Mathematische Geologie	6	S. 131-142	Dresden, 25. August 2002

Computergestützte 3D-Rekonstruktionen in der Paläontologie anhand von Serienschnitten

Katja Henßel, Dieter U. Schmid & Reinhold R. Leinfelder*

Zusammenfassung

Dreidimensionale Rekonstruktionen aus Serienschliffen stellen im Prinzip eine gängige Methode in der Paläontologie dar. Computergestützte Rekonstruktionen sind jedoch noch nicht sehr weit verbreitet. Die vorliegende Arbeit gibt einen Überblick über die Funktionsprinzipien dieser Methode und über geeignete Software-Lösungen für die verschiedenen PC-Plattformen (Windows, Macintosh, Linux). Anhand eines Anwendungsbeispiels aus dem Oberjura wird eine relativ einfache und schnelle Methode vorgestellt, mittels der computergestützte Rekonstruktionen im Makro- und Mikrobereich durchgeführt werden können.

Schlüsselwörter: 3D-Rekonstruktion, Computer, Paläontologie, Serienschnitte

Summary

Computer-based 3D reconstructions in palaeontology using serial sections. Three-dimensional reconstructions using serial sections are principally a common method in palaeontology. Computer-based reconstructions, though, are still no routine yet. This study gives an overview of the functional principles of this method and appropriate software solutions for the different PC platforms (Windows, Macintosh, Linux). Based on a case study from the Upper Jurassic, a relatively simple and quick method is described by which computer-based reconstructions in macro- and microscopic scale have been performed.

The use of serial sectioning is a standard method in palaeontology, biology and medicine (GAUNT & GAUNT 1978). Computer-based reconstructions based on serial sections, however, are still scarce, especially in palaeontology. Two principally different methods may be distinguished: Volume rendering (e.g., SUTTON et al. 2001b) and surface rendering (e.g., HERBERT 1999). In the latter, the sections are connected by an isosurface composed of triangles (Fig. 1). Surface rendering is also used by the software "SURFdriver" (MOODY & LOZANOFF 1999) which was used in our study. In this software, the objects that are to be reconstructed have to be marked in each section by a chain of vertices which is the most time-consuming part of the whole process. The isosurface is then automatically calculated by the program. In our case study, the Macintosh version of SURFdriver was used on a G3 Apple Macintosh computer which was connected to a digital camera mounted on a microscope (Fig. 2). The study was carried out in both macro- and microscopic scale. The material stems from the so-called Treuchtlingen Marble (Middle Kimmeridgian, Upper Jurassic) of the Franconian Alb (southern Germany). For macroscopic reconstruction, a block of 40 x 40 cm was sawed into 20 slabs. The digitized photographs of these plates (Fig. 3) were then used for reconstructing the sedimentary fabric, which is mainly formed by calcareous mud, microbial crusts and siliceous sponges. As the rendered model shows (Figs. 4-5), four crust layers with several vertical connections can be distinguished, thus giving clues for estimating water-energy and background sedimentation rates. For microscopic reconstruction, the problematic encrusting foraminifer *Tubiphytes morronensis* which occurs abundantly in the Treuchtlingen Marble was used for reconstruction. These specimens exhibit an irregularly branched growth-form with several rows of chambers (Fig. 6). The referring rock samples were polished in intervals of 10 µm and photographed in reflected light. The series of more than 100 pictures was then used for the reconstruction. The model (Fig. 7) reveals several features, for example, the non-branching nature of the chambers that cannot be seen in thin-section alone. One problem of the model is that the margin perpendicular to the sections appears jagged (Fig. 8) which is an artefact due to the diffuse outline of the objects. The pros and cons of the used software are briefly discussed as well as alternative reconstruction-software solutions for the PC.

Keywords: 3D-reconstruction, computer, palaeontology, serial sections

* Institut für Paläontologie und Historische Geologie der Ludwig-Maximilians-Universität München, Richard-Wagner-Str. 10, 80333 München; k.henssel@lrz.uni-muenchen.de

1. Einführung

Die dreidimensionale Rekonstruktion von fossilen Organismen ist in der Paläontologie nichts Neues mehr und in zahlreichen Arbeiten beschrieben. So wurden bereits etliche Fossilgruppen mit Hilfe verschiedener Methoden rekonstruiert; einige Beispiele sind unten aufgeführt. Allerdings sind bisher nur wenige Arbeiten bekannt, die sich mit computergestützten dreidimensionalen Rekonstruktionen befassen. Ein Grund dafür ist sicher auch, dass dafür bis vor einigen Jahren die Verwendung von Unix-basierten Workstations und spezieller, meist selbstgeschriebenen Programmen notwendig war. Da PCs mittlerweile leistungsfähig genug sind, um solche Rekonstruktionen durchführen zu können, und entsprechende Programme kommerziell erhältlich sind, ist diese Methode nun auch für einen größeren Anwenderkreis interessant. Im Rahmen einer Diplomarbeit am Institut für Paläontologie und Historische Geologie der LMU München (HENSSEL 2000) wurde eine Methode ausgearbeitet, mittels welcher bei akzeptablem Zeit- und Arbeitsaufwand dreidimensionale Rekonstruktionen erstellt werden können.

2. Rekonstruktionen aus Serienschnitten

Den Beginn der dreidimensionalen Rekonstruktion anhand von Serienschnitten machte BORN (1883) bereits gegen Ende des 19. Jahrhunderts. Er entwikkelte die „Plattenmodellirmethode", wobei er parallele Serienschnitte verschiedener Objekte (z.B. Embryonenköpfe) anfertigte, deren Umrisse bzw. Internstrukturen er dann meist vergrößert abzeichnete. Um ein plastisches Modell zu erhalten, stellte er serienmäßig genormte Wachsplatten her, schnitt aus diesen die vorher erstellten Konturen aus und setzte die Schnitte zu einem dreidimensionalen Körper zusammen. Diese exakte Arbeitsweise war ein großer Fortschritt gegenüber früher, als solche Objekte noch frei mit der Hand aus Ton oder Wachs modelliert werden mussten. Ein moderneres umfangreiches Werk zur dreidimensionalen Rekonstruktion in der Biologie stammt von GAUNT & GAUNT (1978), die einen umfassenden Überblick über die bis dato entwickelten und verwendeten Methoden geben. Die Arbeit behandelt sämtliche zur Rekonstruktion nötigen Schritte von der Herstellung der Schnittserien, deren Orientierung, Positionierung und verschiedene Möglichkeiten der dreidimensionalen Darstellung. Darunter fallen z.B. grafische Techniken, Rekonstruktionen von soliden Körpern oder stereofotografische Methoden. Die Autoren erwähnen sogar kurz frühe Versuche der computerisierten Rekonstruktion durch konturierte Serienschnitte. Doch die Computer-Grafiktechniken waren zu der Zeit noch keine Routine und somit abhängig von teurer und selten vorhandener Hardware.

