ABRASION UND KORROSION BENTHISCHER FORAMINIFEREN

IN DER KIELER BUCHT, WESTLICHE OSTSEE

Diplomarbeit

am Fachbereich Mathematik-Naturwissenschaften
der Christian-Albrechts-Universität
Kiel

HANNES GROBE

Kiel 1981

INHALTSVERZEICHNIS

		Seite
1.	Einleitung	
1.1.	Fragestellung	1
1.2.	Arbeiten zu Ultrastrukturen von Foraminiferenschalen	2
2.	Charakteristika des Untersuchungsgebietes	
2.1.	Sedimentationsverhältnisse	5
2.2.	Karbonatlösung in der Ostsee	6
3.	Aufbau von Foraminiferenschalen	
3.1.	Calcifizierung	11
3.2.	Organische Matrix	11
3.3.	Tapeten	12
3.4.	Strukturen	12
3.4.1.	Die porzellanige Struktur	13
3.4.2.	Die hyaline Struktur	13
4.	Material und Methoden	
4.1.	Auswahl der Foraminiferenarten	15
4.2.	Probennahme	15
4.3.	Probenaufbereitung	17
4.4.	Oxidation	17
4.5.	Anlösung	18
4.6.	Präparation für das Rasterelektronenmikroskop	19
5.	Experimente: Durchführung und Ergebnisse	
5.1.	Oxidation des organischen Materials	20
5.2.	Korrosion von *Elphidium sp.* mit destilliertem Wasser	22
5.3.	Korrosion von *Elphidium sp.* mit Titriplex	22
5.3.1.	Bestimmung des Gewichtsverlustes	22
5.3.2.	Beschreibung des Lösungsverlaufes	24
5.4.	Korrosion von *Ophthalmina* mit Titriplex	32
5.4.1.	Bestimmung des Gewichtsverlustes	32
5.4.2.	Beschreibung des Lösungsverlaufes	33
5.5.	Vergleich der Lösungsverläufe	34

6. Natürliche Fragmentierung

6.1. Fragmentierung von *Elphidium sp.* 35

6.1.1. Korrosion und Zerfall von *Elphidium sp.* 35

6.1.2. Abrasion von *Elphidium sp.* 38

6.2. Fragmentierung von *Ophthalmina kilianensis* 39

7. Diskussion

7.1. Fragmentierung von Foraminiferen 41

7.2. Fragmentierungszonen 42

8. Zusammenfassung 46

9. Dank 47

10. Literaturverzeichnis 48

11. Anhang 53

Tabellen

Bildtafeln

1. EINLEITUNG

1.1. Fragestellung

In der westlichen Ostsee wird nur ein Teil der durch Organismen produzierten Karbonate im Sediment abgelagert (LEWY 1975, RESIG 1965, WEFER 1976). Der überwiegende Teil des Karbonates wird durch frühdiagenetische Prozesse, wie Abrasion (mechanische Zerstörung) und Korrosion (chemische Zerstörung) wieder zerstört.

In der vorliegenden Arbeit sollte untersucht werden, wie sich diese Vorgänge in den Oberflächenstrukturen von Kalkschalen abbilden.

Als Untersuchungsgebiet ist der sogenannte "Hausgarten" des Sonderforschungsbereiches 95 der Universität Kiel besonders geeignet, da dort sowohl Korrosion durch Untersättigung vor allem in Becken, als auch Abrasion durch Sedimenttransport im Flachwasser nebeneinander auf relativ eng begrenztem Raum vorkommen (LUTZE 1974).

Als Untersuchungsmaterial wurden die Gehäuse kalkschaliger Foraminiferen ausgewählt, da sie häufig in allen Wassertiefen vorkommen und besonders empfindlich auf Abrasion und Korrosion reagieren.

Im einzelnen sollte der Einfluß dieser frühdiagenetischen Prozesse auf die Schalen an der Sedimentoberfläche untersucht und bildlich dargestellt werden, sowie die Schritte der Fragmentierung einer Schale bei Anlösung experimentell nachvollzogen werden.

Der Einfluß der organischen Matrix auf die einzelnen Vorgänge war darzustellen.

Als Beobachtungs- und Darstellungsmittel sollte wegen der für die Untersuchung von Ultrastrukturen notwendigen hohen Auflösung ein Rasterelektronenmikroskop (REM) benutzt werden.

Gliederung und Darstellung der einzelnen Probleme in dieser Arbeit folgen dem Gang der Untersuchungen.

1.2. Arbeiten zu Ultrastrukturen von Foraminiferenschalen

Unter den zahlreichen Arbeiten über die Strukturen von Foraminiferenschalen findet man nur einen geringen Prozentsatz, der sich mit den sedimentologischen Gesichtspunkten der Schalen und ihren verschiedenen Fragmentierungsvorgängen im Rahmen frühdiagenetischer Prozesse beschäftigt. Den weitaus größten Teil nehmen Arbeiten in Anspruch, die sich mit dem beschreibenden Schalenaufbau der Foraminiferen befassen. Sie beinhalten Angaben über Kristallitform, -größe, -orientierung und -verteilung, über Ultrastrukturen sowie übergeordnete Schalenstrukturen und beschreiben die Poren und deren Funktion.

Als eine der grundlegenden Arbeiten hierzu ist TOWE & CIFELLI (1967) zu nennen. Sie geben eine genaue Beschreibung der drei häufigsten Schalenstrukturen (granular, radial und porzellanig) in polarisiertem Licht und im REM und versuchen eine klare Definition dieser Begriffe und des Begriffes "Einzelkristall" zu geben, um die hier herrschenden Mißverständnisse zu beseitigen. Ein Modell für die Calcifizierung der Schale wird dargestellt (Kap. 3.1.). Hierauf Bezug nehmend beschreibt HEMLEBEN (1969) strukturelle Merkmale einiger benthischer und planktischer Foraminiferen. Er gibt Anmerkungen zum Bau der Stacheln und beschreibt den Anbau einer neuen Kammer.

Bei der Betrachtung jüngerer Arbeiten ist eine zunehmende Spezialisierung auf bestimmte Familien, Gattungen und schließlich auch Arten festzustellen. So untersuchen z.B. HANSEN & REISS (1971) die Wandstrukturen von neun Gattungen der Rotaliiden im REM. Ein wichtiger Gesichtspunkt für die vorliegenden Untersuchungen war die Erkenntnis, daß beim Anbau einer neuen Kammer auch ältere mit einer weiteren Schale versehen werden.

Eine neue Präparationsmethode führt BELLEMO (1974a) ein. Er löste Schalen mit Glutaraldehyd an, wodurch die Ultrastrukturen deutlich herausgearbeitet wurden. Hiermit wurde eine genaue Beschreibung des Aufbaus der Kristalleinheiten und der Lage, Orientierung und Größe der einzelnen, sie aufbauenden Kristallite möglich. Diese Methode erwieß sich zugleich gegenüber dem Polarisationsmikroskop als bessere Möglichkeit, die Lage der optischen Achsen der Kristalleinheiten zu bestimmen. Die präparierten Schalen entsprechen den in dieser Arbeit durch Untersättigung mit Titriplex hervorgerufenen Strukturen.

Eine neue Methode zur Bestimmung der Kristallitorientierung innerhalb einer Schale wendet HANSEN (1968) an. Er bestimmte den granularen oder

radialen Typ mit Hilfe der Röntgendiffraktion. Nach HANSEN sind die Kristallite in der radialen Struktur mit dem basalen Pinakoid parallel zur Oberfläche orientiert, im granularen Typ liegt die Spaltfläche parallel zur Oberfläche.

Verschiedene Typen von Oberflächenstrukturen und der Aufbau der Schale bei Milioliden werden an Hand von *Quinqueloculina*- und *Triloculina*-Arten bei HAAKE (1971) beschrieben.

Karbonatschalen bilden bei ihrer Zerstörung Partikel bestimmter, von der Ultrastruktur abhängige Korngrößen. Die im Folgenden aufgeführten Arbeiten befassen sich mit den Vorgängen der Fragmentierung, den gebildeten Partikeln und ihren Lieferanten.

MURRAY & WRIGHT (1970) schreiben eine Veränderung der Oberflächenstrukturen von Foraminiferenschalen sowohl der Abrasion durch Sedimentpartikel, wie der chemischen Anlösung zu. Sie führten experimentelle Anlösungen durch und zeigen ihre Bedeutung für das Verständnis von Ultrastrukturen auf.

In mehreren Arbeiten von ALEXANDERSSON (1972, 1975, 1978a, 1978b, 1979) werden Karbonatpartikel unterschiedlicher Herkunft (Bivalvia, Algen, Echinodermen) im Hinblick auf ihr sedimentologisches und diagenetisches Verhalten untersucht. Vorgänge, wie Mikritbildung durch untersättigtes Wasser und der Zerfall von Karbonatprtikeln, von ALEXANDERSSON als "maceration" bezeichnet, werden beschrieben und Zusammenhänge zwischen Lösungsstruktur und Seewassereigenschaften sowie Oxidation und Schalenzerfall diskutiert. Anlösung von Karbonatpartikeln durch Untersättigung bezeichnet ALEXANDERSSON als "Wachstum rückwärts", da das Lösungsrelief als Bild kleinräumiger Lösungsunterschiede wechselndes Kristallwachstum und Chemismus wiederspiegelt.

Das Lösungsverhalten planktischer Foraminiferen wurde eingehend von BÉ, MORSE & HARRISON (1975) untersucht. Mit Schalen, die auf unterschiedliche Weise in bestimmten Zeitintervallen angelöst worden waren, ließen sich Lösungsreihen aufstellen, die mit natürlich angelösten Exemplaren verglichen werden konnten. Hierbei erwies sich *Pulleniatina obliquiloculata*, eine sehr lösungsresistente Form, als brauchbarer Indikator für den Grad der Anlösung von Foraminiferengemeinschaften am Meeresboden.

Eingehend befaßte sich FÜTTERER (1977) im Rahmen seiner Untersuchungen über die Siltfraktion hemipelagischer Sedimente mit Ultrastrukturen und Zerfall karbonatischer Partikel, insbesondere mit ihrer Bedeutung für die

Sedimentbildung. Hierbei werden auch die verschiedenen bei Foraminiferen auftretenden Strukturen unter besonderer Berücksichtigung der im Siltkornbereich erkennbaren Strukturelemente beschrieben. Verwechslungsmöglichkeiten mit Bruchstücken anderer Kalkproduzenten werden aufgezeigt.

Als wesentliche Vorgänge für die Fragmentierung von Karbonat beschreibt FÜTTERER Abrasion, Korrosion und Bioerosion. Zur Abrasion wurden Experimente an Schalen unterschiedlicher Organismen durchgeführt und die entstandenen Korngrößenverteilungen in Beziehung zur Ultrastruktur gesetzt. Hierbei ließ sich eindeutig eine Abhängigkeit nachwiesen.

Als für diese Arbeit wichtige Gesichtspunkte wurden Sedimentologie und Schalenaufbau angesprochen. Weitere Themenkreise aus dem Bereich der Strukturarbeiten beschäftigen sich mit den taxonomischen, phylogenetischen, ontogenetischen und ökologischen Zusammenhängen der Schalenstrukturen. Bei diesen Arbeiten wurde für die Beobachtung, Vergößerung und Darstellung der Schalen und ihrer Elemente meist das Rasterelektronenmikroskop (REM) benutzt.

Der Durchbruch der Rasterelekronenmikroskopie während der sechziger Jahre in den verschiedensten Wissenschaftszweigen war auch in der Mikropaläontologie und der Sedimentologie zu verfolgen. Arbeiten, die durch die geringe Auflösung und Tiefenschärfe der Lichtmikroskope nur begrenzt oder gar nicht mehr möglich waren, konnten sich mit Hilfe dieser Technik in großer Vielfalt entwickeln. HAY & SANDBERG (1967) stellen in ihrem Aufsatz "The scanning elektron mikroscope, a major break-through for micropaleontology" durch Vergleich mit anderen Licht- und Elektronenmikroskoptypen die hervorragende Eignung des REM für mikropaläontologische Untersuchungen dar. Ein wichtiger Zweig, der sich eigentlich erst durch diese Technik richtig entwickeln konnte, sind die Untersuchungen der Ultrastrukturen von Foraminiferenschalen. Dies beweist eine Flut von Publikationen, die in den letzten 15 Jahren zu diesem Thema unter den oben genannten verschiedensten Gesichtpunkten veröffentlicht wurden. Eine der ersten Arbeiten hierzu versucht durch vergleichende Untersuchungen eine Verbindung zwischen lichtoptischen und elektronenoptischen Beobachtungen herzustellen, um die verschiedenen Strukturen in ihren unterschiedlichen Darstellungen in Beziehung setzen zu können (HAY, TOWE & WRIGHT 1963). Zuerst entstand durch diesen Übergang einige Verwirrung unter den bei lichtoptischen Beobachtungen geprägten Strukturbegriffen, die sich nun unter dem REM nicht mehr verwenden ließen und einer neuen Definition bedurften. Einen wichtigen Beitrag hierzu leistete die Arbeit von TOWE & CIFELLI (1967).

2. CHARAKTERISTIKA DES UNTERSUCHUNGSGEBIETES

2.1. Sedimentationsverhältnisse

Die Probennahme erfolgte im Hausgartengebiet des Sonderforschungsbereiches 95. Der "Hausgarten" ist ein vermessenes und durch Tonnen markiertes Untersuchungsgebiet in der Ostsee. Es liegt am Ausgang der Eckernförder Bucht vor Bokniseck zwischen den dort positionierten Meilentonnen.

Eine genaue Kartierung und Untersuchung der Sedimente im "Hausgarten" erfolgte durch FLEMMING & WEFER (1973) und WEFER & TAUCHGRUPPE KIEL (1974). Ein Profil von 0-27m Wassertiefe zeigt generell eine Korngrößenabnahme mit zunehmender Tiefe. WEFER teilt das Gebiet in drei Zonen ein:

1) Abtragungsgebiet mit Restsediment
2) küstenfernes Sand-Anhäufungsgebiet
3) Schlickgebiet

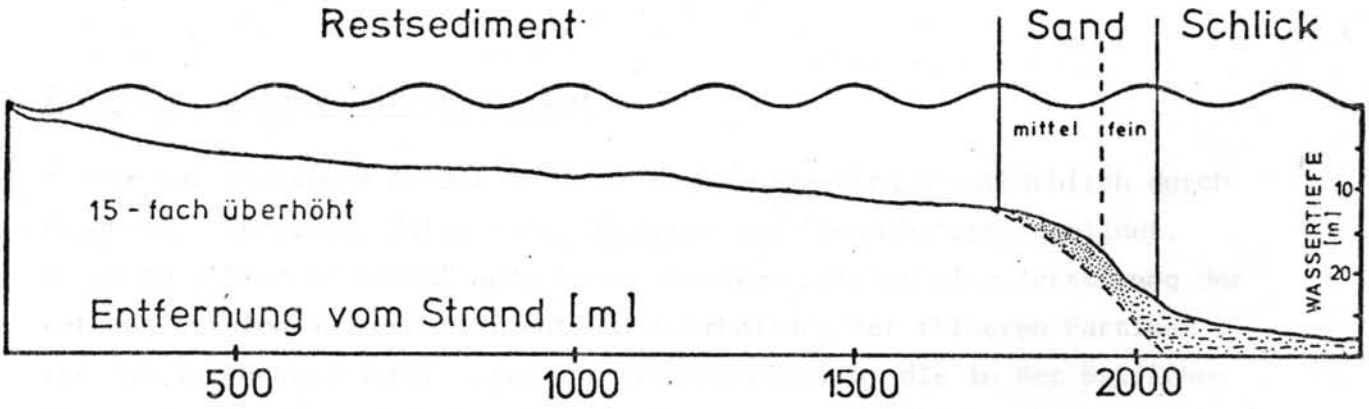


Abb. 1: Profil des "Hausgartens" (n. WEFER & T.G. KIEL 1974)

Das Restsedimentgebiet erstreckt sich von 0 bis 13m Wassertiefe. Der anstehende Geschiebemergel wird fleckenhaft mit grobem Restsediment bedeckt. Felder aus Grob- bis Mittelsand und mit Algen bewachsene Steine sorgen durch ihre Bewegung in Verbindung mit Durchweichung und Bohrtätigkeit von *Barnea candida* für eine Abrasion des Geschiebemergels. Steine können durch Wasser bewegt werden, wenn ihre Oberfläche durch Aufwuchs von Algen entsprechend vergrößert wurde (KUDRASS 1974).

Durch die Bewegung des Sedimentes erfolgt in diesem Bereich eine Abrasion an Karbonatschalen. Hiervon sind auch tote und lebende Foramini-

feren betroffen. Beobachtungen konnten an der hier lebenden *Elphidium excavatum excavatum* und an *Ophthalmina kilianensis* gemacht werden.

Die Erosion im flacheren Wasser liefert das Material für die Sedimentation in Wassertiefen über 13m. Zwischen 13 und 23m werden Mittel- bis Feinsand, unterhalb von 23m wird Schlick abgelagert. Mit dem Sedimenttransport erfolgt auch eine Umlagerung von Foraminiferenschalen aus dem Flachwasser in größere Wassertiefen. Das Überwiegen lebender Formen im Flachwasser und eine Zunahme der Todfauna ab 18m sind Kennzeichen hierfür (LUTZE 1974).

In Tiefen unter 13m wachsen keine Algen mehr, da das Hartsubstrat zum Anheften fehlt. Ein Transport der Phytalfauna ins tiefere Wasser ist jedoch durch losgerissene Algenteile möglich. In Airliftproben aus 23 m Wassertiefe konnten tote Exemplare von *Ophthalmina kilianensis* beobachtet werden, die sowohl Bruch- als auch Lösungsstrukturen aufwiesen. Da *Ophthalmina kilianensis* nur auf Algen oder in deren unmittelbarer Nähe lebend gefunden wurden (WEFER 1976), müssen die Schalenreste aus dem Restsedimentgebiet herantransportiert worden sein.

2.2. Karbonatlösung in der Ostsee

Der karbonatische Anteil in Ostseesedimenten wird hauptsächlich durch Muscheln, Schnecken, Ostracoden, Bryozoen und Foraminiferen gebildet. Durch verschiedene frühdiagenetische Vorgänge erfolgt eine Zerstörung der Karbonatschalen auf dem Sediment. Eine Erhaltung der feineren Partikel ist nur in Karbonatanreicherungshorizonten möglich, die in der östlichen Ostsee vorwiegend aus karbonatischen Aggregaten, in der westlichen Ostsee aus Schill bestehen. In diesen Lagen wird durch die Übersättigung des Porenwassers an Karbonat eine weitere Auflösung verhindert (RESIG 1965). WEFER (1976) dagegen vermutet, daß die Schillagen Wühlhorizonte darstellen, in denen die Foraminiferen durch Makrobenthos ins Sediment gelangten und so den Lösungsvorgängen, die nur an der Sedimentoberfläche stattfinden sollen, entzogen wurden.

Im Hausgartengebiet wird das Karbonat in 25m Wassertiefe zwischen der Oberfläche und 3cm Sedimenttiefe bereits fast vollständig aufgelöst. In Abb. 2 sind die Karbonatgehalte für die Fraktionen $<63\mu m$ und $>63\mu m$ eines Taucherstechkastenkernes dargestellt. Die Werte für den Kernabschnitt 2-3cm liegen weit unter einem Prozent und erreichen hier für die >63um Fraktion, sowie bei 15cm für die <63um Fraktion nicht mehr meßbare Größen.

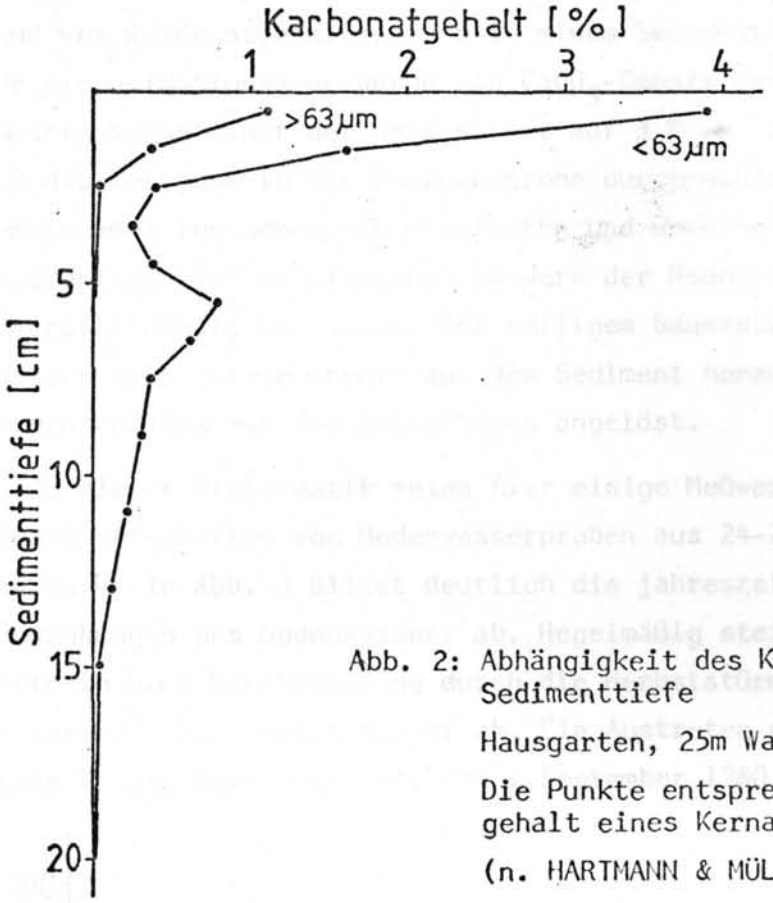


Abb. 2: Abhängigkeit des Karbonatgehaltes von der Sedimenttiefe
Hausgarten, 25m Wassertiefe
Die Punkte entsprechen jeweils dem Karbonatgehalt eines Kernabschnittes von einem cm.
(n. HARTMANN & MÜLLER unpubl. Werte)

Ein Teil des auf der Sedimentoberfläche befindlichen Karbonates fehlt bei den ersten Werten, da es bei der Probennahme zu einer Aufwirbelung kommt. So konnten in der Suspension über dem Kern noch weitere 3,2 % Karbonat gemessen werden.

Die Probe eines Kastengreiferkernes aus 21m Wassertiefe und 5-10cm Sedimenttiefe enthielt, bis auf einige lebende Exemplare, die durch wühlende Organismen in diese Sedimenttiefe gelangt sein müssen, keinerlei vollständige Foraminiferenschalen mehr. Elphidium kann in größeren Tiefen 2-3 Monate überleben (BOLTOVSKOY 1966).

Die Vorgänge, welche auf und im Sediment Karbonat lösen, sind komplex und von zahlreichen Faktoren abhängig. So findet JARKE (1961) eine Erklärung durch die genaue Untersuchung der Oxidations- und der Reduktionsschicht, insbesondere ihres Übergangsbereiches im Sediment. In einer zum Vergleich herangezogenen Arbeit von TROFIMOV (1939) über Gyttjen der Barents-See wurde deren oxido-reduktives Verhalten und ihre pH-Werte untersucht. Sowohl in der Oxidations- wie in der Reduktionszone wurden Werte von 8-8,5 gemessen, im Übergangsbereich dieser beiden Zonen ergab

sich jedoch ein pH von 6,5-6. JARKE überprüfte seine Vermutungen an Hand von Karbonatgehaltswerten in einem Sedimentkern vom Stoller Grund. Für die Oxidationszone wurde ein $CaCO_3$-Gehalt von 10 % gemessen, in der Rduktionszone sinkt der Wert sofort auf 3 % ab. JARKE schließt hierraus, daß das Karbonat in der Übergangszone durch Kohlensäure gelöst wird. Ein gemeinsames Vorkommen von angelösten und unversehrten Exemplaren auf dem Sediment erklärt er mit einem Wandern der Redox-Grenze entsprechend dem Sauerstoffgehalt im Wasser. Bei völligem Sauerstoffverlust des Bodenwassers tritt diese Grenze aus dem Sediment heraus, die Karbonatpartikel werden bereits auf dem Ostseeboden angelöst.

Zu dieser Problematik seien hier einige Meßwerte des prozentualen Sauerstoffgehaltes von Bodenwasserproben aus 24-26m Wassertiefe eingefügt. Die Kurve in Abb. 3 bildet deutlich die jahreszeitlichen O_2-Gehaltsschwankungen des Bodenwassers ab. Regelmäßig steigen im November die Werte in Folge Durchmischung durch die Herbststürme steil an und sinken im Verlauf des Sommers wieder ab. Ein Austreten der Reduktionszone ins freie Wasser zeigt der Wert vom 1.September 1980 mit 0 % Sauerstoff an.

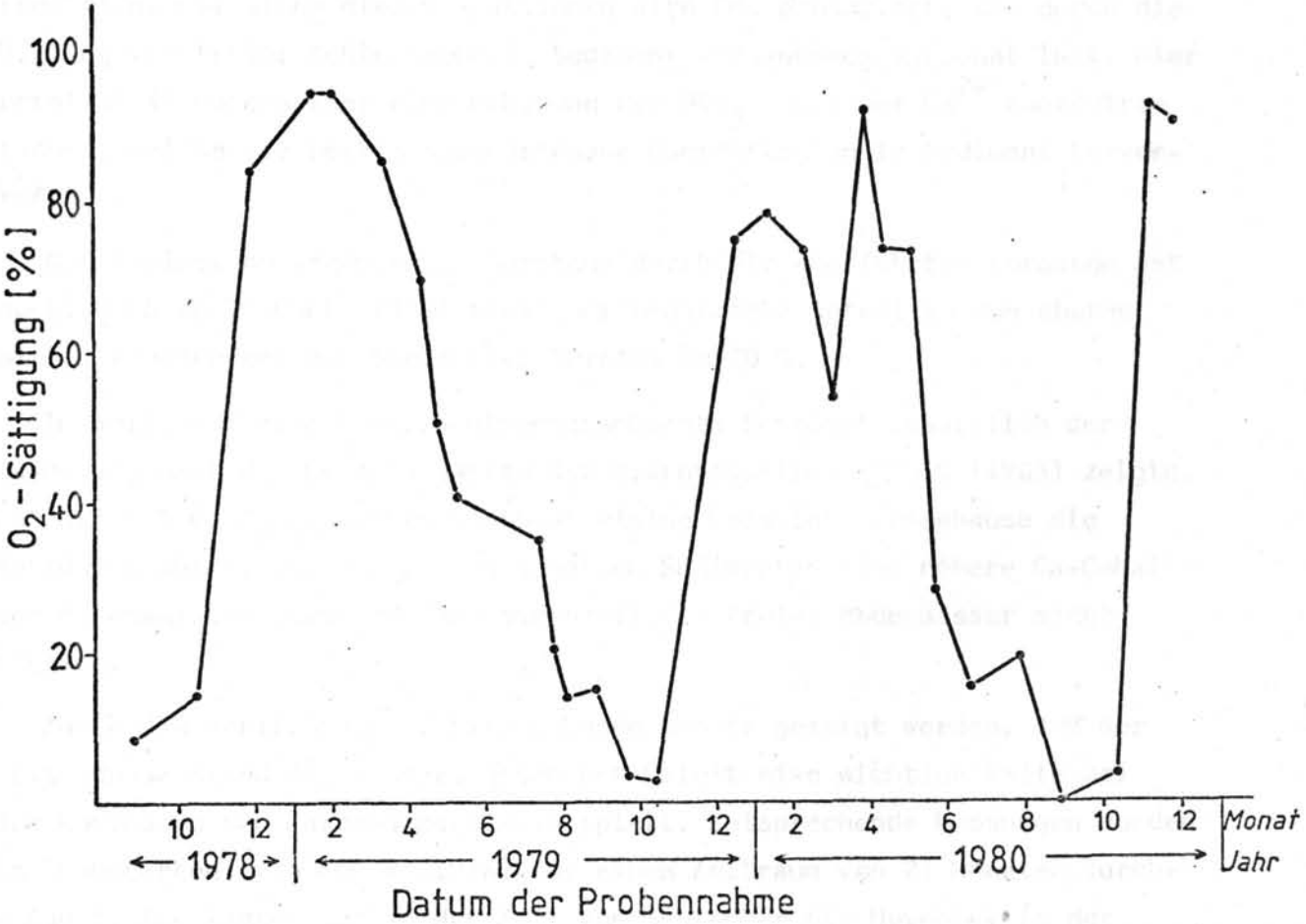


Abb. 3: Jahreszeitliche Schwankungen der Sauerstoffsättigung im Bodenwasser des"Hausgartens", Wassertiefe: 24-26m

(n. HEUSER unpubl. Werte)

Mehrere Möglichkeiten für die Entstehung karbonatlösender Bedingungen beschreibt RESIG (1965). Die größte Bedeutung mißt sie dem CO_2-Gehalt des Bodenwassers bei. Dieser wird bestimmt durch bakterielle Oxidation des organischen Sedimentanteils innerhalb der Oxidationszone.

Im anaeroben Milieu sind nach RESIG zwei weitere Vorgänge untergeordnet für die Bildung von Säuren verantwortlich:

1. Beim Abbau organischer Substanzen, wie Cellulose und Kohlenhydrate, entstehen organische Säuren.
2. Durch Oxidation verschiedener Schwefelverbindungen, insbesondere des im anaeroben Milieu reichlich entstehenden H_2S, wird Schwefelsäure gebildet. Gering ist die Menge an H^+-Ionen, welche durch die Eigendissoziation des H_2S zur Verfügung steht.

Genauer wurden diese Vorgänge von SUESS (1976) untersucht. Im Rahmen des Nährstoffkreislaufes wird organische Substanz am Meeresboden unter Verbrauch von O_2 zu CO_2, NH_3 und PO_4 oxidiert. Der Abbau vollzieht sich im oxidierenden Milieu je nach Eh-Wert durch Sauerstoffrespiration oder Nitratreduktion und im reduzierenden Milieu durch Sulfat- oder Karbonatreduktion. Bei allen diesen Reaktionen wird CO_2 produziert, das durch die Bildung von freier Kohlensäure im Sediment vorhandenes Karbonat löst. Hier entsteht im Porenwasser eine Erhöhung der HCO_3^-- und der Ca^{2+}-Konzentrationen, welche die bereits beschriebene Übersättigung im Sediment hervorrufen.

Der Verlust an organischer Substanz durch die angeführten Vorgänge ist hoch. Nach ZEITZSCHEL (1964) sinkt der organische Anteil in den oberen sieben Zentimetern des Sedimentes bereits um 20 %.

Im weiteren Verlauf der Sedimentgeschichte bestimmt zusätzlich der Karbonatgehalt den Erhaltungsgrad der Mikrofossilien. RESIG (1965) zeigte, daß bei 2 % $CaCO_3$-Anteil im Sediment einige Foraminiferengehäuse die Auflösung überstehen können. In sandigen Sedimenten sind höhere Ca-Gehalte des Porenwassers durch den Austausch mit dem freien Bodenwasser nicht möglich.

Durch die vorliegenden Untersuchungen konnte gezeigt werden, daß der Sättigungszustand des Wassers gegenüber Calcit eine wichtige Rolle bei der Korrosion von Karbonatpartikeln spielt. Entsprechende Messungen wurden im "Hausgarten" von WEFER (1976) für einen Zeitraum von 21 Monaten durchgeführt. Sie lassen nur in der Zeit von September bis November in der gesamten Wassersäule eine Untersättigung erkennen. Erst unterhalb 26m

Wassertiefe ist das Wasser häufig an Calcit untersättigt. In diesem Bereich ist daher mit verstärkter Karbonatlösung durch Untersättigung zu rechnen.

In Abb. 4 sind die Werte entsprechend dem Profil des Hausgartens auf Seite 5 aufgezeichnet. Besonders in der Restsedimentzone ist eine ständige hohe Übersättigung zu verzeichnen.

