

documenta

naturae | no. 137

München 2001



Teil 2

$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$
 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$
 $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$

Mineralisierung
in Fossilien



DOCUMENTA NATURAE

Nr. 137 - Teil 2 2001

ISSN 0723-8428

**Herausgeber der Zeitschrift Documenta naturae im
Verlag (Publishing House) Documenta naturae - München (Munich)**

Dr. Hans-Joachim Gregor, Daxerstr. 21, D-82140 Olching
Dr. Heinz J. Unger, Nußbaumstraße 13, D-85435 Altenerding
Priv.-Doz Dr. Diethard H. Storch, Sägematte 2, D-79183 Waldkirch

Die Zeitschrift erscheint in zwangloser Folge mit Themen aus den Gebieten
Geologie, Paläontologie (Lagerstättenkunde, Paläophytologie, Stratigraphie usw.),
Botanik, Anthropologie, Domestikationsforschung, Vor- und Frühgeschichte u.a.

Die Zeitschrift ist Mitteilungsorgan der Paläobotanisch-Biostratigraphischen Arbeitsgruppe
(PBA) im Heimatmuseum Günzburg und im Naturmuseum, Im Thäle 3,
D-86152 Augsburg

Die Sonderbände behandeln unterschiedliche Themen aus den Gebieten Kunst, antike
Nahrungsmittel, Natur-Reiseführer oder sind Neuauflagen alter wissenschaftlicher Werke
oder spezielle paläontologische Bestimmungsbände für ausgewählte Regionen.

Für die einzelnen Beiträge zeichnen die Autoren verantwortlich,
für die Gesamtgestaltung die Herausgeber.

Überweisung des Heftpreises erbeten auf das Konto 1548460 bei der
Sparkasse Fürstenfeldbruck (BLZ 700 530 70) - Inh. H.-J. Gregor.
Bestellungen: bei Buchhandlungen und den Herausgebern (s.o.)

©copyright 2001 Documenta Verlag. Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist
urheberrechtlich geschützt. Jede Verwendung außerhalb des Urheberrechtsgesetzes
bedarf der Zustimmung des Verlages. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen jeder
Art, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und für Einspeicherungen in elektronische
Systeme.

Gestaltung und Layout: Juliane Gregor und Hans-Joachim Gregor

Umschlagbild von H.-J. Gregor: Umschlagbild: Anschliff einer kleinen Platte mit *Favosites*
sp. u.a. Korallen aus dem Kulm (Karbon) von Wintersberg/Harz (NMA Inv.Nr. 91-396/528)
und Turmschnecke (*Telescopium* vel *Terebralia* sp., det. A. RICHTER) achatisiert bzw.
chalcedonisiert (Inv. Nr. 99-192 /1523a) mit Luftblase, Neogen aus Solo, Java, kombiniert
mit einer chemischen Mineralformel

München 2001

Fossilisation: Mineralchemische Aspekte und auftretende Minerale

H.-J. GREGOR & U. THEWALT

Zusammenfassung

Es wird eine Übersicht zur Mineralisierung von Fossilien gegeben. Die häufigsten Erscheinungen sind Verkieselung, Verkalkung und Vererzung. Näher eingegangen wird auf Verkieselungserscheinungen. Auch Prozesse, bei denen Metall-Sulfate und -Phosphate eine Rolle spielen, sind nicht selten. Die Minerale können als Anflüge auftreten, als Ausfüllungen von Hohlräumen oder als Ersatz organischer sowie anorganischer Baumaterialien. Betroffen sind vor allem die Schalen und Skelette von Organismen. Bei der Fossilisation spielen Verwesungsvorgänge, Reduktions- und Oxidationsprozesse sowie Umkristallisationen mit und ohne Austausch der Originalmaterialien oder ihrer Bestandteile gegen Fremdstoffen eine Rolle. Alle diese Reaktionen verlaufen in Anwesenheit von Wasser.

Summary

A synopsis is given on the mineralization of fossils. The most common processes are silicification, carbonatization, and orification. The role of silica is discussed in some detail. Processes in which metal sulfates and phosphates play a role are also common. We have the following types of mineralisations: a touch of minerals, void filling precipitations, and replacements of endo- and exoskeletons of organisms. The more important reaction types coupled with fossilization are decay of organic matter, reduction and oxidation processes, recrystallization with or without exchange of constituents. All these reactions take place in aqueous environments.

Schlüsselworte: Fossilien, Mineralien, Inkrustation, Silifizierung, Carbonatisierung, Vererzung, Phosphatisierung

Keywords: fossils, minerals, incrustation, silicification, carbonatization, orification, phosphatization

Adressen der Autoren:

Dr. Hans-Joachim Gregor, Naturmuseum, Im Thäle 3, D-86152 Augsburg

Prof. Dr. Ulf Thewalt, Universität Ulm, Sektion Röntgen- und Elektronenbeugung,
D-89069 Ulm

Inhalt:	Seite
1. Einleitung	2
2. Allgemeine Betrachtungen	3
2.1 Ausgangsobjekt - Das Lebewesen zu Lebzeiten	3
2.2 Anfangsbedingungen - Äußere Bedingungen nach dem Tod des Lebewesens	3
2.3 Diagenese - Geschehen über geologische Zeitintervalle hin	4
2.4 Spezielle, hier nur gestreifte Themen	5
2.5 Zur Klassifizierung der Mineralisationen	5
2.5.1 Klassifizierung durch Minerale	5
2.5.2 Klassifizierung nach Ausprägungstendenzen	5
2.5.3 Klassifizierung entsprechend Bildungsbedingungen	6
2.6 Belegstücke und Hinweise zur Literatur	8
3. Die einzelnen Minerale und Mineralisationen	8
3.1 Gediegene Metalle	8
3.2 Sulfide	9
3.3 Halogenide	10
3.4 Oxide und Hydroxide	10
3.4.1 Siliciumdioxid - Verkieselungserscheinungen	10
3.4.2 Weitere Oxide	17
3.5 Carbonate	18
3.6 Sulfate	20
3.7 Phosphate	21
3.8 Silikate	22
3.9 Fossilien als Schwermetallsammler	23
4. Literatur	23
5. Tafelerläuterungen	28

1. Einleitung

In Ulrich Lehmanns Paläontologischem Wörterbuch beginnt der Eintrag *Fossilisation* mit folgenden Worten: „Fossilwerdung; alle Vorgänge, welche vom Tod eines Organismus an auf diesen einwirken und dahin tendieren, ihn zu einem Bestandteil der Erdkruste zu machen.“ (LEHMANN, 1985: 142). In der vorliegenden Arbeit soll auf einige der chemischen Prozesse eingegangen werden, die hierbei eine Rolle spielen. Entgegen der landläufigen Meinung, es handele sich um einfache und gut verstandene Vorgänge, ist dies im allgemeinen *nicht* der Fall. Der Grund: Fossilisationsreaktionen verlaufen in der Natur sehr langsam. Jahrhunderte bis Jahrtausende stehen zu Verfügung. Daher lassen sie sich im Labor nicht nachvollziehen bzw. überprüfen. Was ist nicht schon alles über die Bildung von Feuersteinen oder die Verkieselung von Holz spekuliert und geschrieben worden, ohne daß ein einziges aussagekräftiges Experiment durchgeführt worden ist!

Neben dem gewissermaßen dynamischen Aspekt der Fossilisation gibt es einen statischen: der betrifft das Material, aus dem die Fossilien *jetzt* bestehen und das in ihnen und um sie herum vorkommt. In diesem Zusammenhang sind auch die Mineralbildungen auf und in Fossilien zu erwähnen. Hier kommt die ästhetische Schönheit vieler mineralisierter Fossilien ins Spiel. Interessante Beiträge gerade zu diesem Thema stammen beispielsweise von HEGELE (1999), wobei Pyrit, Kalzit und Dolomit in Jura-Ammoniten eine Rolle spielen, und von FRANKE & GRAF (1996), wobei es um Quarzit-Fossilien geht. Daß auch winzige Bryozoengebilde wunderschöne Verkieselungen aufweisen können, wurde in einem Beitrag von KAPITZKE & RIETER (1996) gezeigt.

Die Idee zu der vorliegenden Arbeit entstand bei der Gestaltung einer Vitrine über Mineralisierungen bei der Fossilisation im Naturmuseum Augsburg. Alle hier abgebildeten Objekte können dort in natura betrachtet werden. Wir möchten uns an dieser Stelle herzlich bei Dr. Michael ACHTELIG, dem Leiter des Naturmuseums in Augsburg für die Möglichkeit bedanken, die Vitrine zu gestalten. Für Diskussionen und Hilfe vielfältiger Art bedanken wir uns bei den Herren A. RICHTER (Augsburg), P. SISSIOU (Frechen-Grefrath), P. HOLLEIS (Gröbenzell) und allen Sammlern, die mitgeholfen haben, diese Arbeit zu gestalten.

2. Allgemeine Betrachtungen

2.1 Ausgangsobjekt – Das Lebewesen zu Lebzeiten

Wie im einzelnen eine Fossilisation abläuft und was dabei schließlich herauskommt, hängt von einer Vielzahl von Ereignissen und Faktoren ab. Am Beginn der Ereigniskette steht das noch lebende Lebewesen. Die Chancen, ein später erkennbares Fossil zu ergeben, hängen in hohem Maße vom Typ des betrachteten Lebewesens ab: Die Chancen sind groß, wenn zu Lebzeiten eine mineralische Schale oder ein mineralisches Skelett gebildet worden ist; sie sind gering, wenn nur „Weichmaterial“ vorlag - jedenfalls bei Tieren. Als Beispiele von Schalen sind die (weitgehend) aus Calciumcarbonat bestehenden Schalen von Schnecken, Cephalopoden, Brachiopoden und Echinodermen zu nennen. Die Schalen bestehen (bzw. bestanden ursprünglich) je nach Tierart aus einem Verbundmaterial, das aus Kalzit oder Aragonit oder beiden Mineralen als anorganischer Komponentenete und Chitin und/oder anderen polymeren Substanzen als organischer Komponente aufgebaut ist. Als Beispiele mineralischer Endoskelette sind die ursprünglich aus Opal (amorphes Siliciumdioxid; Details s. unten) gebildeten Skelette von Kieselschwämmen zu nennen. Zu nennen ist hier natürlich auch Apatit bzw. Hydroxylapatit, der in Knochen von Vertebraten und Hartschalen von Trilobiten und Crustaceen vorkommt bzw. vorkam. In den genannten Fällen haben wir es mit Beispielen der „Biomineralisation“ zu tun. Diese spielt auch bei vielen einzelligen Organismen eine Rolle. Hier zu nennen sind auch die Kieselpanzer von Diatomeen und die aus unterschiedlichen Materialien gebauten Gehäuse von Foraminiferen. Einen Überblick über die Biomineralisation findet man bei LOWENSTAM & WEINER (1989) und eine knappe Zusammenfassung über Skelettmaterialien bei McKERROW (1981: 22).

Eine im Resultat ähnliche, im Ablauf aber völlig andere Taktik zur Erzeugung eines Schutzpanzers besteht im Sammeln und Verkleben von Mineralkörnern. Diese Taktik wird zum Beispiel von bestimmten Foraminiferen angewandt. Daß Mikroorganismen Mineralkörner in ihr Inneres aufnehmen, scheint selten vorzukommen. Ein entsprechendes Beispiel stellt die Intra vitam - Einverleibung von Zirkonkörnern der Foraminifere *Edentostomia* dar (MATTIAT & ZOBEL 1968: Abb 1).

2.2 Anfangsbedingungen – Äußere Bedingungen nach dem Tod des Lebewesens

Freiliegende abgestorbene Organismen verwesen und verlieren sich meist ohne Spuren (terrestrisch-äolische Bedingungen). Durch eine rasche Einbettung des Objekts unter Wasser in einem Sediment (Kalkschlamm, Sand oder Ton) kann der Zerfall aufgehalten werden. Wenn zusätzlich ein reduzierendes Milieu vorliegt (Anwesenheit von organischem Material; Abwesenheit von gelöstem molekularem Sauerstoff), können sogar nicht-mineralische Reste von Tieren konserviert werden (Haare, Haut, Chitin). Je ruhiger das Ablagerungsgebiet ist (Abwesenheit von Strömung, Wellenbewegungen), um so besser können die Fossilien unter marinen, fluviatilen oder limnischen Bedingungen erhalten bleiben.

Eine wichtige Rolle spielt der Chemismus am Fossilisationsort. Relevante Parameter sind das Reduktionsvermögen der umgebenden wäßrigen Lösung (ausgedrückt durch ihren Eh-Wert) und die Stärke des sauren Charakters (gemessen durch den pH-Wert). Liegt saures Milieu vor

($\text{pH} < 7$), so lösen sich die aus Kalzit und Aragonit bestehenden Hartteile von Tieren auf. An Hand von Diagrammen, die pH als Abszisse und Eh als Ordinate benutzen (POURBAIX-Diagramme), läßt sich ablesen, was für chemische Reaktionen bei vorgegebenen Stoffen oder Stoffgemischen ablaufen; beispielsweise, ob Sulfationen (ca. 2,7 g/L im Meerwasser) zu Disulfid-Ionen reduziert werden.

Vom herrschenden Druck, der Temperatur und der Konzentration an in Wasser gelöstem CO_2 hängt es ab, ob gelöstes Calciumcarbonat sich aus der Lösung abscheidet oder ob sich festes CaCO_3 auflöst. Abscheidung von Kalzit erfolgt aus dem Wasser einiger Quellen der Schwäbischen Alb, das relativ viel gelöstes CO_2 enthält, welches beim Kontakt mit der Luft abgegeben wird. Hierbei erfolgt eine Fossilisation durch Umkrustung von Pflanzen- und Tierresten. Der entgegengesetzte Prozeß, Auflösung herabrieselnder biogener CaCO_3 -Partikel, die somit einer möglichen Fossilisation entzogen werden, erfolgt in den Ozeanen unterhalb von ca. 3500 m Tiefe: Die mit der Tiefe zunehmende CO_2 -Konzentration und die niedrige Temperatur sind verantwortlich hierfür.

Hier zu nennen sind die durch die Verwesung von Tierleichen induzierten chemischen Prozesse. Durch die Erhöhung des pH (Freisetzung von Ammoniak aus Eiweiß-Stoffen) verringert sich die Löslichkeit von CaCO_3 in Wasser in der Umgebung. Aus mit CaCO_3 gesättigtem Wasser fällt zwangsläufig Kalzit (oder Aragonit) aus. Dieser Prozeß (Mumifizierung) wird für die häufig beobachtbare körperliche Erhaltung von Kiesel Schwämmen des Weißen Jura verantwortlich gemacht (FRITZ 1958). Auf ihn kann auch die Bildung von Konkretionen zurückgeführt werden, in deren Zentren Fossilien erhalten sind.

Bei Pflanzen sprechen wir erst beim weitgehenden Ersatz der Gewebe durch "mineralisierende" Substanzen von Fossilien, vorher von "Phytoleuma" (KRASILOV 1975: 50), d. h. verwesendem Pflanzenmulm. Daß Übergänge vorkommen, ist klar. So enthält Kieselholz oft noch Zellwände, die z.T. aus organischem Material bestehen.

2.3 Diagenese – Geschehen über geologische Zeitintervalle hin

Wie die primär lockeren Sedimente, so erfahren auch die eingeschlossenen Reste von Tieren und Pflanzen „durch mehr oder weniger langzeitige Wirkung von Druck, Temperatur, chemischer Lösung und Abscheidung usw.“ (MURAWSKI 1992: 34). Veränderungen und Umbildungen. Die unter 2.2 aufgeführten Prozesse lassen sich z. T. als frühe Stufen der Diagenese auffassen. Einen Überblick über die verschiedenen mit der Diagenese zusammenhängenden Erscheinungen findet man beispielsweise bei SEILACHER (1976).

Als wichtiger, für CaCO_3 relevanter diagenetischer Prozeß, ist die Umwandlung von Aragonit in Kalzit zu nennen. Aragonit ist bei Normalbedingungen thermodynamisch geringfügig weniger stabil als Kalzit; Näheres s. u. Auch der oben erwähnte, durch Biomineralisation entstandene Opal ist über längere Zeitintervalle (einige Millionen Jahre) hin nicht stabil. Über Details der SiO_2 -relevanten Prozesse s. u. Hydroxylapatit andererseits ist, soweit er nicht durch Lösungsprozesse verschwunden ist, beständig. Fossilien, deren Exoskelette noch aus ursprünglichen Phosphatmineralen bestehen, werden hier nicht berücksichtigt, selbst wenn sie wie Trilobiten, aus dem Erdaltertum stammen.

Ein interessantes Teilgebiet der Diagenese ist die Organomineralisation. Es handelt sich dabei um die Beeinflussung bzw. Steuerung von Kristallisationsvorgängen durch organische Stoffe (Zersetzungsprodukte von Organismen). Im Gegensatz zur oben erwähnten Biomineralisation laufen entsprechende Vorgänge nach dem Tod von Organismen ab. Zwei Beispiele:

Kristallisation von Baryt in den Klüften von Gagat aus dem Schwarzen Jura von Holzmaden und Verkieselung von Holz.

Zur Diagenese gehört auch die Kompaktion eines Sediments samt eingeschlossenen Fossilien. Hierbei werden je nach Sediment- und Fossiltyp die Schalen der Fossilien zerbrochen oder plattgedrückt. Besonders stark ausgeprägt ist diese Erscheinung bei den Ammoniten aus dem Schwarzen Jura der Holzmadener Gegend (Württemberg).

2.4. Spezielle, hier nur gestreifte Themen

Auf organische Materialien wie Chitin bei Insekten oder Graptolithen oder Kutin und Lignin bei Blättern und Hölzern sowie auf Stoffe wie Ozokerit (Erdwachs) und Leichenwachs wollen wir im Folgenden nicht weiter eingehen. An dieser Stelle sollen sie aber wenigstens erwähnt werden. Auch der praktisch nicht vergängliche Kautschuk gehört hierher. Seine Beständigkeit wird durch die Funde eozäner „Affenhaare“ (irreführender Name für Kautschukfäden in Rinden und Holz) aus dem Geiseltal (GOTTWALD 1976) oder die glatten Kautschuk-Stränge in Eucommia-Früchten von Mühlheim (GREGOR 1995) belegt. Erwähnt seien hier auch einige Ausdrücke, mit denen Erhaltungszustände von Kaustobiolithen bezeichnet werden: Schungit = kohlenstoffreiches Gestein als Rest von Algen; Lignit bzw. Xylit = Holzreste der Braunkohle, auch nach Jahrtausenden noch als Holz erkennbar; Resinit, Kopal = fossiles Harz verschiedener Altersklassen. Ein einziges Beispiel soll hier gebracht werden. Es handelt sich um den Einbau eines speziellen Bitumenmaterials in Fossilien (Fig. 19). Einbettung in Bernstein, Asphalt oder Eis, wird hier nicht als Mineralisierung aufgefaßt.