Die Rekonstruktion mittels Serienschnitten ist in der Biologie und Medizin eine Standardmethode; in der Geologie und Paläontologie herrschen durch die Härte der Präparate und deren Einbettung in kompaktes Gestein allerdings andere Voraussetzungen. So sind auch nichtdestruktive Methoden wie die Computertomografie an Fossilien mit verfüllten Hohlräumen oder an kompaktem Gestein nur in Ausnahmefällen anwendbar (TORRES 1999). Insbesondere kalkige Mikrofossilien sind in der Regel nicht oder nur schlecht aus dem Gesteinsverband zu isolieren und liegen somit nur als zweidimensionale Zufallsschnitte in An- oder Dünnschliffen vor, was die systematische Bestimmung oftmals erschwert oder sogar unmöglich macht. Es existieren allerdings etliche Arbeiten, in denen anhand vieler verschiedener Schnittlagen durch Fossilien Modellierungen bzw. schematische Rekonstruktionen vorgenommen wurden. So ist etwa die Bestimmung von Brachiopoden oft nur anhand von Serienschliffen möglich, die das Armgerüst zeigen (z.B. AGER 1965). REMANE (1969) untersuchte die Alge *Clypeina jurassica* FAVRE anhand von Serienschnitten aus Mikropeels. Dem Autor stand keine Präzisionsschleifmaschine zur Verfügung und somit sind die Schnittintervalle nicht einheitlich. Das ermöglichte keine exakte Rekonstruktion zu einem dreidimensionalen Objekt. Das Wiederherstellen eines Körpers wäre nur manuell grafisch möglich gewesen, was allerdings sehr zeit- und arbeitsaufwändig gewesen wäre. PERVESLER (1983) beschrieb eine Methode, Serienschnitte durch Spurenfossilien in Form von Glasplatten in einem Stapel übereinander zu montieren und somit einen dreidimensionalen Eindruck zu erzeugen. SENOWBARI-DARYAN (1983) rekonstruierte beispielsweise sehr komplex gebaute Foraminiferen (Pseudocucurbitaceen) durch viele handgezeichnete Schnittlagen in unterschiedlichen Richtungen. Die letztgenannte Arbeit kann als beispielhaft für diese sehr anspruchsvolle Methode gelten, bei der die verschiedenen Schnittlagen im Kopf des Bearbeiters zusammengesetzt werden müssen. Diese Methode, die gerade in der Mikropaläontologie weit verbreitet ist (z. B. REICHEL 1931, SOSNINA 1960, HOTTINGER 1967) und auch von einem der Autoren bislang angewendet wurde (SCHMID 1995, 1996), hat jedoch den Nachteil, dass die Qualität der Rekonstruktionen stark vom dreidimensionalen Vorstellungsvermögen des Bearbeiters abhängig ist, was die Ergebnisse subjektiv und kaum reproduzierbar macht.

3. Computergestützte Rekonstruktionen aus Serienschnitten

LOZANOFF & MOODY (2000) fassen die Entwicklung der dreidimensionalen Rekonstruktion in einem Artikel treffend zusammen. Sie sehen den Beginn der digitalen dreidimensionalen Modellierung während der 70er Jahre. Diese frühen Schritte der Rekonstruktion bauten zwar auf der Serienschnitttechnik auf, sahen allerdings noch keine Möglichkeit der Oberflächenmodellierung vor, sondern waren reine Linien- bzw. Konturrekonstruktionen. Nach diesem Prinzip rekonstruiert beispielsweise auch das von uns getestete und aus diesem Grund wieder verworfene Computerprogramm NIH Image ([7]; vgl. z.B. BOHN & HEINZELLER 1999), bei dem es sich auch in erster Linie um ein Bildanalyseprogramm handelt.

Die virtuelle dreidimensionale Rekonstruktion mittels Serienschnitten findet heute hauptsächlich in der Biologie und Medizin Verwendung. Wissenschaftler aus diesen Gebieten stellen laufend Methoden vor, um die Rekonstruktionen und deren Techniken für ihre Zwecke zu optimieren (z.B. PROTHERO & PROTHERO 1986, LOZANOFF & DEPTUCH 1991, LOZANOFF 1992, MOSS 1992, DEVERELL et al. 1993, HAAS & FISCHER 1997).

Aus dem Bereich der Geologie/Paläontologie gibt es vergleichsweise wenige Arbeiten über virtuelle 3D-Rekonstruktionen aus Serienschnitten. DAVAUD & WERNLI (1974) erstellten bereits mit Hilfe eines Computers ein mathematisch berechnetes Modell der planspiralen Foraminifere *Cyclogyra*, um orientierte Schnittbilder zu erhalten. BRENCKLE & GRELECKI (1993) konstruierten virtuelle dreidimensionale Modelle von planspiralen Foraminiferen der Gruppe der Archaediscaceen auf einer Unix-basierten Workstation. Diese Modelle sind "eingespannt" in ein rechtwinkliges Koordinatensystem und somit exakt um ihre Hauptachsen rotierbar. Auch sind beliebig orientierte, virtuelle Schnittbilder möglich, die zum Vergleich mit zu bestimmenden Anschnitten im Gestein dienen. HAMMER (1999) erstellte ein Computermodell der tabulaten Korallengattung *Catenipora*, um deren Wachstumsmuster zu untersuchen. MARSCHALLINGER (1997) modellierte die Gefüge verschiedener, auch kristalliner Gesteine in Form von Volumenrekonstruktionen, wobei er auch ausführlich auf die Methodik eingeht.

HERBERT (1999) beschreibt eine Methode zur digitalen dreidimensionalen Rekonstruktion mittels Serienschnitten in der Paläontologie. Dazu entwickelte der Autor auf einer Unix-Workstation mehrere Algorithmen (CorresGrow), die ursprünglich für die Oberflächenrekonstruktion von Brachiopoden entwickelt wurden. Durch diese Algorithmen kann schrittweise eine Körperoberfläche aus mehreren Serienschnitten berechnet werden. Allerdings stellt CorresGrow die Rekonstruktionen nur in Form von Diagrammen dar; um ein Objekt visualisieren zu können, benötigt man weitere Grafik-Software, die das Objekt gerendert darstellen kann. HERBERT (1999) verweist alternativ zu seinen Algorithmen auf das Rekonstruktionsprinzip von BOISSONNAT (1988; s.u.), welches er als bemerkenswert komplex bezeichnet. Eine weitere Studie, die mit Hilfe einer Unix-basierten Workstation durchgeführt wurde, stammt von SUTTON et al. (2001a, b). Die Autoren rekonstruierten problematische wurmartige Mollusken der Gattung *Acaenoplax* aus dem Silur von England, wobei den Autoren zufolge hier die Volumenrekonstruktion aus verschiedenen Gründen vorzuziehen ist.

Grundsätzlich lassen sich also vereinfacht gesagt zwei Methoden unterscheiden, nach denen 3D-Modelle mit Hilfe von Computerprogrammen erstellt werden. Die eine Methode ist die Volumenrekonstruktion (volume rendering), bei der die fotografisch aufgenommenen Daten - meist Mikroskopaufnahmen oder CT-Bilder - anhand ihrer unterschiedlichen Grauwerte direkt zu einem Voxelmodell zusammengesetzt werden (z.B. MARSCHALLINGER 1997, HAMMER 1999, SUTTON et al. 2001a, b). Die andere Methode ist die Oberflächenrekonstruktion (Abb. 1), bei der durch Triangulation eine Oberfläche („isosurface") aus Dreiecken berechnet wird, die die einzelnen Schnitte umhüllt (z.B. LOZANOFF & DEPTUCH 1991, BROWN & HERBERT 1996, HAAS & FISCHER 1997, MOODY & LOZANOFF 1999, HERBERT 1999); diese Methode wurde auch für die vorliegende Arbeit verwendet. Beide Methoden haben ihre Vor- und Nachteile. Welcher Methode man den Vorzug gibt, hängt insbesondere stark vom Ausgangsmaterial und dem Abstand zwischen den einzelnen Schnitten ab; dieses Thema wird von HERBERT (1999) und SUTTON et al. (2001b) näher diskutiert. Auf entsprechende Computerprogramme, die sich die genannten Methoden zunutze machen, wird am Schluss des Artikels kurz eingegangen.

4. Das verwendete Rekonstruktionsprogramm

4.1 Funktionsweise

Die Rekonstruktion erfolgte mit dem Computerprogramm „SURFdriver" (Version 3.5, Autoren: Scott LOZANOFF und David MOODY [1]), das speziell zur dreidimensionalen Rekonstruktion mittels Serienschnitten konzipiert wurde. Bisher fand SURFdriver seine Anwendung allerdings nur auf medizinischem und biologischem Sektor, da auch die Software-Auto-

ren auf diesem Gebiet arbeiten. Dieses Programm ist in einer Windows- und einer Macintosh-Version erhältlich; letztere wurde von uns verwendet.