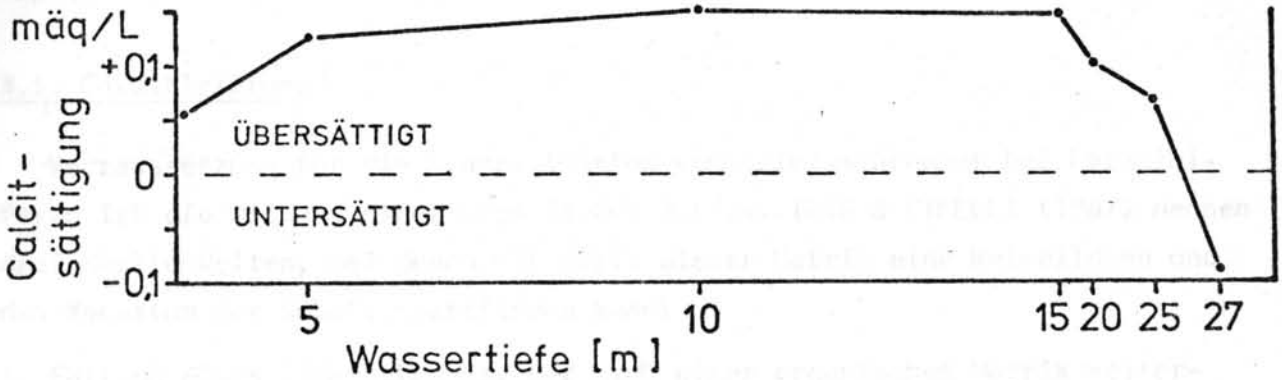


Abb. 4: Calcitsättigung im Hausgartengebiet
Die Zeichnung entspricht dem Profil auf Seite 5.
(n. WEFER 1976)

3. AUFBAU VON FORAMINIFERENSCHALEN

Für die Untersuchungen der aus den Strukturen resultierenden Zerfallserscheinungen von Foraminiferenschalen ist es notwendig, eine Vorstellung von Bildung, Wachstum und Aufbau der Schalen zu haben. Nur in Verbindung mit der Entstehung ist auch der spätere Zerfall zu verstehen. Daher hier einige Anmerkungen zum Calcifizierungsvorgang, zur Verteilung der organischen Matrix innerhalb der Schale und zu den die Kammern auskleidenden Tapeten.

3.1. Calcifizierung

Vorraussetzung für die Mineralisation von Calciumkarbonat bei Foraminiferen ist die Bildung einer organischen Matrix. TOWE & CIFELLI (1967) nennen drei Möglichkeiten, bei denen mit Hilfe dieser Matrix eine Keimbildung und das Wachstum der Schale stattfinden kann:

1. Fällung eines Mineralkernes, der auf einer organischen Matrix weiterwächst. Diese kann in ihrer Struktur zwischen faserig und blättrig variieren.
2. Fällung (ev. spontan) in einer Hülle aus organischem Material.
3. Wachstum von Kristallen mit einem organischen Makromolekül als Keim.

Bei Invertebraten findet man am häufigsten eine Mineralablagerung auf einer extrazellulär gebildeten organischen Matrix. Die Matrix besteht bei Foraminiferen aus einem aktiven und einem passiven Teil (MOSS 1964). Der passive Teil, ein Polysaccharid, ist verantwortlich für Form und Gestalt der Schale. Der aktive Teil, eine Protein-Matrize bestimmt die spätere Lage der optischen Achse der Kristalleinheit. An Hand der Lösungsstrukturen konnte gezeigt werden, daß die Matrizen immer eine der jeweiligen darunterliegenden Kristalleinheit entsprechende Orientierung haben müssen. Jede dieser Einheiten bleibt auch nach Beendigung des Wachstums bis zum Tod des Exemplares von einer organischen Matrix umgeben. Mit Hilfe eines Anlösungsversuches konnte dies verdeutlicht werden.

3.2. Organische Matrix

Einige Schalen lebender Exemplare wurden kurzfristig (15 min) dem Oxidationsmittel ausgesetzt, um nur das auf der Oberfläche befindliche organische Material zu zerstören. Die folgende Anlösung mit einer pH 6 Puffer-Lösung präparierte die noch zwischen den Kristalleinheiten befindliche

Matrix reliefartig heraus (Taf.14, Fig.7). Jede helle Linie kennzeichnet eine Plattengrenze. In Fig.8 ist auch das die Poren auskleidende Material zu erkennen. Die Poren durchdringen die gesamte Schale und verbinden so Kammerinneres mit außen. Sie sind zu einem großen Teil mit organischem Material verfüllt. Um diese Porenfüllungen sichtbar zu machen, wurden einige Schalen ohne vorherige Oxidation zwei Stunden lang mit einer pH 6 Puffer-Lösung behandelt. Die Resultate sind aus Taf.14, Fig.1-4 zu ersehen. Fast die gesamte Schale, bis auf einen kleinen Rest im Nabelbereich, ist aufgelöst. Der organische Inhalt der Kammern ist sichtbar, bedeckt mit einer Vielzahl von Noppen, die Reste der ursprünglichen Poreninhalte darstellen. Die wahre Länge dieser Füllungen ist auf Fig.3 zwischen noch zusammenhängenden Teilen der Schale zu erkennen. Sie verlieren jedoch durch die Auflösung der Schale ihren Halt (Fig.4) und reißen ab (Fig.3, rechts unten).

3.3. Tapeten

Verschiedene Foraminiferen-Gattungen kleiden ihr Gehäuse innen mit einer sehr widerstandsfähigen organischen Tapete aus. Dies Material besteht aus einem hornsubstanz-ähnlichen Stoff und wird als Tektin bezeichnet (HYMAN 1940). Verschiedene Gattungen und Arten zeigen unterschiedlich widerstandsfähige Ausbildungen. Einige Tapeten eignen sich durch hohe Resistenz und Stabilität noch lange nach dem Auflösen der Kalkschalen als fossiler Nachweis einer entsprechenden Art. Genauere Untersuchungen wurden von RESIG (1965) an Ostseekernen durchgeführt, die hierbei Tapeten von *Ammonia* und *Elphidium* (*Cribrononion*) in tiefen Sedimentschichten in großer Häufigkeit fand. Sie beschreibt bei *Elphidium incertum* eine sehr schwache Innentapete. Wie Taf.7, Fig.3 zeigt, zerreißt sie im fortgeschrittenen Stadium des Schalenzerfalls.

3.4. Strukturen

Nach den im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Mechanismen ist die Entwicklung der Schalenstruktur als eine Reaktion auf die Struktur der organischen Matrize zu sehen. Sie regelt die Position und Verteilung der Kristallite, die die Ultrastruktur einer Schale bestimmen. Bei Kalkschaligen Foraminiferen werden nach diesen Gesichtspunkten zwei Grundtypen

von Strukturen unterschieden:

1. die porzellanige Struktur
2. die hyaline Struktur

Die hyaline Struktur läßt sich in eine radial-hyaline und eine granular--hyaline Struktur untergliedern. Als weitere untergeordnete Typen seien hier die monokristalline und die nadelige Struktur bei rezenten Arten und die mikrogranulare Struktur bei fossilen Formen erwähnt (BOLTOVSKOY & WRIGHT 1976).

3.4.1. Die porzellanige Struktur

Vertreter der porzellanschaligen Foraminiferen (Unterordnung Miliolina) lassen unter dem Binokular eine glänzend weiße Schale ohne Perforation erkennen. Die lichtoptisch glatte Schalenoberfläche ist durch eine sehr feine und ebene Ultrastruktur zu erklären. Der äußerste Schalenbereich wird von parallel zur Oberfläche angeordneten, wenige µm großen Kristalliten von nadeligem, stengeligem oder plattigem Habitus gebildet. Die Rhomboeder können unregelmäßig oder parallel zueinander angeordnet sein (HAAKE 1971). LYNTS & PFISTER (1967) war es möglich, durch Vermessen der Calcitrhomboeder verschiedene Miliolidengattungen zu unterscheiden.

Die Oberflächenschicht besteht häufig nur aus einer einzigen Kristallitlage. Darunter folgt eine wahllose dreidimensionale Anordnung von Kristalliten, die durch ihre ungeordnete Lagerung der Schale eine hohe Porosität verleihen. Dieser Raum ist im Lebendstadium mit organischer Matrix verfüllt, ebenso wie die Oberfläche von einer schützenden Matrix überzogen ist. Das die Schale aufbauende Material besteht bei den Milioliden ausschließlich aus hoch-Mg-Calcit.

Eine genaue Beschreibung für die von mir untersuchte Art *Ophthalmina kilianensis* erfolgt im Kapitel zur Korrosion der Testexemplare.

3.4.2. Die hyaline Struktur

Einen völlig anderen Strukturtyp weisen die hyalinschaligen Foraminiferen auf, zu denen alle planktischen und einige benthische Formen zählen. Die Schale besteht aus zahlreichen kleinen, unregelmäßig begrenzten Calcitplatten, die übereinanderliegend Säulen (TOWE & CIFELLI 1967, HANSEN 1970) oder Stapel (HANSEN & REISS 1971) bilden können. BELLEMO (1974a, 1974b, 1976) spricht von Laminae und Laminaestapeln. Die Platten können sowohl aus einem Einzelkristall bestehen (*Bolivinen*), als auch aus

zahlreichen kurz- oder langprismatischen Kristalliten (*Elphidium*) oder Fasern (planktische Foraminiferen) mit gleicher optischer Orientierung innerhalb einer Platte aufgebaut sein. Da die Kristallite eine kristallografische Einheit bilden, spricht man bei den Calcitplatten auch von Kristalleinheiten.

Eine Unterteilung der hyalinschaligen Wandstruktur erfolgt durch die unterschiedliche Lagerung der Kristallite. Das Wachstum der Kristallite im radialen Wandtyp beginnt auf dem basalen Pinakoid (0001), das des granularen Typs auf der Rhomboederfläche ($10\bar{1}1$). Dieser Unterschied wird nach TOWE & CIFELLI (1967) durch geringe stereochemische Veränderungen der aktiven organischen Matrix hervorgerufen. Somit liegen die Kristallite im granularen Wandtyp mit ihrer c-Achse schräg zur Schalenoberfläche, die Rhomboederflächen verlaufen parallel zu ihr. Die c-Achsen verlaufen innerhalb einer Kristalleinheit parallel, die Achsen verschiedener Einheiten zeigen in unterschiedliche Richtungen.

Die Kristallite des radialen Wandtyps befinden sich in senkrechter Orientierung zur Schalenoberfläche und sind ebenfalls in Kristalleinheiten gruppiert.

Vor der Entwicklung des REM mußten diese Strukturen mit Hilfe des Polarisationsmikroskopes unterschieden werden. Der radiale Typ erscheint hier in einheitlicher Auslöschung, der granulare Typ zeigt ein Mosaik unterschiedlicher Grautöne, je nach Orientierung der optischen Achse einer Einheit zum Analysator. Da jedoch die Achsen in verschiedenen Winkeln zur Schalenoberfläche liegen können und diese nicht mehr lichtoptisch zu unterscheiden sind, lehnt BELLEMO (1974a) das Lichtmikroskop zur Identifizierung von Schalenstrukturen ab.

4. MATERIAL UND METHODEN

4.1. Auswahl der Foraminiferenarten

Für die Untersuchung von Struktur und Verhalten zweier verschiedener Schalentypen von Foraminiferen aus unterschiedlichen Wassertiefen der Ostsee wurden als Vertreter der Rotaliiden die Gattung *Elphidium*, von den Milioliden *Ophthalmina* ausgewählt. Exemplare dieser Gattungen sind in der Kieler Bucht häufig und lassen sich daher leicht in größeren Mengen gewinnen.

Bemerkenswerte strukturelle Unterschiede zwischen einzelnen Arten von *Elphidium* oder verschiedene Formen des Zerfalls bei Exemplaren aus unterschiedlichen Wassertiefen konnten im REM nicht festgestellt werden.

Aus diesen Gründen beschränken sich die Beobachtungen auf die in 23m Wassertiefe häufige *Elphidium incertum* und auf *Elphidium albiumbilicatum*. Aus dem flacheren Wasser wurde die dort lebende *Elphidium excavatum excavatum* untersucht.

Bei der von Algen gewonnenen und experimentell behandelten Miliolidenspezies handelt es sich um *Ophtalmina kilianensis*. Zur Untersuchung des natürlichen Zerfallsvorganges wurde auf Proben aus größeren Wassertiefen zurückgegriffen, da im Sediment des Flachwassers keine Exemplare gefunden werden konnten. Offensichtlich werden die abgefallenen Schalen aus dem flacheren Wasser mit der Strömung in größere Tiefen verfrachtet.

4.2. Probennahme

Für die Untersuchungen von Abrasion und Korrosion an Foraminiferenschalen, sowie der Aufzeichnung einer experimentellen Lösungsreihe, war es notwendig, größere Mengen von toten und lebenden Exemplaren zur Verfügung zu haben, damit später eine Auswahl der besten Darstellungen getroffen werden konnte. Durch Taucher wurden daher verschiedene Arten der Probennahme im Hausgartengebiet getestet.

Der Einsatz eines Backengreifers vom Schiff aus eignet sich hier nicht für eine Entnahme von Oberflächenproben, da durch das herabfallende Gerät kurz vom dem Aufsetzen die obersten Sedimentmillimeter, in und auf denen sich die meisten Foraminiferen befinden, aufgewirbelt werden (WEFER 1976).

Eine Probennahme mit Taucherstechkästen erbrachte auf Grund des nur

kleinen erfaßten Oberflächenausschnittes eine zu geringe Menge an Foraminiferen im Verhältnis zum aufzuarbeitenden Sediment.

Als geeignetes Gerät für diese Problemstellung konnte ein Airlift verwendet werden, mit dem sich die obersten Sedimentmillimeter ohne Verlust absaugen lassen. An ein 1,10m langes Plastikrohr mit einem Durchmesser von 5cm wurde am leicht umgebogenen Ende ein Sack aus einem 100 µm Planktonnetz mit einem Fassungsvermögen von etwa drei Litern mit Hilfe einer Schlauchklemme befestigt. Am unteren Ende des Rohres ist ein druckfester Schlauch angebracht, der an eine Preßluftflasche angeschraubt werden kann. Durch Regulierung der Luftzufuhr läßt sich die Stärke des Absaugvorganges einstellen. Im Planktonsack erfährt das Sediment bereits eine Vorfraktionierung. Durch die entweichenden Luftblasen wird ein großer Teil der <100 µm-Fraktion unter Wasser ausgesiebt, sodaß später ein Sedimentrest mit hohem Foraminiferenanteil zu Verfügung steht.

In einem Profil entlang des SW-Randes des "Hausgartens" wurden mit dem Airlift zwischen 12 und 28m Wassertiefe in acht verschiedenen Tiefen jeweils ein Quadratmeter Meeresboden abgesaugt, um den Bereich der besten Ausbeute an *Elphidium sp.* zu ermitteln. Hierbei zeigten sich die besten Ergebnisse zwischen 21 und 23,5m Wasertiefe. In größeren Tiefen nimmt der feine Sedimentanteil so stark zu, daß er nach kurzer Zeit das 100 µm-Netz verstopft und ein weiteres Arbeiten unmöglich macht. In geringeren Tiefen wird *Elphidium sp.* durch eine Dominanz von Sandschalern (*Ammotium cassis*) abgelöst (LUTZE 1974).

Um Aufschluß über die vertikale Verteilung der Foraminiferen, sowie das Auftreten bestimmter Lösungserscheinungen im Sediment mit zunehmender Tiefe zu erhalten, wurden mit einem Kastengreifer bei 22 und 24m Wassertiefe jeweils ein 50cm langer ungestörter Sedimentkern mit einer Grund fläche von 560cm^2 genommen. Da bei dieser Art der Probennahme der schon beim Backengreifer beschriebene Effekt auftritt, ist zu bedenken, daß bei diesen Kernen die obersten Sedimentmillimeter mit zahlreichen Exemplaren fehlen werden. Die Kerne wurden an Bord in Abschnitte von fünf Zentimeter unterteilt und in Probenflaschen gefüllt.

In Wassertiefen unter 10m ist der Meeresboden als Restsediment des Geschiebemergels ausgebildet (WEFER 1974). Auf Geröllen unterschiedlichster Größe wachsen verschiedene Algenarten, die wiederum von Foraminiferen besiedelt werden. Hier war *Ophthalmina kilianensis* als Vertreter der Milioliden und somit einer anderen Schalenstruktur für vergleichende Untersuchungen von Interesse. Daher wurden von Tauchern in Tiefen zwischen 6 und8m Algen vorsichtig von Steinen losgelöst und unter Wasser

in weithalsige verschraubbare Plastikflaschen gefüllt.

Eine Probennahme in diesen Tiefen mit Hilfe des Airliftes in der Umgebung von Algen und auf Grobsandfeldern sollte sowohl herabgefallene und angelöste Milioliden, als auch andere, durch Sedimentbewegung abradierte Formen liefern.

Alle Proben wurden an Bord sofort mit der doppelten Volumenmenge einer Lösung von Bengalrosa in Spiritus versetzt und gut geschüttelt (LUTZE 1964).

4.3. Probenaufbereitung

Eine achttägige Einwirkungszeit des Bengalrosas auf die Probe genügt, um später lebende von toten Foraminiferen eindeutig trennen zu können. Nach dieser Zeit wurde durch nasses Sieben die Sandfraktion 2mm-63µm abgetrennt und im Trockenschrank bei 80°C getrocknet. Das Sieben erfolgte mit warmem Leitungswasser, um eine Anlösung des Karbonates zu vermeiden. Die Foraminiferen konnten dann durch zweimaliges Konzentrieren mit Tetrachloräthylen vom Sediment getrennt werden.

Die Algen wurden nach ebensolanger Lagerungszeit auf einem 2mm-Sieb über einem 63µm-Sieb mit scharfem Wasserstrahl abgespült (WEFER 1976). Aus dem dadurch erhaltenen Material wurden auf gleichem Wege durch Trocknen und Konzentrieren die Foraminiferen herausgezogen.

Eine weitere Abtrennung der Gattungen *Elphidium* und *Ophthalmina* vom Konzentrat und eine Aufteilung in lebende und tote Exemplare mit Hilfe des Farbunterschiedes weiß-rosa erfolgte durch Auslesen mit einem feuchten Pinsel unter dem Binokular. Eine Berührung mit angefetteter Nadel ist zu vermeiden, da solche Objekte für die Untersuchung im REM nicht sauber bedampft werden können.

4.4. Oxidation

Zur Oxidation organischer Stoffe stehen Wasserstoffperoxid (H_2O_2) und Chlorbleichlauge (Natriumhypochlorit, NaClO) zur Verfügung. Bei Anwendung von H_2O_2 ist p.A. zu verwenden, da das technische H_2O_2 Phosphorsäure zur Stabilisierung enthält. Diese würde bereits bei der Oxidation die Schale anlösen.

In vergleichenden Experimenten wurden die besten Ergebnisse in einer 12-stündigen Behandlung mit Chlorbleichlauge erzielt.

Alle Foraminiferen wurden nach dem Auslesen 10 Minuten mit Ultraschall behandelt, um feinste Sedimentpartikel, die fast immer mit der organischen Matrix verklebt waren und später die Wägung verfälschen würden, abzulösen. Die im Sediment lebende Foraminifere *Elphidium incertum* findet man häufig sogar mit einer zusätzlichen Hülle aus Sandkörnern (Sandzelt).

4.5. Anlösung

Zur Darstellung einzelner Schritte des Zerfalls mußten die Foraminiferenschalen nach der Oxidation in unterschiedlichen Zeitintervallen einem Lösungsmittel ausgesetzt werden. Hierzu wurden verschiedene Methoden getestet.

Verdünnte Essigsäure und eine pH 6-Pufferlösung erbrachten eine zu schnelle und unkontollierte Zerstörung der Schale. Die Lösung erfolgte weitgehendungeachtet der Ultrastruktur, und durch Bläschenbildung besteht zusätzlich die Gefahr einer nicht gewünschten mechanischen Zerstörung.

Eine Anlösung durch destilliertes Wasser (pH 6,5) ist möglich, jedoch recht langwierig. Ein Experiment zeigte, daß eine Lösungsreihe bis zur vollständigen Zersörung der Schale mehrere Tage dauern würde. Dies ist ungünstig, da innerhalb dieser Zeit ständig auf gleiche Bedingungen im Lösungsmilieu geachtet werden muß.

In der Literatur findet man stellenweise bei Experimenten zur Untersuchung der Schalenstrukturen die Verwendung von T itriplex als Lösungsmittel (MURRAY & WRIGHT 1970). Titriplex (Reagenznahme der Firma Merck) ist das Dinatriumsalz der Äthylendinitrilotetraessigsäure. Das weiße Pulver ist in Wasser leicht löslich und dient zur Tiration von Metallionen. Titriplex bildet mit den Ionen, in diesem Fall mit Ca^{2+} undissoziierte Chelatkomplexe und entzieht sie so der Lösung. Das Lösungsgleichgewicht wird zu ungunsten des $CaCO_3$ gestört, so daß ständig neue Ca^{2+}- und CO_3^{2-}-Ionen in Lösung gehen müssen, solange Liganden vorhanden sind. Die Schale geht somit zuerst an durch die Struktur prädestinierten Stellen in Lösung, sodaß die Morphologie der Lösungsstrukturen ein Abbild der Schalenstruktur wird. Von verschiedenen Konzentrationen erbrachte eine 0,01 molare Titriplex-Lösung gute Ergebnisse und einen kontollierbaren Lösungsverlauf. Bei dieser Konzentration ist eine Foraminifere nach etwa zwei Stunden vollständig aufgelöst.

Die einzelnen Zerfallsstadien lassen sich daher gut in Lösungsintervallen von mehreren Minuten erfassen.

4.6. Präparation für das Rasterelektronenmikroskop

Aus jeder Probe des Hausgartenprofils wurden 20 tote Exemplare für die REM-Präparation ausgewählt, um den natürlichen Zerfall zu studieren und wassertiefenabhängige Lösungsunterschiede herauszufinden. Bei allen Untersuchungen wurden immer mehrere Schalen einer bestimmten Wassertiefe oder eines Lösungsintervalls fotografiert, da nie alle Schalen die charakteristischen Erscheinungen gleich gut ausgebildet zeigen. Von den behandelten Schalen konnten fünf Exemplare ausgewählt und, nach einer weiteren Spülung mit Spiritus, auf REM Objektträger gebracht werden. Dies erfolgte mit Hilfe von Fotopapier, das mit zweiseitig klebendem leitendem Klebeband auf den Objektträgern befestigt war. Die Gelatineschicht des Fotopapiers hält, nachdem sie zuvor mit einem Wassertropfen leicht eingeweicht wurde, nach dem Eintrocknen die Foraminifere auf dem Objektträger fest. Diese Präparate konnten nach einer zweifachen Bedampfung mit Kohle und Gold/Palladium unter dem REM untersucht werden.

Die Arbeiten wurden mit einem Rasterelektronenmikroskop "Cambridge S 150" durchgeführt. Aufnahmen bis 5000-facher Vergrößerung wurden mit 60 sec, ab 5000-fach mit 125 sec auf einen "Agfapan 25 professional" belichtet.

Für den größten Teil der Untersuchungen reichte die übliche Beschleunigungsspannung von 10 kV, für hohe Vergrößerungen, wie sie meist bei Beobachtungen an *Ophthalmina kilianensis* notwendig waren, wurden jedoch 20 kV verwandt, da durch die höhere Spannung eine bessere Bildschärfe bei hohen Vergrößerungen möglich ist.

Die herausragenden Enden von Kristalliten erscheinen auf einigen Fotos weiß (z.B. Taf.12, Fig.4), da sie durch ihre exponierte Stellung eine hohe Ausbeute an Sekundärelektronen liefern.

Horizontale Streifung durch Helligkeitsunterschiede im Bild wird durch kleinräumige Aufladung des Objektes hervorgerufen. Solche Fehler treten auf, wenn eine vollständige Bedampfung in tiefliegenden Hohlräumen nicht stattgefunden hat.

5. EXPERIMENTE: Durchführung und Ergebnisse

Aus verschiedenen Gründen wurden an beiden im natürlichen Milieu beobachteten Foraminiferengattungen auch experimentelle Lösungsversuche unternommen:

1) Bestimmung der quantitativen Verteilung der organischen Matrix innerhalb der Schale
2) Darstellung einer lückenlosen Fragmentierungsreihe
3) Einblick in den ultrastrukturellen Aufbau der Schale
4) Bestimmung des Gewichtsverlustes durch Anlösung zum Vergleich mit natürlichen Lösungsstadien
5) Aufschluß über die natürlichen Lösungsvorgänge durch Vergleich mit dem Experiment

5.1. Oxidation des organischen Materials

Die Schale und die einzelnen Bausteine einer Foraminifere werden vom Protoplasma der lebenden Zelle umhüllt. Dieses vom Bengalrosa rot gefärbte Material ist bei toten Exemplaren meist natürlich oxidiert und läßt eine Beobachtung der Schale im REM ohne weitere Vorbehandlung zu. Bei lebenden Organismen verdeckt diese Hülle jedoch den Schalenaufbau und die Ultrastrukturen und schützt auch das Karbonat vor kurzzeitiger Anlösung. Um Strukturen der Schale sichtbar zu machen und die einzelnen Schritte eines Zerfalls nachvollziehen zu können, muß das Protoplasma also zuerst oxidiert werden.

Zur Untersuchung des Oxidationsverlaufes und der Bestimmung des prozentualen Gewichtsanteils der organischer Matrix an der gesamten Foraminifere wurden je zehn Exemplare auf ± 2 µg genau gewogen und in unterschiedlichen Zeitintervallen (Tab. 1) mit Chlorbleichlauge behandelt. Nach der Oxidation und einem gründlichen Waschvorgang, der notwendig ist, um eine Kristallisation von Natriumchloritkristallen auf den Schalen zu verhindern, konnte durch erneutes Wiegen der Gewichtsverlust bestimmt und in Prozent errechnet werden.

In einem Diagramm (Abb. 5) wurden Gewichtsverlust in Prozent gegenüber der Oxidationszeit aufgetragen. Als Kurve zeigt sich eine Parabel mit Annäherung für lange Oxidationszeiten an den 30 %-Wert. Zu Beginn verläuft die Oxidation sehr schnell, da die äußere organische Hülle auf Grund ihrer guten Zugänglichkeit leicht zerstört werden kann. Einige Exemplare verloren bei den Versuchen bereits nach zehn Minuten ihre rote Farbe. Bei anderen dauerte es bis zu zehnmal so lange, ein Zeichen

für eine unterschiedlich starke Ausbildung der äußeren Hülle. Schwankungen, die hierdurch in den Meßwerten hätten einstehen können, wurden durch die Verwendung mehrerer Exemplare ausgeglichen.

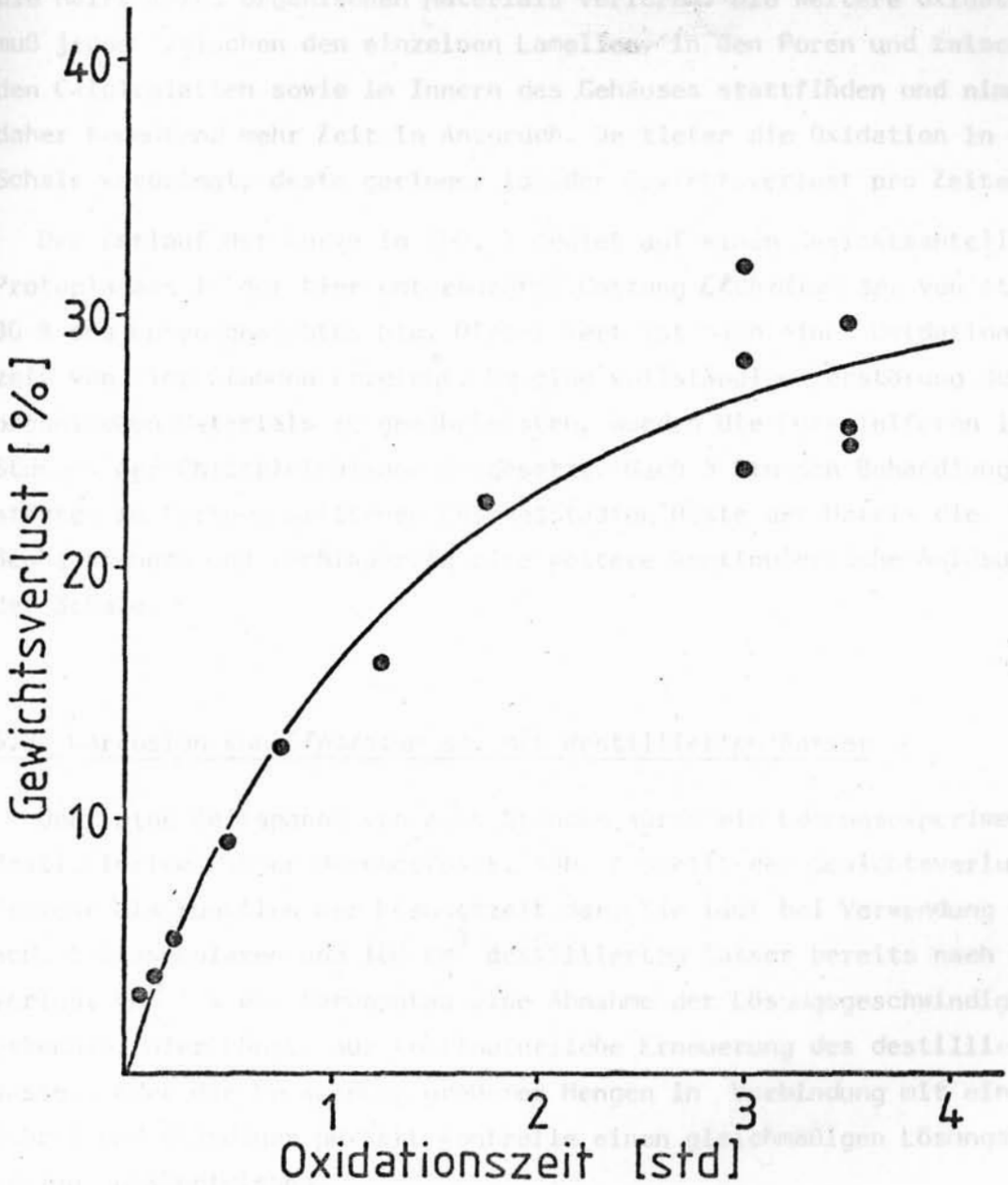


Abb. 5: Abhängigkeit des Gewichtsverlustes an organischer Matrix von der Oxidationszeit bei *Elphidium sp.*

Die nur noch fleckenhaft bedeckte Oberfläche verschiedener Objekte nach relativ kurzen Oxidationszeiten (5-15 min) weist auch auf eine ungleichmäßige Verteilung des organischen Material auf der Schale hin (Taf.14, Fig.5+6). Beide Abbildungen lassen die unregelmäßige Dicke und Verteilung der schwach oxidierten Matrix erkennen. Stellenweise ist die

Karbonatschale zu erkennen, andere Bereiche sind noch von einer dicken Matrixschicht verhüllt (Fig.6).

Nimmt man an, daß bei 30 % Gewichtsverlust das gesamte Protoplasma zerstört ist, so hat die Foraminifere bereits nach einer Stunde über die Hälfte ihres organischen Materials verloren. Die weitere Oxidation muß jedoch zwischen den einzelnen Lamellen, in den Poren und zwischen den Calcitplatten sowie im Innern des Gehäuses stattfinden und nimmt daher bedeutend mehr Zeit in Anspruch. Je tiefer die Oxidation in die Schale vordringt, desto geringer ist der Gewichtsverlust pro Zeiteinheit.

Der Verlauf der Kurve in Abb. 5 deutet auf einen Gewichtsanteil des Protoplasmas in der hier untersuchten Gattung *Elphidium sp.* von etwa 30 % des Lebendgewichtes hin. Dieser Wert ist nach einer Oxidationszeit von vier Stunden erreicht. Um eine vollständige Zerstörung des organischen Materials zu gewährleisten, wurden die Foraminiferen 12 Stunden der Chlorbleichlauge ausgesetzt. Nach 5 Stunden Behandlungszeit störten in fortgeschrittenen Lösungsstadien Reste der Matrix die Beobachtungen und verhinderten eine weitere kontinuierliche Anlösung der Schale.

5.2. Korrosion von *Elphidium sp.* mit destilliertem Wasser

Über eine Zeitspanne von acht Stunden wurde ein Lösungsexperiment mit destilliertem Wasser durchgeführt. Abb. 6 stellt den Gewichtsverlust in Prozent als Funktion der Lösungszeit dar. Sie läßt bei Verwendung von acht Testexemplaren und 100 cm^3 destilliertem Wasser bereits nach einem Verlust von 8 % des Karbonates eine Abnahme der Lösungsgeschwindigkeit erkennen. Hier könnte nur kontinuierliche Erneuerung des destillierten Wassers oder die Verwendung größerer Mengen in Verbindung mit einem Rührer und ständiger pH-Wert Kontrolle einen gleichmäßigen Lösungsverlauf gewährleisten.

