

Anschriften der Autoren:

Prof. Dr. U. THEWALT, Dipl.-Ing. (FH) G. DÖRFNER, Universität Ulm, Sektion für Röntgen- und Elektronenbeugung, Albert-Einstein-Allee 11, D-89081 Ulm; e-mail: ulf.thewalt@chemie.uni-ulm.de und gerda.doerfner@chemie.uni-ulm.de.