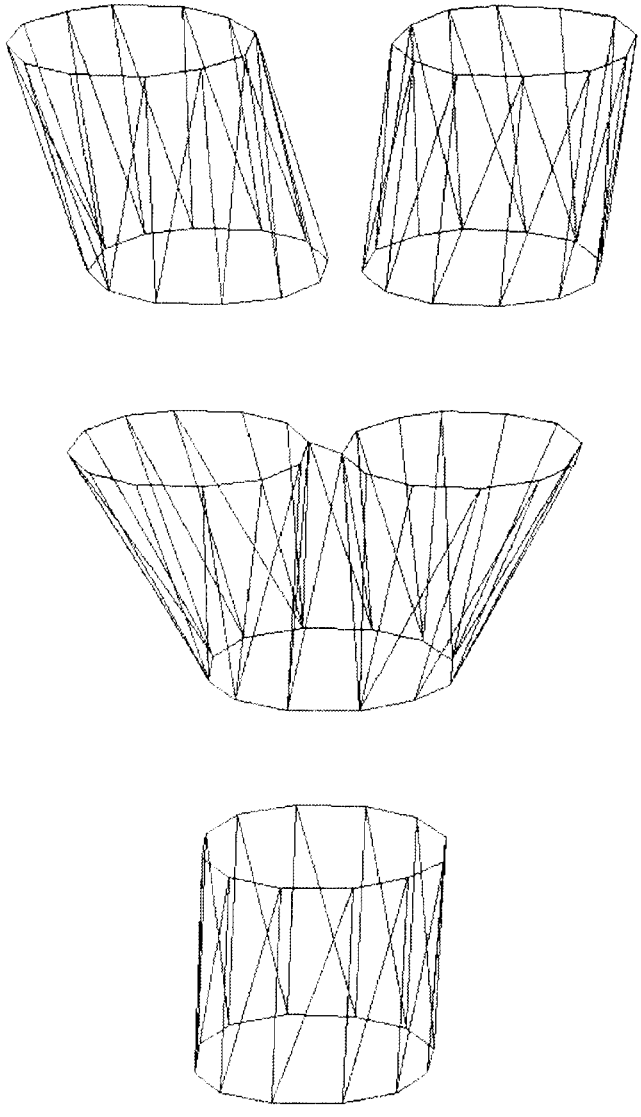


Abbildung 1. Drei Scheiben eines 3D-Objekts, jeweils zusammengesetzt aus zwei Schnittebenen und dem mit Tetraedern gefüllten Raum dazwischen.

Figure 1. Three slices of a 3D object, each being composed of two sections and the tetraeder-filled space between them.

Dieses Rekonstruktionsprogramm arbeitete ursprünglich nach einer Methode, bei der über die Schnittkonturen eines Objekts virtuell eine einfache Hülle gelegt wurde (LOZANOFF & MOODY 2000). Die damit erzeugte Oberfläche setzt sich aus mehreren Flächenstücken zusammen, die je nach ihrer Lage zu einer virtuellen Lichtquelle entsprechend schattiert sind (LOZANOFF & DEPTUCH 1991). Diese Methode macht jedoch die exakte Rekonstruktion von komplizierten verzweigten oder porösen Objekten nicht möglich (BOISSONNAT 1988, LOZANOFF & DEPTUCH 1991). Die hier benutzte neueste Version von SURFdriver dagegen rekonstruiert nach einem Prinzip, das von BOISSONNAT (1988) vorgestellt wurde (LOZANOFF & DEPTUCH 1991). Nach dieser effizienten Methode wird nicht nur eine umhüllende Oberfläche oder ein Voxelobjekt kreiert, sondern ein virtueller, solider Körper, der nach außen hin ein Polyeder aus dreieckigen Flächen darstellt.

Das Gesamtvolumen dieses Polyeders setzt sich aus einzelnen Scheiben zusammen. Eine Scheibe wird dabei gebildet von zwei aufeinanderfolgenden Schnittebenen, die nach außen durch vom Benutzer erzeugte Konturen begrenzt sind, und von dem Raum zwischen den beiden Objektschnitten. Dieser Zwischenraum ist gefüllt mit aneinandergrenzenden Tetraedern, die für den Betrachter allerdings nicht sichtbar sind. Sichtbar sind lediglich die Konturen der Schnittebenen und die dreieckigen Tetraederflächen, die nicht in der Schnittebene liegen, sondern mit ihren Eckpunkten auf den Konturlinien liegen (Abb. 1).

Die Flächen, die durch die Konturen festgelegt wurden, schneiden praktisch einen dreidimensionalen Raum und erzeugen so die Objektoberfläche (LOZANOFF & DEPTUCH 1991). Dadurch ergibt sich der Eindruck eines umhüllenden Maschendrahtes. Mit dieser Methode wird somit keine Hülle um die Gesamtheit der Objektsektionen gelegt, sondern von Sektion zu Sektion ein Volumen erzeugt. Es entsteht eine Sequenz von Teilformen, die den Objektkörper aufbauen. BOISSONNAT (1988) beschreibt, wie diese mittels sogenannter Delaunay- und Voronoi-Diagramme erzeugt werden. Vereinfacht kann man sich dieses Rekonstruktionsprinzip wie eine Bildhauerarbeit vorstellen, bei der alles Material außerhalb des zu modellierenden Körpers entfernt wird.

4.2 Arbeitsschritte

Bei der nun folgenden Beschreibung der Arbeitsschritte mit SURFdriver werden nur kurz die wichtigsten Funktionen und Möglichkeiten von SURFdriver beschrieben; Einzelheiten sind im Handbuch nachzulesen (MOODY & LOZANOFF 2000). Zunächst werden die einzelnen Schnittbilder, die digital aufgenommen oder digitalisiert wurden, in SURFdriver geöffnet. Hierbei muss insbesondere die Intervallhöhe zwischen den Schnittebenen eingegeben werden.

Man kennzeichnet den zweidimensionalen Anschnitt eines Objektes, indem man um das Objekt mit der Maus eine Kontur in Form einer Kette von Punkten legt. Für diese Umrandung stehen verschiedene Werkzeuge zur Verfügung, mit denen auch Punkte nachträglich eingefügt oder gelöscht werden können. Nun können nacheinander die folgenden Bilder der Serie geladen und ebenfalls bearbeitet werden. Zusammengehörende Objektschnitte werden in der gleichen Konturfarbe markiert. Den Anfang und das

Ende eines Objektes schließt man stets mit einem "Deckel", der oben oder unten gesetzt wird. Auf diese Art können auch verzweigte Objekte rekonstruiert werden. Weiterhin hat man die Option, mehrere Objekte eines Fotosatzes getrennt voneinander zu bearbeiten und diese auch unter eigenen Namen als Einzelobjekte zu speichern. Dies ist durchaus sinnvoll, da so später diesen Teilobjekten individuelle Farben oder Texturen zugewiesen werden können. Ist die Umrandung aller Schnitte eines Objektes abgeschlossen, so kann man mit der vollautomatischen Berechnung der Objektoberfläche beginnen. Ist es vorher noch nötig, die Schnitte zu justieren, so kann jeder einzelne Objektschnitt horizontal in seiner Ebene verschoben oder gedreht werden.

Das gerenderte Modell kann nun mit verschiedenen Farben und Texturen versehen werden, um nur die zwei wichtigsten Funktionen zu nennen. Interessant ist beispielsweise die Möglichkeit, ein stereografisches Bildpaar automatisch zu erzeugen, das mit einer rot-blauen 3D-Brille betrachtet werden kann. Die in SURFdriver erzeugten Modelle können auch im DXF- oder IGES-Format in andere 3D- oder CAD-Programme exportiert werden. Zur Visualisierung der Ergebnisse ist zudem die Möglichkeit hilfreich, mittels beigegebener Hilfsprogramme Quicktime-Virtual-Reality-Filme zu erstellen, die eine Rundumsicht des Modells ermöglichen (Beispiel abrufbar unter [2]).

5. Die Methodik am Fallbeispiel des Treuchtlinger Marmors (Oberjura)

Die zur Digitalisierung verwendete Hardware-Ausstattung ist in Abb. 2 abgebildet. Für die hier beschriebene Arbeitsweise benötigt man als Mindestausstattung einen PC mit Macintosh- oder Windows-Betriebssystem. Darüber hinaus hängt die erforderliche Ausstattung davon ab, ob man im makro- oder mikroskopischen Bereich arbeitet. Ansonsten ist es dem Bearbeiter überlassen, ob die Bilder gleich digital aufgenommen oder erst nachträglich digitalisiert werden.