5.3. Korrosion von *Elphidium sp.* mit Titriplex

5.3.1. Bestimmung des Gewichtsverlustes

Ähnlich dem vorangegangenen Experiment wurden jeweils acht Foraminiferen gewogen, gemeinsam einem Lösungsintervall unterzogen und nach einem Waschvorgang wiederum gewogen. Der Gewichtsverlust in Prozent

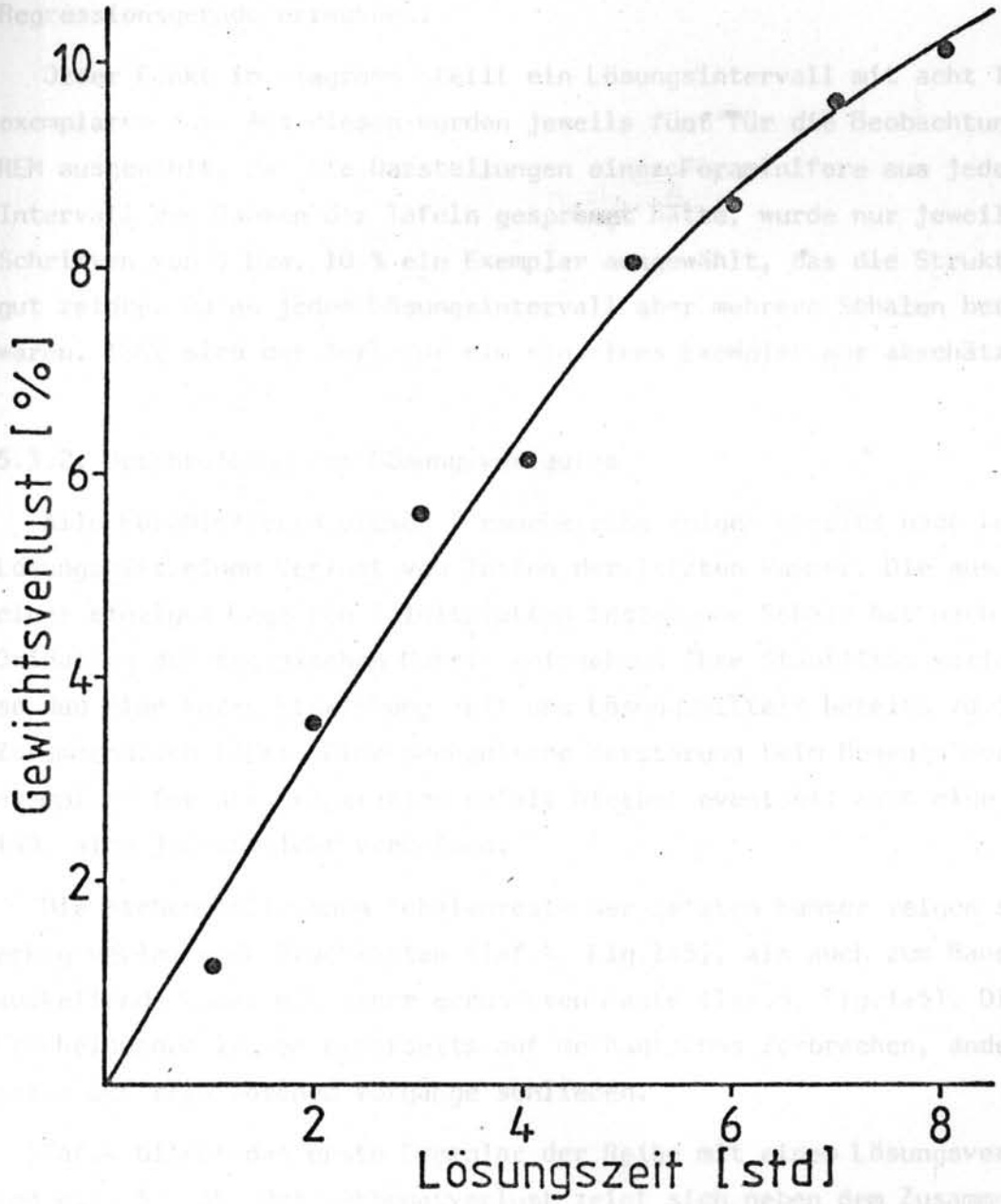


Abb. 6: Abhängigkeit des Gewichtsverlustes von der Lösungszeit bei Behandlung mit destilliertem Wasser (*Elphidium sp.*)

wurde gegen die Lösungszeit in einem Diagramm aufgetragen, die Dauer der Lösungsintervalle sind aus Tabelle 3 zu ersehen.

Der steile Anstieg der im weiteren Verlauf flacheren und linearen Kurve zeigt innerhalb der ersten fünf Minuten einen Lösungsverlust von 15 % (Abb. 7). Dies ist auf den, auch aus den Tafeln ersichtlichen, sehr schnellen Verlust der letzten Kammer zurückzuführen (Taf.4, Fig. 1+5, Taf.5, Fig.1+5). Auch nach nur geringer Anlösungszeit zerfällt die dünne Schale, da sie nur aus einer Lamelle aufgebaut ist.

Für die Werte von 20-75 % Gewichtsverlust wurde die dargestellte Regressionsgerade errechnet.

Jeder Punkt im Diagramm stellt ein Lösungsintervall mit acht Testexemplaren dar. Aus diesen wurden jeweils fünf für die Beobachtungen im REM ausgewählt. Da die Darstellungen einer Foraminifere aus jedem Intervall den Rahmen der Tafeln gesprengt hätte, wurde nur jeweils in Schritten von 5 bzw. 10 % ein Exemplar ausgewählt, das die Strukturen gut zeigte. Da an jedem Lösungsintervall aber mehrere Schalen beteiligt waren, läßt sich der Wert für ein einzelnes Exemplar nur abschätzen.

5.3.2. Beschreibung des Lösungsverlaufes

Alle Foraminiferen dieser Versuchsreihe zeigen bereits nach kurzer Lösungszeit einen Verlust von Teilen der letzten Kammer. Die aus nur einer einzigen Lage von Calcitplatten bestehende Schale hat nach der Oxidation der organischen Matrix weitgehend ihre Stabilität verloren, so daß eine kurze Einwirkungszeit des Lösungsmittels bereits zu ihrem Zusammenbruch führt. Eine mechanische Zerstörung beim Bewegen der Testexemplare für die Präparation spielt hierbei eventuell auch eine Rolle, läßt sich jedoch nicht vermeiden.

Die stehengebliebenen Schalenreste der letzten Kammer zeigen sowohl eckig verlaufende Bruchkanten (Taf.4, Fig.1+5), als auch zum Rand hin auskeilende Wände mit einer gerundeten Kante (Taf.5, Fig.1+5). Diese Erscheinungen lassen einerseits auf mechanisches Zerbrechen, andererseits auf rein lösende Vorgänge schließen.

Taf.4 bildet das erste Exemplar der Reihe mit einem Lösungsverlust von etwa 5 % ab. Der Karbonatverlust zeigt sich neben dem Zusammenbruch der letzten Kammer in einer Verbreiterung der Suturen nach außen hin und in einer beginnenden Herauspräparierung der einzelnen Kristallite. Eine Vorzugsorientierung der c-Achsen (TOWE & CIFELLI 1967) innerhalb einer Kristalleinheit ist bereits zu erkennen. Zur Verdeutlichung zeigt eine schematische Zeichnung (Abb. 8) die Lage der Kristallite.

Die fortschreitende Auflösung der Schalenoberfläche zeigt die Foraminifere von Fig. 5-8. Bei einem Gewichtsverlust von 10 % ist die jüngste Schale bereits stark abgebaut. Die Plattengrenzen sind an einigen Stellen deutlich herauspräpariert, andere Bereiche sind so stark angelöst, daß die ursprüngliche Form der einzelnen Kristalleinheiten nur noch an der darunterliegenden zu erkennen ist. Die Umrisse

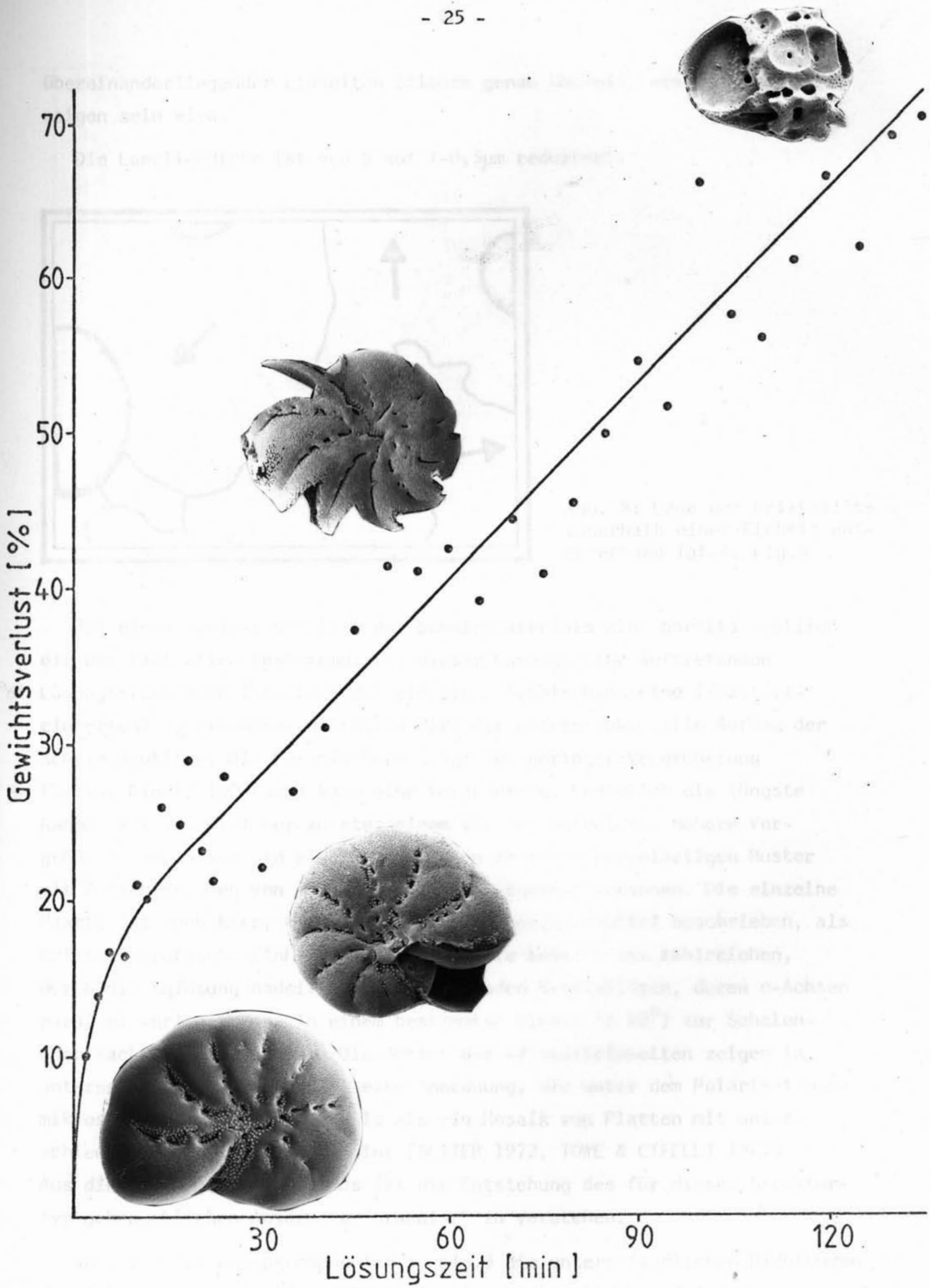


Abb. 7: Abhängigkeit des Gewichtsverlustes von der Lösungszeit bei Behandlung mit Titriplex (*Elphidium sp.*)

übereinanderliegender Einheiten stimmen genau überein, wie später noch zu zeigen sein wird.

Die Lamellendicke ist von 5 auf 1-0,5µm reduziert.

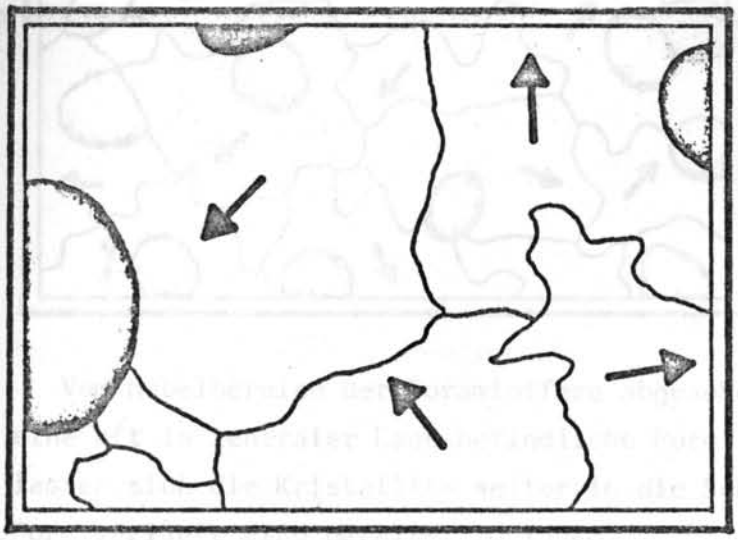


Abb. 8: Lage der Kristallite innerhalb einer Einheit entsprechend Taf.4, Fig.4

Bei einem Verlust von 15 % des Schalenmaterials sind bereits deutlich die bei fast allen Testexemplaren dieser Lösungsreihe auftretenden Lösungsstrukturen innerhalb der einzelnen Schalenbausteine (Kristalleinheiten) zu erkennen. Hierdurch wird der ultrastrukturelle Aufbau der Schale deutlich. Die Foraminifere zeigt bei geringer Vergrößerung (Taf.5, Fig.1, 100-fach) kaum eine Veränderung. Lediglich die jüngste Kammer ist vom Kiel her zu etwa einem Viertel aufgelöst. Höhere Vergrößerungen lassen die einzelnen Platten in einem puzzelartigen Muster mit Zwischenräumen von einigen Zehntel Mikrometer erkennen. Die einzelne Platte ist auch hier, wie schon im vorangehenden Kapitel beschrieben, als kristallografische Einheit zu erkennen. Sie besteht aus zahlreichen, durch die Anlösung nadelförmig erscheinenden Kristalliten, deren c-Achsen parallel verlaufen und in einem bestimmten Winkel ($\neq 90^{o}$) zur Schalenoberfläche stehen (Fig.4). Die Achsen der Kristalleinheiten zeigen in unterschiedliche Richtungen, eine Anordnung, die unter dem Polarisationsmikroskop bei gekreuzten Nicols als ein Mosaik von Platten mit unterschiedlichen Grautönen erscheint (SLITER 1972, TOWE & CIFELLI 1967). Aus dieser Beobachtung heraus ist die Entstehung des für diesen Strukturtyp gebräuchlichen Ausdrucks "granular" zu verstehen.

Abb. 9 zeigt entsprechend Taf.5, Fig.3 die unterschiedlichen Richtungen der Achsen jeder einzelnen Platte in einer schematischen Zeichnung. Die Winkel zwischen Achse und Schalenoberfläche lassen sich im Foto nicht bestimmen.

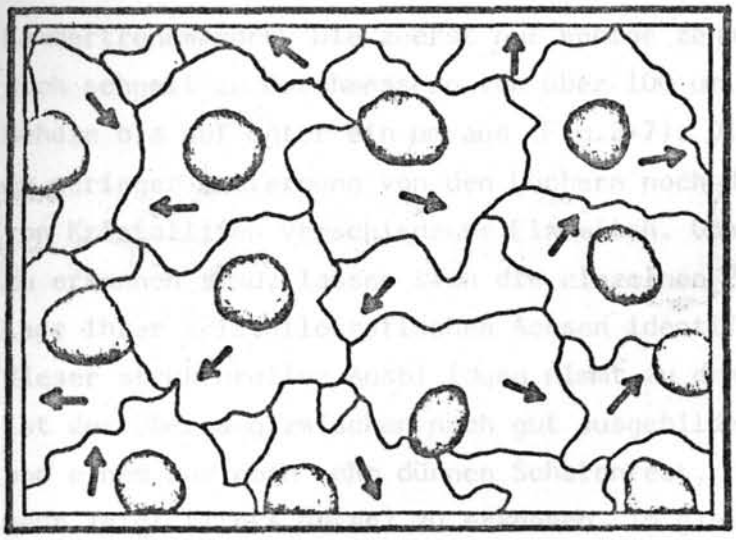


Abb. 9: Lage der Kristallite entsprechend Taf. 5, Fig. 3

Vom Nabelbereich der Foraminifere abgesehen, besitzt fast jede Platte eine oft in zentraler Lage befindliche Pore. Am Innenrand einer Pore lassen sich die Kristallite weiter in die Schale hinein verfolgen, die Pore verläuft also parallel zu ihnen.

Da ein einzelnder Kristallit eine Länge von 5 µm und einen Durchmesser von etwa 0,2-0,3 µm hat, sind diese feinsten Strukturen erst bei Vergrößerungen ab 5000-fach gut zu beobachten. Trotzdem besteht auch mit dem Binokular die Möglichkeit, eine Anlösung, die einer Aufrauhung der Schale gleich kommt, nachzuweisen. Die bei unversehrten Exemplaren glänzende Oberfläche erscheint nach der Anlösung im Mikroskop matt.

Auf Taf.5, Fig.5 ist ein Viertel der gesamten Schalensubstanz aufgelöst. Dies läßt sich bei kleinen Vergrößerungen nicht erkennen, da die Foraminifere noch fast vollständig erhalten ist. Es ist jedoch zu bedenken, daß auf allen Kammern bereits mehrere Lamellen abgelöst sind. In der vorletzten Kammer fehlen größere Teile, und die Ausschnitte Fig.7+8 zeigen, daß die Dicke der folgenden Kammerwand kaum mehr als ein µm beträgt. Die Strukturen der angelösten Schale und der Schale kurz vor dem völligen Zusammenbruch unterscheiden sich. Die Kristallite wurden bis auf kleine Reste, die allerdings noch fest zusammensitzen, aufgelöst, die Plattengrenzen sind nur noch schwach zu erkennen. Da die Lösung wohl hauptsächlich von außen her wirksam ist, besitzt die Schale innen einen noch festeren Verband. Auch an dieser Kammer entstehen in der Kielregion bereits größere Löcher, ein Vorgang, dem eine Ausweitung der Poren vorrangeht (Fig.7 von links nach rechts).

Bei weiterer Anlösung erfolgt zuerst eine völlige Zerstörung der Schale im Kielbereich (Taf.6), abgesehen von kleinen Stegen über den

Kammertrennwänden. Die zuerst nur wenige zehn µm großen Löcher erweitern sich schnell zu Durchmessern von über 100 µm. An den Rändern dünnt die Schale bis auf unter ein µm aus (Fig.2+7). Die Ausschnitte Fig.4+3 zeigen in geringer Entfernung von den Löchern noch die unterschiedliche Lage von Kristalliten verschiedener Einheiten. Obwohl stellenweise keine Suturen zu erkennen sind, lassen sich die einzelnen Platten durch die einheitliche Lage ihrer kristallografischen Achsen identifizieren. Die Übersichtlichkeit dieser strukturellen Ausbi ldung nimmt zu den Löchern hin ab. In Fig.8 ist der Übergang zwischen noch gut ausgebildeten Kristalliten (rechts oben) und einem nur noch sehr dünnen Schalenrest, der keine Internstruktur mehr zeigt (links unten) zu erkennen. Im gleichen Verlauf nimmt die Breite der Suturen zwischen den Kristalleinheiten ab.

Bei einem Lösungsverlust von 45 % (Taf.7) weist die Foraminifere auch von oben deutliche Fehlstellen in der Schale auf. Die Auflösung schreitet keilförmig in Richtung zum Nabel hin fort. In diesem Stadium lassen sich auch häufig die von RESIG (1965) aus Ostseesedimenten beschriebenen Tapeten beobachten (Kap.3.3.). Die folgenden Exemplare wurden ausgewählt, da sie Reste dieser Tapeten erkennen lassen. Sie kleiden die Kammern von innen aus und beginnen bei Auflösung die letzten Lamelle an den Poren zu zerreißen. Fig.3 zeigt das erste Stadium dieses Vorganges bei noch relativ dicker Schale, an der die einzelnen Kristallite noch deutlich zu erkennen sind. Wird die Schale dünner, zerreißt die Tapete an immer mehr Poren, so daß eine vollständige Erhaltung nicht möglich ist. In Fig.4 erscheinen einige Poren bei bereits sehr dünner Schale noch verschlossen (Pfeil), die meisten jedoch frei von Tapeten.

Die vorsichtige Öffnung der Kammern durch die Anlösung ermöglicht einen Blick in ihr Innenleben. In Fig.5 sind Mündungen zu erkennen, die die Kammern untereinander verbinden. Bei einigen Exemplaren zeigte sich auch von innen her eine z.T gute Erhaltung der Tapeten. Auf den zwei Ausschnitten von Fig.6 findet man Teile davon auf einer der Septen (Fig.7), die Oberfläche einer sehr viel älteren Kammer der inneren Windung wird von ihnen verdeckt (Fig.8). Da diese Tapeten nur selten und in unterschiedlicher Erhaltung gefunden wurden, müssen sie entweder verschieden stark ausgebildet gewesen sein oder aber stellenweise bei der Oxidation mit Chlorbleichlauge unzugänglich gelegen haben. Dies könnte besonders in den inneren Bereichen der Schale der Fall gewesen sein.

So finden sich auch in Taf.8, Fig.1-4 noch Reste organischen Materials auf den Wänden der inneren Kammer. Die äußere Windung, bestehend aus etwa zehn Kammern, ist hier bis auf kleine randliche Septenteile ver-

schwunden, womit über die Hälfte des Karbonates gelöst ist. Auf diesen Septenteilen sitzt stellenweise noch reichlich organisches Material (Fig.5-8), von dem hier allerdings nicht eindeutig gesagt werden kann, ob es sich um Tapeten oder um Reste von Protoplasma handelt. Es ist jedoch anzunehmen, daß auf Grund ihrer bedeutend höheren Resistenz nur die Tapeten eine mehrstündige Behandlung mit Chlorbleichlauge überdauert haben.

Nachdem drei Viertel des Karbonates aufgelöst sind, bleibt von den Foraminiferen nur noch ein kleiner harter Kern übrig. Er besteht aus den innersten und ältesten Kammern, die bei einer Größe von 50-100 µm eine dicke Schale aus bis zu einem Dutzend Lamellen besitzen und daher eine große Widerstandsfähigkeit aufweisen (Taf.9). In Fig.2 erkennt man, daß auch diese Kammern vom Kiel her aufgelöst werden und hier bereits große Löcher zeigen, obwohl in Nabelnähe noch fast alle Lamellen erhalten sind.

In Fig.3 fällt auf, daß besonders Schalenteile ohne Poren besser der Lösung widerstehen konnten. Da die Auflösung immer vom Kiel aus in Richtung Nabel erfolgt, ist die Geschwindigkeit des Schalenzerfalls offensichtlich abhängig von Größe und Anzahl der Poren, denn besonders der Kielbereich von *Elphidium sp.* weist eine dichte Verteilung von etwa 2 µm großen Poren auf (Taf.6, Fig.1). Anzahl und Größe der Poren nimmt zum Nabel hin und im Bereich der septalen Laschen ab. Da die Poren durch alle Lamellen hindurchgehen (Taf.9,Fig.7), besteht in Ausschnitten höherer Porendicht für das Lösungsmittel eine bessere Möglichkeit die Schale zu zerstören. Mehr Poren bedeuten größere Oberfläche und somit größere Angriffsfläche.

Bei den letzten Exemplaren dieser Versuchsreihe mit 75 % Lösungsverlust existieren nur noch die innersten Teile der ältesten Kammern um den Nabel. Die Verbindungen der Kammern untereinander wird nur noch durch eine Mündung hergestellt (Fig.6). In Taf.7, Fig.5 waren es bei den jüngeren und um ein Vielfaches größeren Kammern vier Mündungen.

Bei genauerer Betrachtung der Kammerränder wird deutlich, wie oft hier eine neue Lamelle aufgebaut wurde (Fig.6+7). Die Fig.4+8 von Taf.9 zeigen in einem schräg zur Schalenoberfläche verlaufenden Schnitt, entstanden durch die Anlösung, mehrere sowohl räumlich als auch zeitlich übereinanderfolgende Schalen, die ältesten von der Foraminifere gebildeten überhaupt. Bei Betrachtung der Poren findet man eine exakte Fortsetzung durch alle Schalen hindurch bis ins Kammerinnere. Verfolgt man die Umrisse der Calcitplatten mehrerer übereinanderliegender Schichten

im Profil, so stellt man fest, daß auch diese exakt mit den vorhergehenden übereinstimmen, also vertikal in gleicher Form durch alle Generationen von Lamellen hindurch verlaufen. Eine neu gebildete Lamelle ist ein exaktes Abbild der darunterliegenden älteren, sowohl ensprechend der Porenlage als auch der Form und Größe der Kristalleinheiten. Nach Fig.8 erscheinen auch die kristallografischen Orientierungen der Kristallite übereinzustimmen. Dies läßt sich jedoch nicht genau feststellen, da in keinem in dieser Weise ausgebildete Schalenprofil die Kristallite noch sauber durch Lösung herauspräpariert sind.

Die scheinbare Verkleinerung der einen Platte mit gleichzeitiger Vergrößerung der benachbarten in Wachstumsrichtung in Fig.8 wird durch den schrägen Anschnitt der Kammerwand hervorgerufen. Auch bei der Plattenverkleinerung in Fig.4 zum rechten Bildrand hin handelt es sich um einen Anschnitteffekt. Einige Poren sind hier noch mit Resten von Protoplasma verfüllt.

Stabilität erhält dieser zuerst sehr brüchig erscheinende Aufbau durch ein kompliziertes kleinräumiges Ineinandergreifen der einzelnen Teile, sowohl an den horizontalen, wie an den vertikal verlaufenden Suturen. In der Literatur wird für Schalenstrukturen häufig der Begriff "Puzzel" verwendet. Dies bezieht sich jedoch in allen Fällen nur auf die zweidimensionale Anordnung der Platten, läßt sich aber auch auf ihren dreidimensionalen Aufbau anwenden.

Die aus gleichförmigen Bausteinen bestehenden Stapel von Kristalleinheiten lassen sich auf Grund ihrer Verzahnung nicht gegeneinander verschieben. Durch die gebogene und somit in sich geschlossene Wand wird auch eine Verschiebung der einzelnen Schalen untereinander verhindert, so daß, lebend noch in Verbindung mit der organischen Matrix, als komplexes Ganzes ein Gehäuse mit hoher chemischer und mechanischer Resistenz vorliegt.

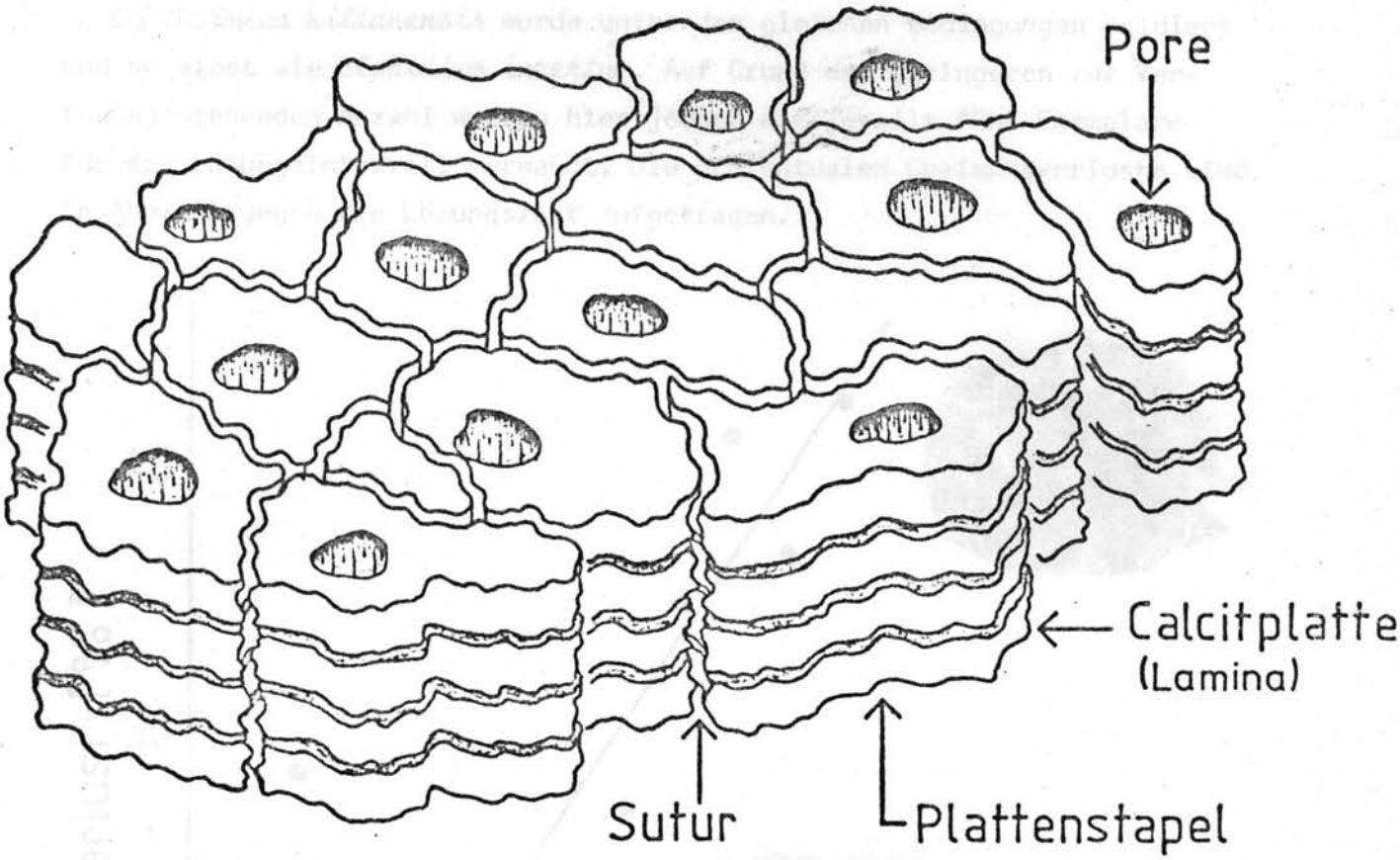


Abb. 10: Schematische Zeichnung zum Aufbau der Schale von *Elphidium sp.*
Die Calcitplatten ergeben in horizontaler Anordnung eine Lamina, der gezeichnete Schalenausschnitt wird von vier Laminae gebildet. Jede Calcitplatte besteht wiederum aus zahlreichen, schräg zur Schalenoberfläche orientierten Einzelkristalliten mit gleicher optischer Orientierung.
Die Verzahnung der horizontalen und vertikalen Suturen ist aus Übersichtsgründen stark vereinfacht gezeichnet.
Die Poren verlaufen innerhalb eines Plattenstapels durchgehend und parallel zu den Kristalliten.
Suturen und Poren sind im Lebendstadium mit organsicher Substanz ausgefüllt.

5.4. Korrosion von *Ophthalmina* mit Titriplex

5.4.1. Bestimmung des Gewichtsverlustes

Ophthalmina kilianensis wurde unter den gleichen Bedingungen oxidiert und angelöst wie *Elphidium incertum*. Auf Grund der geringeren zur Verfügung stehenden Anzahl wurden hier jedoch nur jeweils fünf Exemplare für ein Lösungsintervall verwandt. Die prozentualen Gewichtsverluste sind in Abb. 11 gegen die Lösungszeit aufgetragen.