2.5. Zur Klassifizierung der Mineralisationen

2.5.1 Klassifizierung durch Minerale

Im unten folgenden systematischen Teil werden die Mineralisationen entsprechend den auftretenden Mineralen klassifiziert. Die Anordnung lehnt sich an die Einteilung der Minerale bei RAMDOHR & STRUNZ (1978) an. Fragt man nach den besonders häufig vorkommenden Fossilisationsprozessen, so sind die folgenden zu nennen:

Verkieselungen: Das Endprodukt besteht (weitgehend) aus SiO_2 ; Details siehe S. 10-17 unten.

Carbonatisierungen: Das Endprodukt besteht aus dem Carbonat eines oder mehrerer zweiwertiger Metalle; relevante Minerale sind vor allem Kalzit, Aragonit und Siderit. Details siehe unten.

Vererzungen: Hierunter versteht man den Einbau von (oder eine Verdrängung durch) ein Sulfid, Oxid oder Salz eines Übergangsmetalls oder eines schwereren Hauptgruppenmetalls. „In Erz umgewandelte Tiere und Pflanzen“ ist der Titel einer schönen Arbeit von HARDT (1958), in der viele entsprechende Beispiele von Fossilien aus Deutschland beschrieben werden. Der Begriff „Erz“ ist dabei recht weit gefaßt. Neben Fossilisationen durch die üblicherweise als Erze aufgefaßten Minerale werden auch solche durch gediegene Metalle, die schwereren Carbonate, Sulfate und Glaukonit behandelt.

Die Kressenberger Rot-, Schwarz-, Grün- und Gelberze, z.T. mit Nummuliten, gehören hierher, wobei die Foraminiferen und Mollusken (z.T. phosphoritisch) mit feinen verbackenen Glaukonitkörnern und Limonit-Ooiden gefüllt sind. Das Gestein ist ein Limonit enthaltender Kalksandstein (vgl. HAGN et al. 1981: 100). Auch der Dogger von Sengenthal oder Neumarkt/Opf. hat solche eisenschüssigen oolithischen Schichten und dementsprechende Fossilien aufzuweisen (Beispiel bei Abb. 46).

2.5.2 Klassifizierung nach Ausprägungstendenzen

Fragt man nach der Art, wie die Minerale im Zusammenhang mit Fossilien auftreten, so lassen sich die folgenden Fälle nennen.

Anflüge: Dünne Schichten von Mineralien auf Fossilien. Gümbelit beispielsweise überzieht Farnreste des Karbons vom Piesberg bei Osnabrück. Hierdurch wird die wissenschaftliche Bearbeitung der Fossilien nicht behindert.

Inkrustationen: Ist der Überzug zu dick, um als Anflug bezeichnet zu werden, so spricht man von einer Inkrustation. MURAWSKI (1992: 91) schreibt: „.....durch chem. Ausfällung v. Kalk, Brauneisen, Manganverbindungen usw. erzeugte Krustenbildung um Fossilien, Gerölle oder sonstige auf oder im Boden befindliche Körper“.

Ausfüllungen: Ehemalige Hohlräume, wie Wohnkammern von Foraminiferen, Zell-Lumina von Hölzern oder Wohnkammern von Ammoniten, sind mit Mineralsubstanz ganz oder teilweise gefüllt. Die Wände können noch aus dem Originalmaterial bestehen, durch andere Substanzen ersetzt oder weggelöst sein. Beispiel: Phosphathölzer von Braunschweig (Braunkohlenwerk). Die wissenschaftliche Bearbeitung solcher Stücke ist nur zum Teil behindert.

Intuskrustationen: Dieser Ausdruck beschreibt im wesentlichen den gleichen Sachverhalt wie der vorausgehende: „Ausfüllung und Ersatz abgestorbener pflanzlicher oder tierischer Körper durch mineralische Ausscheidungen, z. B. Kieselhölzer“ (MURAWSKI 1992: 94).

Idiomorphe Kristalle in Hohlräumen: In Hohlräumen von Fossilien findet man häufig besonders schön gewachsene Kristalle verschiedener Minerale. Dies hängt damit zusammen, daß die Hohlräume von Fossilien oft fast hermetisch gegen die Umgebung abgeschlossen sind und daß der Materialtransport daher nur durch Diffusion innerhalb der „Kristallisationskammer“ und/oder über Korngrenzen der Hohlraumwand erfolgt. Genannt seien in diesem Zusammenhang die formenreichen Kalzitkristalle, die in Hohlräumen von Terebrateln des Schwäbischen Weißen Juras vorkommen (THEWALT 2000b). Ist andererseits das bereits fossilisierte Material, beispielsweise ehemaliges Holz, von Rissen durchzogen, so können sich dort entsprechend der Art und Verfügbarkeit der in wäßriger Lösung vorliegenden Ionen wohlkristallisierte Minerale abscheiden (GLAS & MAYR 1994).

Ersatz: Die zu Lebzeiten des Tiers oder der Pflanze gebildeten Schalen, Skelette oder Zellwände sind durch anorganische Feststoffe ersetzt. Dabei kann, muß aber nicht, eine Strukturvergrößerung erfolgen. Strukturvergrößernd ist z.B. der Ersatz der Holzsubstanz durch Gipskristalle oder Eisensulfide, wie es in der Tongrube Berg bei Donauwörth (Obere Süßwassermolasse) mit Hölzern der Fall ist. An pyritisiertem Holz können aber auch feinste Details der Holzstruktur konserviert sein. Inwieweit eine wissenschaftliche Bearbeitung entsprechender Fossilien möglich ist, hängt von den speziellen Gegebenheiten ab.

2.5.3 Klassifizierung entsprechend Bildungsbedingungen

Fossilisationen bzw. ihre Produkte lassen sich auch entsprechend den Bildungsbedingungen klassifizieren. Die folgende Einteilung bietet sich an.

Fossilisationen unter evaporitischen Bedingungen: Unter speziellen Verdampfungsbedingungen von Lagunen oder Seen kommt es zu einer "evaporitischen" Fazies, oftmals gekoppelt an partiell trockene Saisonklimata (winter- oder sommertrocken!). Die Bildung

entsprechender Ablagerungen beobachtet man heute z. B. in Afrika. Wiederkehrende Änderungen der individuellen Konzentrationen der einzelnen gelösten Stoffe (oder auch aller) führen zu alternierenden und/oder gekoppelten Lösungs- und Abscheidungsprozessen. So kann organogener Kalk gelöst und Gips abgeschieden werden. Hierbei gehen Details ehemaliger Strukturen verloren. Oft bleibt aber noch die Farbe erhalten; z.B. braun bei Holz (Lignin oder seine Zersetzungsprodukte). Auch Umhüllung mit Auflösung des Fossils kommt vor, wie sie bei der Entstehung von Muschelsteinkernen (marin) eine Rolle spielt. Gipsholz entsteht bei Ausfüllung der Zell-Lumina mit Gips.

Bildung unter hydrothermalen Bedingungen: Inwieweit die Dolomit-Hölzer in Pyroklastika auf der Kanareninsel Gran Canaria hydrothermal bedingt sind, ist noch zu klären (SCHMINCKE 1968, ROTHE 1996: 158). Auf die Problematik hydrothermalen Beeinflussung bei der Fossilisation sardischer Hölzer wird auf S. 17 kurz eingegangen. Auch die verkieselten Baumstämme von Lesbos gehören - zum Teil jedenfalls - in diese Sparte (vgl. S. 11 und 16).

Reaktionen in reduzierendem Milieu: Organisches Material (beispielsweise Torf, Braunkohle, Kohle, Tierkadaver) wirkt reduzierend. Daher ist etwa in und in der Nachbarschaft von Braunkohlevorkommen mit dem Auftreten von Mineralen zu rechnen, die Metallkationen in relativ niedrigen positiven Oxidationsstufen und Nichtmetallionen in negativen Oxidationsstufen enthalten. Als wichtige entsprechende Ionen seien die Ionen Fe^{2+} und S_2^{2-} , die Bausteine des Pyrits und Markasits, genannt. Andere im Zusammenhang mit Braunkohle vorkommende Fe(II)-Minerale sind Siderit und Vivianit. Reduzierende Bedingungen lagen in den nicht durchlüfteten tieferen Bereichen des Meeres vor, das Süddeutschland zur Zeit des Schwarzen Jura bedeckte. Die pyritisierten Ammoniten aus der Gegend von Holzmaden erinnern daran.

Konkretionäre Bildungen: Über die Bedeutung des Wortes Konkretion findet man im Brockhaus folgendes: „Konkretion [lat.], unregelmäßig, z. B. knollig, traubig-nierig geformte Mineralaggregate in Sedimentgesteinen, aus übersättigten Lösungen durch Anlagerung von Mineralsubstanz an einen Ansatzkern von innen nach außen gewachsen“. Hierdurch werden die Objekte zwar beschrieben, aber die interessante Frage, *warum* sie sich bilden, bleibt unbeantwortet. Konkretionen sind deshalb interessant für uns, weil sie sich häufig um abgestorbene Lebewesen herum gebildet und diese somit konserviert haben. Es trifft sicher in vielen Fällen zu, daß die bei der Verwesung des Organismus resultierenden pH-Änderungen (Freisetzung von Ammoniak und Aminoverbindungen) eine Mineralabscheidung initiierten. Damit ist natürlich nicht geklärt, warum das Wachstum der Konkretionen wie bei einem autokatalytischen Prozeß weiter lief, nachdem es einmal begonnen hatte. In einem weichen Sediment, wie Sand oder Lehm, gebildete Konkretionen können aus Pyrit, Kalzit, Baryt oder Phosphorit bestehen, um die wichtigsten Materialien zu nennen. Vieles spricht dafür, daß sich die in Kalk vorkommenden Feuersteine gebildet haben, als das Sediment noch weich war.

Inkohlung: Kurz und bündig schreibt hierzu MURAWSKI (1992: 91) „Umbildungsprozeß pflanzlicher Stoffe vom Torf über die verschiedenen Braunkohlen- und Steinkohlen- bis zum Meta-Anthrazit“. Die z. T. komplizierten chemischen Reaktionen führen zu einer relativen Zunahme des Kohlenstoffgehalts, gekoppelt mit einer Abnahme des H- und O-Gehalts. Bei der Inkohlung werden strukturelle Details weitgehend zerstört; so läßt das in den Schwarzjura-Sedimenten von Holzmaden (Württemberg) gelegentlich vorkommende, als „Gagat“ bezeichnete tiefschwarze, aus Holz hervorgegangene Material keine Zellstruktur mehr erkennen. Der Bruch ist muschelig wie der von Glas. Wenn sich vor dem Einsetzen der Inkohlungsprozesse lokal begrenzt Konkretionen - etwa dolomitische - gebildet haben,

können in diesen Pflanzenreste eingeschlossen und hervorragend erhalten worden sein (s. unten bei Dolomit). Mikroskopische Details können auch dadurch konserviert worden sein, daß frühzeitig Verkieselungs- oder Pyritisierungsprozesse erfolgten. Als entsprechendes Beispiel sind die innen verkieselten und außen gagatisierten Hölzer aus dem Schwarzen Jura zu nennen. Zu erwähnen ist auch, daß im Zusammenhang mit der Inkohlung unerwartete Minerale auftreten können. So sind die inkohlten Blätter aus den miozänen Tonablagerungen von Meleto (Arno-Tal, Italien) häufig mit feinkristallinem Vivianit überzogen. Offenbar standen relativ große Mengen an Phosphationen zur Verfügung (THEWALT & GREGOR 2001).

Spezielle Fälle: Hier sind solche Erscheinungen zu nennen, die manchmal einmalig auf der Welt sind. In Kapitel 3 sind einige derartige Kuriositäten aufgeführt.

Mehrfache Mineralisationen sind durchaus häufig anzutreffen, so z.B. bei den apatitisierten Pilzzellen in pyritisiertem Holz aus dem Eozän von Johannistal bei Heiligenhafen (Ost-Holstein, vgl. TUFAR et al. 1967).

2.6 Belegstücke und Hinweise zur Literatur

Der im folgenden Kapitel gegebene Überblick über die einzelnen Typen der Mineralisationen betrifft in erster Linie die im Naturmuseum Augsburg gezeigten Exponate. Er ist nicht vollständig, umfaßt aber die wichtigsten Fälle. Es wird ein interessantes Unterfangen sein, die Systematik im Hinblick auf mineralogische Vollständigkeit, das Wechselspiel von Diagenese und Produkten der Biomineralisation und auf die Erscheinung der Organomineralisation hin auszubauen. Ein offenes Feld für Spezialisten und Sammler!

Bezüglich eines Teils der unten genannten Minerale im Zusammenhang mit der Fossilisation gibt es vergleichsweise wenige Publikationen. Umfangreich ist andererseits die Literatur über Calciumcarbonat und Siliciumdioxid. Allein über die Verkieselung von Holz gibt es eine Vielzahl von Veröffentlichungen (und kontroversen Vorstellungen). Einen Überblick hierüber findet man bei LANDMESSER (1994).

Abschließend noch ein paar Literaturhinweise zu unserem Gebiet, zusätzlich zu den bereits genannten. Als Beispiele älterer Arbeiten seien die Ausführungen POTONIÉS (1908-1915:169, 190,215 usw.) über Verkieselungen, Verkalkungen usw. in Sedimenten genannt. Die bis etwa 1920 verfügbaren Erkenntnisse und Ergebnisse über Fossilisationserscheinungen hat DEECKE (1923), Leiter des ehemaligen Badischen Geologischen Landesamts zusammengefaßt. In einer Übersichtsarbeit über Fossilisation von MÜLLER (1979) steht der paläontologische Gesichtspunkt im Vordergrund. Dies gilt auch für einen Aufsatz von KRÄUSEL (1968). Kurz auf die Fossilisation eingegangen wird in den Büchern von RICHTER (1981:12-14), HALSTEAD (1983:38-49), KRUMBIEGEL G. & B. (1980:11-23) und TUREK, MAREK & BENES (1991:9-10). Schöne Abbildungen zum Thema finden sich bei PINNA (1989). Dies trifft auch für die Aufsätze von HOCHLEITNER (1994) und von GLAS & MAYR (1994) zu, die sich speziell mit der Fossilisation von Holz befassen. In der letztgenannten Arbeit findet man eine Liste aller bis 1994 im Zusammenhang mit fossilem Holz angetroffenen Minerale. Detaillierte Angaben zu verschiedenen Aspekten der Fossilisation findet man in den Werken von MÜLLER (1992) und FÜCHTBAUER (1988).

3 Die einzelnen Minerale und Mineralisationen

3.1 Gediegene Metalle

Kupfer. Unter speziellen Bedingungen kann sich metallisches Kupfer auf bzw. in Holz abscheiden. Hierbei erfolgt eine Reduktion von in Wasser gelösten Kupfer(II)-Ionen und offenbar parallel dazu eine teilweise Oxidation des organischen Holzmaterials. Die

Beobachtung, daß auch Grubenhölzer betroffen sein können, zeigt, daß die Umsetzung relativ schnell abläuft.

Silber. Sehr selten; marin; als Element eingebaut in Foraminiferen bestimmter südamerikanischer Ablagerungen. Als Besonderheit sind die Mansfelder „Silberfische“ zu erwähnen. Dabei handelt es sich um in Silber umgewandelte Exemplare des Schmelzschuppers *Palaeoniscus freieslebeni* aus dem Mansfelder Kupferschiefer (HARDT 1958: 46).

3.2 Sulfide

Pyrit und Markasit. Beide Minerale besitzen zwar die gleiche Formel, FeS_2 , kristallisieren jedoch in unterschiedlichen Kristallklassen. Pyrit bildet entsprechend seiner kubischen Symmetrie isometrische Kristalle, bevorzugt mit den Formen Würfel, Oktaeder und Pentagondodekaeder. Markasit bildet mehr oder weniger abgeflachte Kristalle mit orthorhombischer Symmetrie. Häufig kommen beide Mineralspezies nebeneinander vor. Sie bilden sich unter Beteiligung von Schwefelbakterien in reduzierendem Milieu (Abwesenheit von gelöstem molekularem Sauerstoff; Anwesenheit von organischem Material), wenn Sulfationen und Eisen(III)-Verbindungen verfügbar sind. Bei der Reduktion entstehen die Ionen S_2^{2-} und Fe^{2+} , die Bausteine von FeS_2 . Entsprechende Bedingungen herrschen in marinen Bereichen, die nicht durchlüftet sind (heutiges Schwarzes Meer, ehemaliges Holzmadener Meer zur Zeit des Schwarzen Jura, Holzmaden), aber auch in Braunkohlegebieten wie Wackersdorf (stagnierende Wässer in Sümpfen, vererzte Schilfzone (GREGOR 1980). An Fossilien aus Pyrit und Markasit beobachtet man häufig Ausblühungen, Rißbildungen und Zerfall. Der Grund: Luftsauerstoff bewirkt in Gegenwart von Feuchtigkeit die Umkehrung der oben skizzierten Bildungsreaktion.

Pyritisierte Fossilien sind vor allem in Schiefen gut ausgebildet (z. B. Bundenbach). Der Katharinenhof und das Johannistal (Nord-Deutschland) haben in eozänen Tonen schöne Pyritfossilien geliefert (KÜMMEL 1972, GRIPP & TUFAR 1965). Berühmt wegen ihrer schönen pyritisierten Fossilien (Ammoniten, Seelilien, Brachiopoden, Muscheln) sind die Ölschiefer aus dem Lias Württembergs. Als Fundort sei stellvertretend Holzmaden genannt. Gelegentlich kann man dort auch Stücke von pyritisiertem Treibholz finden. Mit den Details der Pyritabscheidung in Ammoniten aus dem Lias beschäftigt sich eine Untersuchung von HUDSON (1982).

Beispiele: Fig. 24, 42.