Bei der im Folgenden kurz beschriebenen Fallstudie (s. auch SCHMID & HENSSEL 2001) wurde sowohl im makroskopischen wie auch im mikroskopischen Bereich gearbeitet. Das Material stammt aus dem sogenannten Treuchtlinger Marmor (mittleres Kimmeridgium, Oberjura) der Fränkischen Alb, der dort in großem Maße abgebaut und in Form von Fensterbänken und Bodenplatten weithin Verwendung findet. Bei dieser etwa 40 m mächtigen Gesteinsserie handelt es sich freilich nicht um Marmor im geologischen Sinne, sondern um eine Abfolge dickbankiger Kalke mit einzelnen Mergellagen (KOTT 1989, MEYER & SCHMIDT-KALER 1994).

5.1 Rekonstruktion im makroskopischen Bereich

Hier wurden Riffstrukturen (mikrobielle Kalkkrusten und Kieselschwämme) aus dem Treuchtlinger Marmor rekonstruiert. Die mikrobiellen Krusten ziehen sich meist flächig ausbreitend im kleinräumigen Wechsel mit dem Kalkschlamm-Sediment durch viele Bänke des Treuchtlinger Marmors und bieten als Hartsubstrat Lebensraum für verschiedene inkrustierende Mikroorganismen.

Zur Rekonstruktion des Sedimentgefüges wurde ein Gesteinsblock aus dem Treuchtlinger Marmor mit einer Kantenlänge von 40 x 40 cm in 20 Scheiben gesägt, die jeweils von beiden Seiten fotografiert wurden (Abb. 3). Es mag trivial klingen, doch ist es wichtig, schon beim Fotografieren mit allergrößter Genauigkeit und Sorgfalt zu arbeiten. Das betrifft vor allem die exakte Nummerierung aller Aufnahmen in der richtigen Reihenfolge. Zu beachten ist dabei, dass jedes zweite Foto spiegelverkehrt ist, da abwechselnd Vorder- und Rückseiten der Platten fotografiert wurden. Somit muss man alle Fotos der Plattenrückseiten mit Hilfe eines Bildbearbeitungsprogramms um die entsprechende Achse drehen.

Anschließend wurden die digitalisierten Fotos zur Rekonstruktion mit SURFdriver verwendet (s.o.). Das Ergebnis ist in Abb. 4 und 5 dargestellt. Abb. 4 zeigt eine Ansicht der einzelnen Schnittlagen sowie die vier großen Krustenlagen; die Kieselschwämme sind ausgeblendet. Abb. 5 zeigt das gesamte Modell einschließlich der Schwämme.

Die dreidimensionale Rekonstruktion (Abb. 5) macht die Schwämme mit ihren oft irregulären Wuchsformen und ihre Verteilung innerhalb des Blockes sichtbar. Der extrem hohe Anteil an Schwämmen in Lebendstellung spricht für sehr niedrige Wasserenergie. Überraschend war, dass die Schwämme nicht etwa die Mikrobenkrusten als Substrat nutzten, sondern vielmehr umgekehrt von den Mikrobenkrusten überwachsen wurden. Die lagige Wuchsform der Krusten lässt vermuten, dass die Hintergrundsedimentation periodisch verstärkt bzw. unterbrochen wurde. Allerdings konnten sich mancherorts die Krustenbildner trotz einer Sedimentationsphase weiterentwickeln, was an den vertikalen Verbindungen mancher Krustenlagen sichtbar wird. Die Wuchsform und Verteilung der Mikrobenkrusten lässt somit einige Rückschlüsse auf die Wasserenergie und Hintergrundsedimentation zu (SCHMID & HENSSEL 2001).

5.2 Rekonstruktion im mikroskopischen Bereich

Im mikroskopischen Bereich wurden sogenannte Tubiphyten rekonstruiert, problematische Mikrofossilien, die im Treuchtlinger Marmor in gesteinsbildender Häufigkeit auftreten und trotz ihrer geringen Größe von wenigen Millimetern durch ihre hellweiße Farbe auffallen (Abb. 6). Im Treuchtlinger Marmor sind verzweigte Formen besonders häufig. Die rätselhafte Form *Tubiphytes morronensis* ist immer wieder Gegenstand von Diskussionen und wurde auf verschiedenste Weise interpretiert. Die meisten Bearbeiter sind sich mittlerweile aber wohl einig, dass es sich um eine miliolide Foraminifere mit außergewöhnlich dickem Gehäuse handelt, an dessen Bildung symbiontische Algen oder Bakterien in irgendeiner Weise beteiligt waren (FLÜGEL 1981, SCHMID 1995, 1996). Von Bedeutung sind diese Mikrofossilien auch deshalb, weil anhand ihres Gehäusedurchmessers Aussagen über die Paläo-Wassertiefe gemacht werden können (SCHMID 1995, 1996). Dies ist wiederum interessant, da Genese und Ablagerungsmilieu der oberjurassischen Kieselschwammriffe nach wie vor umstritten sind (z.B. SELG & WAGENPLAST 1990, LEINFELDER et al. 1994).

Die Gesteinsklötzchen mit den beiden ausgewählten Individuen wurden jeweils auf einen Objektträger aufgeklebt. Hierbei empfiehlt sich das Anbringen von Markierungen am Präparat, um die später gegebenenfalls erforderliche Ausrichtung der Schnittbilder zu erleichtern. Anschließend wurden die Gesteinsklötzchen in 10 µm-Intervallen angeschliffen. Die Wahl des Intervalls ist naturgemäß von großer Bedeutung: nach MOSS (1992) sollte das Sektionsintervall kleiner sein als die kleinste zu rekonstruierende Struktur eines Objektes. Um die Sequenzen digital festzuhalten, wurde nach jedem Schleifdurchgang ein Auflicht-Foto mit der am Binokular angeschlossenen Digitalkamera gemacht. Dabei ist es von höchster Wichtigkeit, dass das Objekt bei jedem Foto in exakt der gleichen Position auf dem Mikroskoptisch angebracht wird. Nur so kann bei der späteren virtuellen Wiederzusammenfügung der Objektschnitte für die Rekonstruktion ein wirklichkeitsnahes, unverzerrtes Ergebnis erzielt werden.

Mit dieser Methode kann in relativ kurzer Zeit eine große Bildserie erstellt werden. Das rekonstruierte Objekt wird bei dieser Vorgehensweise jedoch zerstört und ist dann nur noch in digitaler Form dokumentiert. Will man dies vermeiden, so kann man von den einzelnen Schnittlagen Peels (Acetatfolienabzüge) herstellen, was natürlich mit einem gewissen Arbeits- und Zeitaufwand verbunden ist.

Die nun digitale Schnittserie wurde dann in SURFdriver rekonstruiert (s.o.). Die beiden Serien bestehen aus jeweils über 100 Schnittlagen, wobei natürlich jede Einzelne bearbeitet werden musste. Dies ist der aufwändigste Arbeitsschritt bei der Rekonstruktion. Erschwert wurde die Rekonstruktion bei *Tubiphytes morronensis* durch die irreguläre Wuchsform mit mehreren Verzweigungen. Zudem sollte nicht nur die äußere Form, sondern auch die komplexe Internstruktur rekonstruiert werden.

Dank der dreidimensionalen Rekonstruktion konnten bei den Tubiphyten Aussagen bezüglich deren Kammerung und deren kolonialer Wuchsform gemacht werden (Abb. 7). Es zeigte sich, dass sich die Kammerstränge selbst nicht verzweigen. Es handelt sich hierbei also um Kolonien aus mehreren einzelnen Foraminiferen, wobei die verzweigte Wuchsform erst durch das Aufeinanderwachsen der Gehäuse entsteht. Dies passt auch zum Dünnschliff-Befund, wonach Verzweigungen der Kammern nur in extrem seltenen Einzelfällen beobachtet wurden (SCHMID 1995, 1996). Zudem ließen sich zwei verschieden dimensionierte Kammertypen unterscheiden, was auf den für Foraminiferen typischen Wechsel zwischen mikro- und megalosphärischer Generation zurückgeführt werden kann (SCHMID & HENSSEL 2001). Ein Quicktime-Virtual-Reality-Film mit einer Rundumsicht des in Abb. 7 gezeigten 3D-Modells ist im Internet abrufbar [2].