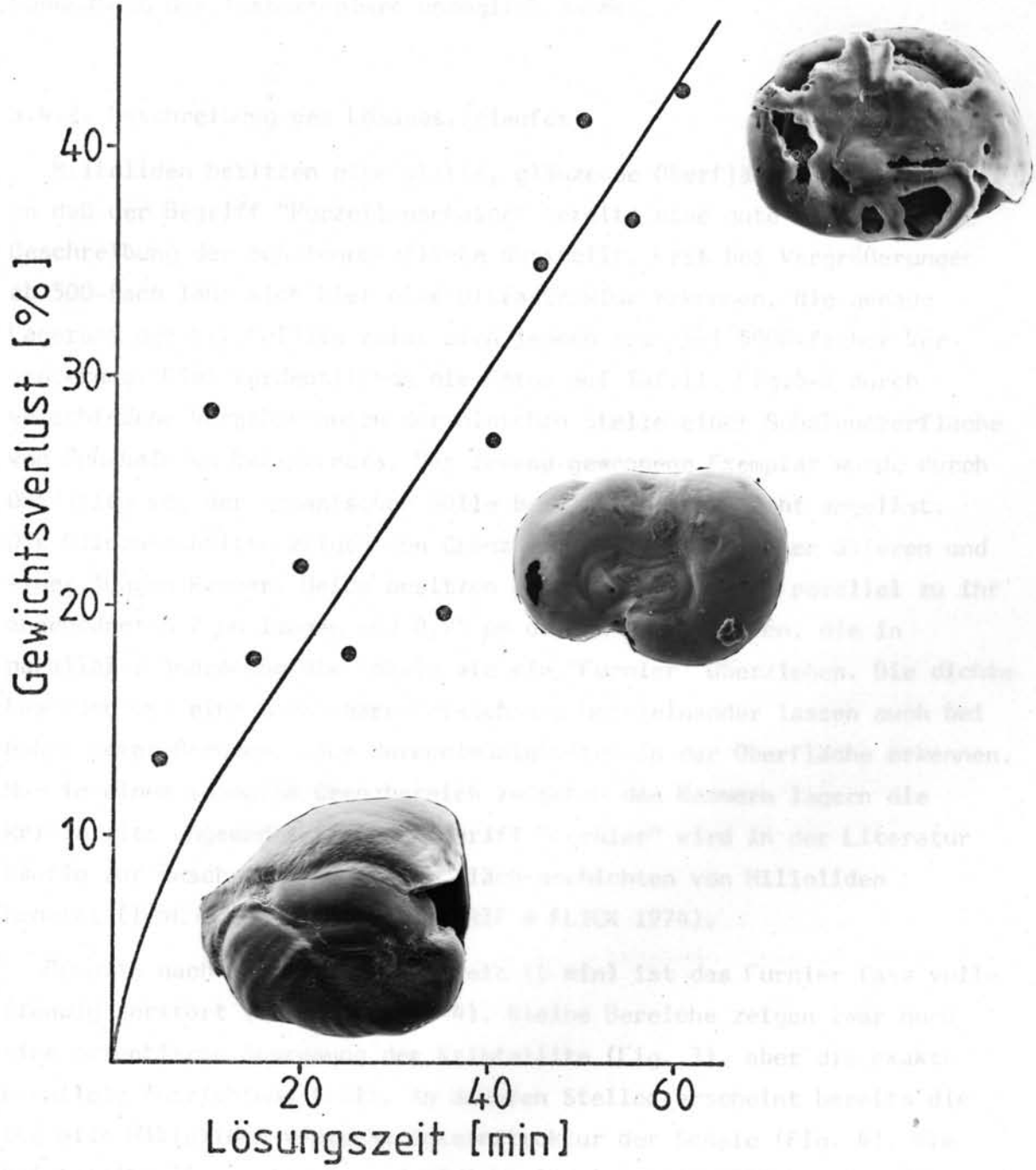


Abb. 11: Gewichtsverlust der Miliolidenschalen (*Ophthalmina kilianensis*) bei Behandlung mit Titriplex

Die Kurve in Abb. 11 zeigt im Hauptteil einen linearen Verlauf, zeichnet sich aber, wie bei der Anlösung von *Elphidium incertum*, durch eine höhere Steigung am Anfang aus. Der Schnittpunkt der Regressionsgeraden mit der x-Achse bei etwa 5 % und die starken Schwankungen der Werte um die Gerade, insbesondere des Prozentwertes für zehn Minuten, sind auf eine schwierige Handhabung der oxidierten und angelösten Milioliden zurückzuführen. Vereinzelt brachen beim Bewegen der Schalen winzige Teile ab, wodurch später die Werte leicht verfälscht wurden. Aus diesem Grund wurde die Lösungsreihe nach 60 Minuten beendet, da eine weitere Verdünnung der Schale eine Handhabung der Testexemplare unmöglich machte.

5.4.2. Beschreibung des Lösungsverlaufes

Milioliden besitzen eine glatte, glänzende Oberfläche ohne Poren, so daß der Begriff "Porzellanschaler" bereits eine gute lichtoptische Beschreibung der Schalenoberfläche darstellt. Erst bei Vergrößerungen ab 500-fach läßt sich hier eine Ultrastruktur erkennen, die genaue Lagerung der Kristallite zeigt sich jedoch erst bei 5000-facher Vergrößerung. Dies verdeutlichen die Fotos auf Taf.11, Fig.5-8 durch verschiedene Vergrößerungen der gleichen Stelle einer Schalenoberfläche von *Ophthalmina kilianensis*. Das lebend gewonnene Exemplar wurde durch Oxidation von der organischen Hülle befreit, jedoch nicht angelöst. Die Bildausschnitte zeigen den Grenzbereich zwischen einer älteren und einer jungen Kammer. Beide besitzen eine Oberfläche aus parallel zu ihr angeordneten 2 µm langen und 0,25 µm dicken Kristalliten, die in paralleler Anordnung die Schale wie ein "Furnier" überziehen. Die dichte Lagerung und eine scheinbare Verwachsung untereinander lassen auch bei hohen Vergrößerungen kaum Unregelmäßigkeiten in der Oberfläche erkennen. Nur in einem schmalen Grenzbereich zwischen den Kammern lagern die Kristallite ungeordneter. Der Begriff "Furnier" wird in der Literatur häufig zur Beschreibung von Oberflächenschichten von Milioliden benutzt (TOWE & CIFELLI 1967, CHERIF & FLICK 1974).

Bereits nach kurzer Anlösungszeit (5 min) ist das Furnier fast vollständig zerstört (Taf.12, Fig.1-4). Kleine Bereiche zeigen zwar noch eine orientierte Anordnung der Kristallite (Fig. 3), aber die exakte parallele Ausrichtung fehlt. An anderen Stellen erscheint bereits die für alle Milioliden typische Internstruktur der Schale (Fig. 4), die Kristallite liegen in einer dreidimensionalen willkürlichen Anordnung, die keine Orientierung mehr erkennen läßt. Fast die gesamte Schale ist

in Form dieser Struktur aufgebaut, bis auf die beschriebene Oberfläche und eine weitere zweidimensional angeordnete Kristallitlage, die die Kammern im Innern auskleidet.

Nach einer längeren Anlösungszeit von etwa 45 Minuten zeigt die Schale große Löcher, hat also einen beträchtlichen Anteil des Karbonates verloren (Taf.12, Fig.5). Fig.6+7 bilden den Grenzbereich zweier Kammern im Nabelbereich der Foraminifere ab, der sich durch eine Kristallvergröberung auszeichnet. Die verfilzte Anordnung der Kristallite weist im tieferen Teil der Schale eine sehr lockere Lagerung auf. Es entsteht hierdurch im Vergleich zu den dicht unter der Oberflächenschicht liegenden Bereichen eine noch höhere Porosität der Schale (Fig.4+8).

Auf Taf.12 zeigt Fig.1 einen Gewichtsverlust von etwa 5 %, Fig.5 fehlen 30 % des Karbonates. Die Werte sind ungenau, da durch Zerbrechen der angelösten Schalen beim Transport Fehler beim Wiegen entstanden. Bei einer lebenden *Ophthalmina* ist die Schale nur etwa 10 µm dick und besteht nicht, wie bei *Elphidium*, aus mehreren Lamellen. Die Kammern können eine Längevon einigen 100 µm erreichen und verlieren auch dadurch an Stabilität. Eine festere Schale ist für diese Gattung jedoch nicht notwendig, da sie angeheftet an Algen lebend, keiner mechanischen Zerstörung ausgesetzt ist.

5.5. Vergleich der Lösungsverläufe

Die Lösungsverläufe von *Ophthalmina kilianensis* und *Elphidium incertum* ergeben im Vergleich bei beiden eine lineare Abhängigkeit zwischen Gewichtsverlust und Lösungszeit. Dies stimmt mit Beobachtungen von BE, MORSE & HARRISON (1975) überein, die *Globorotalia truncatulinoides* in Intervallen von mehreren Tagen bis zu zwei Wochen lang untersättigtem Meerwasser aussetzten und hierbei einen Gewichtsverlust von 80 % erreichten.

Die Steigungen der Regressionsgeraden, als ein Maß für die Lösungsgeschwindigkeit, sind unterschiedlich. Sie betragen für *Ophthalmina 1,6* und für *Elphidium 1,0*, die Milioliden werden also schneller gelöst. Ihre Schale besteht aus hoch-Mg-Calcit mit 10-12 % Mg und ist daher leichter löslich als das Karbonat der Rotaliiden-Schale mit höchstens 3 % Mg.

6. NATÜRLICHE FRAGMENTIERUNG

6.1. Fragmentierung von *Elphidium sp.*

Die Zerstörung von *Elphidium*-Schalen verläuft unter natürlichen Bedingungen in unterschiedlichen, von der Wassertiefe abhängigen Vorgängen ab. Unter "Zerfall" wird im Folgenden die Art der Fragmentierung verstanden, bei der Teile der Schale nur durch Lockerung des Schalengefüges ohne weiteren mechanischen Angriff auseinanderfallen.

6.1.1. Korrosion und Zerfall von *Elphidium sp.*

Die Schale einer lebenden Foraminifere wird, ebenso wie jeder einzelne Schalenbaustein, von einer organischen Matrix umhüllt, die eine Beobachtung der Schalenstrukturen unmöglich macht (Taf.1, Fig.1-4). Nach dem Absterben der lebenden Zelle erfolgt am Meeresboden eine rasche bakterielle Oxidation des organischen Materials. Dieser Vorgang hat bei dem Exemplar in Fig.5-8 bereits statt gefunden. Die Oxidation muß gerade abgeschlossen sein, denn die Karbonatschale ist noch vollständig erhalten. Nur stellenweise läßt eine leicht unregelmäßige Oberfläche der Calcitplatten erste Anzeichen von Anlösung erkennen (Fig.8). Durch die Oxidation wurden die Hohlräume zwischen den einzelnen, die Schale aufbauenden Platten herauspräpariert. Im Lebendstadium des Organismus sind diese, im Folgenden als Suturen bezeichneten Zwischenräume ebenfalls mit organischer Matrix verfüllt, die Platten"schwimmen" also in ihr. Durch den Verlust der Matrix werden die puzzelartig ineinandergreifenden Teile in ihrem Verband gelockert, und die Schale beginnt zu zerfallen. Die abgebildeten Exemplare stammen aus 23 m Wassertiefe, in der nur geringe Wasserbewegung herrscht. Einem Zerfall muß daher eine Ausweitung der Suturen durch Lösung vorrangehen. Erst dadurch verlieren die miteinander verzahnten Platten ihren Halt und beginnen "abzufallen" (Taf.2, Fig.2+3).

Da *Elphidium sp.* beim Anbau einer neuen Kammer immer das gesamte Gehäuse mit einer neuen Lamelle versieht (HANSEN & REISS 1971), bestehen besonders die inneren und älteren Kammern aus zahlreichen Lagen von etwa 2 µm dicken Calcitplatten, die jede einzelne Lamelle aufbauen (Taf.3, Fig.2+3).

Im zweiten Stadium des natürlichen Zerfalls beginnt zuerst die oberste und jüngste Schale sich in einzelnen Platten abzulösen. Im Schalenanbruch ist an den Plattenrändern bereits eine zum Teil schräg verlaufende prismatische Internstruktur zu erkennen (Taf.2, Fig.3). Die darunter-

liegende zweite Schale ist bis auf leichte Anlösungserscheinungen noch unversehrt (Fig.4). Die 2-10 µm großen Platten tragen zuerst in geringem Maße zur Sedimentbildung bei, werden jedoch, wie in Kap.2.2. gezeigt, zum größten Teil auf und in den obersten Zentimetern des Sedimentes aufgelöst.

Die saisonale Verteilung der Calcitsättigung innerhalb der Wassersäule ergibt eine längere und stärkere Untersättigung unterhalb 26 m Wassertiefe (WEFER 1976). Hierdurch tritt an der Sedimentoberfläche eine verstärkte Anlösung von Karbonatpartikeln auf. Einige Foraminiferengehäuse weisen die gleichen Lösungsstrukturen auf, die auch bei den Experimenten beobachtet werden konnten (Taf.2, Fig.5-8). Das abgebildete Exemplar stammt aus 27 m Wassertiefe, also aus dem meist untersättigten Bereich des Tiefenwasserkörpers. Die Schalenteile zeigen im Gegensatz zu den anderen dargestellten *Elphidium*-Gehäusen zusätzlich eine deutliche Internstruktur der Calcitplättchen. Die einzelnen Kristallite sind herauspräpariert und laufen nach außen hin durch die Anlösung spitz zu. Da bei den experimentell behandelten Schalen die gleichen Beobachtungen gemacht werden konnten und diese Strukturen ebenfalls durch Untersättigung hervorgerufen wurden (hier künstlich mit Titriplex), kann man davon ausgehen, daß diese Lösungstrukturen typisch für ein Karbonat-untersättigtes Milieu sind.

An toten Formen der 27 m-Probe, deren Schalen noch von einer dünnen organischen Matrix umhüllt waren, konnte ein Beginn des Zerfalls im Bereich der septalen Laschen beobachtet werden. Die Lösung erfaßt am Rand der "Zwischenkammern" mehrere Schalen gleichzeitig und vergrößert so die Hohlräume. Eine Ultrastruktur läßt sich zuerst nur in diesen Bereichen erkennen, da die übrige Schalenoberfläche noch durch Matrix verhüllt ist.

Durch die verstärkte Anlösung wird der Aufbau der einzelnen Calcitplatten deutlich. Die länglichen Kristallite verlaufen innerhalb einer Platte parallel, bilden also eine kristallografische Einheit. Die Achsen der verschiedenen Platten zeigen jedoch in unterschiedliche Richtungen und bilden mit der Schalenoberfläche einen spitzen Winkel. Dies wird von BELLEMO (1974) so interpretiert, daß jede Kristalleinheit relativ zur benachbarten rotiert ist. Hiernach müßten alle Kristallite im gleichen Winkel zur Schalenoberfläche stehen.

Taf.3 bildet die durch natürliche Prozesse am stärksten zerstörten Exemplare ab, die in den Proben gefunden wurden. Fig.1 fehlen die beiden letzten Kammern völlig, nur Reste der Septenteile zwischen den ehemaligen Mündungen sind noch als kleine Erhebungen zu erkennen. Die folgende Kammer ist bis auf einen geringen Teil am Nabel ebenfalls

abgebaut, die nächste beginnt vom Kiel her zu zerfallen.

Der Zerfall beginnt mit der jüngsten Kammer und ergreift fortschreitend immer ältere, da die Schale mit zunehmendem Kammeralter dicker und stabiler wird, begründet auf der beschriebenen Kammerbauweise der Foraminifere.

Sind die oberen Lamellen zerstört, zerfällt die innerste schneller in großen Bereichen, da ihr der Halt genommen ist (Fig.4). Gut sind hier die einzelnen Calcitplatten (Pfeil) zu erkennen, die nach dem Zerfall übrig bleiben und erst später aufgelöst werden.

Die Zerstörung der Kammern erfolgt zusätzlich vom Kiel aus in Richtung zum Nabel. Dies zeigt auch das noch stärker zerfallene Exemplar von Fig.5. Diesem Vorgang setzen die Septen offensichtlich den größten Widerstand entgegen. Die drei letzten Kammern fehlen, die beiden folgenden sind bis auf die Septen und einen kleinen Teil im Nabelbereich zerfallen. Zwischen diesen und zwei weiteren vom Kiel her aufgebrochenen Kammern liegt eine noch geschlossene, von deren Oberfläche die drei folgenden Vergrößerungen (Fig.6-8) aufgenommen wurden. Sie lassen eine verstärkte Anlösung der Calcitplatten von den Suturen her erkennen. Die Platten greifen nicht mehr ineinander, das Gehäuse steht kurz vor dem Zerfall. Durch die Anlösung wird stellenweise die prismatische Struktur der Platten im Profil herausgearbeitet (Fig.8). Da dies die sechstletzte Kammer ist, kann man unter der Annahme, daß es sich auf dem Foto um die vorletzte Lamelle handelt, leicht errechnen, daß hier bereits vier Lamellen fehlen müssen. Der Rest einer Lage, bestehend aus sieben Platten, ist auf Fig.7 noch zu erkennen. Der Verlust an Karbonat muß bei diesem Exemplar also schon recht hoch sein.

Im Vergleich mit den experimentell angelösten Schalen, bei denen der Gewichtsverlust errechnet werden konnte, ergeben sich für die natürlich zerfallenen Exemplare folgende Schätzwerte zum prozentualen Verlust an Schalenmaterial:

Taf.1, Fig.5-8: 2-3 %

Taf.2, Fig.1-4: 15 %, Fig.5-8: 35%

Taf.3, Fig.1-4: 35 %, Fig.5-8: 45%

6.1.2. Abrasion von *Elphidium sp.*

Die abgebildeten Foraminiferen stammen aus der Restsedimentzone bei 8 m Wassertiefe. An *Elphidium excavatum excavatum* konnte auf Abrasion hinweisende Schalenzerstörung beobachtet werden.

Taf.10, Fig.1 bildet ein totes Exemplar ab. Dies ist an der strukturierten Schalenoberfläche leicht zu erkennen, da durch die Oxidation der organischen Matrix die Plattengrenzen freigelegt wurden. Trotzdem können Stadien eines Schalenzerfalls, wie bei *Elphidium incertum* beschrieben, nicht beobachtet werden. Der Verlust der letzten und eines Teils der vorletzten Kammer sind auf mechanische Beanspruchung zurückzuführen.

Fig.2 zeigt im Anbruch die Anwachsstelle der letzten Kammer auf einer älteren zwischen zwei Mündungen. Hier sind, im Gegensatz zur umgebenden unverletzten Schale, zahlreiche durch die Anlösung spitz zulaufende Kristallite zu erkennen, denn es ist für das lösende Milieu leichter eine Bruchstelle anzuätzen, als den ungestörten Schalenverband.

Die angebrochene zweite Kammer zeigt scharfe Konturen und Kanten, die im deutlichen Gegensatz zu der in Taf.6, Fig.2+7 beschriebenen, dünn auskeilenden, allein durch Anlösung entstandenen Kante stehen. Durch den Bruch wird der interne Schalenaufbau deutlich. Taf.10, Fig.3+4 zeigen zwei Schichten von Kristalliten, die sich zum Teil deutlich von der unteren in die obere Lamelle fortsetzen. Die erste innere Schale wurde beim Bau dieser Kammer gebildet, die zweite beim Anbau der jüngsten jetzt fehlenden Kammer. Eine Schrägstellung der Kristallite ist auf Fig.3 im Bruch zu erkennen. Sie verlaufen innerhalb einer Einheit parallel aber schräg zur Schalenoberfläche.

Einzelne Kristallite werden durch Anlösung im Randbereich der Poren sichtbar. Die rundliche Morphologie die Kristalle im Anbruch läßt auf Lösung schließen.

Die waagerechte hellere Linie in Fig.4 entstand bei der Bildaufzeichnung durch eine schwache Aufladung der Schale im REM.

Das zweite Exemplar von Taf.10, Fig.5 ist bedeutend stärker mechanisch zerstört worden. Hier fehlen die zehn jüngsten Kammern und somit eine ganze Windung, mit der die Foraminifere einmal doppelt so groß wie der abgebildete Rest gewesen sein muß. Sie bot daher auch für die abrasiven Kräfte eine bessere Angriffsfläche. Die Bildausschnitte zeigen die Bruchstellen der fehlenden Kammern im Bereich zwischen den Mündungen. Anlösungserscheinungen ähnlich der in Fig.2 sind zu erkennen, hier jedoch mit dem

Unterschied, daß die organische Matrix auf den übrigen Schalenteilen noch nicht oxidiert wurde. Sie ist an den Rändern der Bruchstelle als leicht aufgewölbte strukturlose Schicht zu erkennen. Die Foraminifere muß also noch im Lebendstadium oder sehr kurz danach zerstört worden sein. Die Sedimente des Flachwasserbereiches in der Kieler Bucht sind also bei entsprechendem Wind und somit Wasserbewegung ein Bereich starker mechanischer Schalenzerstörung.

Ähnliche Vorgänge sind an dem Exemplar von Taf.11,Fig.1 zu beobachten Auch hier fehlen zahlreiche Kammern der äußeren Windung, obwohl die organische Matrix noch stellenweise erhalten ist (Fig.2). Hier hat die Anlösung jedoch in viel stärkerem Maße damit begonnen, die Schale an den Bruchstellen zu zerstören. Die einzelnen Ansätze der Kammerwände zwischen den Mündungen sind nicht mehr zu erkennen, sondern bilden sich als durchgehende angelöste Streifen zwischen Feldern von organischer Matrix ab. Die Schale ist an den ungeschützten Stellen durch mehrere Schichten hindurch zerstört (Fig.3). Fig.4 zeigt die Kristallitreste einer fast völlig aufgelösten Calcitplatte.

6.2. Fragmentierung von *Ophthalmina kilianensis*

Die Schalenreste auf Taf.13 stammen von *Ophthalmina kilianensis* und wurden einer Probe aus 23 m Wassertiefe entnommen. Da in Tiefen über 13 m keine Algen, auf denen diese Formen siedeln könnten, mehr wachsen, müssen sie durch Strömung in die tieferen Bereiche transportiert worden sein. Nach Oxidation der organischen Schutzhülle ist die zerbrechliche Schale den frühdiagenetischen Prozessen am Meeresboden unterworfen.

Die großen äußeren Kammern zerbrechen beim Transport zuerst (Fig.1), die Bruchkanten werden anschließend in größeren Wassertiefen durch Lösung verrundet (Fig.2+6). Drei zentralgelegene Kammern wurden durch Anlösung geöffnet. Auch diese Foraminiferengattung wird im Innern durch eine organische Tapete, die durch die Zerstörung der Schale ihre Stabilität verliert und zu zerreißen beginnt, ausgekleidet (Fig.3+4).

Die ungeordnete Schalenstruktur zeigt sich nur im Querschnitt der Bruchkanten und im stark angelösten Nabelbereich (Fig.2,4,7). In Fig.2 liegt im Zentrum noch ein größerer Bereich, der von glattem Furnier bedeckt wird. Oberhalb des Vierecks in Fig.3 liegt einer kleiner Schalenrest mit der typischen Struktur der Oberflächenschicht. Diese geordnete Lage von Kristalliten setzt der Anlösung offensichtlich größeren Wider-

stand entgegen als der ungeordnete Kristallitfilz, der durch seine hohe Porosität für das lösende Meerwasser besser zugänglich ist.

Das bereits stark zerbrochene Exemplar in Fig.5 zeigt bei genauer Betrachtung auf seiner Oberfläche neben einem einheitlichen Grauton einige hellere Flecken, die besonders von den Bruchkanten ausgehen. Nur an diesen Bereichen ist die Oberflächenschicht zerstört und die restliche Schale stärker angelöst. Dies beweist auch der zwischen Oberflächenschicht und restlicher Schale entstandene Hohlraum in Fig.7. Das Furnier wird vom Untergrund gelöst und zerbricht eher, als es aufgelöst wird.

Die Oberfläche der Schale in Fig.1 läßt nur noch an den tiefergelegenen Bereichen, die vor mechanischer Beanspruchung besser geschützt sind, die elektronenoptisch dunkler erscheinende Oberflächenschicht erkennen. Die mechanische Zerstörung der Schalenoberfläche verbessert die Möglichkeit einer chemischen Zerstörung der porösen Kristallitlage, aus der der größte Teil der Schale besteht. Die ungeordnete Lagerung der Kristallite von 1 µm Länge und 0,2 µm Durchmesser, sowie die hohe Porosität sind bei 25ooo-facher Vergrößerung in Fig.8 deutlich zu erkennen.

7. DISKUSSION

7.1. Fragmentierung von Foraminiferen

Die Oberflächenstrukturen der Gehäuse benthischer Foraminiferen (*Elphidium excavatum excavatum* und *Ophthalmina kilianensis*) aus der Westlichen Ostsee zeigen, daß im Flachwasser bis ca. 13m Wassertiefe die Gehäuse mechanisch zerstört werden (Abrasion). Zum Teil findet die Abrasion ohne vorherige Oxidation der die Kammern umschließenden organischen Matrix statt.

In tieferen Teilen des Untersuchungsgebietes (13-30 m Wassertiefe) zeigen die Oberflächenstrukturen bei *Elphidium incertum* und *Elphidium albiumbilicatum*, daß in dieser Wassertiefe das Karbonat hauptsächlich durch Auflösung (Korrosion) weggeführt wird.

Beim Zerbrechen der Gehäuse wurden Unterschiede zwischen milioliden und rotaliiden Foraminiferen, die einen unterschiedlichen Schalenaufbau aufweisen und im Untersuchungsgebiet in verschiedenen Lebensräumen siedeln, festgestellt. *Elphidium* als Vertreter der Rotaliida lebt fast ausschließlich auf oder im Sediment. Ungestört können Exemplare dieser Gattung nur bei relativ ruhigem Wasser, also ohne wesentliche Sedimentbewegung, heranwachsen. Bei starker Sedimentumlagerung werden die Gehäuse bis auf einen kleinen harten Kern, bestehend aus einigen Kammern, zerbrochen. Auf Grund der geringeren Größe und durch die im Vergleich zu jüngeren Kammern dickeren Kammerwände sind kleine Gehäuse resistenter.

Bei der nur aus einem Strukturtyp aufgebauten Schale von *Elphidium* sind deutliche Unterschiede zwischen der Fragmentierung bei rein mechanischer Beanspruchung und chemischer Anlösung zu erkennen. Bruchstellen zeichnen sich durch scharfe Kanten, eckige Konturen und einen plötzlichen Abbruch der Schale aus. Durch Lösung entstandene Löcher sind im Gegensatz dazu rundlich, die Schale keilt zum Rand hin aus, und an der Struktur der Calcitplatten läßt sich der Grad der Auflösung ablesen.

Strukturabhängig ist bei *Elphidium* die Richtung des Fragmentierungsverlaufes innerhalb des Gehäuses. Die Schale bricht sowohl im Experiment wie auch beim natürlichen Vorgang zuerst am Kiel auf und zerfällt weiter in Richtung zum Nabel. Verantwortlich dafür sind Verteilung und Größe der Poren. Außerdem ist die Stabilität der äußeren Schale zum Nabel hin größer, da die Septen zunehmend enger liegen.

Das Zerbrechen der Kammer, das mit der jüngsten beginnt und immer ältere ergreift, ist eine Funktion der Schalendicke.

Im Gegensatz zu *Elphidium* lebt die miliolide Foraminifere *Ophthalmina* bevorzugt an Algen. Nach dem Absterben oder bei starker Strömung fallen die Gehäuse auf das Sediment und werden dort zerbrochen und in tieferes Wasser transportiert. Im Unterschied zu *Elphidium* brechen bei *Ophthalmina* bei geringster mechanischer Beanspruchung große Teile des Gehäuses sofort ab. Gehäuseteile werden in tieferes Wasser transportiert und dort teilweise oder vollständig aufgelöst.

7.2. Fragmentierungszonen

Anhand der Oberflächenstrukturen der Foraminiferengehäuse konnten im Untersuchungsgebiet verschiedenen Vorgänge erfaßt werden, die eine Fragmentierung der Gehäuse zur Folge haben: Oxidation der organischen Matrix, Abrasion, Zerfall, schwache und starke Anlösung durch Untersättigung.

In der Natur kommt es nicht vor, daß einer dieser Vorgänge allein wirksam ist, es werden immer mehrere gleichzeitig oder nacheinander auf das Karbonat einwirken. Da die einzelnen Vorgänge abhängig von bestimmten Parametern des Milieus sind, wie z.B. Sediment, Wassertiefe, Wasserbewegung oder Karbonatsättigung, und diese sich wiederum zueinander in Beziehung setzen lassen, ergeben sich für ein Profil im Hausgarten vom Flachwasser ins Rinnentiefste mehrere Fragmentierungszonen mit für sie charakteristischer Karbonatzerstörung. Diese drei Bereiche entsprechen in etwa den Sedimentationszonen nach WEFER & Tauchgruppe (1974).

1. Abrasionszone
2. Zerfallszone
3. Korrosionszone

In der Abrasionszone findet eine Zerstörung der Foraminiferen und sicherlich auch anderer Kalkschalen hauptsächlich durch mechanischen Abrieb bei starker Sedimentbewegung statt. Oxidation und schwache Anlösung konnten ebenfalls festgestellt werden, tragen jedoch nicht maßgeblich zum Schalenzerfall bei. Aus diesem Gebiet werden die zerkleinerten Karbonatpartikel mit der Strömung ins tiefere Wasser verfrachtet.

Die Zerfallszone liegt zwischen 13 und ungefähr 26 m Wassertiefe. Die 13 m-Grenze wird durch den Übergang vom Restsediment zum küstenfernen Sedimentanhäufungsgebiet gebildet. Tiefer als ca. 13 m Wassertiefe findet keine wesentliche Auswaschung des Sandanteils des erodierten Geschiebemergels mehr statt und die Abrasion ist geringer als im Restsedimentgebiet.

Die untere Grenze der Zerfallszone schwankt saisonal und ist abhängig vom Sättigungszustand des Bodenwassers gegenüber Karbonatmineralen (WEFER 1976, S.85)

In der Zerfallszone spielt die Oxidation der organischen Matrix eine wichtige Rolle. Nur durch den Verlust dieses Schutzes ist es in dem schwach untersättigten Milieu möglich den Kalk anzulösen und die Verzahnung der einzelnen Platten zu lockern. Die Schale zerfällt in ihre Einzelteile (Calcitplatten) und erst später werden diese Teile vollständig aufgelöst.

Mit der Zerstörung der Matrix ist hier also bereits ein wichtiger Beitrag zum Zerfall der Schale geleistet. Ähnliche Beobachtungen beschreibt LEWY (1975) bei Untersuchungen frühdiagenetischer Prozesse an Kalkpartikeln in der Ostsee. Schalen toter Exemplare von *Arctica islandica* scheinen empfindlicher auf mechanische Beanspruchung zu reagieren, als lebende. Sie zerbrechen leichter entlang der Wachstumslagen, das Karbonat bekommt einen kreidigen Charakter. Vergleichende Analysen des Anteils organischer Substanz in Schalen von lebenden und toten Exemplaren zeigten einen dreimal höheren Anteil in den lebenden Muscheln. LEWY begründet die empfindliche, kreidige Struktur der Schale mit dem Verlust der bindenden organischen Substanz zwischen den einzelnen Kristalliten und vermutet eine Zerstörung durch Mikroorganismen.

Auch ALEXANDERSSON (1979) hält die Zerstörung der organischen Matrix für einen wichtigen Beitrag zur Fragmentierung von Karbonatpartikeln.

Beim Abbau organischen Materials sind aerobe Bakterien bedeutend effektiver als anaerobe. Organische Hüllen sollten daher in der Zerfallszone bedeutend schneller abgebaut werden als in der Korrosionszone. Hier sind im Herbst besonders niedrige Sauerstoffgehalte vorhanden. Niedrige Sauerstoffgehalte können zur Erhaltung von Foraminiferenschalen beitragen, da die schützende organische Hülle langsamer oder gar nicht zerstört wird (WEFER 1976).

Der oben beschriebene Zerfall betrifft nur die *Elphidium*-Arten, die in dem küstenfernen Sandanhäufungsgebiet leben. *Ophthalmina* erreicht diese Zone bereits in oxidiertem und angebrochenem Zustand, so daß hier eine weitere Anlösung der leichter löslichen Mg-Calcitschale erfolgen kann. Sie wird also in der flacheren Zone vorzugsweise abradiert und in der Zerfallszone korrodiert. Ähnliches dürfte auch für die in der Restsedimentzone lebenden *Elphidium*-Arten gelten.

Die Ausbreitung der Korrosionszone wird bestimmt durch den Karbonatsättigungszustand des Wassers. In Bereichen stark untersättigten Bodenwassers findet eine verstärkte Korrosion der toten *Elphidium*-Schalen statt. Diese Bedingungen liegen meist unterhalb von 26 m Wassertiefe. Die chemische Zerstörung des Karbonates erfolgt hier in bedeutend stärkerem Maße und sicherlich auch schneller als in den flacheren Zonen. Z.T. werden die Schalen schon vor der vollständigen Oxidation der organischen Matrix angegriffen.