Markasit (Speerkies) ist außer an seiner Kristallform auch daran erkennbar, daß er (in frischem Zustand) heller und silbriger als Pyrit erscheint. Schöne Speerkies-Kristalle stammen aus der marinen Kreide von Hannover. Skelette von Kieselschwämmen, die jetzt teils aus Pyrit, teils aus Markasit und teils aus Goethit (als Pseudomorphosen nach Pyrit und Markasit) bestehen, kommen an einigen Stellen im Weißjurakalk in der Ulmer Gegend vor. Aus den grauen Partien des dortigen Kalks lassen sich mit verdünnter Salzsäure auch kleine, aber gut ausgebildete Einzelkristalle, Zwillinge und Viellinge von Markasit herausätzen (Beobachtungen von U. THEWALT & G. DÖRFNER).

Beispiel in Fig. 38.

Kupferkies (Chalkopyrit). Dieses Mineral mit der Formel CuFeS_2 kommt in marinen Sedimenten vor. Entstehung unter Sauerstoffausschluß. Es bildet Anflüge und Zwickelfüllungen; entsprechende Beispiele sind die „Kupferschiefer-Fische“ im deutschen Perm. Bei *Palaeoniscus freieslebeni* von Mansfeld sind die Schuppen mit einem Anflug überzogen und erscheinen „gelb-gold-glänzend“. Auch andere Kupfersulfide, wie

Kupferglanz (Cu_2S) und Bornit (Buntkupfererz, Cu_5FeS_4), können beteiligt sein (HARDT 1958: 46). Über Pflanzenreste aus dem permischen Kupferschiefer, die durch Kupfersulfide vererzt sind (beispielsweise „Frankenberger Kornähren“), findet man bei HARDT (1958: 73) einige Angaben.

Bleiglanz (Galenit). Mineralisierungen durch Bleiglanz (Formel PbS) sind selten. In Deutschland sind sie an triassischen Kieselhölzern nahe Würzburg – Bad Windsheim zu beobachten. Einige weitere Angaben finden sich bei DEECKE (1923: 149). Überzüge von PbS auf karbonischen Farnwedelresten kommen bei Montceau les Mines vor (Frankreich).

Zinnober (Formel HgS) kommt im Zusammenhang mit Fossilien selten vor. DEECKE (1923: 150) erwähnt, daß Fischschuppen aus den permischen bituminösen Schiefern von Münsterappel (Pfalz) Überzüge von Zinnober aufweisen.

3.3 Halogenide

Da die Halogenide der meisten Metalle entweder gut in Wasser löslich sind oder mit Wasser zu andersartigen Verbindungen reagieren, spielt nur der vergleichsweise schwerlösliche Fluorit (Formel CaF_2) als Fossilisationsmaterial eine Rolle.

Fluorit (Flußspat) ist gelegentlich in radialstrahliger Form als Evaporit in Algenrasen zu finden; eine Abscheidung von CaF_2 -Kriställchen ist auch bei bestimmten Pflanzen beobachtet worden. Ersetzung von Holz durch Fluorit kommt vor, wenn auch nur selten. Berühmt sind die in Fluoriterhaltung vorliegenden Psaroniusstämme aus dem Perm von Chemnitz. Eine vergleichbare, auch heute noch ablaufende CaF_2 -Abscheidung ist bei Stromatholithen zu beobachten, die in einem evaporitischen Milieu in afrikanischen Seen wachsen.

Beispiel: Fig. 4.

3.4. Oxide und Hydroxide

Neben einigen Metalloxiden und -oxidhydroxiden spielt in diesem Abschnitt vor allem das Siliciumdioxid eine wichtige Rolle. Um die interessanten, mit dieser Substanz zusammenhängenden Mineralisationserscheinungen zu verstehen, soll kurz auch auf ihr chemisches Verhalten eingegangen werden.

3.4.1. Siliciumdioxid - Verkieselungserscheinungen

Zur Chemie des Siliciumdioxids

Die Bezeichnung „Kieselsäure“ für SiO_2 hat sich zwar eingebürgert, ist aber falsch. Richtig ist die Bezeichnung „Siliciumdioxid“. SiO_2 ist das Anhydrid der Kieselsäure. Letztere hat die Formel H_4SiO_4 . Da beide Verbindungen bei Verkieselungsprozessen eine Rolle spielen, sollte man die zutreffenden Bezeichnungen benutzen, um eine Konfusion zu vermeiden. Wenn der pH der Lösung deutlich oberhalb 7 liegt (alkalisches Milieu), spielen auch ionische Spezies wie H_3SiO_4^- eine Rolle. Als „verkieselt“ bezeichnet man Fossilien, wenn sie ganz oder weitgehend aus SiO_2 bestehen. In der SiO_2 -Matrix können Fremdsubstanzen, besonders Metalloxydpartikel eingelagert sein, die ein breites Spektrum von Farben verursachen. Reines SiO_2 ist farblos. Auch organische Verbindungen können eingebaut sein. Die dunkelbraune Farbe mancher Feuersteine ist so zu deuten.

Bei Verkieselungsprozessen fungiert Wasser als Reaktionsmedium und Lösungsmittel. In der Lösung liegen im wesentlichen H_4SiO_4 -Moleküle vor. Aus diesen bildet sich der Feststoff SiO_2 durch Abspaltung von Wasser gemäß



Das entstehende Siliciumdioxid besteht nicht etwa aus SiO_2 -Molekülen - solche gibt es nicht - sondern besitzt einen polymeren Bau, wobei jedes Si-Atom mit vier O-Atomen und jedes O-Atom mit zwei Si-Atomen verknüpft ist. Die Bildung von SiO_2 gemäß Gl. (*) erfolgt fast ausschließlich auf der Oberfläche bereits vorhandener SiO_2 -Kristalle (oder nichtkristalliner SiO_2 -Typen). Das „fast“ deutet an, daß natürlich zunächst einmal „Kristallkeime“ oder sonstige SiO_2 -Unterlagen entstehen bzw. vorliegen müssen. Gerade beim SiO_2 ist die Tendenz zur Bildung von Kristallkeimen aber nicht hoch. In Abhängigkeit von der Konzentration an H_4SiO_4 in der Reaktionslösung scheiden sich verschiedene Typen von festem SiO_2 ab. Bei nicht wesentlich über Raumtemperatur liegenden Temperaturen und entsprechend abnehmender H_4SiO_4 -Konzentration kommen im wesentlichen die folgenden SiO_2 -Typen vor:

- a) **Opal-A:** Amorphes SiO_2 mit einigen % H_2O ; häufig einfach als Opal bezeichnet;
- b) **Opal-CT:** In dieser SiO_2 -Form alternieren statistisch und auf submikroskopischer Skala C- und T-Bezirke. C und T sind Abkürzungen für die SiO_2 -Modifikationen Cristobalit bzw. Tridymit;
- c) **Chalcedon und Quarz.** Chalcedon ist feinkristalliner Quarz, wobei die Kriställchen nach einem speziellen Muster ausgerichtet sind; Quarz, genau: Tiefquarz, ist die unter Normalbedingungen thermodynamisch stabile SiO_2 -Modifikation. Entsprechend der Größe der Kristalle wird bei Bedarf noch zwischen Krypto-, Mikro- und Megaquarz unterschieden.

In der Reihenfolge a, b, c nimmt die Stabilität der SiO_2 -Formen zu und die Löslichkeit in Wasser ab. Hieraus kann abgeleitet werden, daß sich im Laufe der Zeit Opal in Opal-CT und dieser in Chalcedon/Quarz umwandeln muß und zwar dadurch, daß sich die jeweils energiereichere Form löst (im umgebenden Wasser) und daß gleichzeitig die nächst-stabilere auskristallisiert. Ausführlich und anschaulich wird dieser Sachverhalt bei LANDMESSER (1994) im Zusammenhang mit der Entstehung von Achat und der Bildung von Kieselholz dargelegt.

Während viele chemische Reaktionen innerhalb von Sekunden bis Tagen ablaufen, sind etliche der mit SiO_2 zusammenhängenden Prozesse ausgesprochen langsam. Hiermit hängt es zusammen, daß es erst um 1970 gelang, Quarzkristalle bei Raumtemperatur künstlich herzustellen (Kriställchen von maximal 0,1 mm Größe!). Die benötigte Zeit betrug ca. drei Monate (HARDER & FLEMING 1970). Die Versuche belegen auch, daß bei geeigneter niedriger H_4SiO_4 -Konzentration die Opal- und Opal-CT-Stufen bei der Quarz-Bildung nicht durchlaufen werden müssen. Die oben skizzierte Umwandlung von Opal-CT zu Chalcedon benötigt im Rahmen der Entstehung von Kieselholz Zeitintervalle, die im Bereich von Jahrmillionen liegen können; auch hierüber mehr bei LANDMESSER (1994).

An neuerer Literatur über Silifizierungsprozesse ist die Übersichtsarbeit von HESSE (1989) zu nennen.

Woher stammt das bei Verkieselungen auftretende SiO_2 ?

Als eine wichtige SiO_2 -Quelle wird vulkanische Asche angesehen. Insbesondere bei der Verwitterung der enthaltenen Glaspartikel wird H_4SiO_4 und/oder H_3SiO_4^- freigesetzt. Hierauf ist die Entstehung des „verkieselten Waldes“ auf Lesbos, Griechenland zurückzuführen (VELITZELOS 1999). Eine weitere SiO_2 -Quelle ist biogen gebildeter Opal. Aus solchem Material bestehen die Panzer von Radiolarien und Diatomeen sowie die Skelette und Spicula (Skelettnadeln) von Kieselschwämmen. Bei den Kieselschwämmen wird die nach dem Tod der Organismen einsetzende Auflösung des Opals noch sicherlich dadurch gefördert, daß im verwesenden Schwamm eine Erhöhung des pH erfolgt (Bildung von Aminoverbindungen und Ammoniak). Der biogene Opal wird als SiO_2 -Reservoir bei der frühdiagenetisch ablaufenden Bildung von Feuersteinen und verkieselten Makrofossilien in marinen Kalksedimenten

angesehen (beispielsweise in der Kreide bei Maastricht, Holland, oder dem Weißen Jura der Schwäbischen Alb). In tropischen und subtropischen Gebieten ist Fluß- und Grundwasser häufig bezüglich der Abscheidung von Quarz an Kieselsäure übersättigt. Man kann daher erwarten, daß in solchen Gebieten Baumstämme, die von sandigen Flußablagerungen bedeckt und gegen den Einfluß von Luftsauerstoff geschützt sind, im Laufe der Zeit „verkieseln“. Einen Einfluß auf die Lösung und Abscheidung von SiO_2 in einem solchen Milieu haben sicher auch jahreszeitlich bedingte Schwankungen im Wasserchemismus sowie periodische Änderungen des Grundwasserspiegels. Als Beispiele entsprechender „verkieselter Wälder“ seien diejenigen von Kastoria, Makedonien und der „petrified forest“ von Arizona genannt. Information über weitere SiO_2 -Quellen findet man bei FÜCHTBAUER (1988).

Warum und wie wandert die Kieselsäure?

Zum einen sind es die „Grund- und Porenwasserströme“, die für den Transport verantwortlich zu machen sind. Sicherlich spielen diese in vulkanischer Asche und in sandigem Material eine wichtige Rolle. Neben diesem, aus Sicht des Kieselmaterials passiven Transport gibt es in jedem Fall einen gewissermaßen aktiven Transport, und zwar durch Diffusion der Moleküle und Ionen in wäßriger Lösung. Diffusion erfolgt durch die wassergefüllten Hohlräume zwischen den Körnern des einbettenden Sediments hindurch oder via Porenlösungsfilme oder auch, falls vorhanden - durch organische Materialien hindurch. Letzteres spielt bei der Bildung von Kieselholz eine Rolle; s. u.. Wenn benachbart zueinander Aggregate von zwei unterschiedlichen SiO_2 -Arten (etwa Opal und Opal-CT) in einer Matrix (etwa Kalkstein) vorliegen, bildet sich ein Konzentrationsgefälle aus. In der Umgebung des Opals ist die H_4SiO_4 -Konzentration höher als in der Umgebung des Opal-CT. Zwangsläufig erfolgt dann ein diffusionsgesteuerter Materialtransport: Der Opal löst sich auf und gleichzeitig scheidet sich im Bereich des Opal-CT weiterer Opal-CT ab. Am Ende der Reaktionskette stehen die am wenigsten löslichen Formen Chalcedon und Quarz. Letztere bezeichnet LANDMESSER in diesem Zusammenhang als die am meisten „gereiften“ Formen des SiO_2 . Das skizzierte Prinzip kann treffend als „Mobilisation durch Reifung“ bezeichnet werden (LANDMESSER 1994). Das Ablaufen entsprechender Reifungsprozesse ist natürlich auch innerhalb einer Ansammlung unreifen SiO_2 -Materials zu erwarten - vorausgesetzt, es liegen zumindest bereits Kristallkeime des reiferen Materials vor.

Wie wird die SiO_2 -Abscheidung initiiert?

Vielen Verkieselungsprozessen ist gemeinsam, daß die resultierenden Gebilde gegen ihre Umgebung mehr oder weniger scharf abgegrenzt sind; man denke nur an verkieselte Baumstämme, die in lockerer vulkanischer Asche eingebettet sind. Daraus muß man folgern, daß sich in Holz frühzeitig nach Beginn der H_4SiO_4 -Zufuhr ein Reifungsvorsprung gegenüber SiO_2 -Ablagerungen in der Umgebung aufgebaut haben muß. Dieser führte dann entsprechend dem oben. Erläuterten zur vollständigen „Verkieselung“ des Holzes.

Die Initiierung der SiO_2 -Abscheidung in Holz ist ganz offenbar durch die speziellen chemischen Eigenschaften dieses Materials bedingt. Es wurde vorgeschlagen, daß die Ausbildung von sog. Wasserstoffbrücken zwischen H_4SiO_4 -Molekülen und den OH-Gruppen des Cellulosematerials der Zellwände der entscheidende Schritt sei. (LEO & BARGHOORN 1976). Diese häufig wiederholte Behauptung ist durch nichts belegt! Auch darüber, wie in anderen Fällen Verkieselungen beginnen, ist so gut wie nichts bekannt.

Im Zusammenhang mit Verkieselungen relevante Erscheinungsformen des SiO_2

Achat ist gebänderter, aus Opal-CT hervorgegangener Chalcedon, der meist bandweise wechselnde Färbung aufweist. Kürzlich belegte LANDMESSER (1994), daß bei der „Verkieselung“ von Holz und der Bildung von Achat im wesentlichen die gleichen Prozesse

ablaufen, nämlich die oben skizzierte „Mobilisation durch Reifung“. Beim Achat findet der Prozeß in Gesteinshohlräumen statt, beim Holz in den, wenn auch kleinen, Holzzellen. Die Schönheit der Achate hat in den Köpfen vieler früherer Betrachter eigenartige Theorien zu ihrer Genese wachsen lassen. Nähere Angaben dazu bei LANDMESSER (1984). Auch deshalb ist Achat hier zu nennen, weil er sogar in (ehemaligen) Hohlräumen von Fossilien vorkommen kann. Besonders häufig füllt er Risse in „verkieseltem Holz“ aus. Teilweise in Achat umgewandelte Schalen von Bohrmuscheln finden sich in den farbig erhaltenen Kieselhölzern aus den Aachener Sanden (vgl. GOTTWALD 2000).

Beispiele in Fig.: 1, 3, 17, 35.

Feuerstein (Hornstein, Kieselknollen, Chert, Silex, Flint). Knollige oder plattige, vereinzelt oder schichtweise in Kalksedimenten auftretende SiO_2 -Gebilde. Vieles deutet darauf hin, daß die Bildung frühdiaogenetisch, im noch nicht verfestigten Kalksediment erfolgt ist und daß die SiO_2 -Abscheidung mit einer gleichzeitig erfolgenden Auflösung von Kalzit - Verdrängung durch Auflösung - gekoppelt ist (KNAUTH 1994). Auch über die Entstehung von Feuerstein wurden die unterschiedlichsten Meinungen geäußert, vor allem in der älteren Literatur. Die Feuersteine aus der Kreide- und Jura-Epoche bestehen weitgehend aus Mikroquarz. Darüber, ob Opal-Stadien bei ihrer Bildung durchlaufen wurden oder ob gleich Mikroquarz auskristallisierte, gehen die Meinungen auseinander. Als SiO_2 -Quelle werden die aus Opal bestehenden Skelette und Panzer diverser Organismen angesehen. Für die Ablagerungen des europäischen Weißen Juras kommen insbesondere die Skelette von Kieselschwämmen infrage.

Zum Ablauf der Feuersteinbildung: Es gibt Feuersteine, deren Wachstum offensichtlich durch abgestorbene Makrofossilien initiiert worden ist. So enthalten viele Kieselknollen aus dem Weißen Jura der Ulmer Gegend in ihrer Mitte cm-große Fetzen von teller- oder röhrenförmigen Kieselschwämmen (THEWALT 1998). Die Annahme liegt nahe, daß das spezielle, bei der Verwesung der Schwämme auftretende chemische Milieu für den Beginn der SiO_2 -Akkumulation verantwortlich war. Feuersteine vieler anderer Vorkommen, auch solcher der Ulmer Gegend, enthalten keine Makrofossilien. Also muß es einen weiteren Mechanismus für den Bildungsbeginn geben. Wir kennen ihn nicht. Wenn erst einmal ein „Feuerstein-Baby“ da ist, ist sein Erwachsenwerden offenbar nur eine Frage der Zeit - vorausgesetzt, es existiert eine Quelle für H_4SiO_4 in der Umgebung. In Feuersteinen sind häufig die auch im umgebenden Kalk vorkommenden Mikrofossilien (und Schwammnadeln) konserviert, und zwar besser und leichter erkennbar als bei kalkiger Erhaltung.

Mit Feuerstein verwandte SiO_2 -Abscheidungen sind die Radiolarite und paläozoischen Lydite. Es handelt sich dabei um SiO_2 -verkittete Ablagerungen aus Unmengen von winzigen Radiolarien mit Kieselskelett.