Das größte Problem stellte bei beiden Kolonien die Rekonstruktion der Kammerungen dar. Dabei war das Hauptproblem die Nachvollziehbarkeit der Kammeranschnitte durch die Sequenz. Hier wirkten sich der mangelnde Kontrast und die manchmal verschwommenen Grenzen zwischen Kammern und Hülle besonders gravierend aus. Die Kammerumrisse sowie der Umriss der gesamten Kolonie, welcher im Auflicht ebenfalls oft etwas unscharf ist, erscheinen in der Profilansicht der Rekonstruktion (senkrecht zu den Schnittebenen) somit oftmals "gezackt" (Abb. 8). Dies ist allerdings ein generelles Problem bei Oberflächenrekonstruktionen, worauf DEVERELL et al. (1993) näher eingehen.

6. Erfahrungen mit der verwendeten Software

Nach MOSS (1992) sollte ein 3D-Programm ganz speziellen Anforderungen gerecht werden, um gute Ergebnisse zu erzielen. Dazu gehören die Optionen, einzelne Objekte nach Bedarf ein- oder auszublenden, Objekte zu verändern, Schnitte in beliebiger Richtung anzufertigen, Schnitte und Transparenzen zu erzeugen, durch die interne Strukturen sichtbar

werden, Objekte zu animieren und individuelle, realistische Texturen zuzuteilen.

Es kann festgehalten werden, dass die verwendete Software SURFdriver diesen Anforderungen größtenteils gerecht wird. Ein großer Vorteil ist dabei die Bedienerfreundlichkeit. Insgesamt lief das Programm auch hinreichend stabil; allerdings musste man für bestimmte Aufgaben hin und wieder die Speicherzuteilung für das Programm ändern. Ein weiterer Vorteil liegt in den relativ geringen Anschaffungskosten. Dem stehen jedoch auch einige Nachteile gegenüber: So lassen sich etwa die Abstände zwischen den Schnitten nicht individuell einstellen, was in einigen Fällen erforderlich wäre. Das Rendering ist teilweise fehlerhaft, da Punkte manchmal falsch miteinander verbunden werden, was nur unter großem Zeitaufwand manuell korrigiert werden könnte. Dieses Problem ließ sich auch trotz freundlicher Hilfestellung der Software-Autoren nicht lösen. Ein weiterer Nachteil ist, dass vom virtuellen 3D-Modell keine Schnittlagen in beliebiger Richtung herstellbar sind. Dies kann nur über den Umweg des Exports in andere 3D-Programme bewerkstelligt werden. Auch ist die Zahl der Objekte begrenzt, die in einem Modell zusammengefasst werden können. Für sehr komplexe Modelle muss man daher wohl auf andere Programme zurückgreifen.

7. Andere Rekonstruktions-Programme für den PC

Im Verlauf der oben dargestellten Arbeiten stießen wir auf einige andere Programme, mit denen 3D-Rekonstruktionen aus Serienschnitten durchgeführt werden können. Das Programm Amira 2.3 (Firma Indeed - Visual Concepts GmbH, Vertrieb durch Firma TGS [3, 4]) stellt ein modulares Softwarepaket dar, mit dem sowohl Volumen- als auch Oberflächenrekonstruktionen möglich sind (Plattformen: Windows, Linux u.a.). Bei Analysis 3.1 (Firma Soft Imaging GmbH [5]) handelt es sich ebenfalls um ein modulares Softwarepaket, das neben zahlreichen anderen Funktionen auch ein 3D-Modul zur Oberflächenrekonstruktion enthält (Plattform: Windows). Von der Firma Creaso [6] stammt IDL, ein kommandosprachengesteuertes Grafik- und Bildverarbeitungssystem, mit dem Volumenrekonstruktionen erstellt werden können (Plattformen: Unix, Windows, Macintosh u.a.). Anwendungsbeispiele sind bei MARSCHALLINGER (1997) zu finden.

Die Eignung dieser Programme für unsere speziellen Anforderungen werden derzeit von uns geprüft; hier sind noch keine abschließenden Aussagen möglich. Im Vergleich zu SURFdriver weisen alle Programme einen größeren Funktionsumfang auf, was sich natürlich auch deutlich im Preis niederschlägt. Hier muss jeder Interessent für sich entscheiden, welches Programm für seine speziellen Anforderungen am geeignetsten ist.

Abschließend bleibt zu sagen, dass sich die computergestützte dreidimensionale Rekonstruktion in der Paläontologie bereits sehr bewährt hat. Ihre Anwendung ist sowohl im makroskopischen als auch im mikroskopischen Bereich durchführbar und kann viele neue Einblicke gewähren. Das Potential dieser zukunftsweisenden Methode ist mit Sicherheit noch nicht einmal annähernd ausgeschöpft.

Danksagung

Wir bedanken uns bei der Firma Frankenschotter (Dietfurt) für die kostenlose Anfertigung und den Serienschnitt des Gesteinsblocks sowie bei der Firma Niefnecker (Petersbuch) für die kostenlose Bereitstellung von polierten Ausschuss-Platten aus dem Treuchtlinger Marmor. Gustav BERGMEIER (München) danken wir für die Hilfestellung und die wertvollen Tipps beim Fotografieren der Gesteinsplatten. Matthias BORN (München) war uns eine große Hilfe bei der Präparation des Materials. Scott LOZANOFF (Hawaii), dem Autor von SURFdriver, möchten wir für seine Kooperation und Hilfsbereitschaft danken.

Warenzeichen

Amira ist ein eingetragenes Warenzeichen von ZIB, Berlin. analySIS ist ein eingetragenes Warenzeichen der Soft Imaging System GmbH. Apple, Mac, Macintosh und Quicktime sind eingetragene Warenzeichen der Firma Apple Computer, Inc. Fuji ist ein eingetragenes Warenzeichen von Fuji Photo Film, Inc. IDL ist ein eingetragenes Warenzeichen der Firma Research Systems, Inc. Linux ist ein eingetragenes Warenzeichen von Linus TORVALDS. TGS ist ein eingetragenes Warenzeichen der Firma TGS, Inc. UNIX ist ein eingetragenes Warenzeichen von Open Group. Windows ist ein eingetragenes Warenzeichen der Microsoft Corporation.

Literatur

AGER, D. V. 1965. Serial grinding techniques. -- [In:] Kummel, B. & Raup, D. (eds.): Handbook of paleontological techniques. 212-224; New York (Freeman).

BOHN, J.M. & HEINZELLER, T. 1999. Morphology of the bourgueticrinid and isocrinid aboral nervous system and its possible phylogenetic implications (Echinodermata, Crinoidea). -- Acta Zoologica, 80: 241-249; Stockholm.

BOISSONNAT, J.D. 1988. Shape reconstruction from planar cross sections. -- Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 44: 1-29; Valbonne.

BORN, G. 1883. Die Plattenmodellirmethode. -- Archiv mikroskopischer Anatomie, 22: 584-599; Breslau.

BRENCKLE, P.L. & GRELECKI, C.J. 1993. Type Archaediscacean foraminifers (Carboniferous) from the former Soviet Union and Great Britain. With a description of computer modelling of Archaediscacean coiling. -- Cushman Foundation for Foraminiferal Research, Special Publication, 30: 1-59; Cambridge/Massachusetts.

BROWN, I.M. & HERBERT, M.J. 1996. Knowledge-based geological visualisation using AVS. - Electronic Geology [online], 1 (Special volume on the proceedings of the Geoscience Information Group on Geological visualisation: the intelligent picture?): 37-47; [8].

DAVAUD, E. & WERNLI, R. 1974. Simulation de sections orienteé de foraminifères planspiralés au moyen d'un ordinateur. -- Eclogae geologicae Helvetiae, 67: 31-38; Basel.

DEVERELL, M.H., SALISBURY, J.R., COOKSON, M.J., HOLMAN, J.G., DYKES, E. & WHIMSTER, W.F. 1993. Three-dimensional reconstruction: methods of improving image registration and interpretation. -- Analytical Cellular Pathology, 5: 253-263; London.

FLÜGEL, E. 1981. "Tubiphyten" aus dem Fränkischen Malm. -- Geologische Blätter für Nordost-Bayern, 31: 126-142; Erlangen.