Kennzeichnend für die Anlösung durch Untersättigung sind typische Lösungsstrukturen auf der Schale, die im Experiment durch die Verwendung von Titriplex nachvolzogen werden konnten, und die den ultrastrukturellen Aufbau der Schale deutlich machen.

Die Anlösung erfolgt nur im freien Bodenwasser. Im Sediment wurde bereits ab 1 cm Sedimenttiefe Calcitübersättigung gemessen (SUESS et. al. 1975). WEFER (1976) hält eine Erhaltung der Schalen nur für möglich, wenn sie durch Bioturbation in größere Sedimenttiefen und damit in Kalk-übersättigtes Porenwasser gelangen. Danach müßten durchwühlte Sedimente höhere Schalengehalte als geschichtete aufweisen. Ferner sollten in Schillagen Foraminiferen besser erhaltungsfähig sein, da dort eine Übersättigung des Porenwassers gegenüber Karbonat zu erwarten ist.

In der folgenden Tabelle sind noch einmal die wichtigsten, für die Schalenfragmentierung verantwortlichen Vorgänge und ihre Begleiterscheinungen in den einzelnen Zonen zusammengefaßt:

	Wassertiefe	vorherrschender Zerstörungsmechanismus	begleitende Vorgänge
Abrasionszone	0-13 m	Abrasion	Oxidation Korrosion
Zerfallszone	13-26 m	Oxidation	Korrosion Abrasion
Korrosionszone	26-30 m	Korrosion	Oxidation

Unterschiede zwischen Experiment und Natur ergeben sich durch den Grad der Untersättigung. Da für die Versuche weniger Zeit zur Verfügung stand, als es bei einem natürlichen Vorgang der Fall ist, mußte hier mit einer stärkeren Untersättigung gearbeitet werden. Die Experimente liefen innerhalb weniger Stunden ab, während die Auflösung von Foraminiferengehäusen in den tieferen Bereichen des Untersuchungsgebietes nach WEFER (1976) einige

Monate beträgt.

Wie in der Zerfallszone zerfallen die Gehäuse von *Elphidium* auch in der Korrosionszone nach einer bestimmten Anlösungszeit in ihre Platten. Im Experiment verbleiben die Schalenteile jedoch bis zur völligen Auflösung in ihrem Verband. Hierdurch können auch die für schnelle Lösung typischen Löcher in der Schale entstehen, die bei den natürlichen Vorgängen nicht zu beobachten sind.

8. ZUSAMMENFASSUNG

An Foraminiferengehäusen, die unterschiedliche Schalenstrukturen aufweisen und aus verschiedenen Wassertiefen der Westlichen Ostsee stammen, wurden frühdiagenetische Veränderungen mit Hilfe des Rasterelektronenmikroskopes beobachtet.

Es konnten drei Fragmentierungszonen mit unterschiedlichen Karbonatzerstörungsmechanismen, die bereits an der Sedimentoberfläche stattfinden, abgegrenzt werden:

1. Abrasionszone
2. Zerfallszone
3. Korrosionszone

In Anlösungsexperimenten wurden die einzelnen Schritte des Zerfalls von Schalen der Gattungen *Ophthalmina* und *Elphidium* nachvollzogen. Durch Wiegen vor und nach der Anlösung konnten die jeweiligen Gewichtsverluste einer Zeitreihe ermittelt und den angelösten Schalen zugeordnet werden. Die Lösungsverluste sind in Abhängigkeit von der Zeit in Diagrammen dargestellt.

Die Anlösung durch Untersättigung ermöglicht sowohl experimentell als auch in der Natur einen guten Einblick in den ultrastrukturellen Aufbau der Schale.

An den Strukturen lassen sich deutliche Unterschiede zwischen mechanischer und chemischer Zerstörung feststellen.

Die Schutzfunktion der organischer Matrix konnte nachgewiesen werden. Unter extremen Verhältnissen findet jedoch auch eine Schalenzerstörung, sowohl abrasiv, als auch korrosiv, ohne vorherige Oxidation statt.

9. DANK

Mein besonderer Dank gilt den Betreuern dieser Arbeit Herrn Dr.habil. D.Fütterer, Herrn Dr. C.Samtleben und Herrn Dr. G.Wefer. Die Diskussionen mit ihnen und ihre Ratschläge halfen mir bei vielen Fragen eine Lösung zu finden und der Arbeit ihre jetzige Form zu geben.

Dank sagen möchte ich auch der Tauchgruppe der Universität Kiel, insbesondere meinen Ausbildern Herrn T.Kollatschni und Herrn R.Mason, sowie der Besatzung des Forschungsschiffes "Littorina", ohne deren tatkräftige Unterstützung über und unter Wasser die Probennahme zu dieser Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Für die Bearbeitung des bei den REM-Arbeiten reichlich anfallenden Fotomaterials und für gute Zusammenarbeit bei der Herstellung der Tafeln danke ich Frau U.Schuldt.

Weiterhin möchte ich mich bei allen Institutsangehörigen, die mir in zahlreichen Diskussionen eine große Hilfe waren, herzlich bedanken. Dieser Dank gilt besonders Herrn Dr. P.Müller, Herrn Dipl.geol. H.Heuser und Herrn Dr. M.Hartmann für die Überlassung von Datenmaterial aus dem "Hausgarten" des Sonderforschungsbereiches 95.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft danke ich für die finazielle Unterstützung meiner Diplomarbeit im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 95.

10. LITERATURVERZEICHNIS:

ALEXANDERSSON, E.T. (1972): Micritization of carbonate particles: processes of precipitation and dissolution in modern shallow-marine sediments.- Bull. geol. Inst. Univ. Uppsala N.S., 3: 201-236.

ALEXANDERSSON,E.T. (1972): Etch patterns on calcareous sediment grains: petrographic evidence of marine dissolution of carbonate minerals.- Science, 189: 47-48.

ALEXANDERSSON, E.T. (1978a): Destruktive diagenesis of carbonate sediments in the eastern Skagerrak, North Sea.- Geology, 6: 324-327.

ALEXANDERSSON, E.T. (1978b): Petrographic saturometry in marine carbonate sediments.-In: Scanning Electron Microscopy 1978 (ed. by O.Johari) Part 1, 503-511, SEM Inc., AMF O'Hare, U.S.A.

ALEXANDERSSON, E.T. (1979): Marine maceration of skeletal carbonates in the Skagerrak, North Sea.- Sedimentology, 26: 845-852.

ANDERSEN, N.R. & MALAHOFF, A. (1977): The fate of fossil fuel CO_2 in the oceans, 749 S., Plenum Press, New York.

ANGELL, R.W. (1967): The test structure and composition of the foraminifer *Rosalina floridana*,-J. Protozool, 14/2: 299-307.

BE, A.W.H. (1965): The influence of depth on shell growth in *Globigerinoides sacculifer* (BRADY).- Micropaleontology, 11/1: 81-97.

BE, A.W.H., MCINTYRE, A. & BREGER, D.L. (1966): Shell microstructure of a planktonic foraminifer, *Globorotalia menardii* (D'ORBIGNY).- Eclogae geol. Helv., 59/2: 885-896.

BE, A.W.H. & HEMLEBEN, C. (1970): Calcification in a living planktonic foraminifer, *Globigerinoides sacculifer* (BRADY).- N. Jb. Geol. Paläont. Abh., 134: 221-234.

BE, A.W.H., Morse, J.W. & HARRISON, S.M. (1975): Progressive dissolution and ultrastructural breakdown of planktonic foraminifera.- In: SLITER, W.V., BE, A.W.H. & BERGER, W. (Hrsg.), Dissolution of Deep-Sea Carbonates, Cushman Foundation for Foraminiferal Res., Spec. Publ., 13: 27-55

BELLEMO, S. (1974a): Ultrastructures in recent radial and granular calcareous foraminifera.- Bull. geol. Inst. Univ. Uppsala, N.S., 4/7: 117-122.

BELLEMO, S. (1974b): The compound and intermediate wall structure in Cibicidinae (Foraminifera) with remarks on the radial and granular wall structure.- Bull. geol. Inst. Univ. Uppsala, N.S., 6: 1-11.

BELLEMO, S. (1976): Wall ultramicrostructure in the foraminifer *Cibicides floridanus* (CUSHMAN).- Micropaleontology, 22: 352-362.

BOLTOVSKOY, E. (1966): Depth at which foraminifera can survive in sediments.- Contr. Cushman Fdn. Foram. Res.,17: 43-45.

BOLTOVSKOY, E. & WRIGHT, R. (1976): Recent Foraminifera.- 515 S., Dr. W. Junk: The Hague.

BUZAS, M.A. (1966): The disarimination of morphological groups of *Elphidium* in Long Island sound through canonical analysis and invariant charakters.- J. Paleont. 40/3: 585-594.

CHERIF, O.H. & FLICK, H. (1974): On the taxonomic value of the wall structure of *Quinqueloculina*.- Micropaleontology, 20: 236-244.

DOLD, R. (1976): Bioturbationseffekte und Sedimentspezifität bei Arten des Makrobenthos der Kieler Bucht.- Dissertation an der Christian-Albrechts-Universität, Kiel.

EISENACK, A. (1935): Mikrofossilien aus Doggergeschieben Ostpreußens.- Z. Geschiebeforschung, 11: 167-184.

FÜTTERER, D. (1969): Die Sedimente der nördlichen Adria vor der Küste Istriens.- Göttinger Arb. Geol. Paläont., 3: 57 S.

FÜTTERER, D. & SAMTLEBEN, C. (1970): Zur Anwendung des Raster-Elektronenmikroskops in der Paläontologie: Der Einfluß der Primärstrahl-Beschleunigung auf den Informationsgehalt von REM-Aufnahmen.- Paläont. Z., 44 3/4: 228-232.

FÜTTERER, D. (1977): Die Feinfraktion (Silt) in marinen Sedimenten des ariden Klimabereichs: Quantitative Analysenmethoden, Herkunft und Verbreitung.- 246 S. Habilitationsschrift an der Christian-Albrechts-Universität, Kiel.

HAAKE, F.W. (1971): Ultrastructures of miliolid walls.- J. Foram. Res., 1: 187-189.

HANSEN, H.J. (1968): X-ray diffraction investigation of a radiate and a granulate foraminifer.- Medd. Dansk Geol. Foren, 18: 345-348.

HANSEN, H.J. (1971): Two species of foraminifera of the genus *Turrilina* with different wall structure.- Lethaia, 5:39-45.

HANSEN, H.J., REISS, Z. & SCHNEIDERMANN, N. (1969): Ultramicrostructure of bilamellar walls in foraminiferida.- Rev. Espanola Micropal., 4: 293-316.

HANSEN, H.J. & REISS, Z. (1971): Electron microscopy of Rotaliacean wall structures.- Bull. Geol. Soc. Denmark, 20: 329-346.

HANSEN, H.J. & REISS, Z. (1972a): Scanning electron microscopy of some asterigerinid foraminiferida.- Journ. Foram. Res., 2: 191-199.

HANSEN, H.J. & REISS, Z. (1972b): Scanning electron microscopy of wall structures in some benthonic and planktonic foraminiferida.- Rev. Espanola Micropal., 4: 169-179.

HANSEN, H.J. & LYKKE-ANDERSEN, A.L. (1976): Wall structure and classification of fossil and recent elphidiid and nonionid foraminifera.- Fossils and Strata, 10: 37 S.

HAQ, B.U. & BOERSMA, A. (1978): Introduction to marine micropaleontology.- 376 S., Elsevier: New York.

HAY, W.W., TOWE, K.M. & WRIGHT, R.C. (1963): Ultramicrostructure of some selected foraminiferal tests.- Micropaleontology, 9/2: 171-195.

HAY, W.W. & SANDBERG, P.A. (1967): The scanning electron microscope, a major break-through for micropaleontology.- Micropaleontlology, 13: 407-418.

HEMLEBEN, C. (1969a): Zur Morphogenese planktonischer Foraminiferen.- Zitteliana, 1: 91-133.

HEMLEBEN, C. (1969b): Ultrastrukturen bei kalkschaligen Foraminiferen.- Naturwissenschaften, 56/11: 534-538.

HEMLEBEN, C., BE, A.W.H., SPINDLER, M., ANDERSON, O.R. (1979): "Dissolution" effects induced by shell resorption during gametogenesis in *Hastigerina Pelagica* (D'ORBIGNY).- Journ. Foram. Res., 9/2: 118-124.

HOFKER, J. (1967): Hat die feinere Wandstruktur der Foraminiferen supragenerische Bedeutung?- Paläont. Z. 41 3/4: 194-198.

HYMAN, L.H. (1940): The Invertebrates: Protozoa through Ctenophora.- McGraw-Hill Book Co., 726 S., New York.

JARKE, J. (1961): Beobachtungen über Kalkauflösung an Schalen von Mikrofossilien in Sedimenten der westlichen Ostsee.- Deutsch. hydrogr. Z., 14: 6-11.

KOHLMEYER, J. (1969): The role of marine fungi in the penetration of calcareous substances.- Am. Zoologist, 9: 741-746.

KUDRASS, H.R. (1974): Experimental study of nearshore transportation of pebbles with attached algae.- Mar. Geol. 16: 9-12.

LEWY, Z. (1975): Early diagenesis of calcareous skeletons in the Baltic Sea, Western Germany.- Meyniana, 27: 29-33.

LOEBLICH, A.R. & TAPPAN, H. (1964): Sarcodina, chiefly "Thecamoebians" and Foraminiferida.- In Moore, R.C. (editor): Treatise on Invertebrate Paleontology. C, Protista 2, I-II. Geol. Soc. Amer. and Univ. Kansas Press 900 S.

LUTZE, G.F. (1964): Zum Färben rezenter Foraminiferen.- Meyniana, 14: 43-47.

LUTZE, G.F. (1974): Foraminiferen der Kieler Bucht (westliche Ostsee): 1. "Hausgartengebiet" des SFB 95 der Uni. Kiel.- Meyniana, 26: 9-22.

LYNTS, G.W. & PFISTER, R.M. (1967): Surface ultrastructure of some tests of recent foraminiferida from the Dry Tortugas, Florida.- J. Protozool., 14/3: 387-399.

MILLIMAN, J.D. (1974): Marine Carbonates.- 375 S. Springer: Berlin.

MOSS, M.L. (1964): The phylogeny of mineralized tissues: Internat. Rev. General & Exper. Zoology, 1: 297-331.

MURRAY, J.W. & WRIGHT, C.A. (1970): Surface textures of calcareous foraminiferids.- Paleontol., 13: 184-187.

PARKER, F.L. & BERGER, W.H. (1971): Faunal and solution patterns of planktonic foraminifera in surface sediments of the South Pacific.- Deep Sea Research, 18/1: 73-107.

PESSAGNO, E.A. & MIYANO, K. (1968): Notes on the wall structure of the Globigerinacea.- Micropaleontology, 14/1: 38-50.

POKORNY, V. (1958a): Grundzüge der zoologischen Mikropläontologie, Bd.I, 582 S., VEB Deutscher Verl. d. Wissenschaften: Berlin.

POKORNY, V. (1958b): Grundzüge der zoologischen Mikropaläontologie, Bd.II, 453 S., VEB Deutscher Verl. d. Wissenschaften: Berlin.

REISS, Z. (1959): The wall-structure of Cibicides, Planulina, Gyroidinoides and Globorotalites.- Micropaleontology, 5/3: 355-357.

RESIG, J.M. (1965): Lösungserscheinungen an Foraminiferen der Ostseesedimente.- Dissertstion an der Christian-Albrecht-Universität, Kiel.

SLITER, W.V. (1972): Test ultrastructure of some living benthic foraminifers.- Lethaia, 7: 5-16.

STAPLETON, R.P. (1973): Ultrastructure of tests of some recent benthic hyaline foraminifera.- Palaeontographica, 142: 16-49.

SUESS, E., MÜLLER, P., WEFER, G. & WHITEKAR, M. (1975): in GRASSHOFF, K.: Fahrtbericht, Meteor-Fahrt Nr. 37, "Baltic 75".

SUESS, E. (1976): Porenlösungen mariner Sedimente: Ihre chemische Zusammensetzung als Ausdruchk frühdiagenetischer Vorgänge.- Habilitationsschrift an der Christian-Albrechts-Universität, Kiel.

TOWE, K.M. & CIFELLI, R. (1967): Wall ultrastructure in the calcareous foraminifera: Crystallographic aspects and a model for calcification.- J. Paleont. 41/3: 742-762.

TOWE, K.M. (1972): Invertebrate shell structure and the organic matrix concept.- Biomineralisation, 4: 1-14.

WEFER, G. & FLEMMING, B. (1973): Tauchbeobachtungen an Wellenrippeln und Abrasionserscheinungen in der Westlichen Ostsee südöstlich Bokniseck.- Meyniana, 23: 9-18.

WEFER, G. & TAUCHGRUPPE KIEL (1974): Topographie und Sedimente im "Hausgarten" des Sonderforschungsbereiches 95 der Universität Kiel (Eckernförder Bucht, Westl. Ostsee).- Meyniana, 26: 3-7.

WEFER, G. & LUTZE, G.F. (1976): Benthic foraminifera biomass production in the Western Baltic.- Kieler Meeresforschungen, 3: 76-81.

WEFER, G. (1976): Umwelt, Produktion und Sedimentation benthischer Foraminiferen in der westlichen Ostsee.- Dissertation an der Christian-Albrechts-Universität, Kiel.

WEFER, G. & LUTZE, G.F. (1978): Carbonate production by benthic foraminifera and accumulation in the western Baltic.- Limnol. Oceanogr., 23/5: 992-996.

ZEITZSCHEL,B. (1964): Zur Sedimentation von Seston; eine produktionsbiologische Untersuchung von Sinkstoffen und Sedimentation der westlichen und mittleren Ostsee.- Dissertation an der Christian-Albrechts-Universität, Kiel.

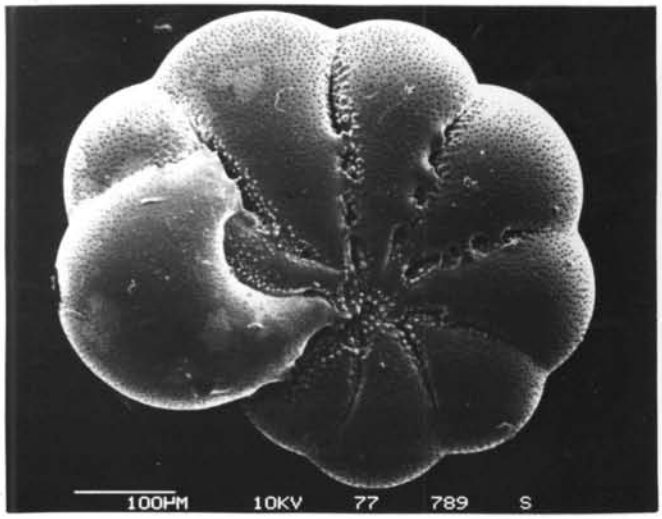
Tafel 1-3:

NATÜRLICHER ZERFALL UND KORROSION VON *ELPHIDIUM INCERTUM*

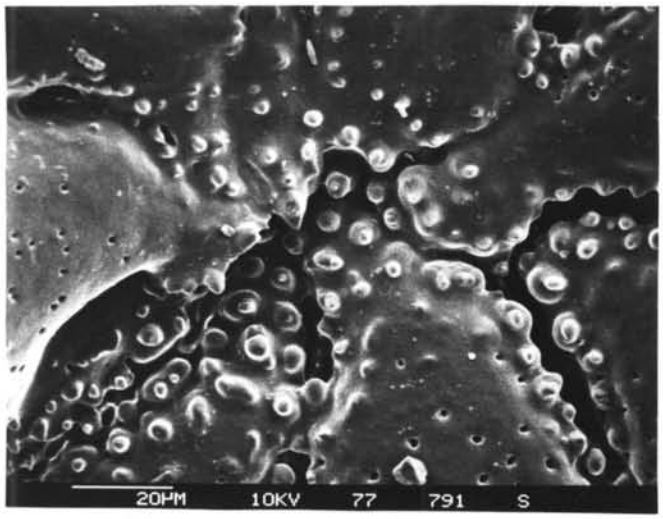
"Hausgarten" vor Bokniseck, Kieler Bucht

Tafel 1,	Fig. 1-4	21m, lebendes Exemplar mit organischer Hülle, Schalenstrukturen nicht zu erkennen
	Fig. 5-8	21m, totes Exemplar, organische Hülle natürlich oxidiert, Suturen erkennbar, Oberfläche leicht korrodiert Lösungsverlust: 2-3 %
Tafel 2,	Fig. 1-4	23m, beginnender Schalenzerfall, Ablösung der ersten Lamelle, Oberflächen leicht korrodiert Lösungsverlust: 15 %
	Fig. 5-8	27m, durch starke Untersättigung hervorgerufene Anlösungsstrukturen Lösungsverlust: 35 %
Tafel 3,	Fig. 1-4	23m, Zerfall weiterer Lamellen in einzelne Platten (Pfeil), Lösungsverlust: 35 %
	Fig. 5-8	23m, fortgeschrittener Schalenzerfall, mehrere Kammern vom Kiel her aufgebrochen, jüngste Kammer völlig zerstört Lösungsverlust: 45 %