Opal. Außer dem durch Biomineralisation gebildeten Opal gibt es die bereits erwähnten, bei der Achat- und Kieselholzgenese auftretenden Typen. Zu den anorganisch entstandenen Opaltypen ist auch der als Kruste auf einigen vulkanischen Gesteinen vorkommende wasserklare Hyalit zu rechnen; vgl. FLÖRKE et al. (1973). Aus warmem Quellwasser abgeschiedener Opal hat eine Rolle bei der Silifizierung der (jetzt aus Chalcedon bestehenden) Gastropodenschalen von Steinheim am Albuch gespielt (Beobachtung Autor GREGOR). Während RAMDOHR & STRUNZ (1978: 529) und andere Autoren unter Holzopal „durch Opalsubstanz in allen Farben versteinertes Holz“ verstehen, hat Holzopal laut LINCK & JUNG (1954: 130) nichts mit Holz zu tun, sondern ist ein nur wie versteinertes Holz aussehender Opal.

Biologische Opalbildungen weisen häufig einen hohen ästhetischen Reiz auf. Die Kieselpanzer von Radiolarien, Diatomeen und bestimmter Foraminiferen seien genannt. Faszinierend schön sind auch die Skelette und Skelettnadeln von Kieselschwämmen, sowohl rezenter als auch fossiler. Soweit die fossilen (noch) aus SiO_2 bestehen, lassen sie sich leicht mit Säuren aus umgebendem Kalk herausätzen. Solche Nadeln bestehen entgegen der gängigen Meinung nicht (mehr) aus Opal, sondern aus Chalcedon oder sie sind aus idiomorphen Quarzkriställchen aufgebaut (THEWALT 1996) - es sei denn, sie sind geologisch jung. Es hat also im oben erläuterten Sinn ein Reifungsprozeß stattgefunden.

Beispiele in Fig.: 16, 27, 43, 53.

Chalcedon. Entsprechend der relativen Orientierung der Quarzkristallite gegenüber den "Fasern" des Chalcedons werden mehrere Chalcedontypen unterschieden. Dies wird hier aber nicht berücksichtigt. Zusätzlich zu den bereits genannten Beispielen für das Auftreten von Chalcedon hier noch zwei weitere Beispiele: Eigenartige Chalcedonschnecken wurden von RICHTER (1999) beschrieben; vgl. das Cover dieses Heftes. Chalcedon kommt im Zusammenhang mit verkieselten Korallen des Weißen Jura der Schwäbischen Alb vor (NAGEL & LAUXMANN 1990). Die Gegenden von Gerstetten, Giengen und Blaubeuren sind seit langem bekannt hierfür. QUENSTEDT (1858: 692) berichtet, daß bei Oberstotzingen (zwischen Ulm und Heidenheim) „die prachtvollsten smalteblauen Chalcedonkugeln, so schön traubig, wie man sie sonst nur in vulkanischen Gesteinen anzutreffen pflegt“ vorkommen und daß es sich dabei um „hohle Korallenstöcke“ handelt.

Beispiele in Fig.: 2, 41, 43, 51.

Quarzkristalle. Hier sind isolierte oder nur teilweise verwachsene Kristalle gemeint. Millimetergroße Kristalle kann man in Hohlräumen verkieselter Korallen aus dem Weißen Jura der Schwäbischen Alb finden; dgl. in Wohnkammern von Ammoniten aus dem Schwarzen Jura (HEGELE 1999). Auch in den Hohlräumen von Schnecken aus der Unteren Süßwassermolasse (Miozän) der Ulmer Gegend hat man Quarzkristalle angetroffen (HILDEBRANDT 1991; SCHULER & BERTLING 1995). Das Ungewöhnliche hierbei ist die Tatsache, daß das (ehemalige) aragonitische Baumaterial der Schneckenhäuser noch als Aragonit vorliegt.

Quarzkristalle kommen auch in Braunkohlenhölzern aus der Gegend von Bilin (Tschechien) und Leipzig vor. Die zentralen Bezirke in Achaten, sowie Hohlräume in verkieseltem Holz oder in Feuersteinen sind ebenfalls häufig Brutstätten gut entwickelter Quarzkristalle.

Süßwasserquarzit. Ein Fallbeispiel: Aus kleinen idiomorphen, statistisch orientierten Quarzkriställchen ist das grünliche bis braune Gestein aufgebaut, das an einigen Stellen im Bereich der Graupenrandrinne und des Hochsträss bei Ulm vorkommt. Entstanden ist es offenbar als Kristallinat aus tropischem, an Kieselsäure übersättigtem Flußwasser im Miozän. Das Gestein enthält Steinkerne von Schnecken, Abdrücke von schilfartigen Pflanzen und Hohlformen, die von Ästen herrühren. Die Erhaltung der Fossilien ist schlecht.

Verkieselte Fossilien. Die Frage nach dem Verhalten abgestorbener Organismen bzw. Organismenteile gegenüber Kieselsäure kann nicht pauschal beantwortet werden. Der Ablauf von Verkieselungen hängt von der Konzentration der angelieferten Kieselsäure ab und vom Zeitpunkt, an dem die Kieselsäurezufuhr beginnt. Das Folgende betrifft marine Fossilien. Über verkieseltes Holz s. nächster Abschnitt. Ist die Zufuhr von Kieselsäure zu gering oder setzt sie relativ spät ein, so können andere Prozesse bevorzugt ablaufen oder bereits abgelaufen sein; beispielsweise der Ersatz von ursprünglichem Aragonit einer Muschelschale durch Kalzit. Das Vorliegen einer verkieselten Muschelschale in einem Kalksediment deutet demnach auf eine frühzeitige Verkieselung. Falls die primär aragonitischen Muschelschale

aber bereits in (grobkristallinen) Kalzit umgewandelt war, wird bei Zufuhr von H_4SiO_4 eher das feinkristalline einbettende Kalksediment als die Muschelschale silifiziert. Daß die Verhältnisse noch komplizierter sind, als hier angedeutet, geht daraus hervor, daß in den Weißjura-Sedimenten der Schwäbischen Alb häufig auch verkieselte Schalen von Terebrateln und Rynchonellen vorkommen, obwohl das anorganische Baumaterial ziemlich reiner Kalzit war. Seeigel liefern ein weiteres interessantes Beispiel: Bei den Exemplaren aus dem Weißen Jura von Nattheim (Schwäbische Alb) sind die Schalen verkieselt; Kern und Umgebung nicht; bei den Exemplaren aus der Kreide (z. B. von Maastricht) dagegen ist es umgekehrt; häufig ist bei den letzteren allerdings nachträglich der Kalzit der Schale weggelöst.

Korallen aus dem Weißen Jura scheinen eine besonders hohe Affinität für Kieselsäure besessen zu haben. Verkieselte Korallen kommen an vielen Stellen der Schwäbischen Alb vor. Die Vorkommen sind jeweils lokal eng begrenzt und entsprechen den ehemaligen Schuttbereichen von Korallenriffen. Die Korallen lassen sich leicht durch Säurebehandlung aus dem umgebenden Kalk herauslösen. Besonders schöne Exemplare sind beispielsweise im Löwentormuseum in Stuttgart, dem neu eingerichteten Museum in Gerstetten und in den naturkundlichen Sammlungen der Stadt Ulm zu bewundern. Über den Ablauf der Verkieselung der ehemals aus Aragonit bestehenden Hartteile von Korallen und die auftretenden SiO_2 -Arten gibt eine Untersuchung von NAGEL & LAUXMANN (1990) Auskunft.

Kalkstein aus Riffschuttbereichen des Weißen Juras birgt außer verkieselten Korallen eine Vielzahl weiterer verkieselter Tierreste - vorausgesetzt, das Gestein stammt aus einer Gegend, in der während der Frühdiagenese genügend große Mengen an Kieselsäure zur Verfügung standen. Dies war oft, aber nicht immer der Fall. So liegen die Korallen und anderen Fossilien im Riff von Arnegg (bei Ulm) in kalzitischer Erhaltung vor, während sie in den nur wenige Kilometer entfernten Riffbereichen bei Blaubeuren verkieselt sind. Dort findet man in verkieselter Form (zusätzlich zu mehreren Arten von Korallen) Schalen von Terebrateln, Rhynchonellen, und Seeigeln, Stacheln von Seeigeln, Stielglieder von Seelilien, diverse Serpeln, Kalkschwämme und Moostierchen, um die häufigsten Typen zu nennen. Vollständigere Fossil-Listen, sowie Angaben zu den Fundpunkten findet man bei ENGEL (1908). Fast immer sind Reste von Kieselschwämmen dabei.

Auf Kieselschwämme soll wegen ihrer großen Verbreitung während des Weißen Juras Süddeutschlands etwas näher eingegangen werden. Namensgebend für diesen Typ von Schwämmen ist das via Biomineralisation gebildete (zunächst) aus Opal bestehende Gerüstmaterial. Es gibt Kieselschwämme mit dreidimensional ausgedehnten Skeletten und solche, die nur isolierte „Schwammnadeln“ (Scleren) enthalten. Das Wort „Kieselnadel“ ist nicht wörtlich zu nehmen; denn die Form der Gebilde ist häufig viel komplexer als die Form einer Nadel; s. beispielsweise die Abbildungen bei REIF (1967) oder KRAUTTER (1997).

Die wohl häufigste Art der Erhaltung dieser Lebewesen in Weißjurakalk ist die Erhaltung als Schwamm-Mumien (körperliche Erhaltung; SiO_2 des Skeletts durch Kalzit ersetzt; Schwamm meist geringfügig dunkler als die Umgebung). Die ehemaligen Opalteile können aber auch aus Quarz (in Form kleiner idiomorpher Kristalle) bestehen. Es ist unklar, ob es sich dabei um das an Ort und Stelle gebildete Umwandlungsprodukt des Opals handelt oder ob dieser zunächst aufgelöst worden ist und der resultierende Hohlraum später durch SiO_2 gefüllt wurde, das aus Porenwasser stammte. Kieselig erhaltene Schwammreste lassen sich mit verdünnter Salzsäure leicht aus dem umgebenden Kalk herauslösen. Der (ehemalige) Opal der Skelette kann auch durch Pyrit oder Markasit ersetzt worden sein, und diese Minerale können ihrerseits in Goethit umgewandelt sein (THEWALT 1998).

Auch Mikrofossilien können verkieselt sein. Über verkieselte Ostracoden aus dem Erdaltertum berichten BECKER & ADAMCZAK (2001). Verkieselte Foraminiferen kommen in Weißjurasedimenten an vielen Stellen der Schwäbischen Alb vor. Die Quarzkriställchen, aus denen ihre Schalen jetzt bestehen, sind häufig deutlich größer als die Kriställchen, aus denen die oben erwähnten Schwammnadeln aufgebaut sind. Offenbar spielen hierbei spezielle Effekte der Organomineralisation eine Rolle. Es gab (und gibt) auch Foraminiferen, die zu Lebzeiten Mineralkörner sammeln und in ihrer Schale einbauen (agglutinierende Foraminiferen).

Kieselholz. Im Gegensatz zu den anderen verkieselten Fossilien bildet verkieseltes Holz großvolumige Gebilde, ganze Baumstämme oder Bruchstücke davon. Wegen der relativ großen Härte des Materials und seiner Verwitterungsbeständigkeit - verglichen mit der geringeren Resistenz des einbettenden Materials (meist vulkanische Asche oder sandige Sedimente) - kann es bei der Erosion zu lokalen Anhäufungen von verkieselten Stämmen und Holzstücken kommen. Unabhängig davon, ob die Bäume an Ort und Stelle gelebt haben oder ob die Stämme durch Flüsse an den Verkieselungsort transportiert worden sind, werden solche Holzfriedhöfe häufig als „versteinerte Wälder“ bezeichnet. „Die 31 schönsten versteinerten Wälder der Erde“ werden in einem von DERNBACH (1996) herausgebrachten Bildband kurz beschrieben. Als Beispiel einer reich bebilderten Veröffentlichung, in der ausführlich ein einzelner „Petrified Forest“ vorgestellt wird, sei die Lesbos betreffende Beschreibung von VELITZELOS & ZOUROS (2000) erwähnt.

Wenn durch Erosion freigelegte Kieselholzstämme verwittern, hat man den Eindruck, es handele sich um zerfallendes rezentes Holz. Dies wird durch die auftretenden Farben unterstrichen (Braun- und Rottöne) und die Art, wie das Material in Bruchstücke aufsplittert. Bei Hölzern mit Jahresringen erfolgt die Spaltung bevorzugt entsprechend den Jahresringen und parallel zu Ebenen, die durch die Stammachse verlaufen. Mit fortschreitender Verwitterung fallen zunehmend kleiner werdende, längliche selbstähnliche Fragmente an.

Betrachtet man verkieseltes Holz mit einer Lupe, so fällt vor allem die gute Erhaltung der Zellstruktur auf. Die Zell-Lumina sind mit SiO_2 gefüllt. Dabei können je nach Alter und Fundpunkt verschiedene SiO_2 -Typen (s. oben) vorkommen. Die ehemaligen Zellwände sind an ihren im allgemeinen dunklen Färbungen zu erkennen. Die Färbungen sind durch Reste des ursprünglichen organischen Baumaterials bedingt. Häufig ist noch so viel davon vorhanden, daß nach dem Entfernen des SiO_2 mit Flußsäure zusammenhängende Zellaggregate erhalten werden können; vgl. beispielsweise STORZ (1933). Bei der Bildung von Kieselholz ist offensichtlich nicht der Ersatz organischen Materials der entscheidende Vorgang, sondern das Ausfüllen der Holzzellen mit dem Versteinerungsagens. Demnach hat man es weniger mit einer *Verkieselung* als mit einer *Einkieselung* zu tun, und das Produkt sollte eigentlich mit „Kieselholz“ statt mit „verkieseltem Holz“ bezeichnet werden (STORZ 1933). Einen knappen Überblick über die Anatomie von Kieselhölzern findet man bei SELMEIER (1994). Zur Bestimmung fossiler Hölzer benötigt man im allgemeinen mehrere Dünnschliffe. Elektronenmikroskopische Untersuchungen zeigen, daß die ehemaligen Zellwände des Kieselholzes die Sollbruchflächen bei mechanischer Beanspruchung darstellen und daß Kieselholz häufig ein unerwartet poröses Material ist - jedenfalls auf der elektronenmikroskopischen Skala; vgl. die Aufnahmen in der Arbeit von BUURMAN (1972). Die Korrosion von Kieselholz verläuft offenbar so, daß Feuchtigkeit bevorzugt entlang dem mehr oder weniger porösen, polykristallinen Material eindringt, das jetzt an Stelle des ehemaligen organischen Wandmaterials vorliegt.

Aus der Vielzahl von Veröffentlichungen über Kieselhölzer seien diejenigen von GOTTWALD (1994, 1997) über Funde aus Birma bzw. der Molasse Bayerns genannt. Die zu den Coniferen gehörenden Araucarien Südargentiniens aus dem Mesophyticum sind dadurch bekannt geworden, daß nicht nur die Stämme sondern auch die Zapfen in verkieselter Form vorkommen. Aufgesägt zeigen letztere feinste Details ihres Baues (DERNBACH 1992).

Stammquerschnitte verkieselter Baumfarne zeigen von den Luftbündeln herrührende, gleichmäßig verteilte helle Flecke auf dunklem Grund. Der Vergleich mit „der schwarzen weissgefleckten Brust des Staars“ lag nahe; vgl. STENZEL (1854). Die erstmals in der Gegend von Chemnitz gefundenen Steine wurden daher als Sta(a)rsteine bezeichnet und der Star (griechisch: ψαρος) wurde namensgebend für die Psaronien (Baumfarne). Weitere Details zur Entdeckungs- und Interpretationsgeschichte der Starsteine s. STENZEL (1854).

Beispiele in Fig.: 12, 13, 32, 34, 3, 53.

Hier soll noch das in Weiterführung begriffene Projekt auf Sardinien erwähnt werden, das sich mit Verkieselungen, speziell dem Achat in Holzstämmen befaßt. GREGOR et al. (2001) konnten in einer Studie die algenummantelten Baumstämme von Perfugas, Laerru und Martis untersuchen und mit denen vom Lago Omodeo vergleichen. Im ersten Falle sind die Hölzer eindeutig tuffitisch beeinflusst und hydrothermal geprägt, im zweiten Falle nur zum Teil, da Konglomerate und somit Umlagerungsphänomene vorliegen. Neue Funde von Zuri gestatten es nun, Stämme in situ (?), ummantelt von feinkörnigen Tuffiten, zu studieren – also wieder hydrothermal beeinflusste Fossilien.

3.4.2. Weitere Oxide

Hämatit (Eisenglanz, Roteisenerz) ist ein wichtiges Eisenerz. Das Mineral mit der Formel Fe_2O_3 bedingt die rote Farbe der präkambrischen Bändereisenerze, die aus abwechselnden Lagen von Hämatit und Hornstein bestehen. Erze dieses Typs kommen an vielen Stellen vor (Brasilien, Simbabwe, Labrador usw.). Entstanden sind sie in marinem Milieu. Über die Details der Bildung und die Rolle von Mikroorganismen dabei gehen die Meinungen auseinander. Fälle von in Hämatit umgewandelten oder mit Hämatit imprägnierten Fossilien aus dem Devon führt HARDT (1958:39) auf.

Beispiel in Fig. 37.

Goethit (Nadeleisenerz) ist Eisenoxidhydroxid, $\text{FeO}(\text{OH})$. Das Mineral tritt häufig in Form von Krusten auf, die aus sehr dünnen miteinander verwachsenen, parallel orientierten Fasern oder Nadeln bestehen (Faserrichtung senkrecht zur Krustenoberfläche). Das resultierende Aggregat mit tiefschwarzer, glänzender Oberfläche hat den passenden Name „Glaskopf“. Solcher „Glaskopf“ kann Kalzitkristalle überkrusten, die in Kammerhohlräumen von Ammoniten aus dem Weißen Jura gewachsen sind (HOLENWEG & OFFERMANN 1977). In Ammonitenhohlräumen wurden auch isolierte nadelige Goethitkristalle angetroffen (HEGELE 1999). Goethit bildet häufig Pseudomorphosen nach Pyrit. In solchen Fällen ist er durch die Oxidation des Pyrits durch Sauerstoff entstanden. Die ehemals pyritisierten und jetzt aus Goethit bestehenden Ammoniten von Staffelstein sind hier zu erwähnen.

Auch die „roten“ Blätter von Sprendlingen (MELLER 1989) sind anzuführen.

Beispiele in Fig.: 9, 25, 26.