GAUNT, W.A. & GAUNT, P.N. 1978. Three dimensional reconstruction in biology. 174 S.; Kent (Pitman Medical Press).

HAAS, A. & FISCHER, M.S. 1997. Three-dimensional reconstruction of histological sections using modern product-design software. -- The Anatomical Record, 249: 510-516; Jena.

HAMMER, O. 1999. Computer-aided study of growth patterns in tabulate corals, exemplified by Catenipora heintzi from Ringerike, Oslo Region. -- Norsk Geologisk Tidsskrift, 79: 219-226; Oslo.

HENSSEL, K. 2000. Ausarbeitung und Optimierung einer Methodik zur computergestützten dreidimensionalen Rekonstruktion von Fossilien des Treuchtlinger Marmors. -- Diplomarbeit LMU München. 64 S. + CD; München (unveröffentlicht).

HERBERT, M. 1999. Computer-based serial section reconstruction. -- [In:] Harper, D.A.T. (ed.): Numerical palaeobiology. 93-126; Chichester.

HOTTINGER, L. 1967. Foraminifères imperforés du Mésozoïque marocain. -- Notes et Mémoires du Service Géologique du Maroc, 209: 1-168, pl. 1-20; Rabat.

KOTT, R. 1989. Fazies und Geochemie des Treuchtlinger Marmors (Unter- und Mittel-Kimmeridge, Südliche Frankenalb). -- Berliner Geowissenschaftliche Abhandlungen (A), 111: 115 S.; Berlin.

LEINFELDER, R.R., KRAUTTER, M., LATERNSER, R., NOSE, M., SCHMID, D.U., SCHWEIGERT, G., WERNER, W., KEUPP, H., BRUGGER, H., HERRMANN, R., REHFELD-KIEFER, U., SCHROEDER, J.H., REINHOLD, C., KOCH, R., ZEISS, A., SCHWEIZER, V., CHRISTMANN, H., MENGES, G. & LUTERBACHER, H. (ed. and coord. by LEINFELDER, R.R.) 1994. The origin of Jurassic reefs: Current research developments and results. -- Facies, 31: 1-56, pl. 1-4; Erlangen.

LOZANOFF, S. 1992. Accuracy and Precision of Computerized Models of the Anterior Cranial Base in Young Mice. -- The Anatomical Record, 234: 618-624; New York.

LOZANOFF, S. & DEPTUCH, J.J. 1991. Implementing Boissonnat's method for generating models of craniofacial cartilages. -- The Anatomical Record, 229: 556-564; New York.

LOZANOFF, S. & MOODY D. 2000. A brief review of computerized 3D reconstruction of anatomical structures. -- [9].

MARSCHALLINGER, R. 1997. Computergestützte dreidimensionale Rekonstruktion und Visualisierung von Mineralen und Mikrogefügen in den Geowissenschaften. Endbericht zum APART-Programm der Österreichischen Akademie der Wissenschaften. -- [10].

MEYER, R.K.F. & SCHMIDT-KALER, H. 1994. Treuchtlingen – Solnhofen - Mörnsheim - Dollnstein. -- Wanderungen in die Erdgeschichte (1), 96 S.; München.

MOODY, D. & LOZANOFF, S. 1999. SURFdriver. Rapid and reliable 3-D reconstruction. -- SURFdriver 3.5 Manual. 32 S.

MOSS, V.A. 1992. Fundamentals of 3-D reconstruction of serial sections on a microcomputer. -- [In:] Kriete, A. (ed.): Visualization in Biomedical Microscopies. 19-43; Weinheim (VHC).

PERVESLER, P. 1983. Gelände- und Labor-Methoden zur Rekonstruktion von Lebensspuren (Gangsystemen) nach der Serienschnitt-Folienmethode. -- Der Präparator, 29: 109-112; Bochum.

PROTHERO, J.S. & PROTHERO, J.W. 1986. Three-dimensional reconstruction from serial sections: IV. The reassembly problem. -- Computers and Biomedical Research, 19: 361-373; Washington.

REICHEL, M. 1931. Sur la structure des Alvéolines. -- Eclogae geologicae Helvetiae, 24: 289-303, pl. 1-6; Basel.

REMANE, J. 1969. Morphological and statistical analysis of Clypeina jurassica (Favre) (Dasycladaceae) by means of serial sections. -- Geologica Romana, 8: 85-116; Roma.

SCHMID, D.U. 1995. „Tubiphytes" morronensis – eine fakultativ inkrustierende Foraminifere mit endosymbiontischen Algen. -- Profil, 8: 305-317; Stuttgart.

SCHMID, D.U. 1996. Marine Mikrobolithe und Mikroinkrustierer aus dem Oberjura. -- Profil, 9: 101-251; Stuttgart.

SCHMID, D.U. & HENSSEL, K. 2001. Die rätselhaften Tubiphyten des Treuchtlinger Marmors. -- Jahresbericht 2000 und Mitteilungen der Freunde der Bayerischen Staatssammlung für Paläontologie und Historische Geologie München e.V., 29: 45-54; München.

SELG, M. & WAGENPLAST, P. 1990. Beckenarchitektur im süddeutschen Weißen Jura und die Bildung der Schwammriffe. -- Jahreshefte des Geologischen Landesamtes Baden-Württemberg, 32: 171-206; Freiburg i. Breisgau.

SENOWBARI-DARYAN, B. 1983. Zur Gattung Pseudocucurbita Borza & Samuel, 1978 (= pro Cucurbita Jablonsky, 1973) und Beschreibung vergleichbarer problematischer Organismen aus der Obertrias des alpin-mediterranen Raumes. -- Rivista Italiana di Palaeontologia e Sratigrafia, 88: 181-250; Milano.

SOSNINA, M.I. 1960. Izuchenie lyagenid metodom posledovatel'nykh prishlifovok [Untersuchungen an Lageniden durch die Serienschnitt-Methode]. -- Trudy Pervogo Seminara po Mikrofaune, Vsesoyuznyy Neftyanoy Nauchnoissledovatel'skii Geologorazvedochnyy Institut (VNIGRI), 88-119; Leningrad.

SUTTON, M.D., BRIGGS, D.E.G., SIVETER, David J. & SIVETER, Derek J. 2001a. An exceptionally preserved vermiform mollusc from the Silurian of England. -- Nature, 410: 461-463; London.

SUTTON, M.D., BRIGGS, D.E.G., SIVETER, David J. & SIVETER, Derek J. 2001b. Methodologies for the visualization and reconstruction of three-dimensional fossils from the Silurian Herefordshire Lagerstätte. -- Palaeontologia Electronica, 4: 17 S. [11]

TORRES, A.M. 1999. A three-dimensional CT (CAT) scan through a rock with Permian alga Ivanovia tebagaensis. -- Journal of Paleontology, 73: 154-158; Tulsa.

Internetreferenzen

[1] http://www.surfdriver.com

[2] http://www.palaeo.de/3d

[3] http://www.amiravis.com

[4] http://www.tgs.com

[5] http://www.soft-imaging.net

[6] http://www.creaso.com

[7] http://rsb.info.nih.gov/nih-image

[8] http://www.electronicjournals.co.uk/eg/pdf/EG1-5.pdf

[9] http://surfdriver.com/reconstruction.html

[10] http://www.sbg.ac.at/gew/leute/marsch/apart_end/apartend.htm

[11] http://palaeo-electronica.org/2001_1/s2/issue1_01.htm

Abbildungserläuterungen

Abbildung 2. Versuchsaufbau zur Digitalisierung der Serienschnitte (von links nach rechts): Videomonitor, Bildschirm/Tastatur/Maus, Computer (Apple PowerMacintosh G3), Fuji Kamera-Steuergerät, Leica-Binokular mit aufmontierter Digitalkamera (Fujix HC-2000 3CCD).

Figure 2. Hardware used for digitizing the serial sections (from left to right): video monitor, computer monitor/keyboard/mouse, Computer (Apple PowerMacintosh G3), Fuji camera control device, Leica binocular with mounted digital camera (Fujix HC-2000 3CCD).