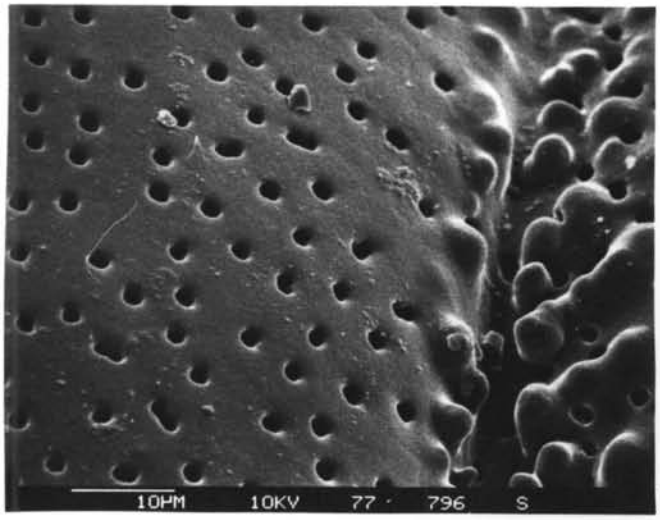
Tafel 1



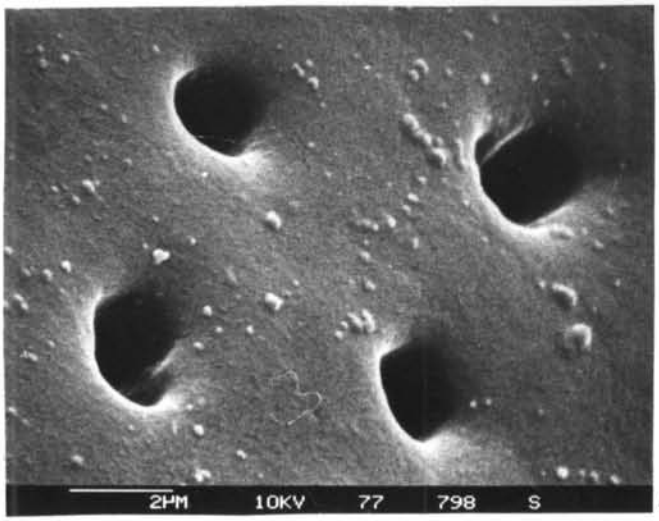
1



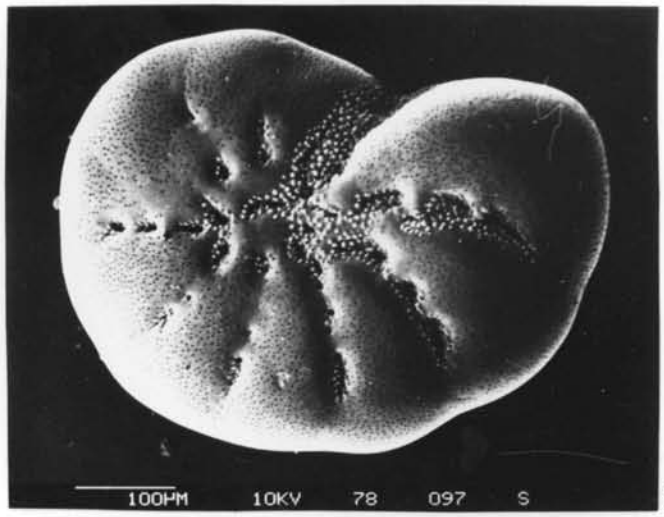
2



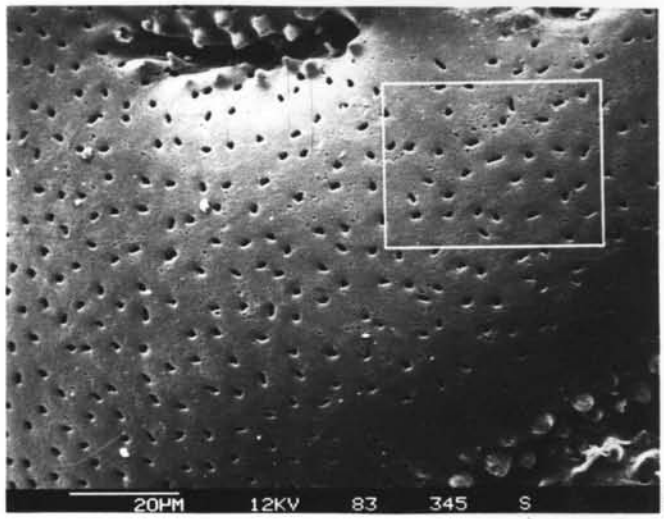
3



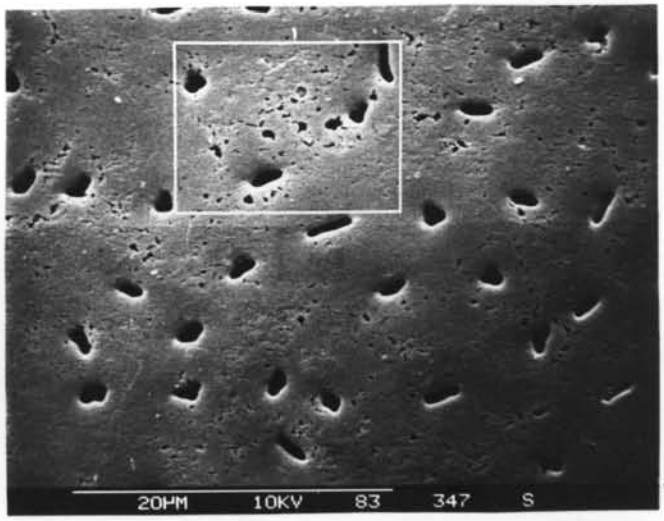
4



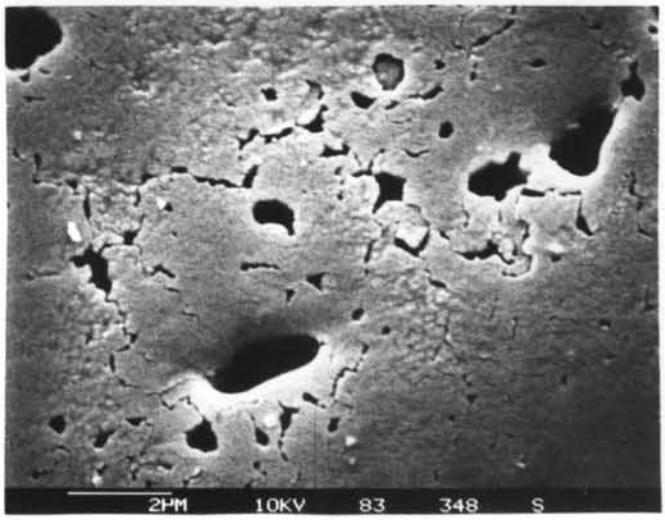
5



6

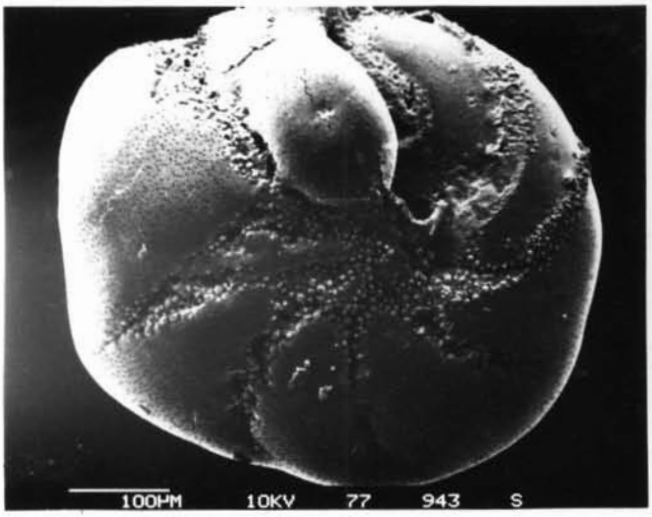


7

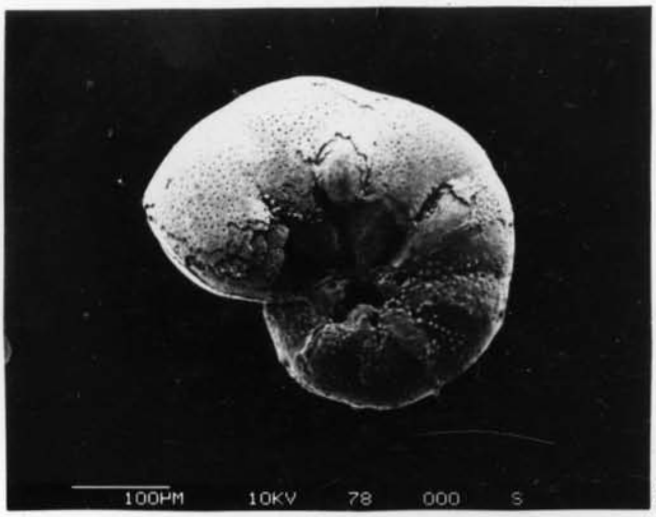


8

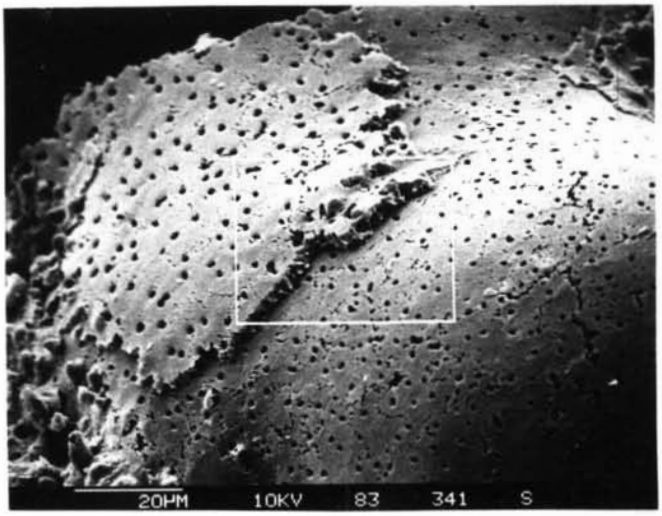
Tafel 2



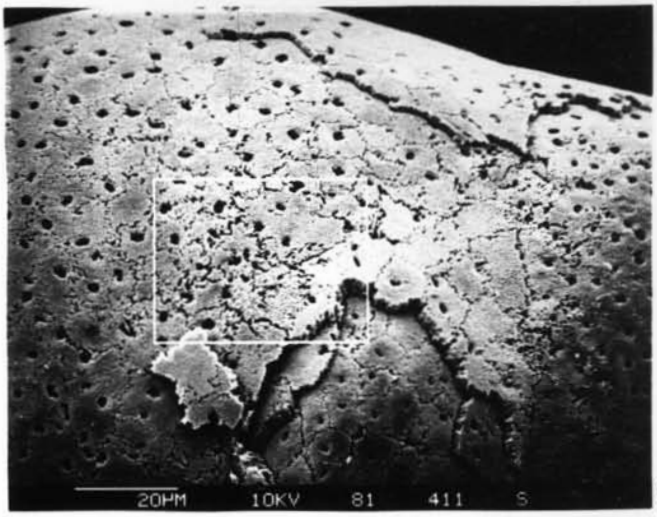
1



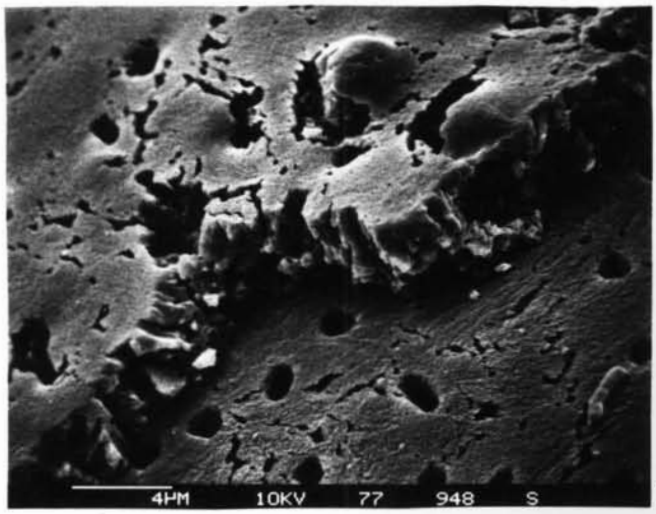
5



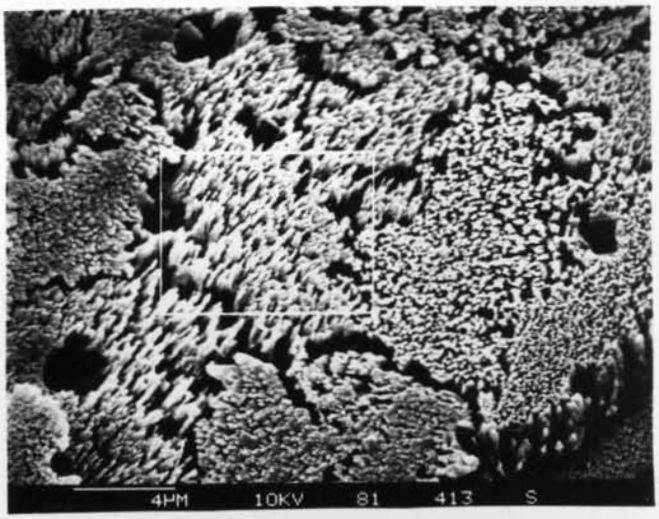
2



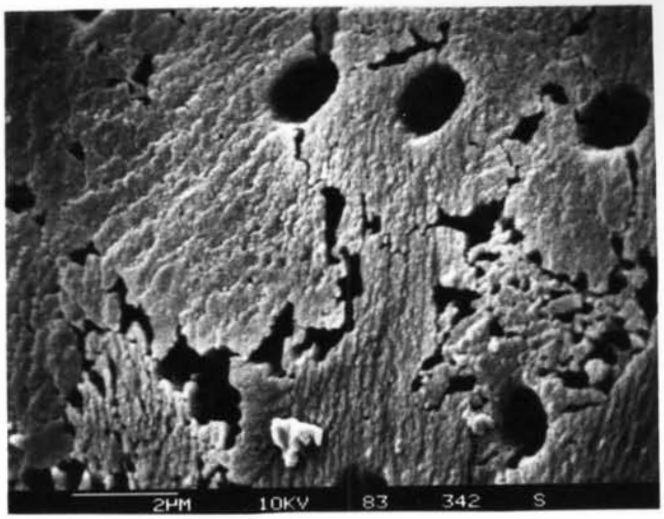
6



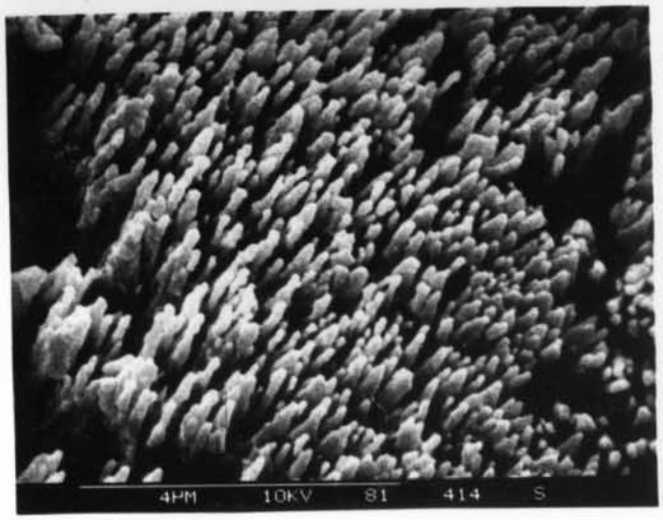
3



7



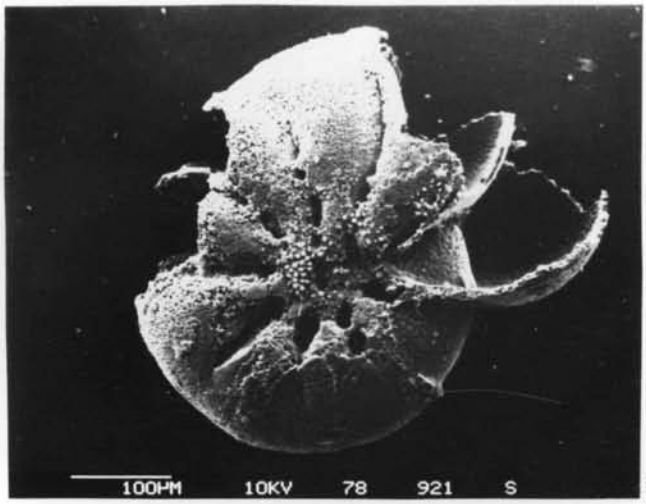
4



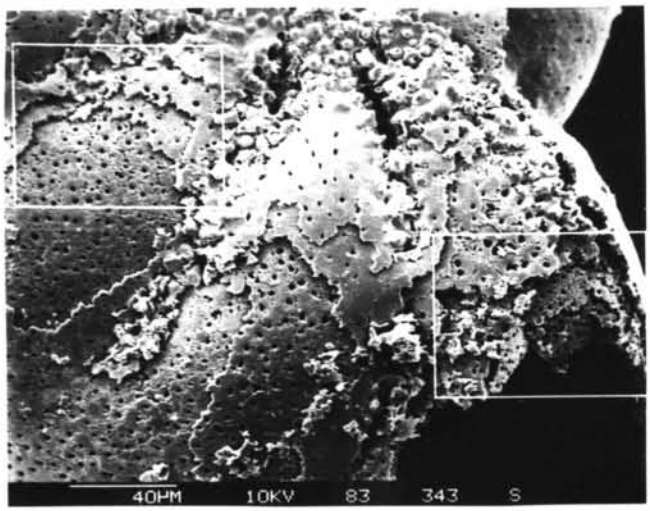
8

Tafel 3

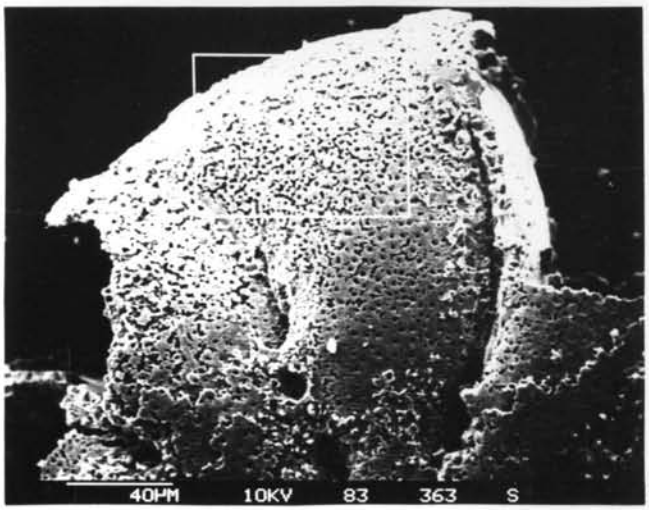
1



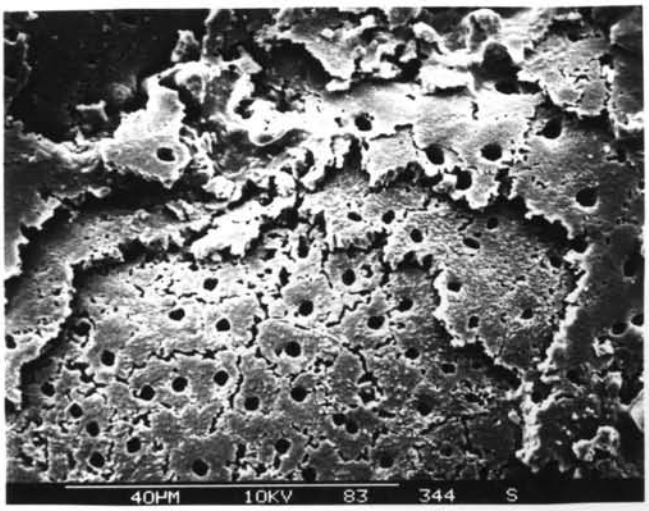
5



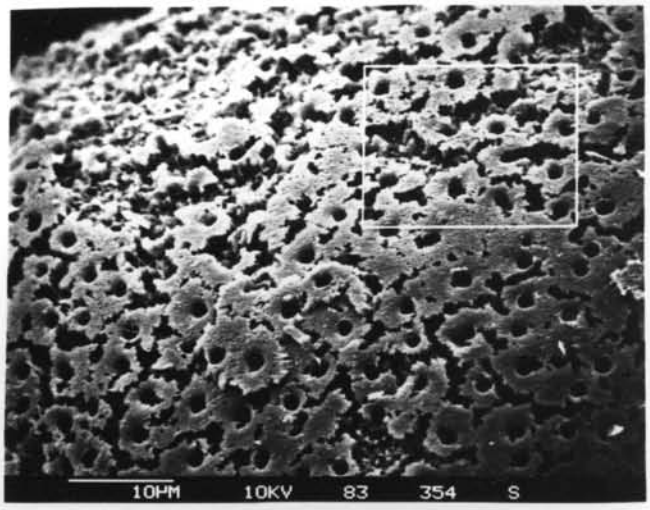
2



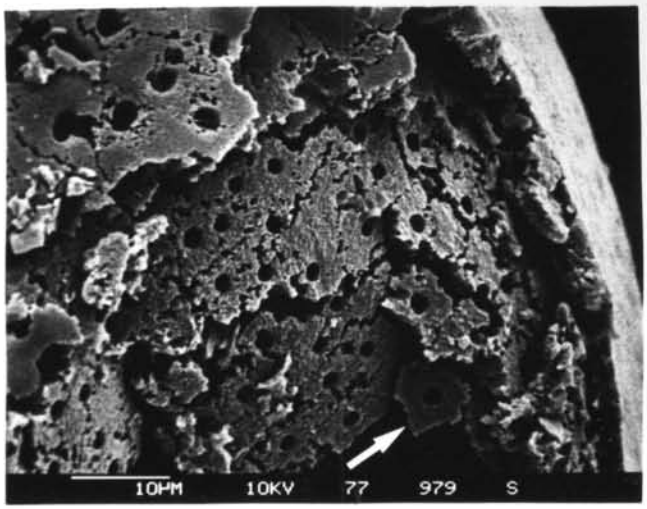
6



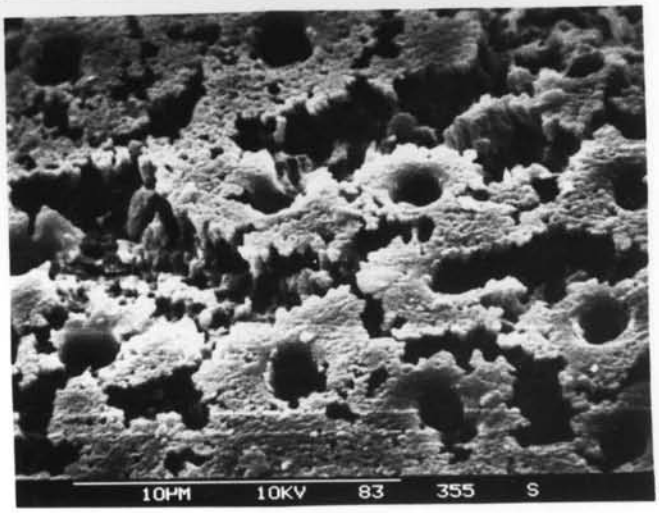
3



7



4



8

Tafel 4-9:

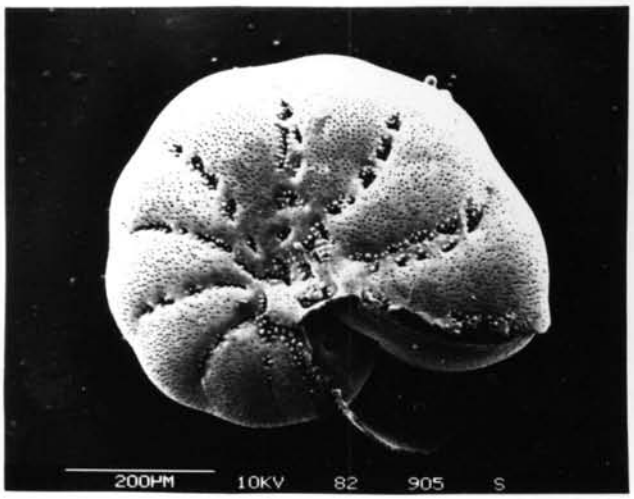
EXPERIMENTELLE KORROSION VON *ELPHIDIUM INCERTUM*

"Hausgarten", 23m Wassertiefe, organische Hülle künstlich oxidiert

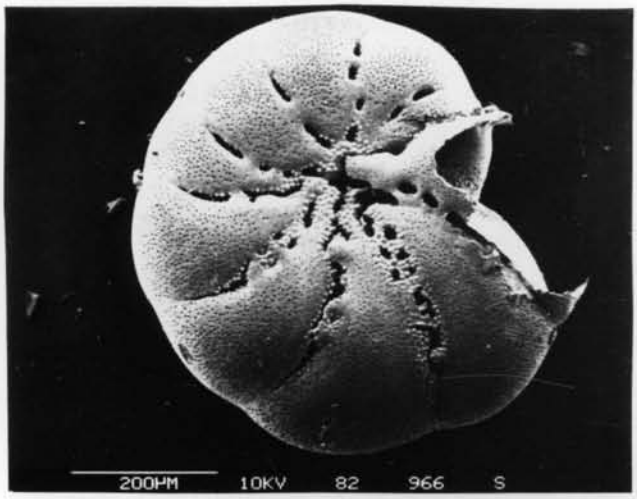
Tafel 4, Fig. 1-4	schwache Korrosion der Schale, Verlust der letzten Kammer, Verbreitung der Suturen, Lösungsverlust: 5 %
Fig. 5-8	fortgeschrittene Zerstörung der jüngsten Lamelle, Verlust der letzten Kammer, Lösungsverlust: 10 %
Tafel 5, Fig. 1-4	starke Korrosion der Schale, letzte Kammer vom Kiel her geöffnet, der ultrastrukturelle Aufbau der Schale wird deutlich, Lösungsverlust: 15 %
Fig. 5-8	die jüngeren Kammern stehen kurz vor dem Zerfall, die Schale ist stellenweise so dünn, daß keine Ultrastruktur mehr zu erkennen ist; größere Löcher reißen auf, Lösungsverlust: 25 %
Tafel 6, Fig. 1-4	Aufbrechen der Kammern im Kielbereich, starke Korrosion der übrigen Schalenteile, Kristallite zeigen innerhalb einer Platte die gleiche Orientierung, Lösungsverlust: 35 %
Fig. 5-8	fortschreitender Schalenzerfall im Kielbereich, Verlust der jüngsten Kammern, Lösungsverlust: 40 %

(Lösungsverlust: Gewichtsverlust durch Anlösung mit Titriplex in Prozent)