Psilomelan und andere Mangan(IV)-Oxo-Verbindungen. Von Psilomelan (MnO_2) leitet sich eine große Gruppe schwarzer, meist schwer identifizierbarer mikrokristalliner Mn(IV)-Minerale ab. Aus solchen Mineralen bestehen die in den Plattenkalken der Solnhofener Gegend besonders schön entwickelten „Mangandendriten“. Daß die filigranen Gebilde „ihren Ursprung nicht von den Geschlechtern des Pflanzenreichs haben, mit denen sie einigermaßen in ihrer Bildung übereinkommen“, war bereits LINNÉ (1779: 170) klar. Ein weiteres

Mangan-Pseudofossil, „Psilomelan-Platten, fossilem Holz mit Jahresringen ähnlich“, beschreibt POTONIE (1908: 230, 231). Bei der Bildung von Mangansumpferz und Manganocker sind Mikroorganismen beteiligt. Bei der Verwitterung von Mn(II)-Mineralen, werden die freigesetzten Mn^{2+} -Ionen durch Sauerstoff aus der Luft leicht oxidiert. Die entstehenden feinkristallinen Mangan(IV)-Oxide können Reste von Lebewesen imprägnieren oder überkrusten; vgl. dazu alles in POTONIE (1908). Entsprechende schwarze Knochen und Zähne fanden sich nach eigener Erfahrung von Autor GREGOR in Spaltenfüllungen bei Weißenburg. Schwarze Überzüge von Manganmineralen kommen auf Ammoniten aus den triassischen Rotkalken von Epidauros, Osthang Theokafta-Berg (Griechenland) vor.

Beispiel in Fig. 50.

3.5 Carbonate

Unter den Carbonaten spielt das Mineral Kalzit, $CaCO_3$, die weitaus wichtigste Rolle im Zusammenhang mit Fossilien

- a) verglichen mit den anderen Modifikationen des Calciumcarbonats und
- b) verglichen mit den Carbonaten anderer zweiwertiger Metalle.

Zu a: Kalzit ist die unter Normalbedingungen stabilste Modifikation des Calciumcarbonats, Dies hat zur Folge, daß Aragonit, eine weitere Modifikation des $CaCO_3$, sich (außer wenn spezielle Bedingungen herrschen) im Laufe geologisch langer Zeitintervalle in Kalzit umwandelt. Vaterit, ebenfalls eine $CaCO_3$ -Modifikation, ist so wenig beständig, daß er (wahrscheinlich) keine Rolle bei Fossilien spielt.

Zu b: Calciumcarbonat in Form von (a) reinem Kalzit, (b) Kalzit, bei dem einige Mol% Ca-Ionen durch Mg-Ionen ersetzt sind („Magnesiumkalzit“) und (c) Aragonit scheiden sich heute und schieden sich während der Erdgeschichte in riesigen Mengen aus Meerwasser ab. Bei diesem Prozeß sind (und waren) Mikro- und Makroorganismen beteiligt. Bestimmte Algen etwa initiieren auf ihrer Oberfläche die Kristallisation von $CaCO_3$. Makroorganismen wie Korallen oder Muscheln bauen ihre Skelette bzw. Schalen weitgehend aus $CaCO_3$. Nach dem Tod dieser Organismen sind die Hartteile Bestandteile des Sediments. Abscheidung von $CaCO_3$ erfolgt auch im nicht-marinen Milieu: in Süßwasserseen und aus Quellwasser.

Auch Dolomit, $CaMg(CO_3)_2$, kommt in großen Mengen als Sedimentgestein in der Natur vor. In Dolomit sind Fossilien aber meist weniger gut als in Kalzit erhalten. Verglichen mit den genannten Carbonaten spielen die Carbonate anderer Metalle (Eisen, Mangan, Kupfer) eine untergeordnete Rolle bei der Fossilisation. Im folgenden werden zu einigen der genannten Substanzen ein paar zusätzliche Erläuterungen gegeben.

Kalzit. Die Kalzitkristalle, aus denen der Kalkstein und die in ihm enthaltenen Fossilien bestehen, sind meist so klein, daß man sie mit bloßem Auge nicht erkennen kann. Jeder Kristall hindert jeden anderen am Wachstum. Wenn allerdings Hohlräume verfügbar sind, wie Wohnkammern von Ammoniten, kann der Kalzit in Form mm- bis cm-großer, idiomorpher, Kristalle wachsen; vgl. hierzu HEGELE (1999) und HOLENWEIG & OFFERMANN (1977). Besonders gut entwickelte, flächenreiche Kristalle kann man in den Hohlräumen finden, die durch häufig fest geschlossene Schalen von Brachiopoden des Weißen Jura gebildet werden (THEWALT 2000b).

Bei der oben erwähnten Umwandlung von Aragonit (z. B. Schalen bestimmter Muscheln oder Gehäuse von bestimmten Serpeln) in Kalzit erfolgt eine Vergrößerung der Strukturen. Gleiches gilt für die Substitution von Magnesiumkalzit durch reinen Kalzit. Dementsprechend

sind Hartteile, die ursprünglich aus Kalzit bestanden, im allgemeinen viel detailreicher erhalten als solche, die ursprünglich aus einem anderen Material bestanden. Als Beispiele sind einerseits die hervorragend konservierten Schalen von Terebrateln des Weißen Jura zu nennen und andererseits die schlecht erhaltenen Schalen von Muscheln mit ehemals aragonitischen Bestandteilen.

Säulen- bis nadelförmiger Kalzit tritt im Zusammenhang mit Inoceramus-Muscheln auf und zwar als Prismen der äußeren Klappenschicht (vgl. MÜLLER 1980), während die innere Aragonitschicht aus Lamellen besteht.

Eine eigenartige Erscheinung ist bei fossilen Echinodermen zu beobachten: Bei ihnen erfolgte die Kristallisation von Kalzit derart, daß die Hohlräume von Skelettelementen (jetzt) von jeweils einem einzigen Kalzitkristall ausgefüllt werden. Durch die relativ großen glänzenden Spaltflächen solcher Kalzite sind Echinodermenreste leicht zu erkennen.

Die „Kristalläpfel“ von Gotland sind die mit Kalzit ausgefüllten Körper von Cystoideen. Phantastische Kombinationen von rotem und schwarzem Kalk und weißem Kalkspat findet man bei Halorella-Handstücken aus dem Dachsteinkalk (Trias) vom Tennengebirge, wobei auch oftmals sog. „fossile Wasserwaagen“ (Geopetalgefüge) vorkommen. Der sog. Dasycladaceenkalk aus den Alpen verdankt seine Entstehung der durch spezielle Algen bewirkten Kalkabscheidung

Travertin (Sinterkalk, Kalktuff). Die Löslichkeit von CaCO_3 in reinem Wasser ist gering (ca. 13 mg in 1 l Wasser bei 18°C). C. Sie steigt erheblich, wenn Kohlendioxid im Wasser gelöst ist. Wenn eine solche „kalkreiche“ Lösung mit der Atmosphäre Kontakt bekommt, gibt sie (bis auf einen kleinen Rest) ihr CO_2 an die Luft ab. Dabei scheidet sich zwangsläufig festes CaCO_3 ab. Hierauf beruht die Kalkabscheidung aus CO_2 -haltigen Quellwässern in Gegenden mit Kalkuntergrund. Auch hierbei bewirken bzw. beschleunigen Algen und Bakterien die Kalkabscheidung. In den mehr oder weniger porösen Kalken sind oft Blätter und Pflanzenreste aller Art eingeschlossen. Solche Kalktuffe kommen an mehreren Stellen in Bayern vor, z. B. bei Polling. Bekannt ist auch der Cannstadter Travertin und der als „Böttinger Marmor“ bezeichnete Sinterkalk von Böttingen auf der Schwäbischen Alb.

Beispiel in Fig. 48.

Aragonit spielt als gesteinsbildendes Mineral eine unbedeutende Rolle. Während der Diagenese von Sedimenten wandelt sich der Aragonit von Hartteilen ehemaliger Lebewesen in Kalzit um oder wird durch SiO_2 ersetzt. Auf letzterem Prozeß beruht die Verkieselung von Korallen aus dem Weißen Jura der Schwäbischen Alb (NAGEL & LAUXMANN 1990). Nadelförmige Aragonitkristalle wurden in Wohnkammern von Ammoniten aus dem Schweizer Jura angetroffen (HOLENWEIG & OFFERMANN 1977). Bemerkenswert sind die Fälle, in denen Aragonit über geologisch-lange Zeitabschnitte erhalten bleibt. Beispiele hierzu liefern die Schalen der Muschel *Trigonia navis* und des Ammoniten *Leioceras opalinum* aus dem Dogger alpha SW-Deutschlands. Die Aragoniterhaltung wird auf die geringe Wasserdurchlässigkeit des einbettenden Sediments (Opalinuston) zurückgeführt (ANDALIB 1973). Erklärt ist die Angelegenheit damit allerdings nicht! Wie beim Kalzit schon ausgeführt, sind die inneren Klappen bei Inoceramus z.B. aus dichten Lamellen von Aragonit geprägt (MÜLLER 1980).

Beispiele in Fig.: 6, 7, 8, 10, 11, 20, 33, 45, 47, 49..

Dolomit. Ohne auf die Problematik einzugehen, sei vermerkt, daß bezüglich der Bildung von Dolomit in der Natur noch etliche Unklarheiten bestehen. Das gilt auch für das Verständnis der Reaktionen, an denen Dolomit beteiligt ist. Wichtige entsprechende Reaktionen sind die

“Dolomitisierung” von Kalk (Kalzit $\rightarrow$ Dolomit) sowie die Umkehrung des Prozesses, die “Dedolomitisierung” (Dolomit $\rightarrow$ Kalzit). Beide Prozesse sind an vielen Stellen in den Weißjura-Sedimenten der Schwäbischen und Fränkischen Alb abgelaufen. Der grobkristalline, speckig glänzende “zuckerkörnige” Kalk, der an manchen Stellen der Alb vorkommt, ist als Dedolomit anzusehen. Fossilien, die eine Dolomitisierung mitgemacht haben, sind meist schlecht erhalten, zumal das dolomitische Gestein leicht “sandet”, d.h. in kleine, etwa gleichgroße, rhomboederförmige Dolomitkriställchen zerfällt.

Unter speziellen Bedingungen wurden allerdings auch durch Dolomit Reste von Lebewesen sehr detailgenau konserviert. Zu erwähnen sind hier die dolomitischen Konkretionen aus bestimmten Carbonsedimenten („Torfdolomite“). An Dünnschliffen dieses Materials lassen sich anatomische Feinheiten von eingeschlossenen Pflanzenresten studieren (GÖKE 1965).

Die Ammoniten und großen *Astarte*-Muscheln von Großmerring bei Ingolstadt bestehen aus Dolomit, der mit Kalzitkristallen überzogen ist.

Stratigraphisch heute ins Miozän zu stellende dolomitisierte Lithothamnien-Knollen erwähnt (ROTHER 1996: Abb.45) aus einem Transgressionshorizont von Fuerteventura.

Beispiel: Fig. 30.

Rhodochrosit (Manganspat) mit der Formel MnCO_3 bildet häufig nierenförmige rosa Aggregate; beispielsweise im Neogen von Kertsch. Gelegentlich kommt das Mineral auch in Muscheln und Holz vor; so im Miozän von Niederpleis bei Köln.

Beispiel: Fig. 21.

Siderit (Eisenspat) ist das Carbonat des zweiwertigen Eisens: FeCO_3 . Die Kristalle weisen meistens rhomboedrischen Habitus auf, so z. B. die in den Spalten der Sideritkonkretionen vom Tagebau Hambach (Köln, Rheinbraun AG) vorkommenden (THEWALT & DÖRFNER 2001). Die Bildung der Sideritkonkretionen, die Durchmesser von über 1 m erreichen können, und der sideritisierten Hölzer von Hambach und anderen Stellen im Niederrheingebiet ist an ein reduzierendes Milieu gebunden. Durch die Reduktion von allgegenwärtigen oxidischen Fe(III)-Verbindungen müssen Fe^{2+} -Ionen verfügbar gemacht werden. Als Reduktionsmittel fungiert das organische Material der ehemaligen Braunkohlesümpfe sowie die Braunkohle selbst.

Smithsonit (Zinkspat; ZnCO_3) tritt gelegentlich als Versteinerungsmaterial von Muscheln aus dem Unteren Muschelkalk auf (HARDT 1958: 55).

Malachit ist ein basisches Kupfercarbonat mit der Formel $\text{Cu}_2[(\text{OH})_2(\text{CO}_3)]$. Es entsteht bei der Oxidation sulfidischer Kupfererze. Malachit wird oft als Überzug prähistorischer bis rezenter Gegenstände beobachtet, die aus Kupfer oder Kupfer enthaltenden Legierungen bestehen. Das Mineral kommt auch als Anflug auf fossilen Knochen vor, auf die Kupferionen enthaltende Lösungen eingewirkt haben.

Beispiel: Fig. 15.

Azurit (Kupferlasur) ist ein weiteres basisches Kupfercarbonat mit der Formel $\text{Cu}_3[(\text{OH})_2(\text{CO}_3)_2]$. Es kommt oft zusammen mit Malachit vor. Man hat es in Stromatolithen beobachtet (PINNA 1989).

3.6 Sulfate

Gips (Selenit) scheidet sich als eines von mehreren Mineralen beim Eindunsten von Meerwasser ab (evaporitische Bildung z. B. in Lagunen). Neben Gips, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, kommt auch das wasserfreie Calciumsulfat, der „Anhydrit“, vor. Beide Minerale können sich unter geeigneten Bedingungen ineinander umwandeln. Als Fossilien, die durch Gips ersetzt sind,

seien die Schalen von Mollusken aus dem südspanischen oder libyschen Pliozän erwähnt (GREGOR & RICHTER 1996). Auch Holzreste können weitgehend mit Gips imprägniert sein. Eine entsprechende Fundstelle ist der Bereich der untermiozänen Gipsmergel nahe einer Riffzone bei Barcelona. Eine Besonderheit bilden die großen Gipskristalle von Alba oder Cherasco in Oberitalien, in denen Libellenlarven und andere organische Reste eingeschlossen sind. Gips bildet sich auch bei der Verwitterung von Pyrit (genauer: bei dessen Oxidation durch Luftsauerstoff, wobei Fe^{3+} -Kationen und Sulfat-Anionen entstehen), wenn Ca^{2+} -Kationen verfügbar sind. Hierdurch ist das Auftreten von, wenn auch meist kleinen, Gipskristallen in Braunkohle zu erklären.

Beispiel in Fig.: 28, 36, 44, 52.

Coelestin ist Strontiumsulfat, SrSO_4 . Dieses Mineral hat ähnliche Eigenschaften wie Baryt (s. u.). Es soll hier als Beispiel eines durch Biomineralisation gebildeten Materials erwähnt werden: Aus Coelestin bestehen die hochsymmetrischen filigranen Skelette der zu den Radiolarien gehörenden Acantharia; vgl. LOWENSTAM & WEINER (1989: 54). Als Fossilisationsmaterial spielt Coelestin bei Muscheln und Schnecken aus dem Muschelkalk eine Rolle; siehe hierzu HARDT (1958: 54).

Baryt ist Bariumsulfat, BaSO_4 . Baryt zementiert gelegentlich Sand zu einem sandsteinartigen Material. Das Mineral bildet auch Konkretionen, beispielsweise in den marinen Strandablagerungen des Mainzer Beckens aus dem Oligozän (Steinhardt Erbsen). Eingeschlossen in den Konkretionen von Steinhardt finden sich Pinienzapfen, Holzstücke und Muscheln (GEIB 1955). Das weiße Material, das die Risse von inkohltem Holz, dem sog. Gagat, aus dem Lias von Holzmaden (Württemberg) ausfüllt, ist Baryt und nicht, wie man meinen könnte, ein carbonatisches Mineral.

Beispiel: Fig. 5.

Alunit, ein basisches Kalium-Aluminium-Sulfat der Zusammensetzung $\text{KAl}_3[(\text{OH})_6(\text{SO}_4)_2]$, tritt bei der Verwitterung pyrithaltiger Schiefer auf (Alaunschiefer). Es bildet gelbe oder blaue Anflüge auf Fossilien, z. B. auf Graptolithen. Vor allem im Frankenwald in Nordbayern finden sich Alaunschiefer mit solchen Fossilien, die wohl durch pneumatolytische Veränderungen von Granitgesteinen entstanden sind (JUNG 1954: 290).

Beispiel: Fig. 31.

3.7 Phosphate

Allgemeines. Phosphor ist ein lebenswichtiges Element. Zum einen kommt er in den Zellkernen vor, zum anderen enthalten Knochen von Wirbeltieren sowie Hartteile bestimmter Invertebraten erhebliche Mengen an Calciumphosphat-Mineralen. Unter geeigneten Bedingungen kann es bei der Verwesung von organischem Material zu Anreicherungen von Phosphaten kommen. Eine ergiebige Quelle von Phosphorverbindungen sind Fäkalien. Aus Vogelexkrementen entsteht der Guano. Große Phosphatlagerstätten gibt es in Florida und Marokko, z.T. mit vielen Fossilien vergesellschaftet. Phosphatabscheidung kann unter speziellen Reaktionsbedingungen auch in marinem Milieu erfolgen. Im folgenden wird auf einige Phosphate näher eingegangen.

Apatit besitzt die Formel $\text{Ca}_5[(\text{PO}_4)_3\text{X}]$, wobei X ein einfach-negatives Anion bezeichnet. Je nach eingebauten Anionen spricht man von Chlor-, Fluor-, oder Hydroxylapatit; es können auch nebeneinander unterschiedliche X vorkommen. Hydroxylapatit spielt als Bestandteil von Zähnen und Knochen eine wichtige Rolle.

Phosphorit ist die Bezeichnung für ein weitgehend aus Calciumphosphat bestehendes Material, das in unterschiedlichem Ausmaß Apatit und ähnliche Mineralspezies enthält. Für die verschiedenen "Varietäten ist eine Unzahl meist überflüssiger Namen geprägt" worden; s. dazu RAMDOHR & STRUNZ (1978: 637). Aus Phosphorit bestehen die Koprolithen ("versteinerter Schitt"). Phosphorithölzer fanden sich beispielsweise in der Braunkohle von Helmstedt (GOTTWALD 1992) oder im Leipziger Tagebau Espenhain (neue Befunde). Aus Phosphoritvorkommen Israels beschreiben SOUDRY & GREGOR (1997) eine Kreide-Frucht. Konkretionen aus Phosphorit kommen gelegentlich in den tertiären Spaltenlehmen der Schwäbischen Alb vor (THEWALT 2000a). Als Quelle der Phosphationen kommen dabei die Knochen von Säugetieren in Frage. Weil sedimentäre Apatit/Phosphoritbildungen im Gegensatz zu solchen in magmatischen Gesteinen sehr feinkristallin sind, können durch sie Fossilien unglaublich detailreich und fein konserviert werden. Als Beispiele seien die nur mm-großen *Skaracarida* (Crustaceen) aus dem Kambrium von Västergötland (Schweden) erwähnt (MÜLLER & WALOSSEK 1985).