Abbildung 3. Gesägte Platte aus dem Treuchtlinger Marmor. Die meisten Kieselschwämme (1) sind in Lebendstellung erhalten, einige Exemplare sind umgekippt (2); die Schwämme sind überwachsen von dunkel erscheinenden mikrobiellen Krusten (3). Aus SCHMID & HENSSEL (2001).

Figure 3. Slab from the Treuchtlingen Marble. Most siliceous sponges are preserved in life-position (1), some specimens are toppled (2); the sponges are overgrown by calcareous microbial crusts which appear dark. From SCHMID & HENSSEL (2001).

Abbildung 4. a) Ansicht der einzelnen Schnittlagen ohne Oberfläche; b) gerenderte Ansicht der vier großen Mikrobenkrustenlagen.

Figure 4. a) View of the individual sections without surface; b) rendered view of the four large layers of microbial crusts

Abbildung 5. Dreidimensionale Rekonstruktion von mikrobiellen Krusten und Kieselschwämmen aus der Bank 1 des Treuchtlinger Marmors (Höhe und Breite betragen ca. 40 cm). Aus SCHMID & HENSSEL (2001).

Figure 5. Three-dimensional reconstruction of the microbial crusts and the siliceous sponges from the "Bank 1" horizon of the Treuchtlingen Marble. From SCHMID & HENSSEL (2001).

Abbildung 6. Die beiden für die Rekonstruktion ausgewählten Individuen "A" und "B" von *Tubiphytes morronensis*. Zu erkennen sind die zentralen, birnenförmigen Kammern und die äußere, lagige Hülle (Auflicht). Aus SCHMID & HENSSEL (2001).

Figure 6. The two individuals of *Tubiphytes morronensis* which were selected for reconstruction. The central pear-shaped chambers and the outer laminated layer are shown here (in reflected light). From SCHMID & HENSSEL (2001).

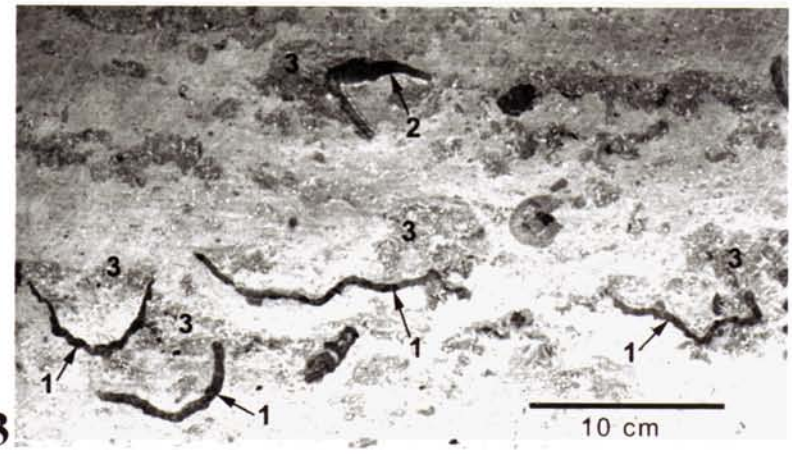
Abbildung 7. Computer-Rekonstruktion von *Tubiphytes morronensis*; (hier: Individuum B). Aus SCHMID & HENSSEL (2001).

Figure 7. Computer-based reconstruction of *Tubiphytes morronensis*; (here: individual B). From SCHMID & HENSSEL (2001).

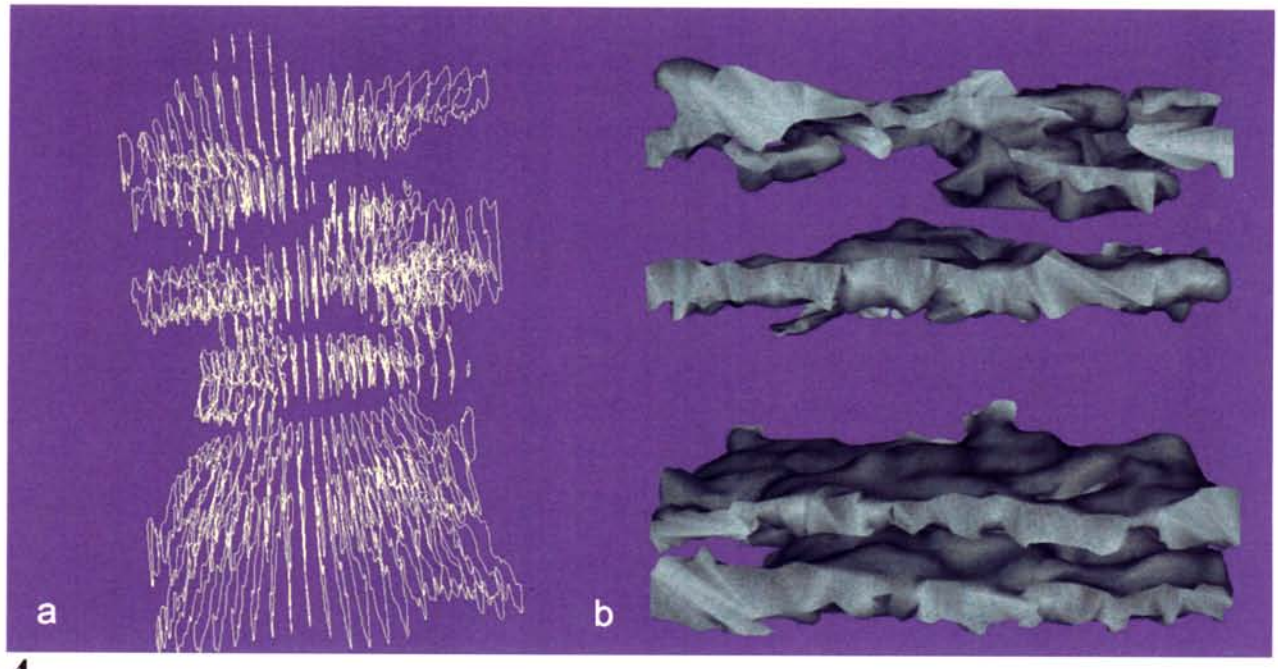
Abbildung 8. Profilansicht der Rekonstruktion von *Tubiphytes morronensis* (Individuum B): Unruhige, "gezackte" Oberfläche aufgrund der diffusen Objektbegrenzung.

Figure 8. Profile-view of the reconstruction of *Tubiphytes morronensis* (individual B): irregular "jagged" surface due to diffuse object outlines.