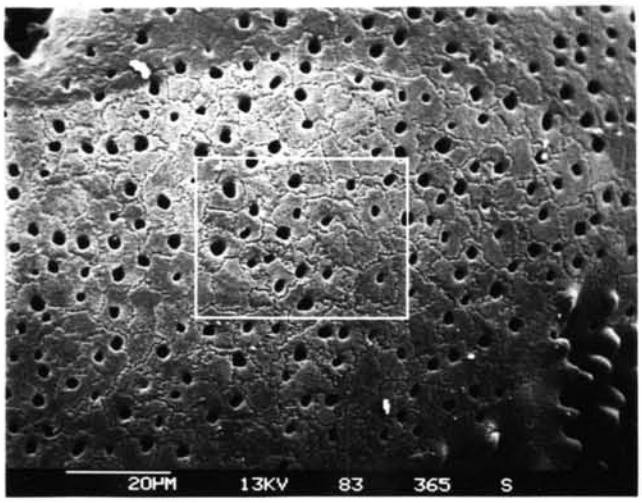
Tafel 4



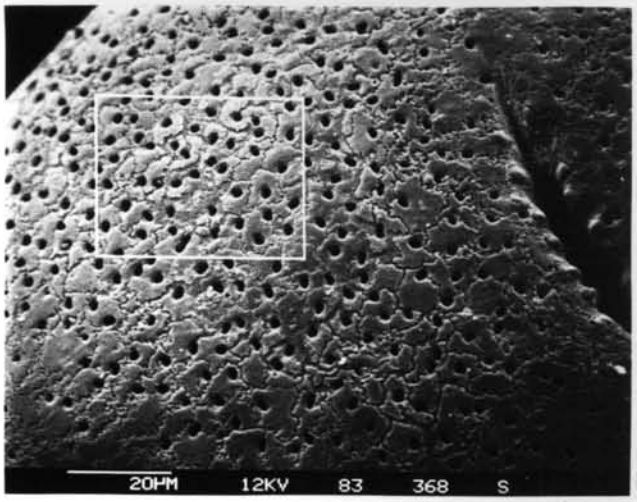
1



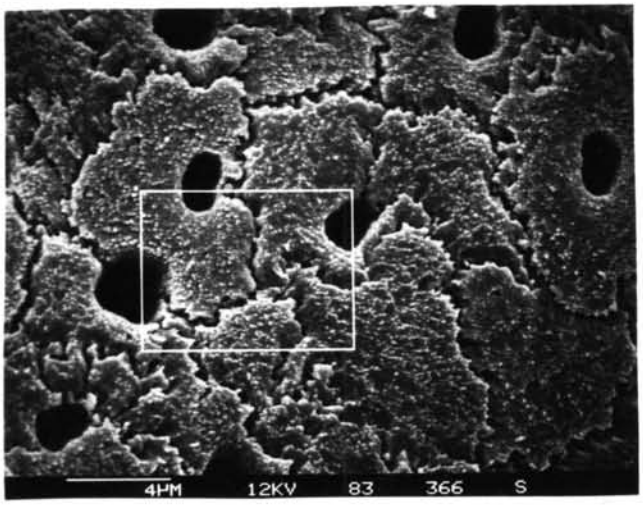
5



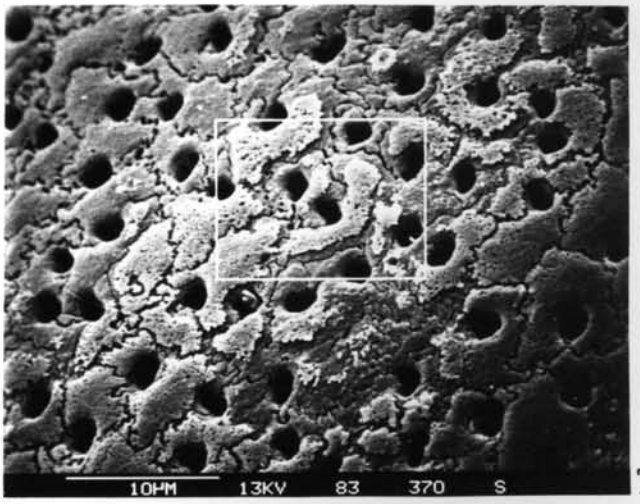
2



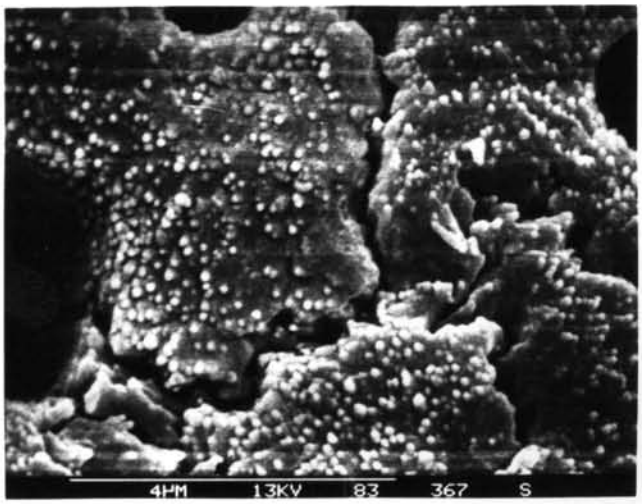
6



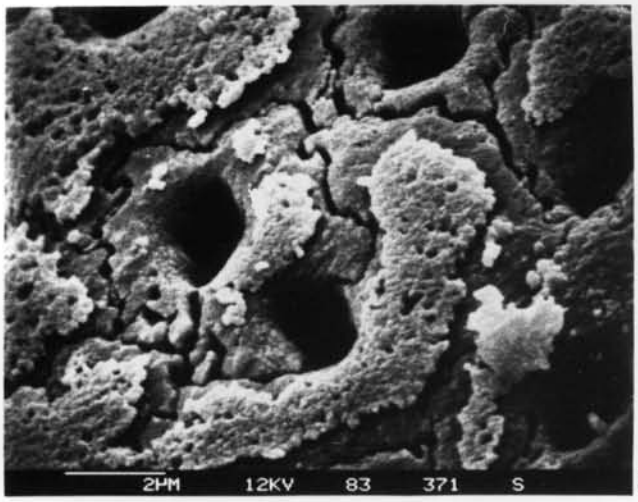
3



7



4

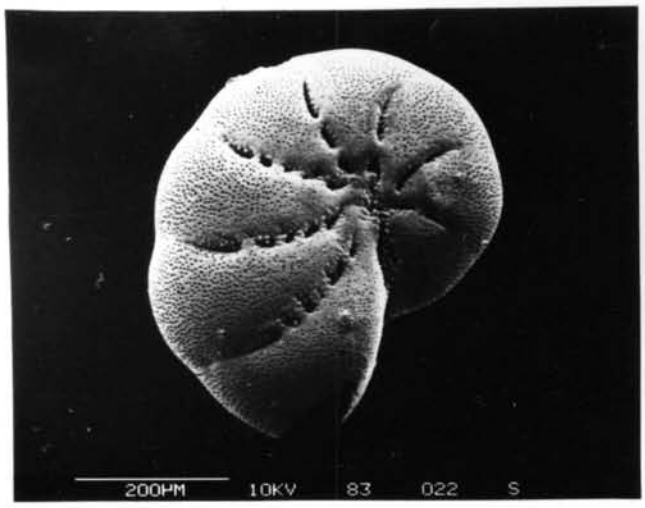


8

Lösungsverlust : 5%

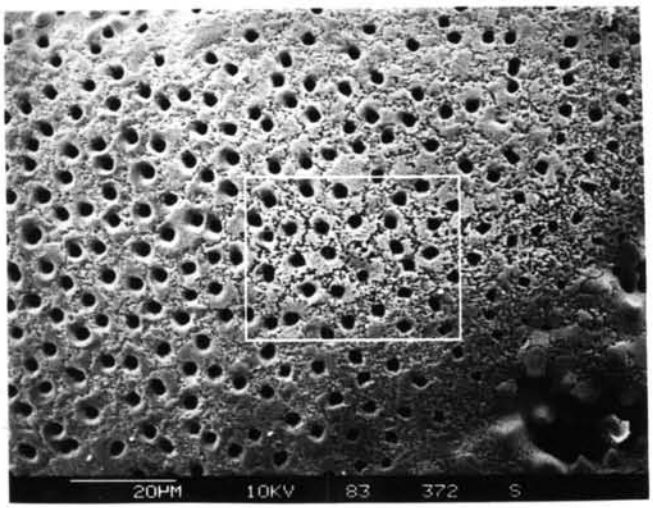
Lösungsverlust : 10%

Tafel 5

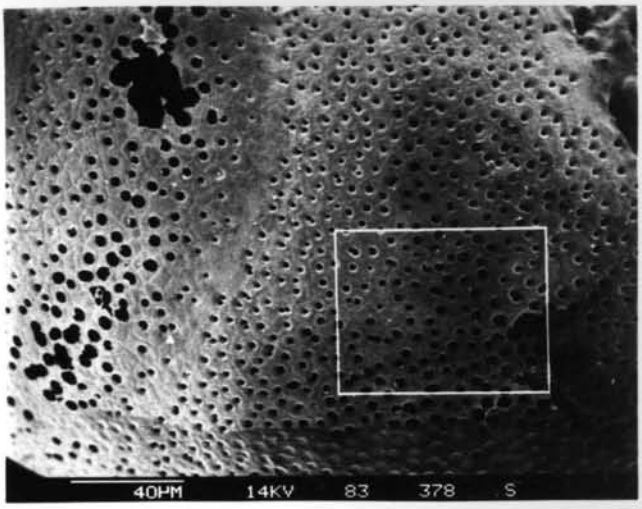


1

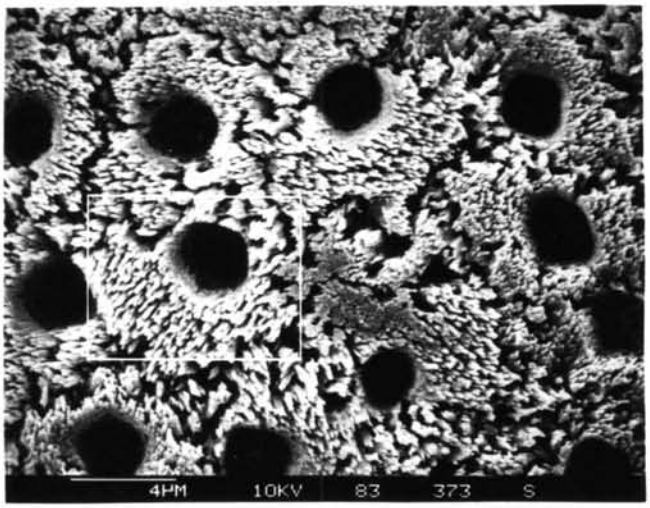
5



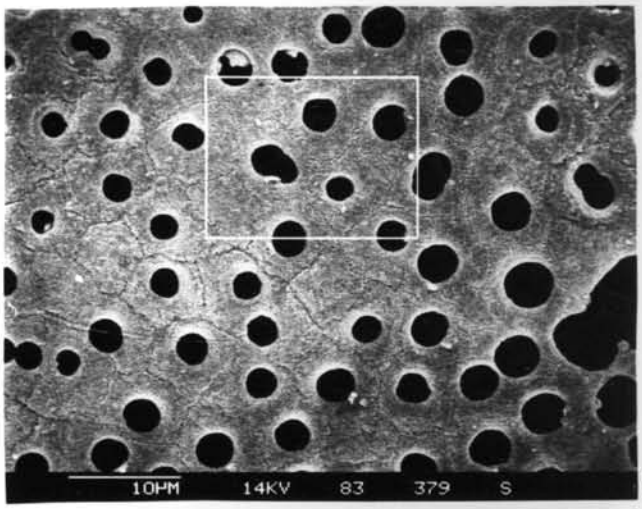
2



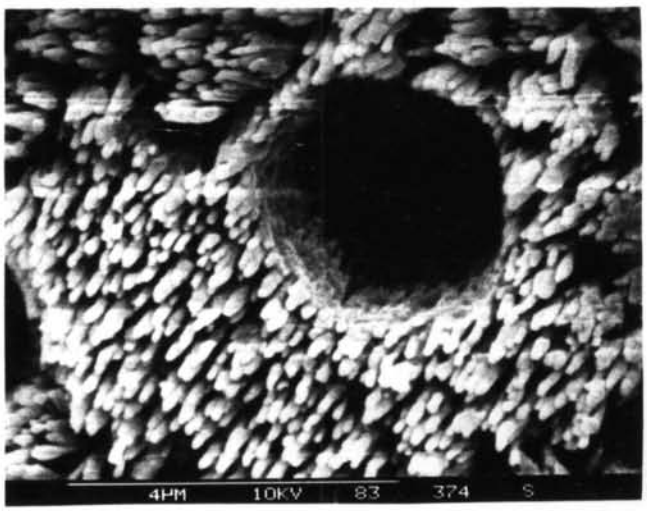
6



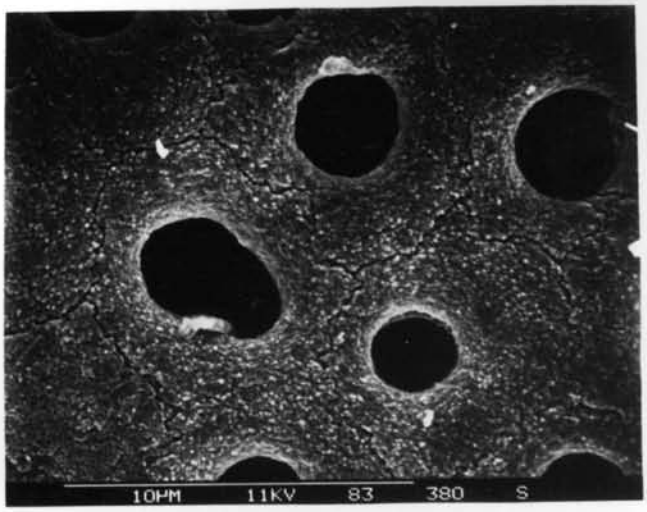
3



7



4

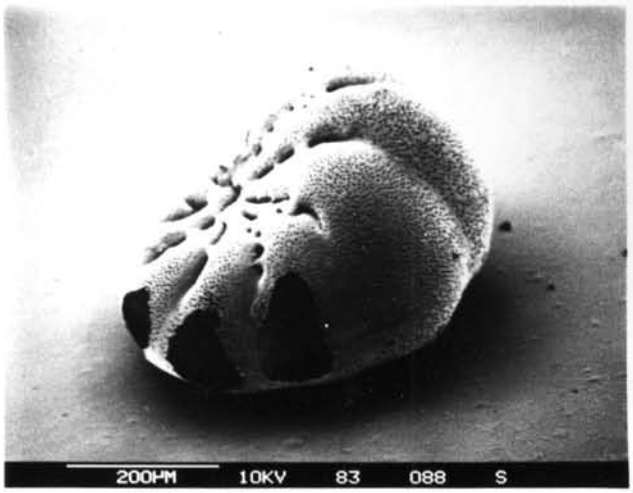


8

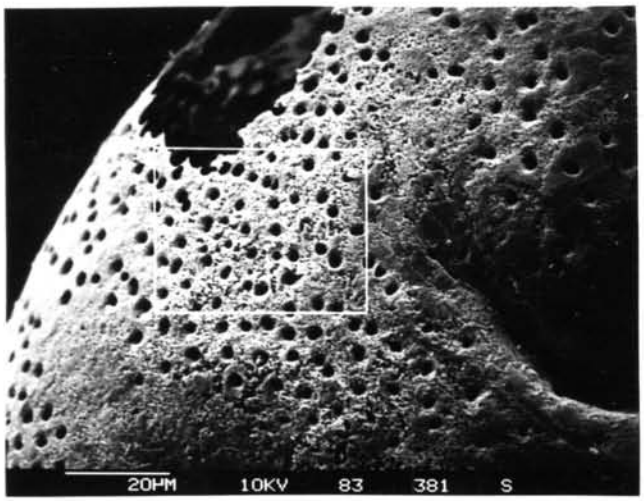
Lösungsverlust: 15%

Lösungsverlust: 25%

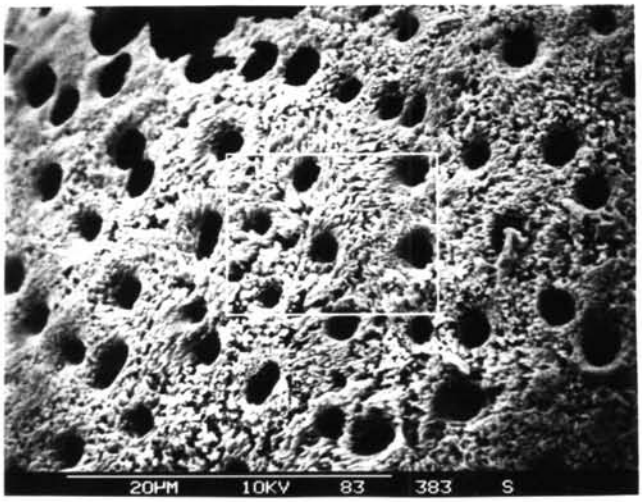
Tafel 6



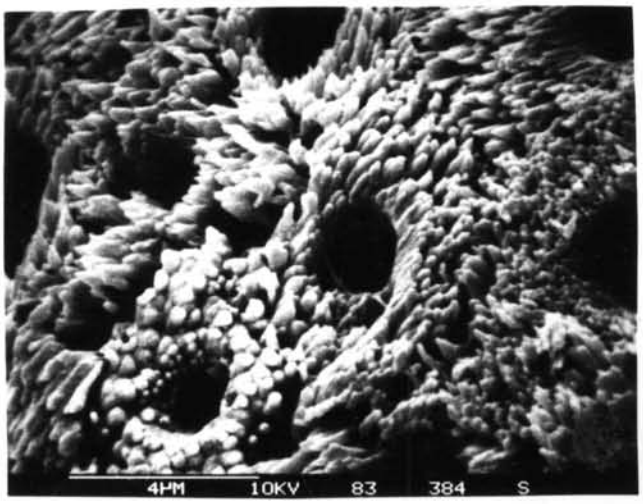
1



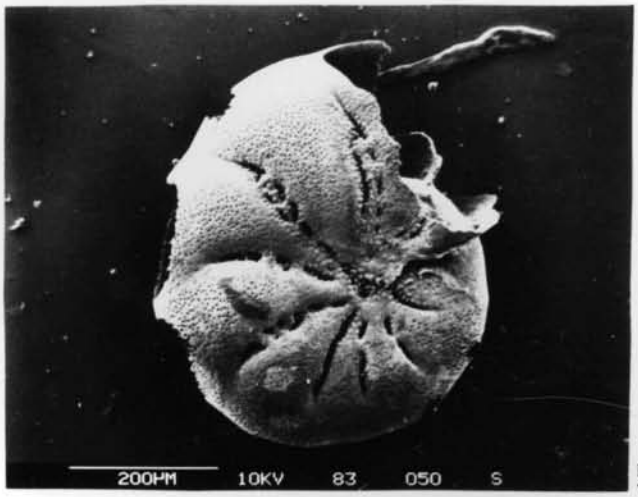
2



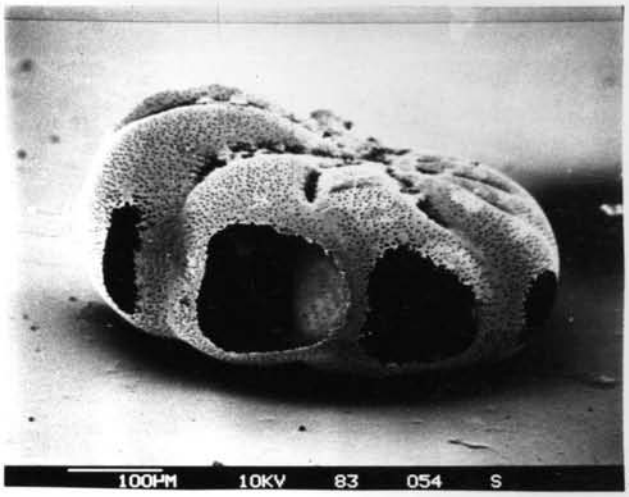
3



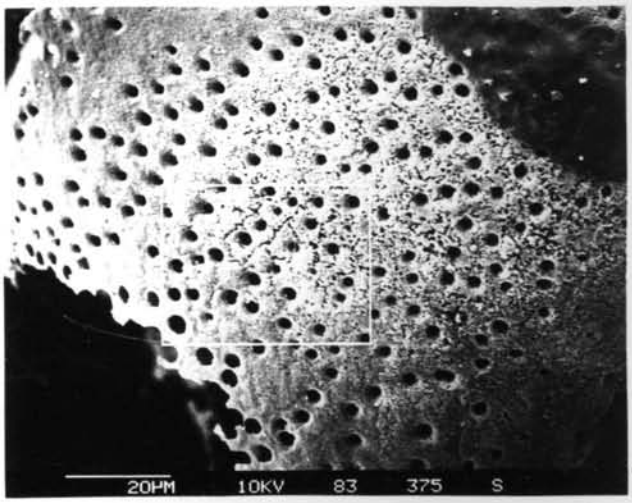
4



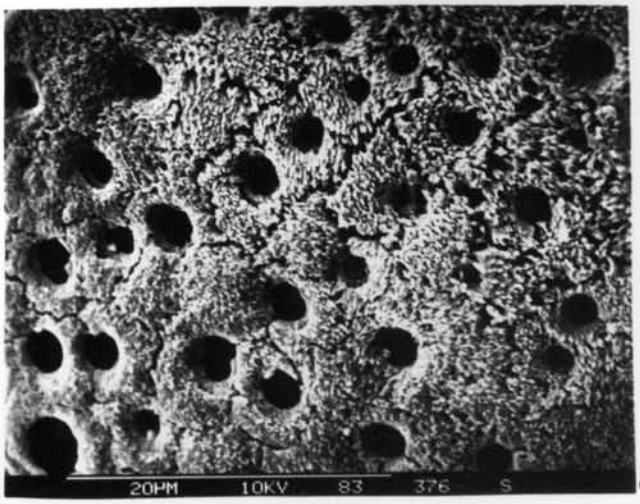
5



6



7



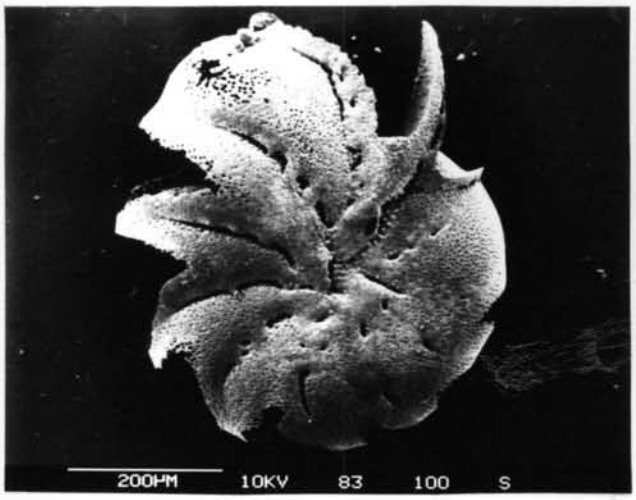
8

Lösungsverlust: 35 %

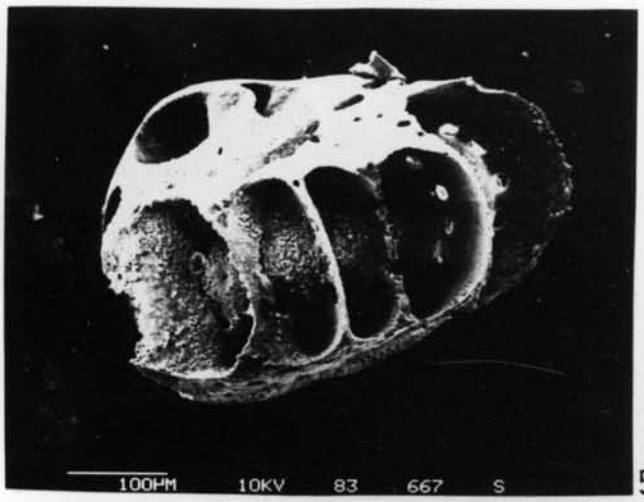
Lösungsverlust: 40 %

Tafel 7, Fig. 1-4	Einbrechen der Schale vom Kiel in Richtung Nabel, Zerreißen der Tapeten kurz vor dem Zusammenbruch der Schale, Lösungsverlust: 45 %
Fig. 5-8	alle Kammern der äußeren Windung randlich stark abgebaut, Mündungen und Reste von Tapeten in den Kammern sichtbar, Lösungsverlust: 50 %
Tafel 8, Fig. 1-4	Schalen der äußeren Windung bis auf den Nabelbereich aufgelöst, Reste von Tapeten auf der inneren Windung, Lösungsverlust: 55 %
Fig. 5-8	randliche Reste der Septen mit organischem Material, Lösungsverlust: 60 %
Tafel 9, Fig. 1-4	äußere Kammern vollständig aufgelöst, Anlösung der inneren Kammern vom Kiel her, in den Poren Reste organischen Materials, Lösungsverlust: 70 %
Fig. 5-8	innerste Kammern bis auf einen Zentralteil abgebaut, Schalenaufbau im Profil erkennbar, Lösungsverlust: 75 %

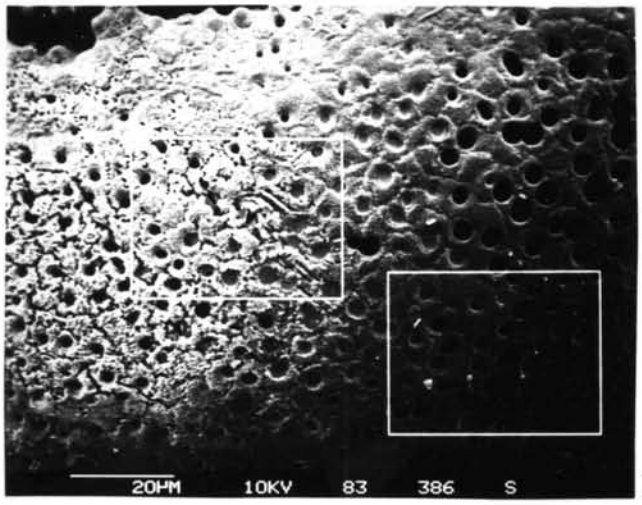
Tafel 7



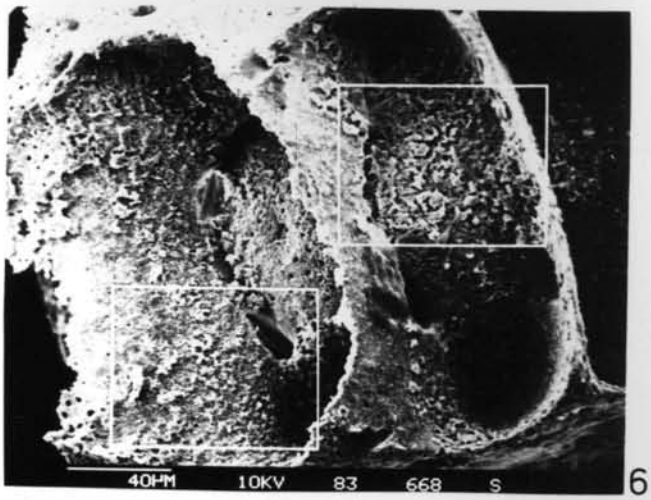
1



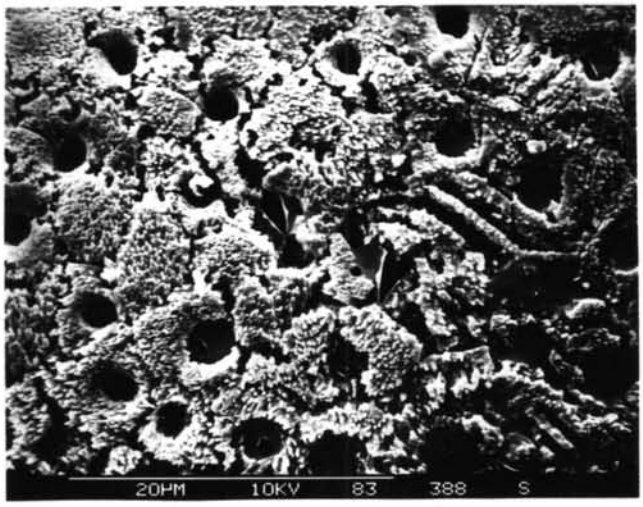
5



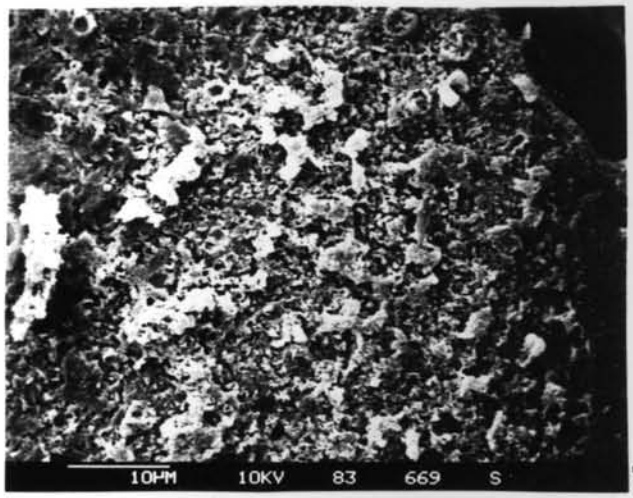
2



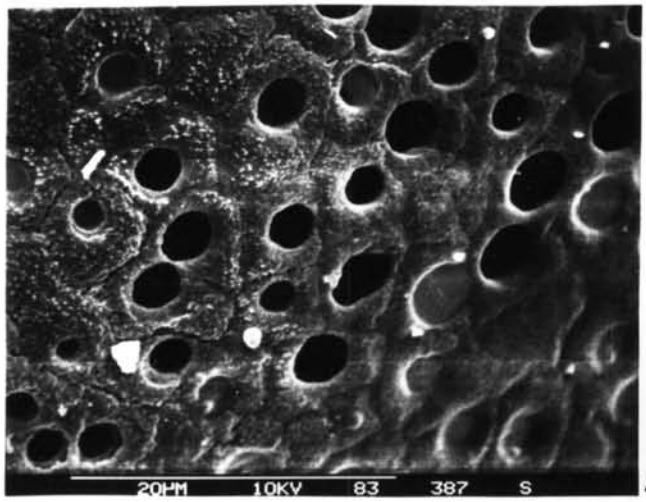
6



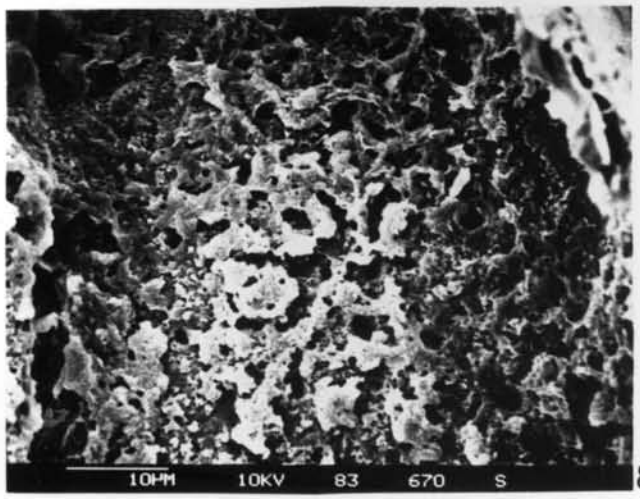
3



7



4

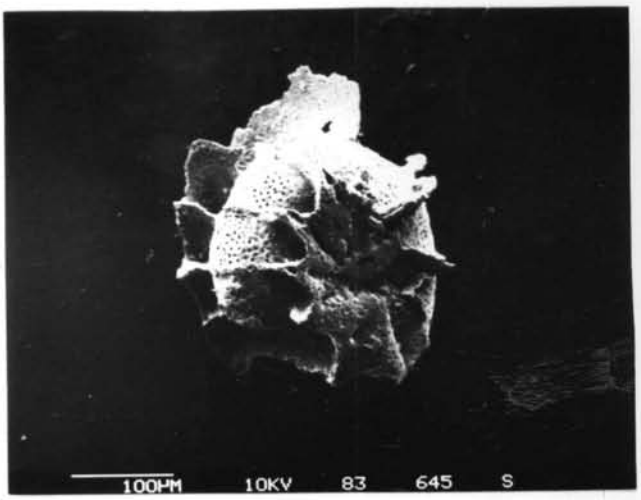


8

Lösungsverlust: 45%

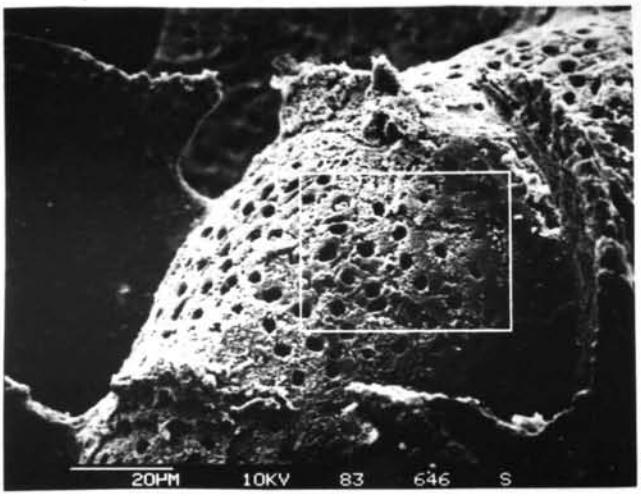
Lösungsverlust: 50%

Tafel 8

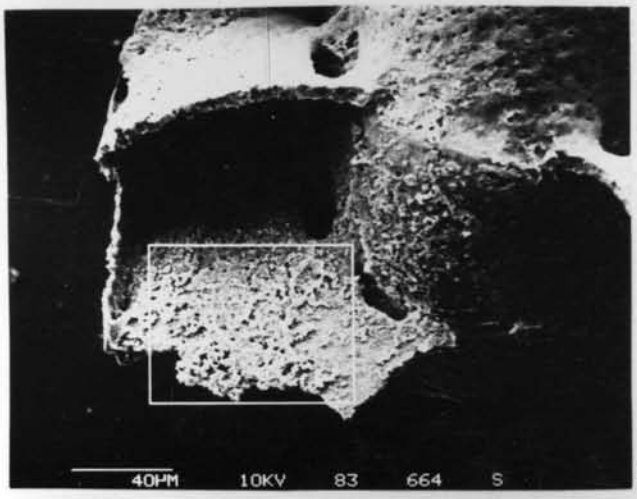


1

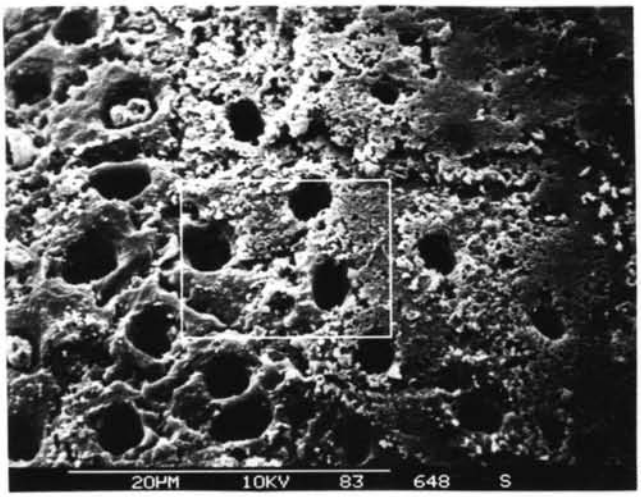
5



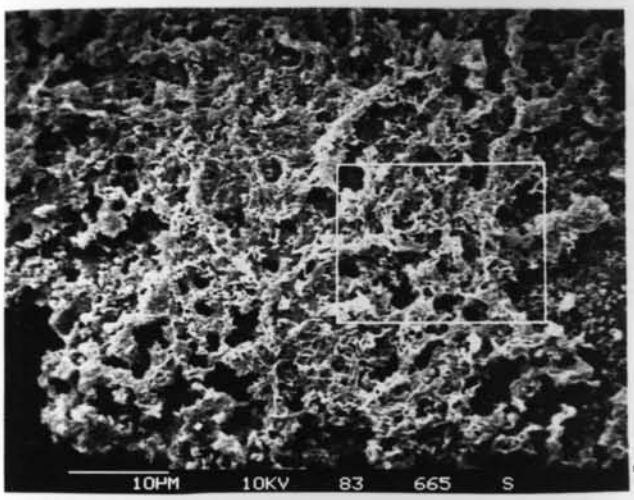
2



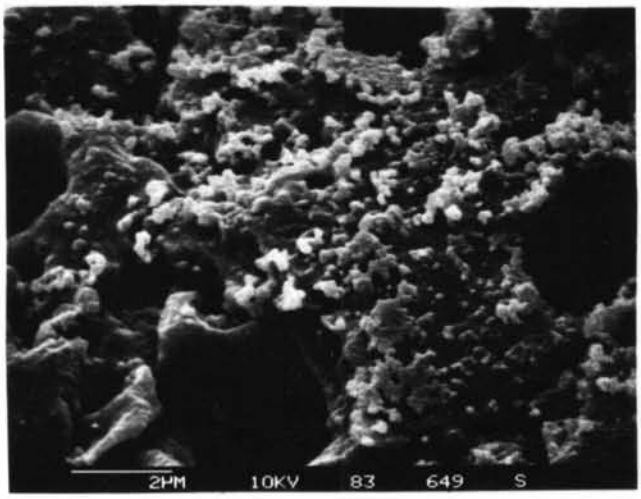
6



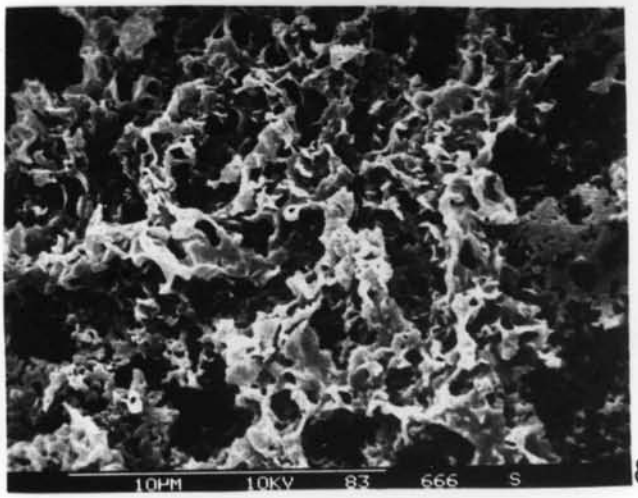
3



7



4

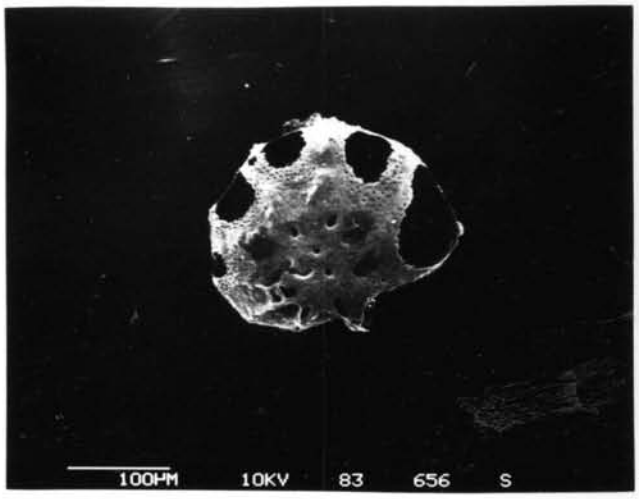


8

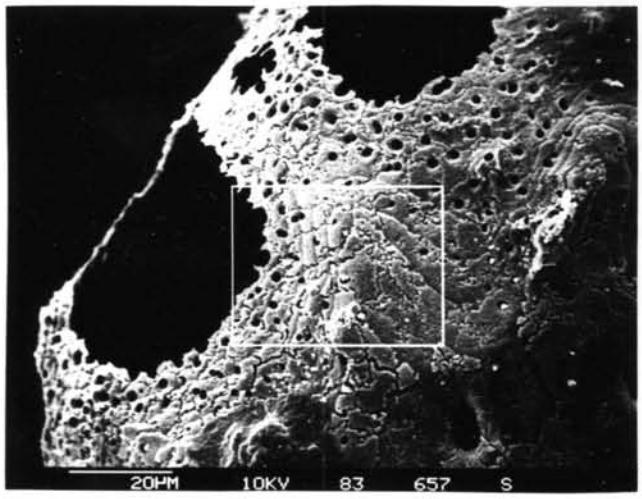
Lösungsverlust : 55 %

Lösungsverlust : 60 %

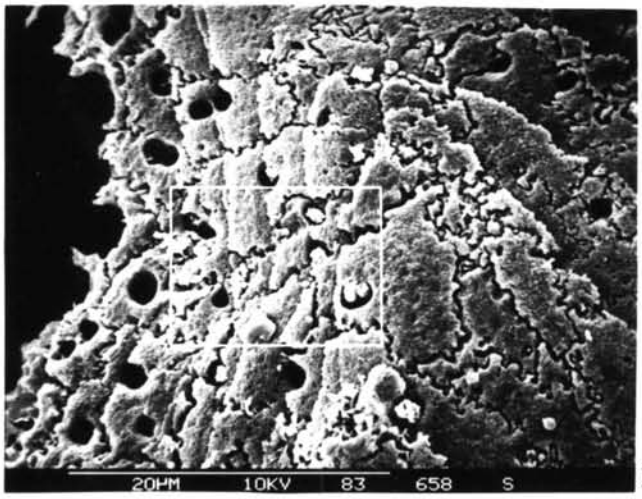
Tafel 9



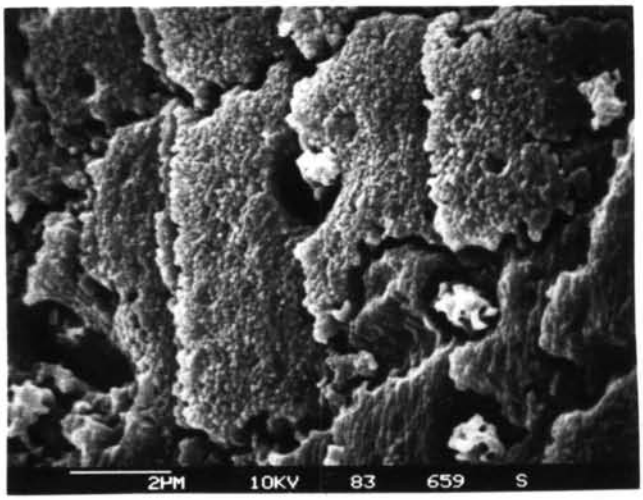
1



2



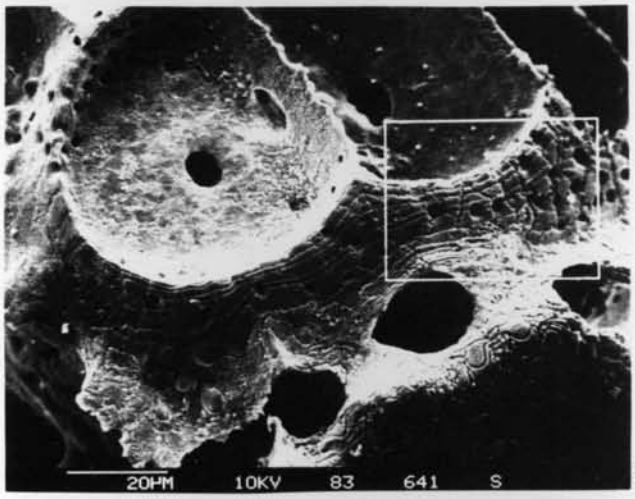
3



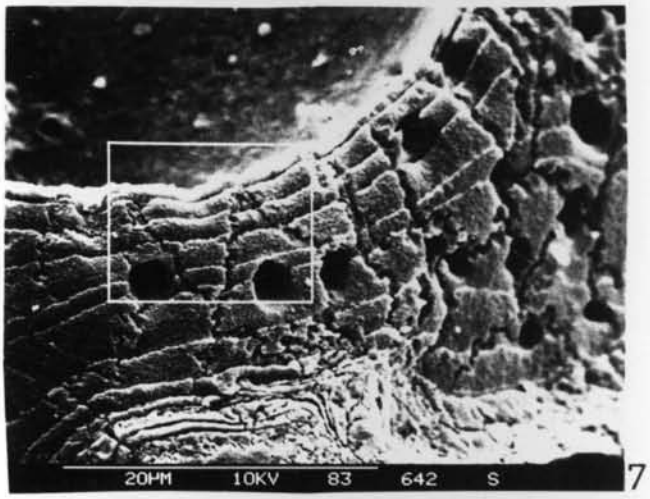
4

Lösungsverlust : 70 %

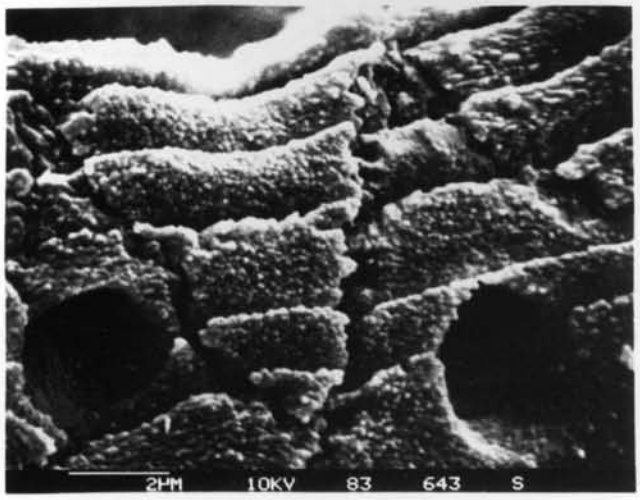
5



6



7



8

Lösungsverlust : 75 %

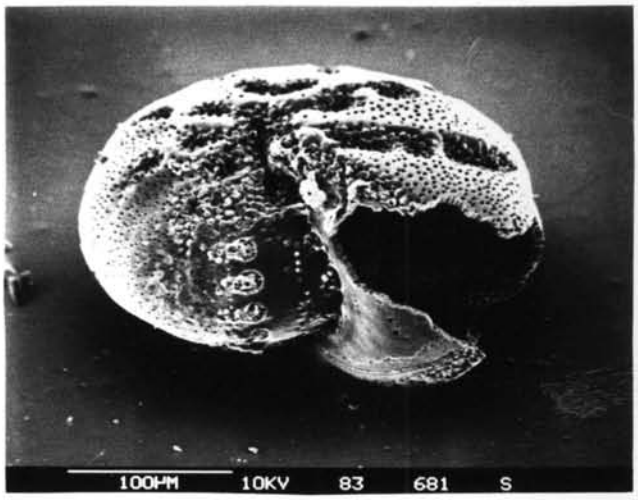
Tafel 10, 11 links:

ABRASION VON *ELPHIDIUM EXCAVATUM EXCAVATUM*

Restsedimentzone des "Hausgartens", 8m Wassertiefe

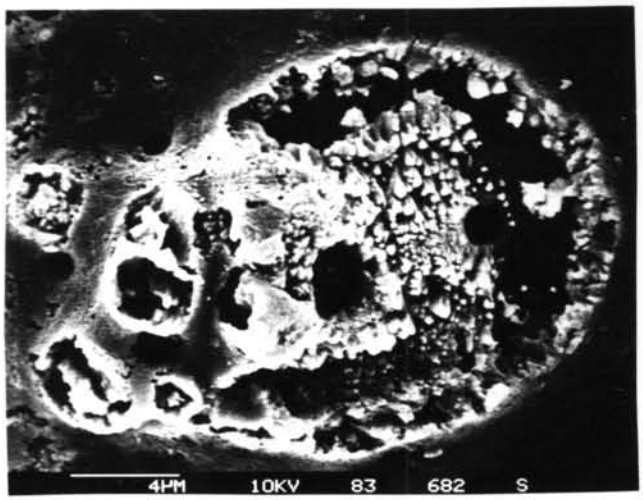
Tafel 10, Fig. 1-4	totes Exemplar mit fehlender und angebrochener Kammer, schwach korrodierte Bruchstellen; Fortsetzung der Kristallite und Poren von der unteren in die obere Lamelle zeigt Fig.4 (Pfeil)
Fig. 5-8	totes Exemplar, nicht oxidiert, zehn Kammern abgebrochen, Bruchstellen korrodiert
Tafel 11, Fig. 1-4	totes Exemplar, nicht oxidiert, mehrere Kammern abgebrochen, Bruchstellen stark korrodiert, organische Hülle nur noch in Flecken erhalten