Francolith. Mit diesem Namen ist ein Carbonationen enthaltender Apatittyp belegt worden. Francolith kommt in Conodontenzähnen vor, z.B. solchen aus dem Devon von Gießen.

Vivianit ist ein Kristallwasser enthaltendes Phosphat des zweiwertigen Eisens, $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$. In reiner Form ist Vivianit farblos; beim Kontakt mit Luftsauerstoff erfolgt unter Blaufärbung rasch partielle Oxidation des Eisens. Das Mineral tritt im Zusammenhang mit der Verwesung von organischem Material, besonders von Fäkalien, auf. In Form tiefblauer, langprismatischer Kristalle und strahliger Aggregate kommt es in Hohlräumen von Muscheln aus dem Neogen der Halbinsel Krim vor. Bildung von Überzügen und Drusenbildung wird bei in Ton eingebetteten Pflanzenresten beobachtet. In feinkristalliner Form kann Vivianit die Spreiten tertiärer Laubblätter ersetzen und ganze Blattspreiten bedecken; vgl. THEWALT & GREGOR (2001). Auch Knochen tertiärer Großsäuger können von Vivianit überzogen und mit dem Mineral imprägniert sein (HARDT 1958:72).

Beispiel in Fig. 22.

Anapaait ist eine hellgrüne, verglichen mit Vivianit hartes und verwitterungsbeständiges Phosphat. Dieses Mineral mit der Formel $\text{Ca}_2\text{Fe}(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ wird in Hohlräumen von Mollusken von der Halbinsel Krim angetroffen. Dort ist das Mineral entdeckt worden. Es kommt auch in den Sedimenten tertiärer Süßwasserseen in Italien, Spanien, Deutschland und Griechenland vor; vgl. THEWALT, VELITZELOS & VELITZELOS (2001).

3.8 Silikate

Obwohl die Zahl der bekannten Silikate groß ist und obwohl die Erdkruste zu über 50 Gewichts% aus Silikaten besteht, spielen Silikate im Zusammenhang mit Fossilisationserscheinungen eine sehr untergeordnete Rolle.

Glaukonit ist ein strukturell dem Muskovit nahestehendes Schichtsilikat mit hohem Eisengehalt. Das Mineral kommt in Form grüner Körnchen vor. Glaukonit kann massenweise auftreten. Er ist farbgebender Bestandteil des „Grünsands“. Das Mineral bildet sich unter marinen Bedingungen bei der Verwitterung anderer Silikate. Aus Glaukonit bestehen gelegentlich die Steinkerne von in Kalkstein eingebetteten marinen Mikrofossilien, besonders Foraminiferen. Strukturelle Details können dabei überraschend genau konserviert sein.

Beispiel: Fig. 29.

Gümbelit gehört zu den "Hydro-Glimmern" und ist verwandt mit dem "Hydromuskovit"; vgl. RAMDOHR & STRUNZ (1978: 751). Dieses Mineral kommt als Besatz oder Anflug auf

Fossilien vor, vor allem auf den schönen karbonischen Farnen von Piesberg bei Osnabrück. Diese bekommen dadurch ein silbriges Aussehen.

Beispiel: Fig. 18.

3.9 Fossilien als Schwermetallsammler

Unter Schwermetallen werden hier Uran und seine Nachbarn im Periodensystem der Elemente verstanden. Solche Metalle bzw. ihre Kationen finden sich nicht selten in fossilen Knochen und Zähnen, z.B. bei Sauriern, angereichert. Die entsprechende Imprägnierung mit Uran und Thorium im Grundwasserbereich findet offenbar nur in saurem Milieu (Sandsteine, Tone) statt. Man kennt sie bei Dinosaurierknochen, aber auch bei Knochen von fossilen Elefantenvorläufern; z. B. solchen aus der Molasse Bayerns. Interessanterweise fehlt diese Erscheinung in Ablagerungen der Unteren Süßwassermolasse Süddeutschlands und der Schweiz, so z.B. auch bei Sprendlingen (MELLER 1989). Dies dürfte mit dem Kalkgehalt und damit einem eher basisch beeinflussten Reaktionsmilieu zusammenhängen. Pechblende (Uranoxid mit der Formel UO_2) kommt in größerer Menge im Bereich des Colorado-Plateaus vor. Die Bildung erfolgte durch die Reaktion gelöster, vom Grundwasser transportierter Uran-Verbindungen mit eingebettetem organischen Material, insbesondere mit Holz.

Beispiel: Fig. 40.

4. Literatur

- ANDALIB, F. (1973): Erhaltung von Aragonit-Schalen im Dogger alpha (Unteres Aalenium) SW-Deutschlands. - Geologische Rundschau, **62**: 506-521
- BECKER, G., ADAMCZAK, F. J. (2001): Schalenmerkmale verkieselter Ostracoden: sind die ordovizischen Duplikaturen nur Artefakte oder eher evolutionäre Vorversuche?.- Paläont. Z., **75** (2): 151-162, 9 Abb., Stuttgart
- BUURMAN, P. (1972): Mineralisation of fossil wood.- Scripta Geol., **12**: 1-43, 38 figs., Leiden
- DEECKE, W. (1923): Die Fossilisation, Verlag Gebr. Bornträger, Berlin
- DERNBACH, U. (1992): Araucaria – die versteinerten Araukarien vom Cerro Cuadro, Argentinien.- 160 S., viele, z.T. farb. Fotos, D'ORO Verl., Lorsch
- DERNBACH, U. (1996): Versteinerte Wälder – die 31 schönsten versteinerten Wälder der Erde.- 188 S., viele, z.T. farb. Fotos, D'ORO Verl., Lorsch
- ENGEL, T. (1908): Geognostischer Wegweiser durch Württemberg. - 646 S., 261 Abb., 6 Taf., E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung Stuttgart
- FLÖRKE, O. W., JONES, J. B. & SEGNET, E. R. (1973): The genesis of hyalite. - N. Jahrb. Min. Mh. 82-89.
- FRANKE, CH. & GRAF, W. (1996): Fossilien aus Luxemburg und Westeifel, Teil I: Quarzit de Berlé.- Fossilien, **4**: 257-260, Korb
- FRITZ, G. K. (1958): Schwammstotzen, Tuberolithe und Schuttbreccien im Weißen Jura der Schwäbischen Alb. - Arb. Geol. Paläont. Inst. TH Stuttgart, N. F. **13**, 113 S., 24 Abb., 5 Taf., Stuttgart
- FÜCHTBAUER, H. (1988): Sediment Petrologie II. Sedimente und Sedimentgesteine.- 1141 S., 600 Abb., 113 Tab., Schweizerbarth, Stuttgart
- GEIB, K. W. (1955): Über den Vorgang der Konkretionsbildung bei den Barytkonkretionen des mitteloligozänen Meeressandes von Steinhardt (Kreis Kreuznach). - Notizbl. Hess. L.-Amt Bodenforsch. **88**: 243-245, Wiesbaden

- GLAS, M. & MAYR, H. (1994): Holz, ein Mineraliensammler (2).- extra Lapis, 7: 10-15, Chr. Weise Verl., München
- GÖKE, G. (1965): Die mikroskopische Untersuchung von Torfdolomiten. - Der Aufschluss, 16: 121-126, Göttingen
- GOTTWALD, H. (1976): Die Bestimmung der "Kautschukhölzer" und "Kautschukrinden" aus der Braunkohle des Geiseltales, in: Eozäne Floren des Geiseltales.- Abh. Zentr. Geol. Inst., Paläont. Abh., 26: 283- 290, Taf. XL, XLI, Berlin
- GOTTWALD, H. (1992): Hölzer aus marinen Sanden des Oberen Eozän von Helmstedt (Niedersachsen). - Palaeontographica, B, 225, 1-3: 27-103, 20 Taf., Stuttgart
- GOTTWALD, H. (1994): Tertiäre Kieselhölzer aus dem Chindwinn-Bassin im nordwestlichen Myanmar (Birma). - Documenta naturae, 86: 1-90, 28 Abb., 2 Tab., 9 Taf., München.
- GOTTWALD, H. (1997): Alttertiäre Kieselhölzer aus miozänen Schottern der ostbayerischen Molasse bei Ortenburg.- Documenta naturae, 109: 1-83, 24 Abb., 4 Tab., 11 Taf., München
- GOTTWALD, H. (2000): Gymnosperme und angiosperme Hölzer aus den „Aachener Sanden“ der Oberen Kreide von NO-Belgien und NW-Deutschland – mit anatomischer Bestimmung der Arten, Kommentaren, Tafeln und 96 Mikrofotos (Pflanzen aus der Aachener Kreide – Teil 1).- Documenta naturae, 131, 65 S., 14 Abb., 2 Tab., 10 Taf., München
- GREGOR, H.-J. (1980): Die miozänen Frucht- und Samen-Floren der Oberpfälzer Braunkohle. II. Funde aus den Kohlen und tonigen Zwischenmitteln. -- Palaeontographica, B, 174, 1-3: 7-94, 15 Taf., 7 Abb., 3 Tab.; Stuttgart.
- GREGOR, H.-J. (1995): Die pliozäne Flora von Mühlheim bei Offenbach am Main. -- Jber. wetterau. Ges. ges. Naturkunde, 146-147. Jg.: 87-167, 7 Abb., 5 Tab., 23 Taf.; Hanau.
- GREGOR, H.-J. & RICHTER, A. (1996): Geologie, Fazies und Fossilinhalt der pliozänen Ablagerungen von El Alquian östlich Almeria (Andalusien, Spanien). -- Documenta naturae, 106, 2: 1-41, 7 Abb., 14 Taf., München
- GRIPP, K. & TUFAR, W. (1965): Pyrit-Fossilien aus dem Unter-Eozän von Johannistal bei Heiligenhafen (Ost-Holstein).- Meyniana, 15: 29-40, 4 Taf., Kiel
- HAGN, H., HILLEBRANDT, A. v., MALZ, H., MARTINI, E., MOUSSAVIAN, E., PFEIL, F. H., SCHAUB, H. & VOIGT, E. (1981): Helvetikum und Ultrahelvetikum im Raum von Siegsdorf – Exkursion B, in: HAGN, H. Die bayerischen Alpen und ihr Vorland in mikropaläontologischer Sicht, Exkursionsführer zum 17. Europäischen Mikropaläontologischen Kolloquium in Oberbayern, Sept. 1981.- Geologica Bavarica, 82: 89-132, div. Abb. u. Tab., München
- HALSTEAD, L.B. (1983): Spuren im Stein. Das Kosmosbuch der Paläontologie. - 208 S., viele Abb.u.Tab., Kosmos Ges. d. Natfr., Franckh'sche Verlagshdlg., Stuttgart.
- HARDER, H. & FLEMIG, W. (1970): Quarzsynthese bei tiefen Temperaturen. - Geochim. Cosmochim. Acta, 34: 295 - 305,
- HARDT, H. (1958): Inn Erz umgewandelte Tiere und Pflanzen.-Neue Brehm-Bücherei, 80 S., 30 Abb., viele Tab., Ziemsen Verl., Wittenberg
- HEGELE, A. (1999): Einfach mal hineinschauen – Mineralien in Jura-Ammoniten.- Fossilien, 3: 182-187, Korb

- HESSE, R. (1989): Silica Diagenesis: Origin of Inorganic and Replacement Cherts.- Earth-Science Report, 26: 253-284, Amsterdam
- HILDEBRANDT, K.-D. (1991): Ein quarzithaltiger Kohlehorizont aus der Unteren Süßwassermolasse von Einsingen bei Ulm (Unter-Miozän). - Documenta naturae, 65: 18-27, 5 Abb., 2 Taf., München
- HOCHLEITNER, R. (1994): Holz, ein Mineraliensammler (1).- extra Lapis, 7: 4-9, Chr. Weise Verl., München
- HOLENWEIG, H. & OFFERMANN, E: Mineralfunde in Fossilhohlräumen aus dem Schweizer Jura. - Aufschluß, 28: 205-218, Göttingen
- HUDSON, J. D. (1982): Pyrite in ammonite-bearing shales from the Jurassic of England and Germany. - Sedimentology, 29: 639-667, Oxford
- KAPITZKE, M. & RIETER, M. (1996): Apsendesia – eine seltene Bryozoe aus dem schwäbischen Korallenkalk.- Fossilien, 4: 261, 262, Korb
- KNAUTH, L. P. (1994): Petrogenesis of Chert. - Reviews in Mineralogy, 29: 233-258, Washington, D. C.
- KRÄUSEL, W. (1968): Wesen und Wandel der Fossilien - Der Aufschluss, 19: 177-184, Göttingen
- KRASILOV, V.A. (1975): Paleoecology of terrestrial plants (Israel Program for Scientific Translations). - 283 S., 19 Fig., John Wiley & Sons, New York.
- KRAUTTER, M. (1997): Aspekte zur Paläökologie postpaläozoischer Kieselschwämme.- Profil, 11: 199-324, Stuttgart
- KRUMBIEGEL, G. & B. (1980): Fossilien der Erdgeschichte. - 406 S., 338 Bilder, 17 Tab., VEB Verl. Leipzig.
- KÜMMEL, R. (1972): Pyritfossilien aus der Londontonscholle Unter-Eozän 2 von Katharinenhof auf Fehmarn.- Der Geschiebesammler, 6, 3-4: 99-104, 2 Taf., Hamburg
- LANDMESSER, M. (1984): Das Problem der Achatgenese. - Mitt. d. Pollichia 72: 5-137, 109 Abb., 2 Tab., Bad Dürkheim
- LANDMESSER, M. (1994): Zur Entstehung von Kieselhölzern.- extra Lapis, 7: 49-80, Chr. Weise Verl., München
- LEHMANN, U. (1985): Paläontologisches Wörterbuch, 3. Aufl., F. Enke Verlag Stuttgart
- LEO, R. F. & BARGHOORN, E. S. (1976): Silicification of wood. - Bot. Mus. Leaflet. Harv. Univ., 25, 1-47, Cambridge, Mass.
- LINCK, G. & JUNG, H. (1954): Grundriss der Mineralogie und Petrographie.- 367 S., 392 Fig., (2. Aufl., JUNG) VEB G. FISCHER Verl., Jena
- LINNÉ, C. VON (1779): Vollständiges Natursystem des Mineralreichs nach der 12. Lateinischen Ausgabe in einer freyen und vermehrten Uebersetzung von J. F. GMELIN, 4. Tl., 548 S., 30 Taf., Nürnberg
- LOWENSTAM, H. A. & WEINER, S. (1989): On Biomineralization, Oxford University Press
- MATTIAT, B. & ZOBEL, B (1968): Edentostomina durrandii (MILLETT) mit ingestierten Zirkonen.- Geol. Jb., 86: 239-246, 3 Abb., 1 Tab., Hannover
- McKERRROW, W.S. (1981): Palökologie.- 248 S., 87 Abb., Kosmos Verl., Stuttgart

- MELLER, B. (1989): Eine Blatt-Flora aus den obermiozänen Dinotheriensanden (Vallesium) von Sprendlingen (Rheinhausen). - Documenta naturae, 54: 1-109, 8 Abb., 2 Tab., 26 Taf., München.
- MÜLLER, A. H. (1979): Fossilization (Taphonomy) in: MOORE, R. C. et al. Treatise on Invertebrate Paleontology, Part A.: A2-A78, Boulder, Colorado.
- MÜLLER, A. H. (1980): Lehrbuch der Paläozoologie, II, 1, 628 S., 722 Abb., 1 Tab., VEB G. Fischer Verl., Jena
- MÜLLER, A. H. (1992): Lehrbuch der Paläozoologie, I. Allgemeine Grundlagen.- 514 S., 280 Abb., G. Fischer, Stuttgart
- MÜLLER, K. J. & WALOSSEK, D. (1985): Skaracarida, a new order of Crustacea from the Upper Cambrian of Västergötland, Sweden.- Fossils and Strata, 17: 1 - 65, Oslo.
- MURAWSKI, H. (1992): Geologisches Wörterbuch, 3. Aufl., F. Enke Verlag Stuttgart
- NAGEL, R. & LAUXMANN, U. (1990): Zur Verkieselung der oberjurassischen Korallen von Württemberg. - N. Jb. Geol. Paläont. Mh., Heft 10, 622-638, Stuttgart
- PINNA, G. (1989): Enzyklopädie der Fossilien.- 232 S., viele farb. Abb., Pattloch Verl. (Weltbild)
- POTONIÉ, H. (1908-1915): Die rezenten Kaustobiolithe und ihre Lagerstätten.-Abh. Kön. Preuss. Geol. LA, N.F. 55, Bd. I: Die Sapropelite: VII-XV, 1-251, 23 Fig. (1908); Bd. II: Die Humusbildungen (1. Teil) 1-326, 59 Fig. (1911); Bd. III: Die Humus-Bildungen (2. Teil) und die Liptobiolithe: 1-322, 58 Fig., (1912); Ergänzende Tafeln zur abhandlung Potonié's über die rezenten Kaustobiolithe und ihre Lagerstätten: 1-81 (Tafeln) (1915), Berlin
- QUENSTEDT, F. A. (1858): Der Jura, Band I: Textband. - 842 S.; Fotomechanischer Nachdruck (1995) Goldschneck-Verlag, Korb
- RAMDOHR, P. & STRUNZ, H (1978): KLOCKMANN's Lehrbuch der Mineralogie, 16. Aufl., F.Enke Verl. Stuttgart
- REIF, W.-E. (1967): Schwammspicula aus dem Weißen Jura Zeta von Nattheim (Schwäbische Alb).- Palaeontographica Abt. A, 127: 85 - 102, Stuttgart.
- RICHTER, A.E. (1981): Handbuch des Fossiliensammlers. - 461 S., viele Abb. u. Tab., Kosmos Ges.d.Naturforsch., Franckh'sche Verlagshdlg. Stuttgart
- RICHTER, A. (1999): Achatisierte Schnecken.- Fossilien, 3: 130, 1 Abb., Korb
- ROTHER, P. (1996) : Kanarische Inseln – Lanzarote, Fuerteventura, Gran Canaria, Tenerife, Gomera, La Palma, Hierro.- Sammlung Geologischer Führer, 81, 307 S., 94 Abb., 9 Tab., 5 Beil., 2. Aufl., Gebr. Bornträger, Berlin
- SCHULER, G. & BERTLING, M. (1995): Bergkristalle in fossilen Schnecken. - Mineralien-Welt, Heft 6, S. 33-38
- SEILACHER, A. (1976): Palökologie, Konstruktionen, Sedimentologie, Diagenese und Vergesellschaftung von Fossilien - Bericht 1970-1975 des Sonderforschungsbereiches 53 Tübingen. - Zentralbl. Geol. Paläont. II, 5/6: 203-494, viele Abb., E. Schweizerbarthsche Verlagsbuchhdlg., Stuttgart
- SELMEIER, A. (1994): Nadelholz oder Laubholz, Palme oder Farn? Wie man versteinertes Holz bestimmt.- extra Lapis, 7: 32-47, Chr. Weise Verl., München