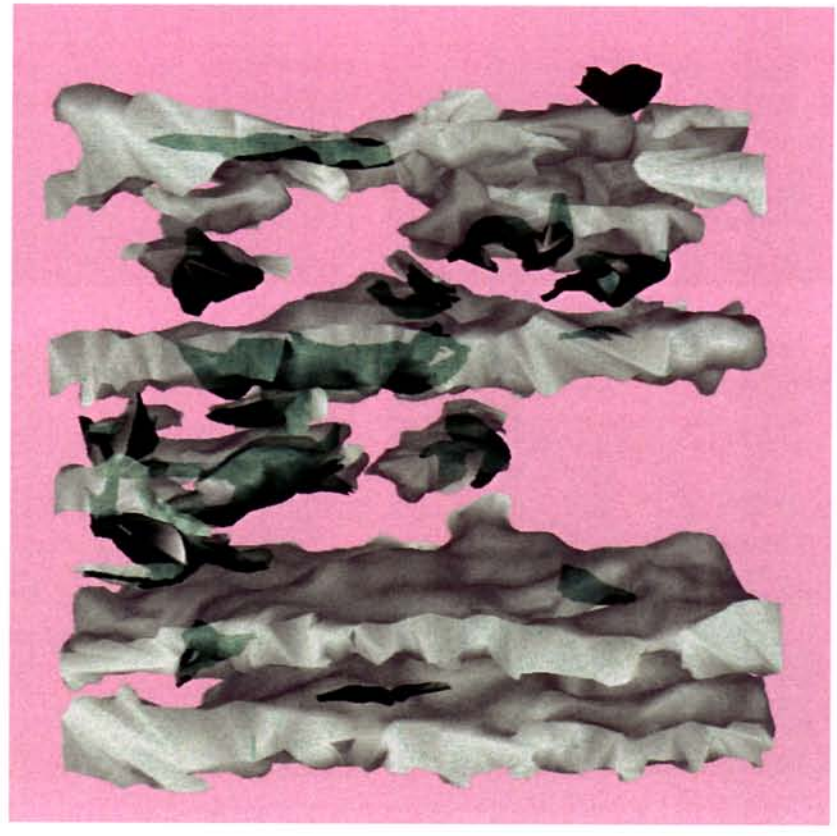
2



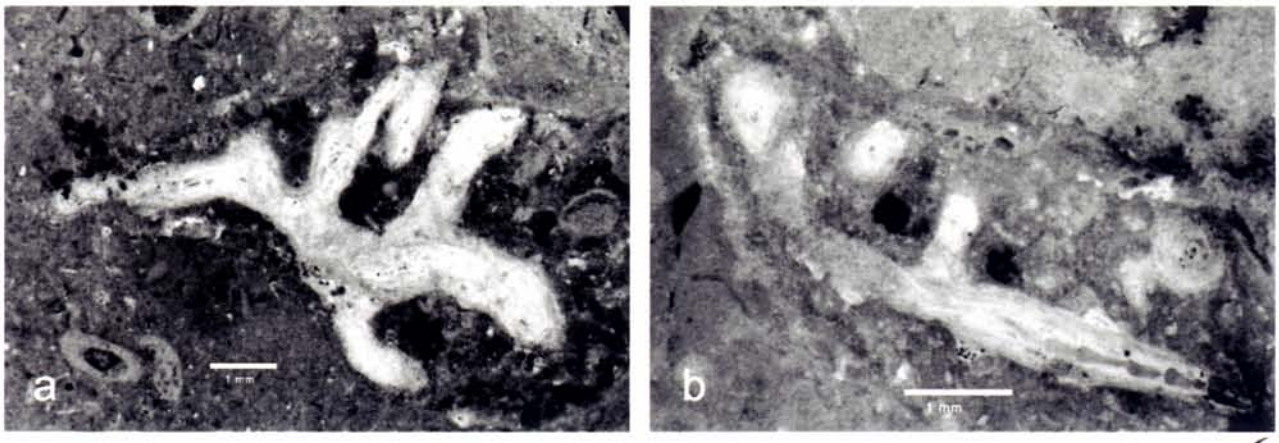
3



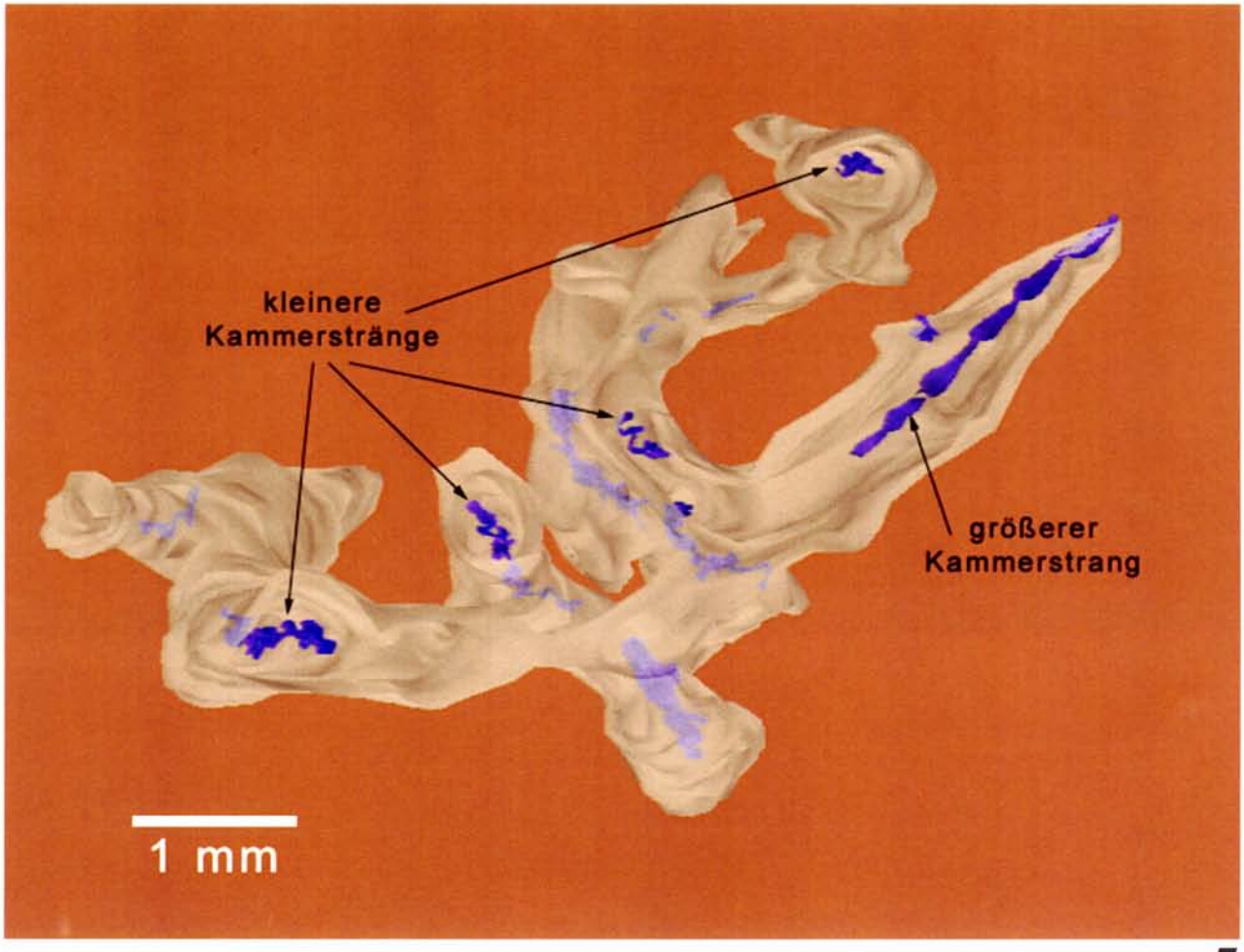
4



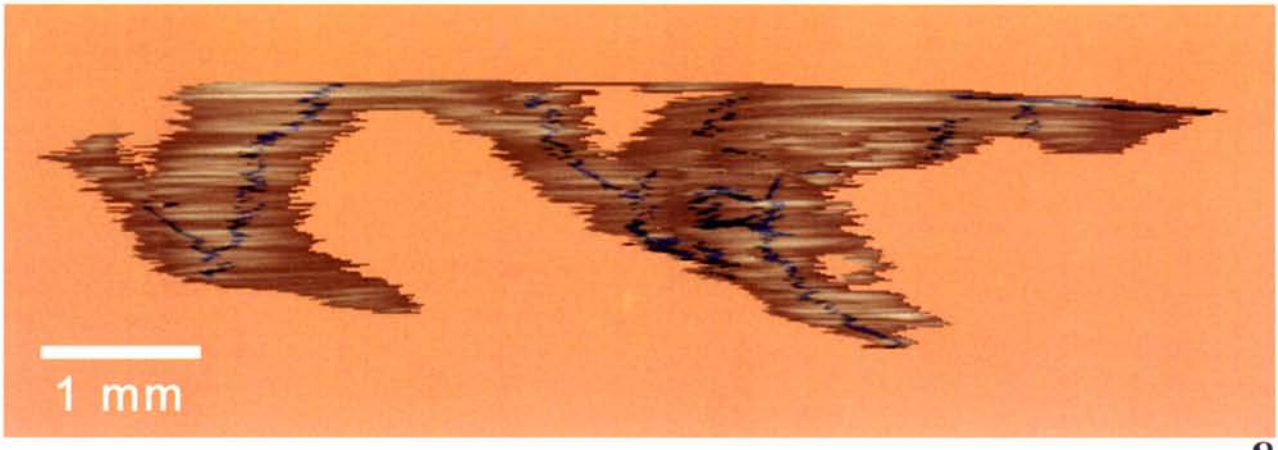
5


a
1 mm
b
1 mm

6


kleinere
Kammerstränge
größerer
Kammerstrang
1 mm

7


1 mm

8