Tafel 10

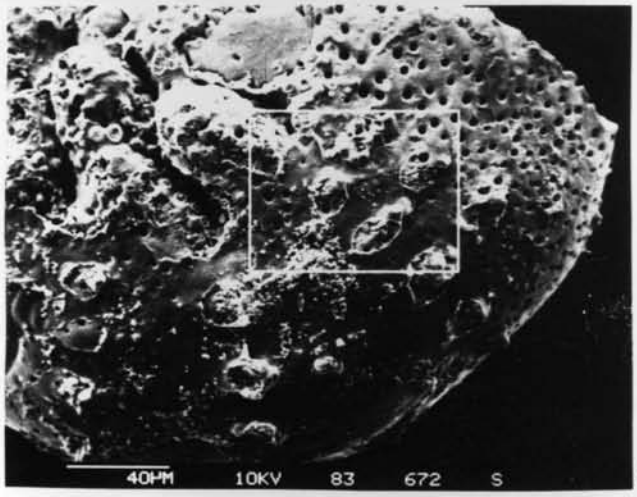


1

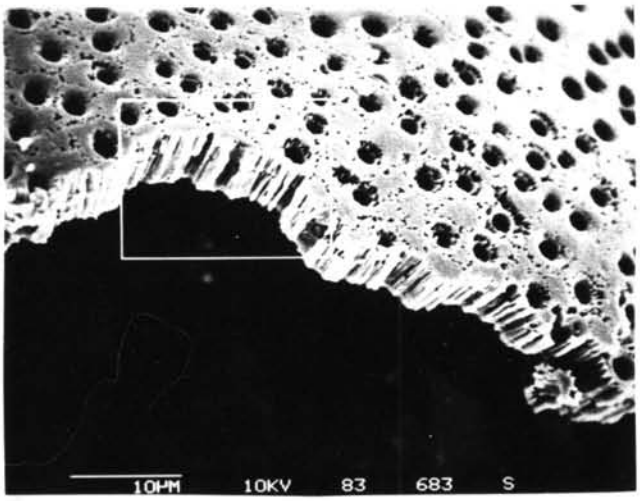
5



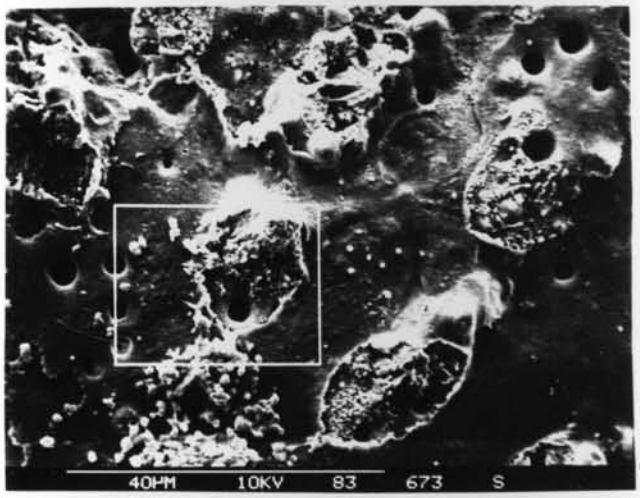
2



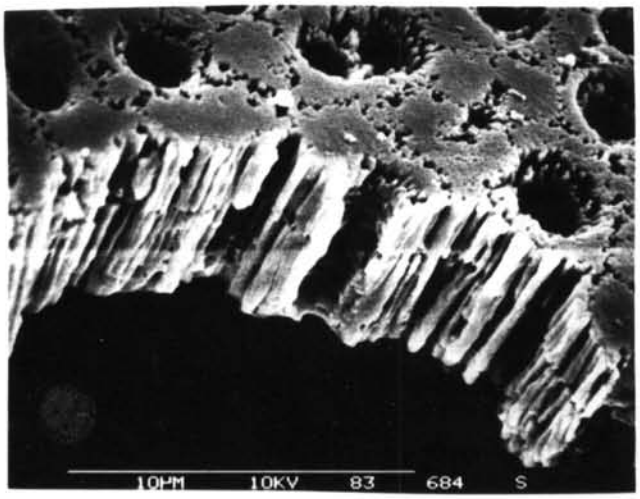
6



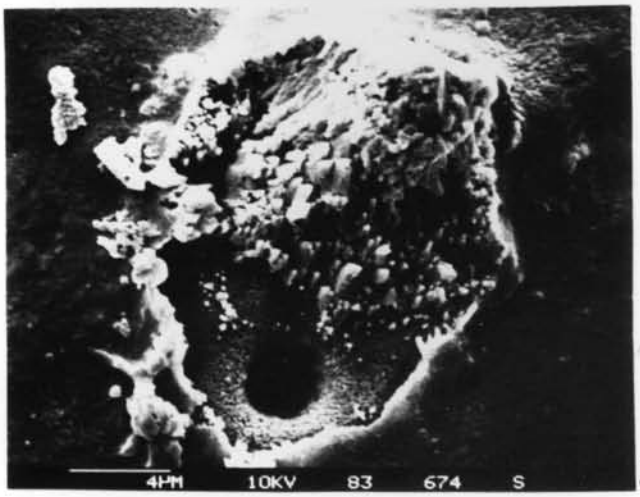
3



7



4



8

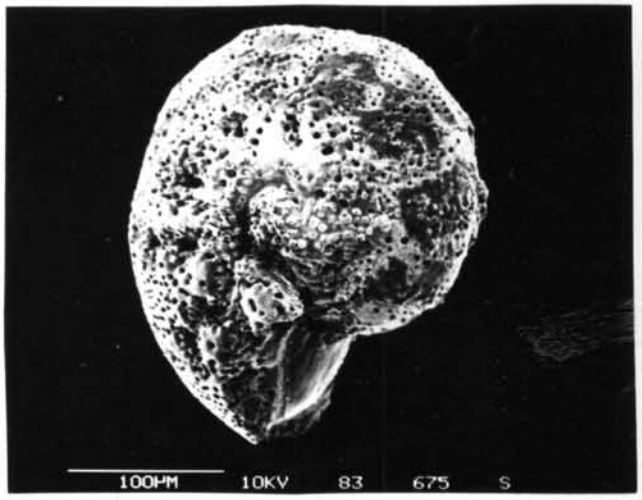
Tafel 11 rechts, 12:

EXPERIMENTELLE KORROSION VON *OPHTHALMINA KILIANENSIS*

"Hausgarten", Algen in 6-8m Wassertiefe

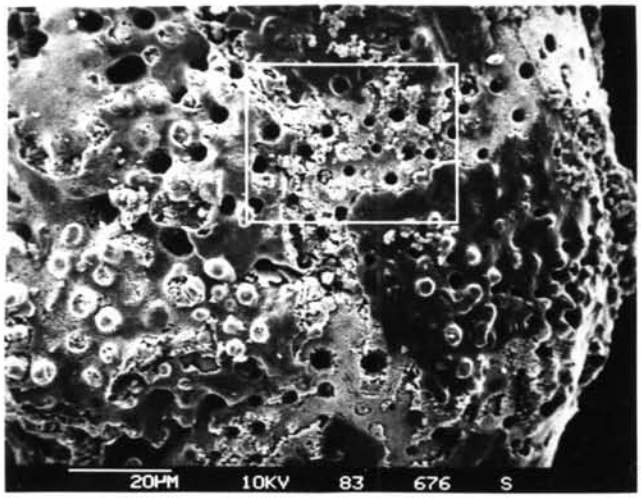
Tafel 11, Fig. 5-8	lebendes Exemplar, oxidiert, nicht angelöst, parallel angeordnete stengelige Kristallite der Oberflächenschicht in verschiedenen Vergrößerungen
Tafel 12, Fig. 1-4	schwache Anlösung, stellenweise Verlust der Oberflächenschicht; in Fig.3 ist eine Vorzugsorientierung noch zu erkennen, Lösungsverlust: 5 %
Fig. 5-8	starke Anlösung, Schale zeigt Löcher und völligen Verlust der Oberflächenschicht, poröser Kristallitfilz der Schale in Fig.8, Lösungsverlust: 30 %

Tafel 11

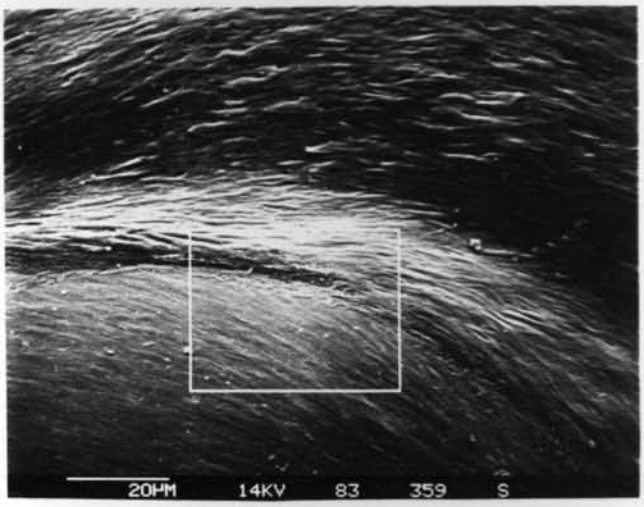


1

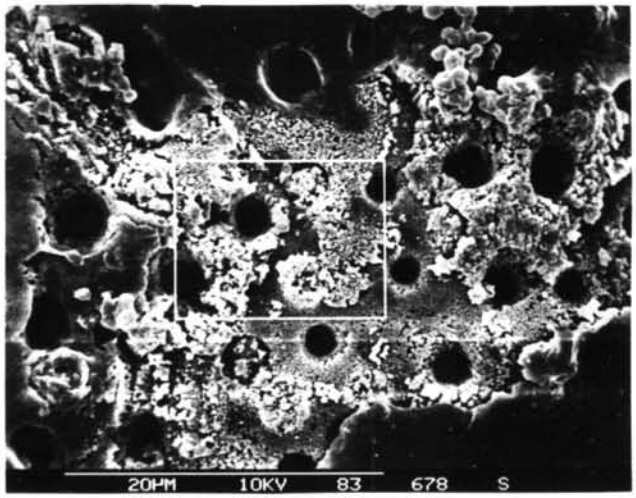
5



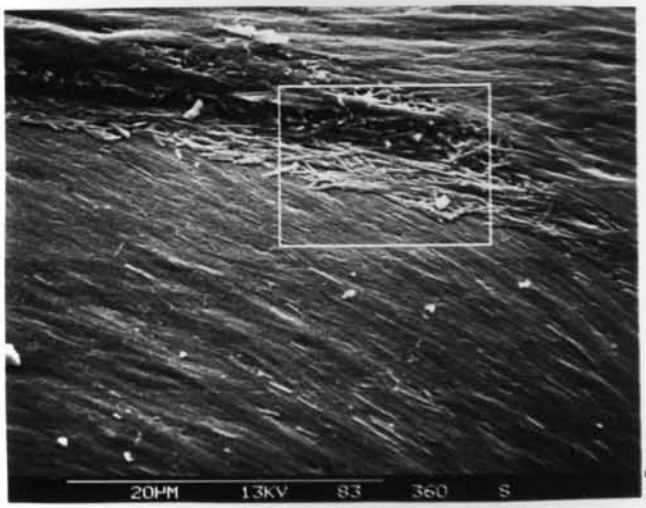
2



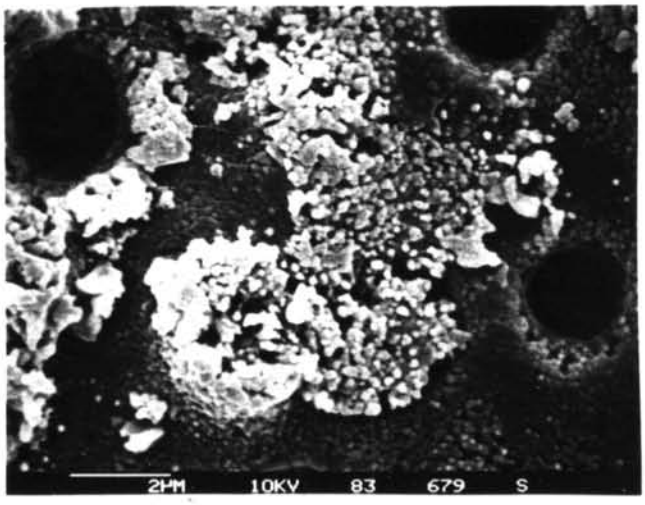
6



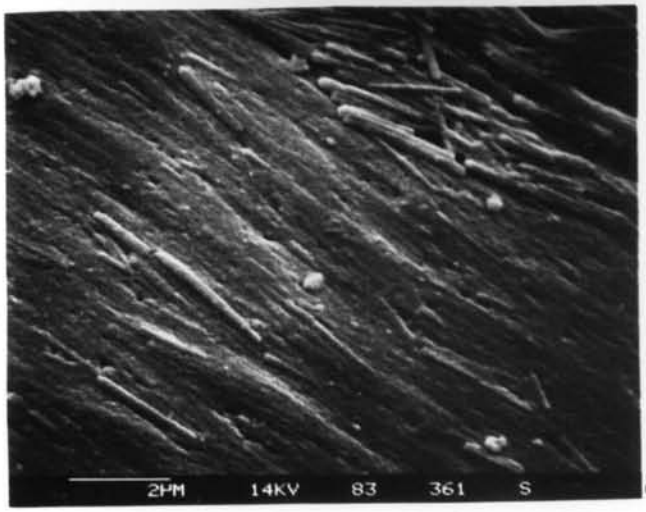
3



7



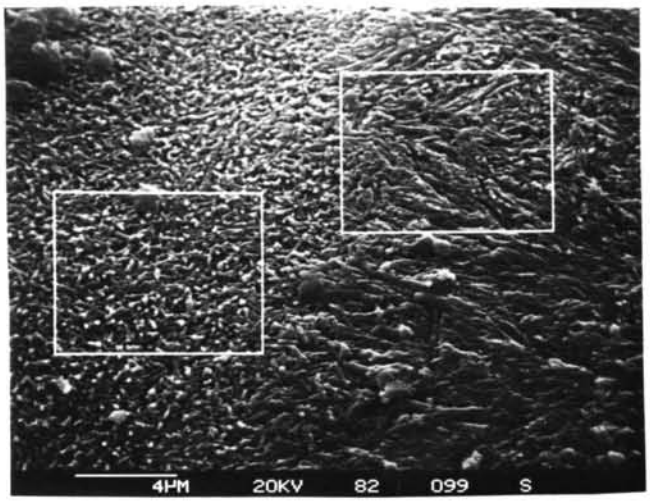
4



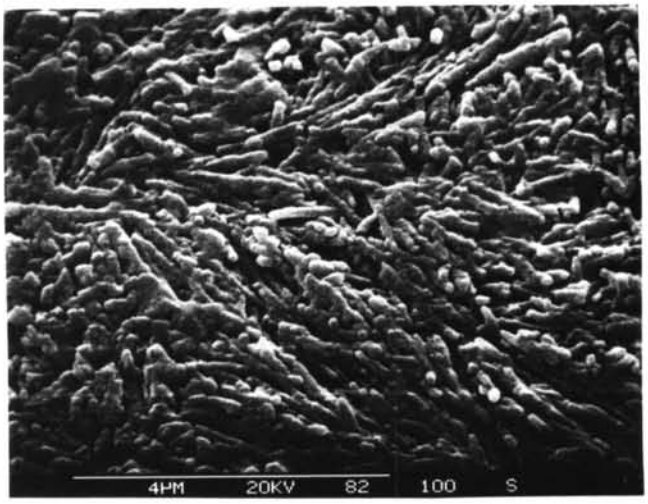
8

Tafel 12

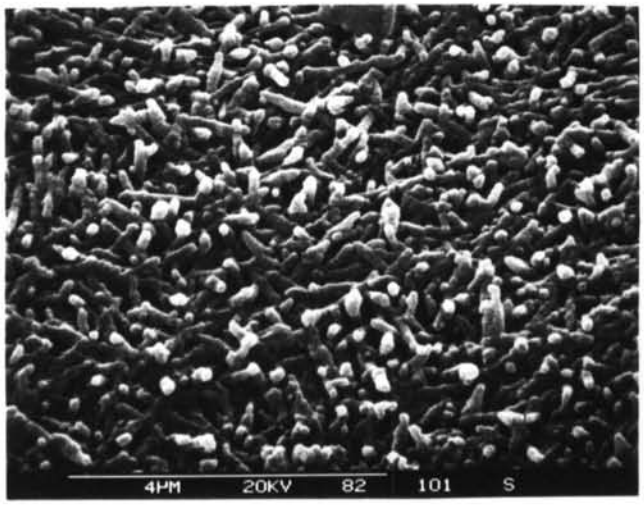
1



2

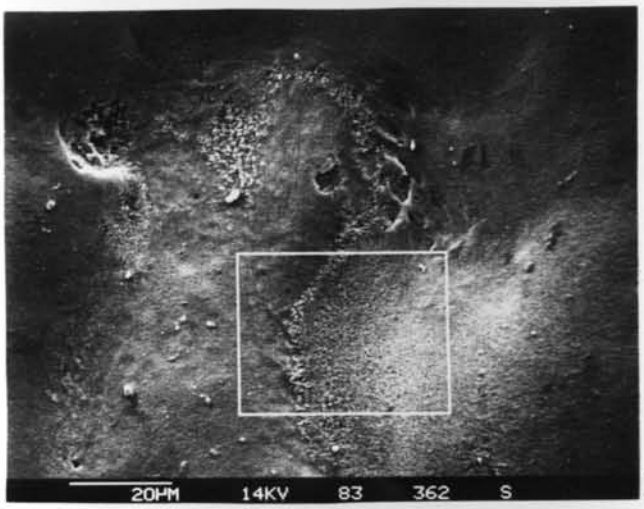


3

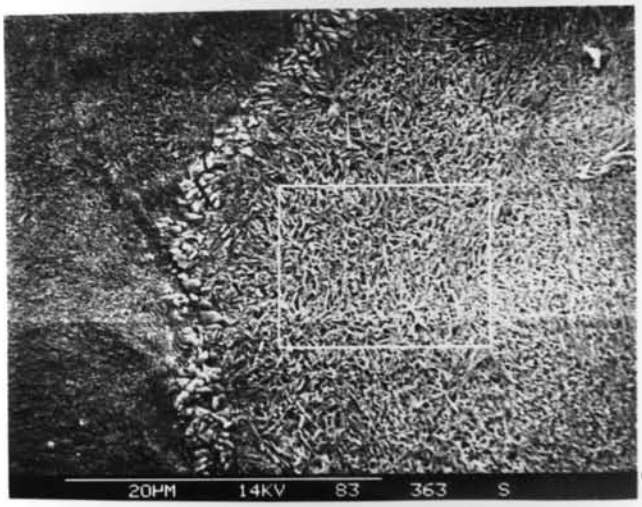


4

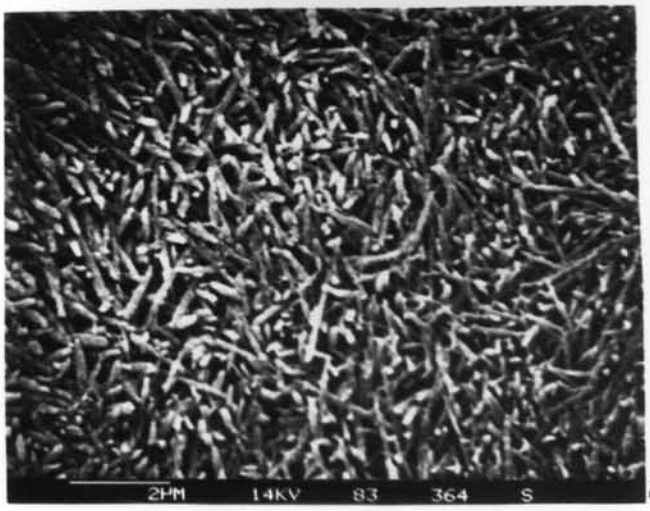
5



6



7

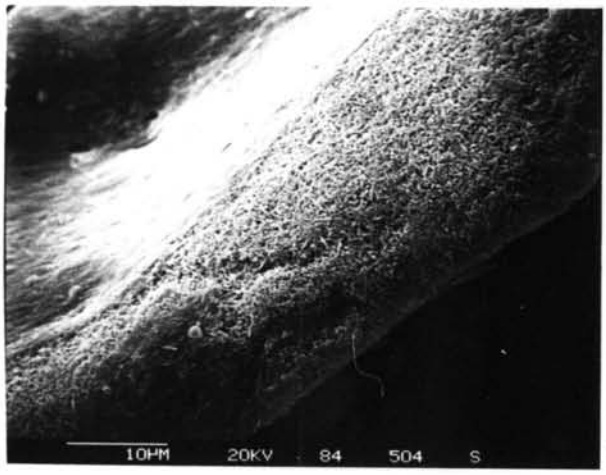


8

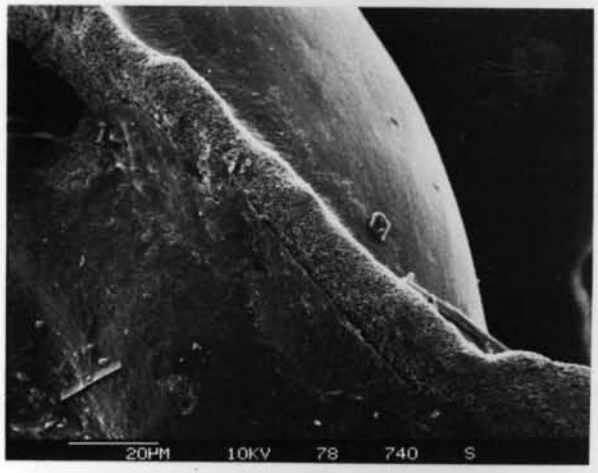
Tafel 13

1

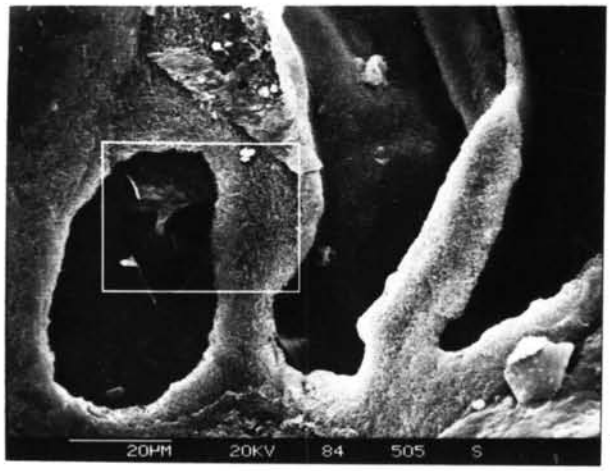
5



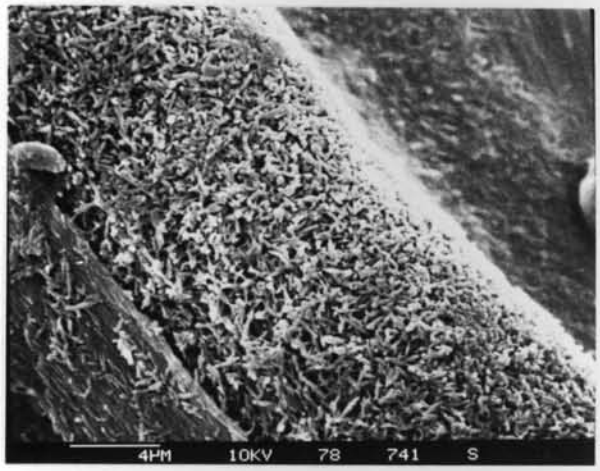
2



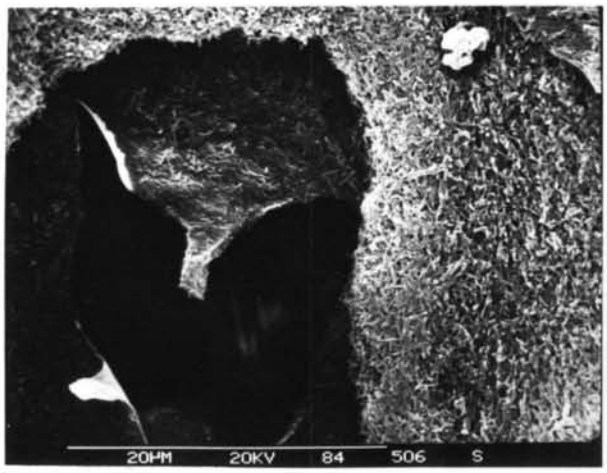
6



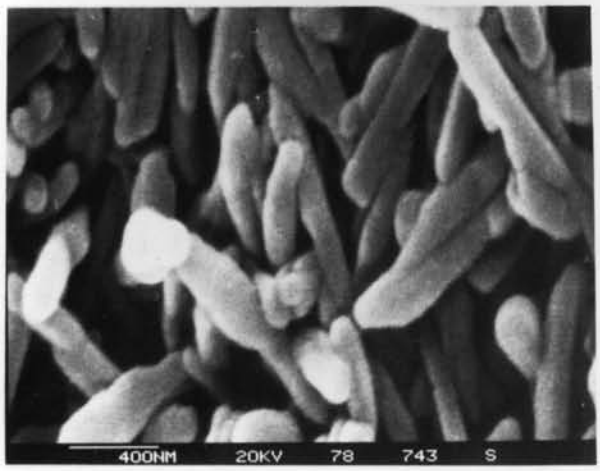
3



7



4



8

Tafel 13:

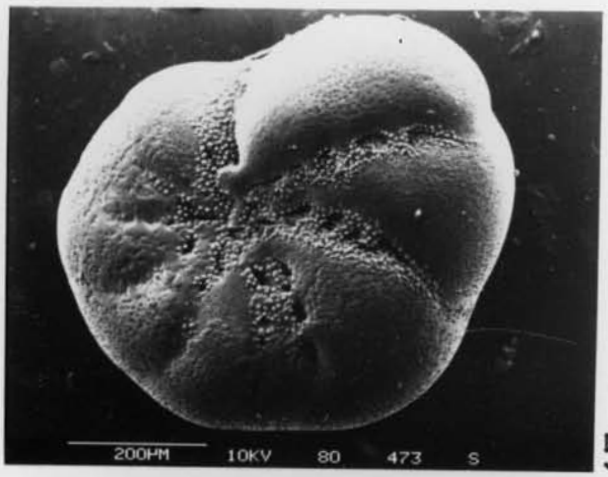
NATÜRLICHE FRAGMENTIERUNG VON *OPHTHALMINA KILIANENSIS*

"Hausgarten", 23m Wassertiefe

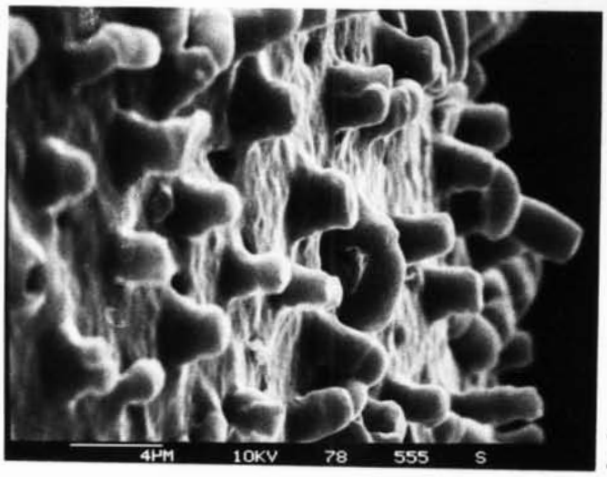
Tafel 13, Fig. 1-4	große Kammern angebrochen, Bruchstellen und Schale korrodiert, Oberflächenschicht stellenweise noch erhalten (dunkle Flächen), innere Tapete zerreißt
Fig. 5-8	stark zerbrochenes Exemplar, Oberflächenschicht zum großen Teil noch erhalten, wird aber von den Bruchstellen aus abgebaut, Bruchflächen rundlich korrodiert

Tafel 14

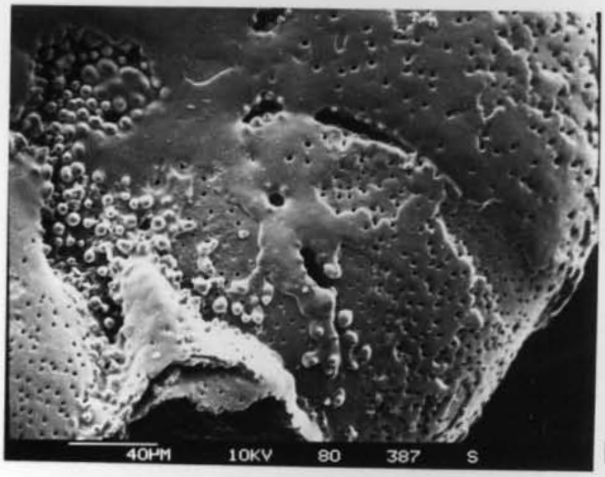
1



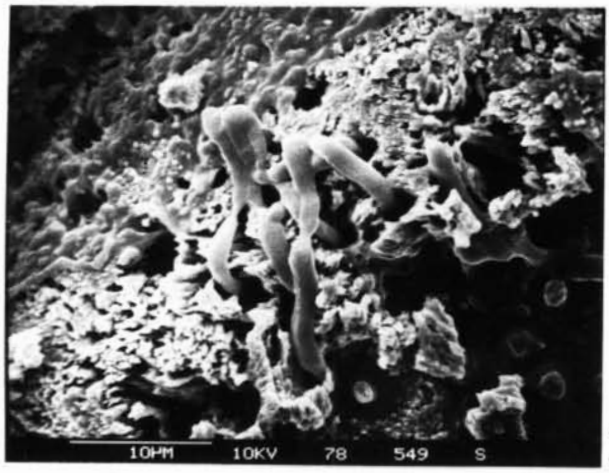
5



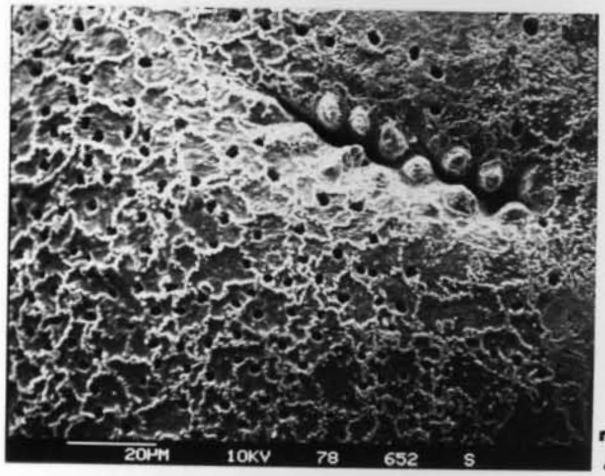
2



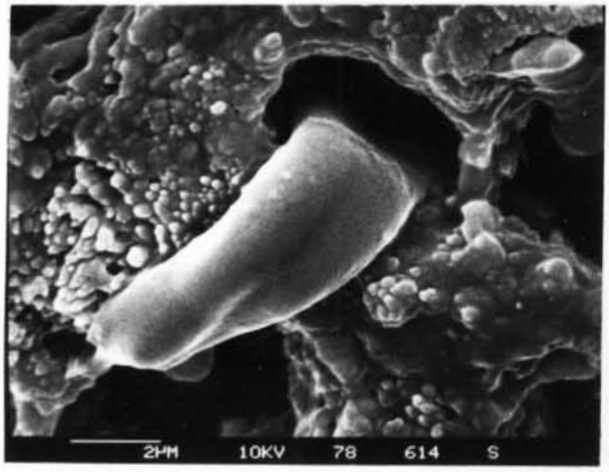
6



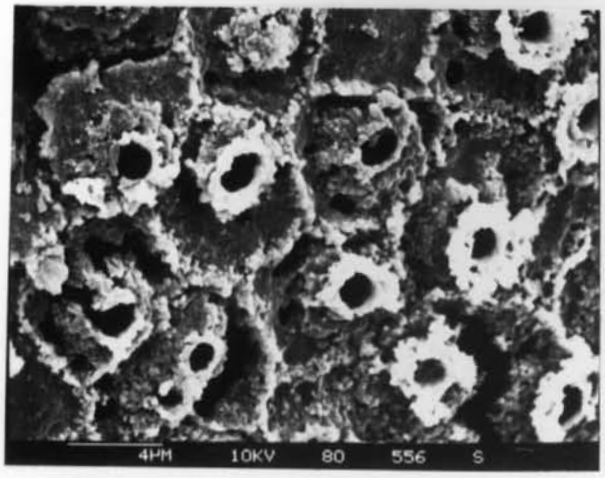
3



7



4



8

Tafel 14:

VERTEILUNG DER ORGANISCHEN MATRIX IN DER SCHALE VON *ELPHIDIUM SP.*

Tafel 14, Fig. 1-4	lebendes Exemplar, nicht oxidiert, stark künstlich angelöst, inneres organisches Material und Porenfüllungen werden sichtbar
Fig. 5+6	unvollständig oxidiertes, lebendes Exemplar zeigt unregelmäßige Verteilung der äußeren organische Hülle
Fig. 7+8	lebendes Exemplar, schwach oxidiert und angelöst, Porenauskleidungen und organische Matrix in den Suturen treten reliefartig hervor