- SCHMINCKE, H.-U. (1968): Pliozäne, subtropische Vegetation auf Gran Canaria.- Naturwissenschaften, 55, 4 : 185-186, Berlin
- SOUDRY, D. & GREGOR, H.-J. (1997): *Iodes israelii* sp.nov.: a huge phosphate-mineralized icacinacean fructification from the Late Cretaceous of the Negev, southern Israel.- Cretaceous Research, 18: 161-178
- STENZEL, C. G. (1854): Über die Staarsteine. - Nova Acta Leopold. 24: 752-896, 7 Taf.
- STORZ, M. (1933): Zur Petrogenesis der Kieselhölzer Ägyptens. - Abh. Bayer. Akad. Wiss. Math.-naturwiss. Abt. N. F. Heft 16: 24-50, 14 Abb., München
- THEWALT, U. (1996): Im Flußbett der Ur-Donau - Von der Schönheit der Kieselschwammskelette. - Uni Ulm Intern, 206: 14-17, 14 Abb., Ulm
- THEWALT, U. (1998): Wie Lebewesen (fast) unsterblich werden.- Fossilisationen aus der Ulmer Gegend. - Uni Ulm Intern, 224: 13-17, 14 Abb., Ulm
- THEWALT, U. (2000 a): Feuersteine und andere Mineralkonkretionen - Beobachtungen an Funden aus der Ulmer Gegend. - Uni Ulm Intern, 239: 10-14, 12 Abb., Ulm
- THEWALT, U. (2000 b): Calcit - Beobachtungen im Mikrokosmos der Ulmer Alb in: SCHUNK, A. & THEWALT, U. (Herausg.) Historische anorganische Werkstoffe: 65 - 99, Universitätsverlag Ulm
- THEWALT, U. & GREGOR, H.-J. (2001): Vivianit, ein Phosphatmineral, auf „blauen“ Blättern aus pliozänen Sedimenten von Meleto im Valdarno (Italien). - Documenta naturae, 137: 13-23, 3 Abb., 2 Taf., München
- THEWALT, U., VELITZELOS, E. & VELITZELOS, D. (2001): Anapait, ein Phosphatmineral aus miozänen Sedimenten von Vegora in Makedonien, Griechenland. - Documenta naturae, 137: 1-11, 2 Abb., 2 Taf., München
- THEWALT, U. & DÖRFNER, G. (2001): Mineralogische Notizen vom Tagebau Hambach (Köln, Rheinbraun AG). - Documenta naturae, 138: 77-91, 5 Taf., München
- TUFAR, W., GRIPP, K. OTTEMANN, J. & STENDERUP, A. (1967): Mikroorganismen aus einer fossilen Holzprobe von Johannistal bei Heiligenhafen (Ost-Holstein).- N. Jb. Geol. Paläont., Mh., 2: 103-110, 12 Abb., Stuttgart
- TUREK, MAREK & BENES: Fossilien; Handbuch und Führer für den Sammler. - 496 S., viele farb. Abb., Aventinum Verlag, Prag 1991.
- VELITZELOS, E. (1999): La Foresta pitrificata dell'Isola di Lesbo (Grecia), in: PINNA, G. (ed.) Alle radici della Storia Naturale d'Europa - seicento milioni di anni attraverso i grandi giacimenti paleontologica.- P. 219-222, Jaca Book SpA, Milano
- VELITZELOS, E. & ZOUROS, N. (2000): The Petrified Forest of Lesvos.- 141 S. mit vielen Farbphotographien, Topio Publications

5. Tafelerläuterungen

Wenn nicht anders vermerkt, stammen alle mineralisierten Fossilien aus der Sammlung des Naturmuseums in Augsburg (NMA) und sind mit ihrer Inventarnummer angegeben.

Fig. 1 – 53: Beispiele für Mineralisierungen in Fossilien, Fotos von Fr. M. RÖDL oder vom Autor GREGOR; wenn nicht anders angegeben sind alle Objekte aus der speziellen Vitrine „Mineralisierung in Fossilien“ im Naturmuseum in Augsburg. Größenmaßstab etwa 1:1, wenn nicht anders angegeben.

Fig. 1: Gastropode (*Actaeonella* sp.) in blau-beiger Achat-Chalcedon-Erhaltung; Deccan, Himalaya; Kreide; NMA Inv. Nr. 99-148/1572

Fig. 2: Weiße Achatfüllung bei einer *Actaeonella* (siehe Fig. 1); NMA Inv. Nr. 99-149/1572

Fig. 3: Einzel-Koralle mit rotem Achat, verkieselt bis zu den Septen; Utah, USA; Tertiär; NMA Inv. Nr. 91-1565/528

Fig. 4: Fluorit-Einlagerung in Scheibe eines Calamiten; Hilbersdorf bei Chemnitz; Perm; NMA Inv. Nr. 99-150/1600

Fig. 5: Baryt-Ersatz von Lignit in einem Kiefernzapfen in einer Steinhardter Erbse (cf. *Pinus palaeostrobis*); Steinhardt bei Sobernheim; Oligozän; Coll. DERNBACH, o.Nr.

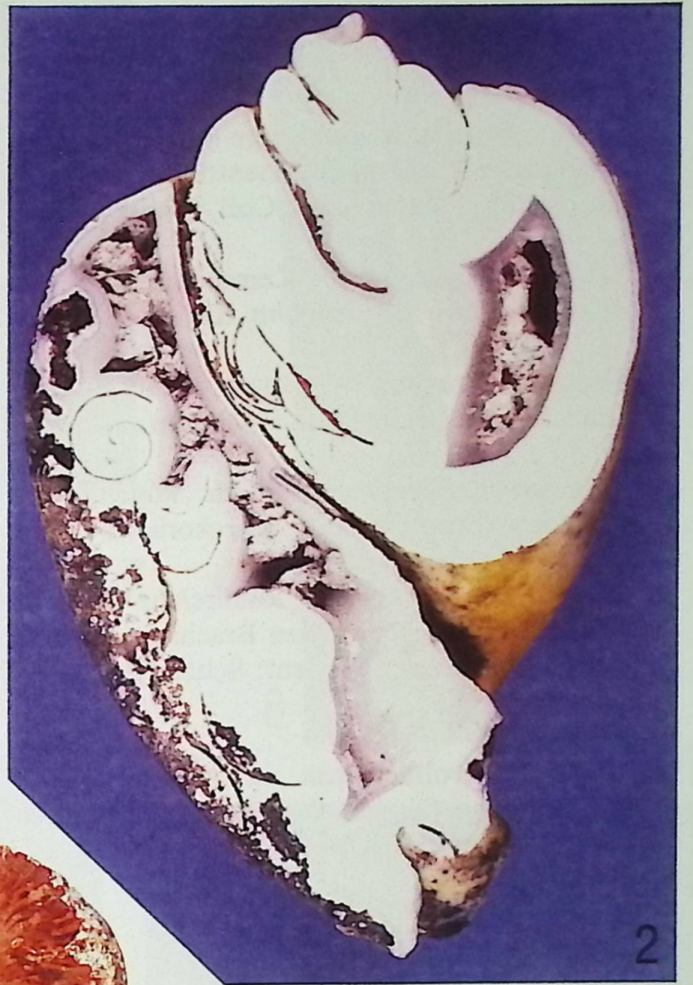


Fig. 6: Fossile Wasserwaage (*Orthoceras* sp.) in dedritischem Kalk aus dem Frankenwald bei Ludwigstadt; unten Sedimentfüllung normal, oben ist der ehemalige Hohlraum durch Kalzit ausgefüllt; Paläozoikum; Coll. GREGOR

Fig. 7: Ammonit mit Kammerfüllungen aus gelbem Kalzit; *Speetonicerias* cf. *versicolor*; Anabou-Fluß, Sibirien; Unt. Kreide; NMA Inv. Nr. 99-151/1260

Fig. 8: Aragonit – Kalzit – Ausprägung bei einem großen Belemniten-Phragmocon; Kalzitbesatz sekundär in Hohlraum auskristallisiert; NMA Inv. Nr. 91-1601/761

Fig. 9: Limonitisch vererzte kugelige Angiospermen-Früchte aus der Oberkreide der Aachener Sande; Sandgr. Kaeskorb, La Calamine, Belgien; NMA Inv. Nr. 99-152/1600

Fig. 10: verkalkte fossilreiche Handstücke mit Brachiopoden (*Halorella* sp.); Sedimentfüllungen in den Brachiopoden-Schalen rot und weiß (Übergang zu Kalzit), extern meist schwarzes Sediment; Scheiblingkogel, Tennengebirge; Trias-Dachsteinkalk; NMA Inv. Nr. 99-153/665

Fig. 11: vollkommen in Kalzit umgewandelter Nautilus (*Cenoceras striatum*) mit Siphostrang; Carrière de la Roche Blain, Fresney-le-Puceux, Normandie, Frankreich, Calcaire dur, Pliensbachium, Jura); Coll. SISSIOU, Frechen-Grefrath



6



8

9



7



10



11

Fig. 12: quarzitisch kristallisiertes Holz, strukturlos, aber Leitbündel noch sichtbar (Palme); (NC 126), N Oase Nafoorah und Andjila, Cyrenaika; Libyen; Kreide-Tertiär (Paläogen?); NMA Inv. Nr. 92-1876/778 (vgl. BRODT, GOTTWALD & GREGOR 1993)

Fig. 13: Schliff durch ein Kieselholz mit interner Struktur, man beachte die bläulich funkelnden Quarz-kristalle in gekreuzten Nicols; alter Fund; o.Nr.

Fig. 14: Korallenstöcke von *Favosites* und *Michelina* im Karbonkalk von Wintersberg; NMA Inv. Nr. 91-396/528

Fig. 15: Schafszahn von Kitzbühl (Tirol) mit Malachitanflug; Holozän, Bronzezeit; NMA Inv. Nr. 91-1708/698

Fig. 16: „opalisierte“ Holzscheibe (Konifere) mit deutlicher verkieselter Holzstruktur (braun), „wässrigem“ Chalcedon und grün-rötlichem Opal; Virgin Valley, Nevada, USA; Miozän; NMA Inv. Nr. 175/1667

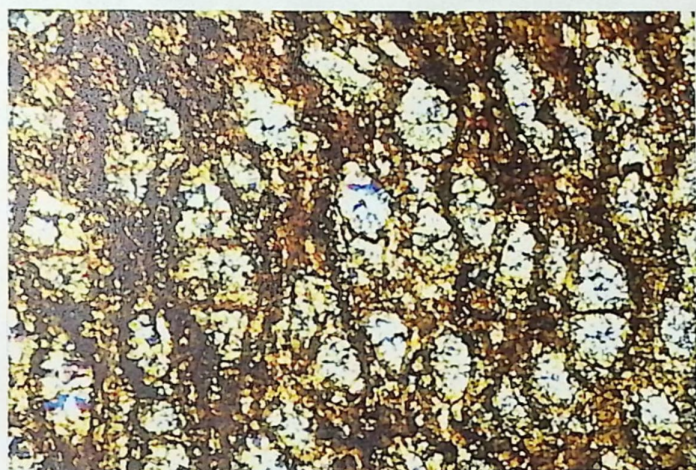
Fig. 17: blau achatisierte Holzscheibe mit schwarz verkieselten Partien; Blue Forest, Wyoming, USA; Tertiär; NMA Inv. Nr. 91-1566/779

12



14

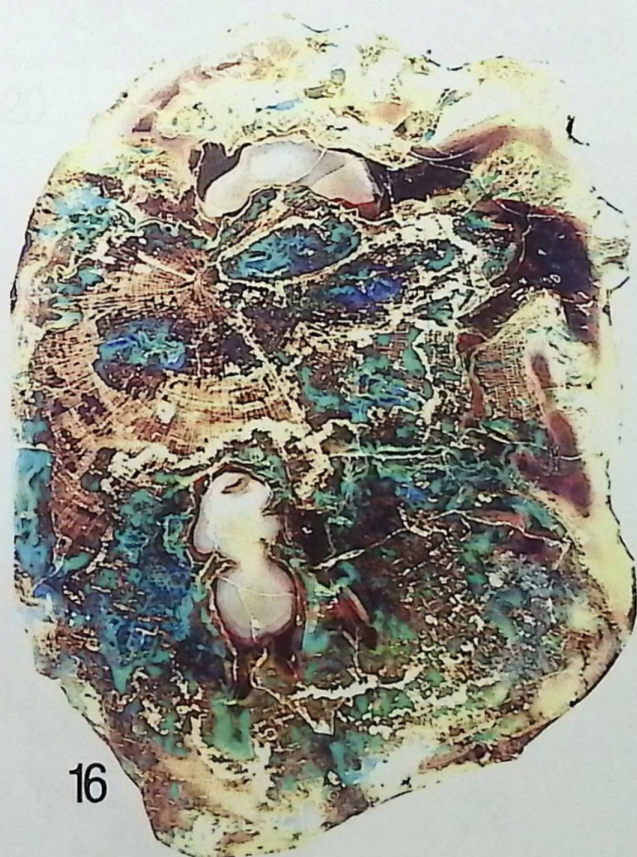
13



15



16



17



Fig. 18: Gümbelitbesatz auf einem Farn (*Neuropteris* aff. *obliqua*) vom Piesberg bei Osnabrück; Karbon (Westfal); NMA Inv. Nr. 91-16975/636

Fig. 19: Rugoser Korallenstock mit Imprägnierung von Impsonit (Pyrobitumen); Iberg i. Harz; Devon; NMA Inv. Nr. 99-154/963

Fig. 20: aus gelblichem grobkristallinem Kalzit bestehende Wände von Bohrmuscheln in Treibholz, Isle of Sheppey; Eozän; NMA Inv. Nr. 99-155/1441

Fig. 21: Rhodochrosit in einer Muschel, Kertsch, Krim, Schwarzes Meer; Neogen; NMA Inv. Nr. 91-1698/507

Fig. 22: Vivianit (blau) in einer Muschel mit weißer Schale; Kertsch, Krim, Schwarzes Meer; Neogen; NMA Inv. Nr. 91-1700/507

Fig. 23: Stromatolith aus dem Präkambrium von Brasilien mit gelbem Kalk und schwärzlichen Verkieselungen; NMA Inv. Nr. 99-196/1520



18



19



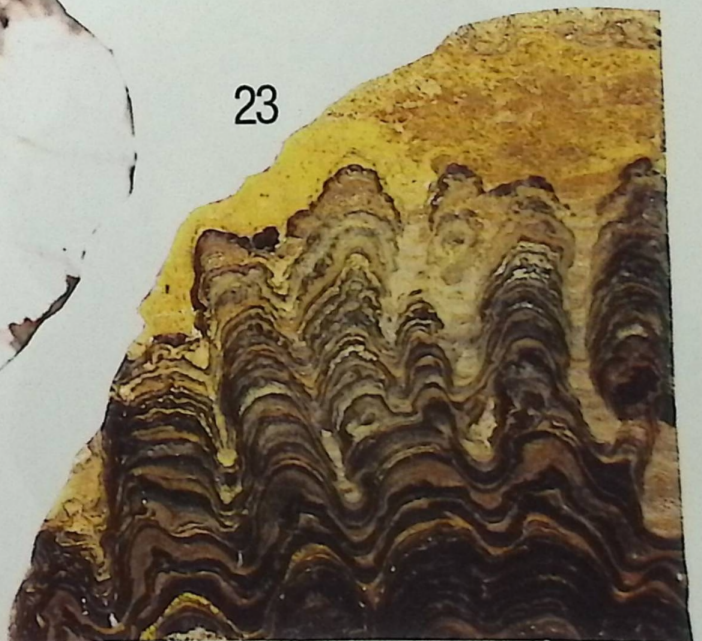
20



21



22



23

Fig. 24: "Silber"-Ammoniten (pyritisiert) von Mistelgau; *Pleydellia* sp., Lias epsilon;
NMA Inv. Nr. 91-2363/910

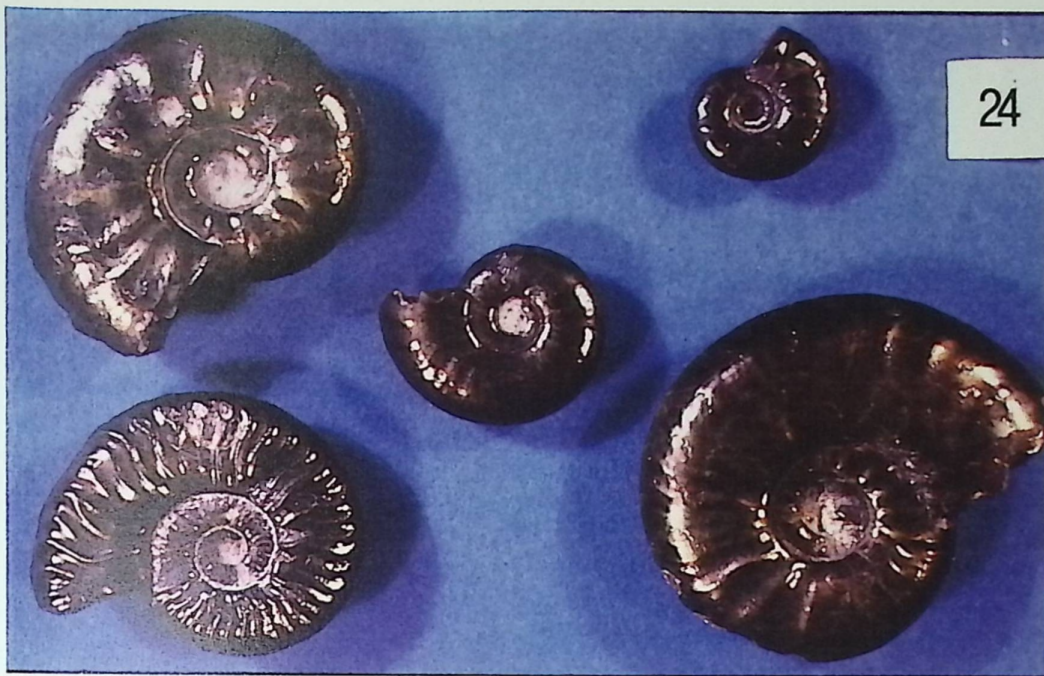
Fig. 25: "Gold"-Ammoniten (Limonit bzw. Goethit); *Dolicephalites perseverus*; Staffelberg
bei Staffelstein; Dogger; NMA Inv. Nr. 91-351/528

Fig. 26: vererzte Ammoniten in Limoniterhaltung; *Phylloceras* sp.; Marokko; Jura;
NMA Inv. Nr. 91-1585/801

Fig. 27: opalisierte Muscheln, vollkommen umgewandelt, Coober Pedy, Australien; Tertiär;
NMA Inv. Nr. 92-636/360

Fig. 28: durchsichtige Bivalve aus reinem Gips; Arabien; Neogen; Coll. RICHTER

Fig. 29: Ammoniten – Handstück mit Glaukonit-Besatz (grün) auf der ehemaligen Schale;
Gräfenberg, Fränk. Schweiz; Malm gamma; NMA Inv. Nr. 91-1612/615



24



25



27



26



28



29



Fig. 30: Zuckerkorn – Dolomit auf einem Horn der *Diceras*- Muschel; Töging, Beilngries; Ob. Jura; NMA Inv. Nr. 91-1603/785

Fig. 31: Alaunschiefer mit Graptolithen (*Monograptus* sp.); Camaret, W-Bretagne, Frankreich; Silur; NMA Inv. Nr. 91-1696/802

Fig. 32: winzige Bergkristalle auf den Innenwänden der Schalen von Landschnecken (*Cepaea rugosa*) aus dem Süßwasserquarzit von Einsingen bei Ulm; Unt. Süßwassermolasse, Unt. Miozän; NMA Inv. Nr. 91-1853/456

Fig. 33: „Turritellen-Platte“ mit angesägten kalzitisierten Schalen der *Turritella turris*; Ermingen bei Ulm; Ob. Meeresmolasse, Unt. Miozän; NMA Inv. Nr. 91-2277/521

Fig. 34: aus Tuffit stammende Gastropodenschale (*Tryonia* sp.) mit interner Quarzkristallisation (primär Auskleidung der Innenwand, sekundär gesamter Raum, Auflösungserscheinungen); Carboneras, Rio Dulce, Guatemala, Neogen; NMA Inv. Nr. 94-270/1112

Fig. 35: Turmschnecke (Turritellidae) achatisiert bzw. chalcedonisiert aus Solo, Java (*Telescopium* vel *Terebralia* sp., det. A. RICHTER); Neogen; NMA Inv. Nr. 99-192/1523

Fig. 36: *Strombus* – Schnecke aus marinen Sedimenten in Libyen, Schale fast ganz vergipst; Sahabi S Beghazi; Ob. Miozän; NMA Inv. Nr. 99-193/1139



30



31



33



34



32



35



36

Fig. 37: Banded iron ore (Bändereisenerz) mit Hämatit - Kiesel - Lagen aus dem Präkambrium von Australien; NMA Inv. Nr. 91-2271/905

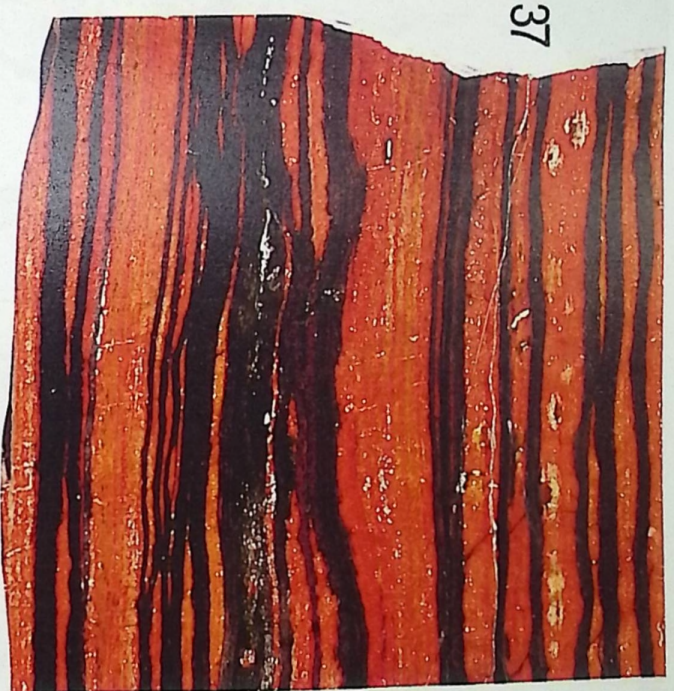
Fig. 38: vollkommen äußerlich in Pyrit-Markasit umgewandelter Schwamm aus der Kreide von Hannover; Bruch Höver, Misburg, Ob. Campan; NMA Inv. Nr. 91-1615/437

Fig. 39: Kieselholz aus dem Tagebau Zwenkau bei Leipzig (Oligozän) mit Mini-Bergkristall-Rasen (Rauchquarz); Holz nicht mehr bestimmbar; NMA Inv. Nr. 91-1565/528

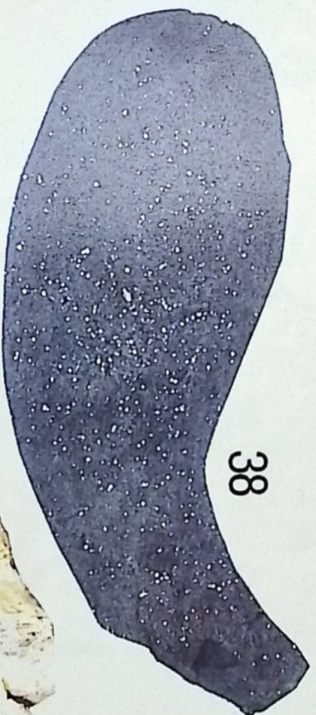
Fig. 40: Saurierknochen aus Spanien mit Imprägnierung von radioaktiven Uranmineralen in Zwickeln der Spongiosastrukturen; *Brachiosaurus* sp.; Capas rojas de Morella; Valencia; Unt. Kreide (Apt); NMA Inv. Nr. 91-1711/743

Fig. 41: z.T. gelb verkalkte, z.T. weiß verkieselte Partien in einem Korallenstock von Gerstetten/Alb; Malm; NMA Inv. Nr. 91-1558/709

Fig. 42: pyritisierte Schlangensterne (cf. *Ophiura* sp.) und Muschelreste aus dem Lias des Rhein-Main-Donau-Kanals; NMA Inv. Nr. 99-194/997



37



38



39



40

41



42

Fig. 43: Korallenstock (*Enallhelia* sp.) völlig verkieselt, Nattheim/Alb; Ob. Jura; NMA Inv. Nr. 99-195/75

Fig. 44: weißliche Sedimentfüllung in vergipstem Holz (Lignin vollkommen in kristallisierten Gips umgewandelt, strukturloses Holz); Vilovigyps SA, Vilovi de Penedes, Barcelona, Spanien; Ob. Miozän; NMA Inv. Nr. 91-1695/820

Fig. 45: weiße Kalzit-Ausfüllungen der Kammern in einem Nautilus, sonst graues Sediment; Würzburg; Muschelkalk; NMA Inv. Nr. 91-1684/877

Fig. 46: In glaukonitisches, erzhaltiges Sediment umgewandelter Steinkern eines Gastropoden (*Ampullospira conica*) aus dem Eozän von S. Pankraz/ Österreich; NMA Inv. Nr. 99-197/542

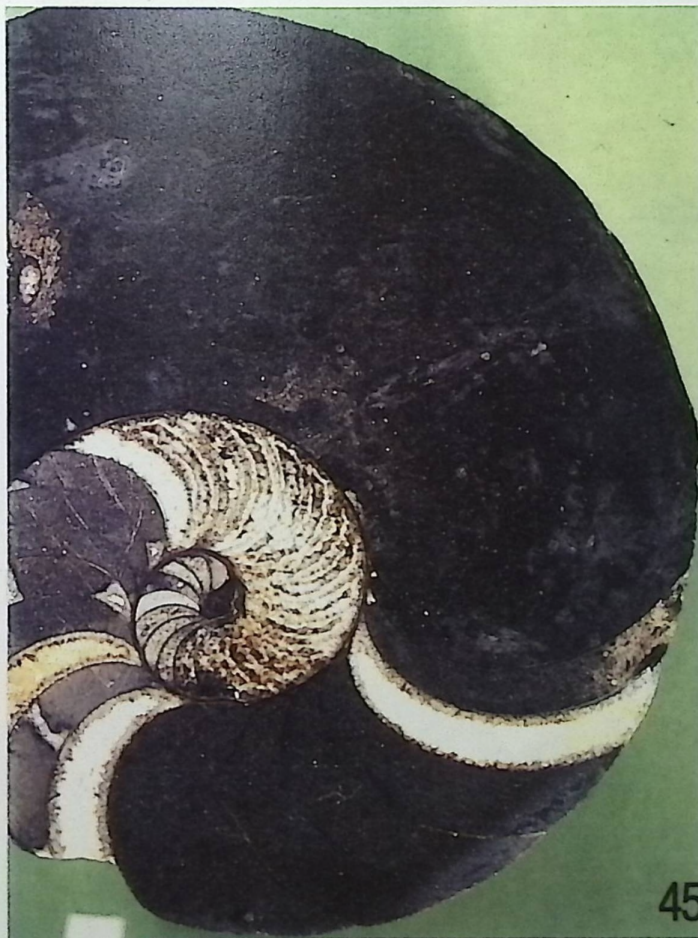
Fig. 47: mit Kalzitkristallen gefüllter Seeigel (*Echinocorys* sp.) aus der Kreide von Hannover; Bruch Höver, Misburg; Ober-Campan; NMA Inv. Nr. 91-1599/437



43



44



45



46



47

Fig. 48: Versintertes Vogelnest aus dem Holozän vom Goldberg bei Pflaumloch/Ries; NMA Inv. Nr. 91-1604/75

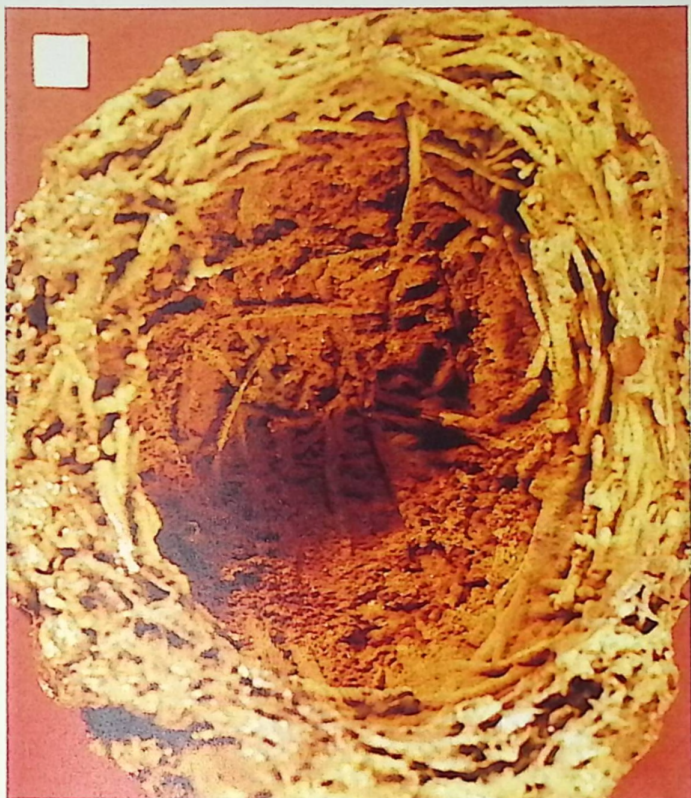
Fig. 49: feiner Kalzit-Spitzenbesatz in einer achatisierten Muschel aus Java; NMA Inv. Nr. 91-1695/820

Fig. 50: ein schwarzer, mit Manganoxid überzogener Ammonit (*Discoptychites* sp.) vom Osthang des Theokafta-Berges, Ligurion (Epidauros, Griechenland) ; NMA Inv. Nr. 99-200/333

Fig. 51: Versteinertes Holz vom Lago Omodeo bei Zuri, Sardinien; die Struktur ist gut bestimmbar, zusätzlich sind durch vulkanischen Einfluß bedingt Löcher und Zwickel im Holz entstanden, die mit weißlich-bläulichem Achat gefüllt wurden; zusätzlich zeigen die meisten Gebilde Geopetalgefüge; NMA Inv. Nr. 91-1564/525

Fig. 52: Korallenblock aus der Gegend von Zilla in Libyen; Obermiozän, völlig vergipste Septen in mikritisch-kalkiger Grundmasse; NMA Inv. Nr. 99-198/1745

Fig. 53: zarter Kugel-Schwamm mit Kieselsäureskleren in kalkiger Grundmasse, auf Korallenblock, freigeätzt aus einem Kalkblock; Malm zeta 2 von Gerstetten auf der Schwäbischen Alb; NMA Inv. Nr. 99-199/75



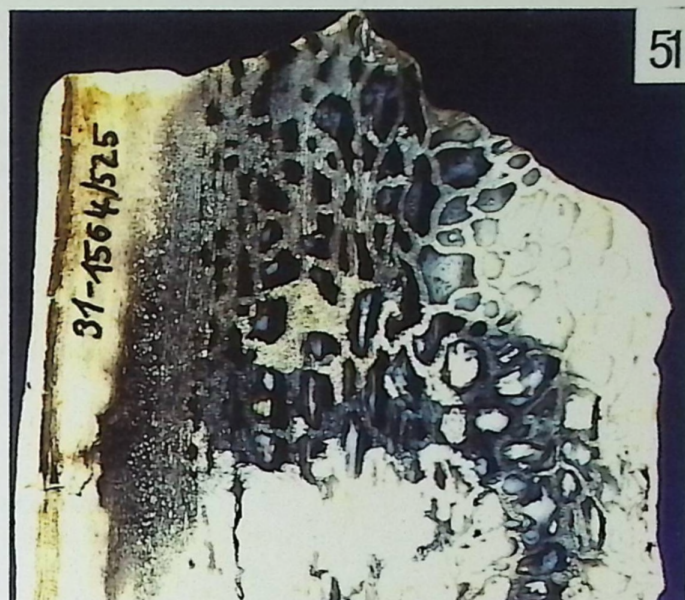
48



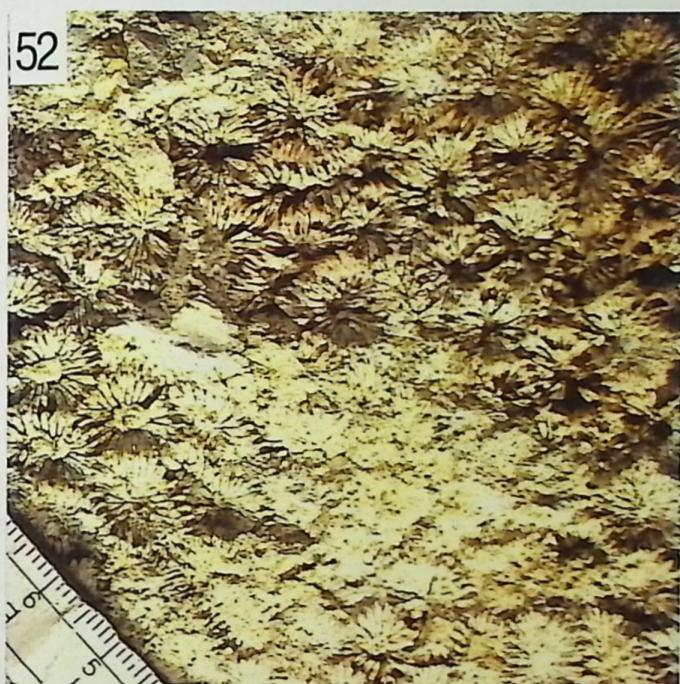
49



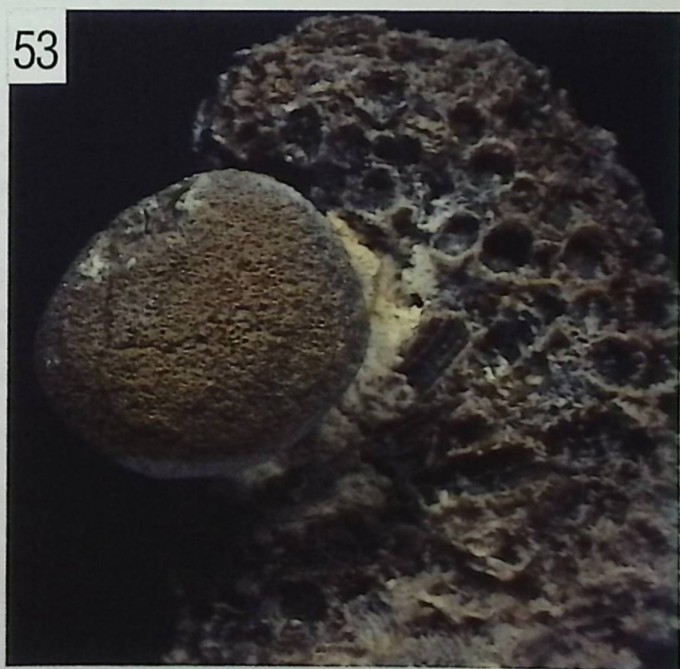
50



51



52



53