

Meyniana	33	Seite 85–96	2 Abb., 1 Tab., 2 Taf.	Kiel, Nov. 1981
----------	----	-------------	---------------------------	-----------------

Zur Fragmentierung benthischer Foraminiferen in der Kieler Bucht (Westliche Ostsee)

Beitrag Nr. 364 aus dem Sonderforschungsbereich 95
der Universität Kiel
„Wechselwirkung Meer – Meeresboden“

HANNES GROBE UND DIETER FÜTTERER

GROBE, HANNES und FÜTTERER, DIETER, 1981: Zur Fragmentierung benthischer Foraminiferen in der Kieler Bucht (Westliche Ostsee). (On fragmentation of benthic foraminifers in the Kiel Bight (Western Baltic). – *Meyniana* **33**: 85–96, 2 fig., 1 tab., 2 pl., Kiel.

Early diagenetic ultrastructural alterations of benthic foraminifers of the genera *Elphidium* and *Ophthalmina* from the shallow water sediments of the Kiel Bight were investigated by scanning electron microscopy. Pure solution patterns were deduced from supplementary experiments.

Several carbonate destroying processes can be specified by ultrastructural patterns of the shell surfaces. Based on these patterns three zones are established, each showing different mechanisms of shell fragmentation: 1) zone of abrasion, 2) zone of disintegration, 3) zone of corrosion. This zonation depends on the water depth and is caused primarily by water agitation and by undersaturation of the bottom water with respect to carbonate.

Cand. geol. H. GROBE und Dr. D. FÜTTERER, Geologisch-Paläontologisches Institut und Museum der Universität, Olshausenstr. 40/60, D-2300 Kiel.

Kurzfassung

An benthischen Foraminiferen der Gattungen *Elphidium* und *Ophthalmina* aus dem Flachwasser der Kieler Bucht wurden die frühdiagenetischen Veränderungen der Ultrastruktur der Schalenoberfläche durch Abrasion und Korrosion im Raster-Elektronenmikroskop (REM) untersucht. Zur Ermittlung der reinen Lösungsstrukturen wurden ergänzend Experimentreihen durchgeführt.

Den verschiedenen schalenzerstörenden Prozessen können spezifische Ultrastrukturen zugeschrieben werden. Anhand dieser Strukturen können im Bereich der Kieler Bucht drei Fragmentierungszonen mit schwerpunktmäßig unterschiedlichen Karbonat-Zerstörungsmechanismen unterschieden werden: 1) Abrasionszone, 2) Zerfallszone, 3) Korrosionszone. Diese Zonierung ist tiefenabhängig und ursächlich im wesentlichen von der Wasserbewegung und dem Sättigungszustand des Bodenwassers gegenüber Karbonat abhängig.

Einleitung

In der Westlichen Ostsee wird nur ein Teil des durch Organismen produzierten karbonatischen Schalenmaterials im Sediment abgelagert (RESIG, 1965; LEWY, 1975; WWEFER, 1976); der überwiegende Teil wird durch mechanische Beanspruchung (Abrasion) und chemische Anlösung (Korrosion) wieder zerstört. Dabei spielen im Flachwasser Sedimenterosion und Umlagerung, in größeren Wassertiefen die Untersättigung des Bodenwassers gegenüber Karbonatmineralen die wichtigste Rolle.

In der vorliegenden Untersuchung wird am Beispiel benthischer Foraminiferen der Frage nachgegangen, ob und wie sich diese Prozesse in den Oberflächenstrukturen der Kalkschalen abbilden.

Anhand von Experimentreihen zur Korrosion von Foraminiferenschalen wird zunächst geklärt, wie weit sich beim Anlösungsprozess spezifische Muster in der Ultrastruktur der Foraminiferenschale herausbilden. Im folgenden Schritt soll im Vergleich mit natürlich fragmentierten Schalen die Bedeutung der einzelnen Vorgänge in ihrer natürlichen Umgebung abgeschätzt werden.

Grundlage dieser Untersuchung ist das Datenmaterial, das einer der Autoren (H.G.) im Rahmen seiner Diplomarbeit gesammelt hat. Dank gilt unseren Kollegen Dr. C. SAMTLEBEN und Dr. G. WEFER für Diskussion und Anregung sowie Dr. P. MÜLLER, Dipl.-Geol. H. HEUSER und Dr. M. HARTMANN für die Überlassung von unpubliziertem Datenmaterial. Besonderer Dank gilt der Tauchgruppe der Universität Kiel, besonders T. KOLLATSCHNI und R. MASON. Für umfangreiche technische Hilfe bei Fotoarbeiten und am REM danken wir Frau U. SCHULDT und Herrn W. REIMANN. Der Deutschen Forschungsgemeinschaft danken wir für die Förderung der Untersuchungen im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 95.

Das Untersuchungsgebiet

Das Probenmaterial stammt aus dem „Hausgarten“ des Sonderforschungsbereichs 95 der Universität Kiel, einem durch Tonnen markierten Untersuchungsgebiet am Ausgang der Eckernförder Bucht vor Bokniseck in der Westliche Ostsee.

Eine genaue Kartierung und Sedimentanalyse des „Hausgartens“ erfolgte durch FLEMMING & WEFER (1973) und WEFER et al. (1974, 1976). Danach läßt sich das Gebiet in drei Sedimentzonen gliedern: 1) ein küstennahes Abtragungsgebiet mit Restsediment, 2) ein küstenfernes Sand-Anhäufungsgebiet und 3) ein Schlickgebiet (Abb. 1).

Das Restsedimentgebiet erstreckt sich von 9 bis 13 m Wassertiefe. Der dort anstehende Geschiebemergel wird fleckenhaft von grobem Restsediment bedeckt. Felder aus Grob- bis Mittelsand sowie mit Algen bewachsene Steine sorgen durch ihre Bewegung in Verbindung mit Durchweichung und Bohrtätigkeit der Muschel *Barnea candida* für eine Erosion des Geschiebemergels. Durch die Sedimentbewegung erfolgt in diesem Bereich eine Abrasion der Karbonatschalen, wie Beobachtungen an hier lebenden *Elphidium excavatum excavatum* und an *Ophthalmina kilianensis* zeigten.

Die Erosion im flacheren Wasser liefert das Material für die Sedimentation in Wassertiefen über 13 m: Zwischen 13 m und 23 m werden Mittel- bis Feinsand (= küstenfernes Sandanhäufungsgebiet), unterhalb von 23 m Schlack (= Schlackgebiet) abgelagert.

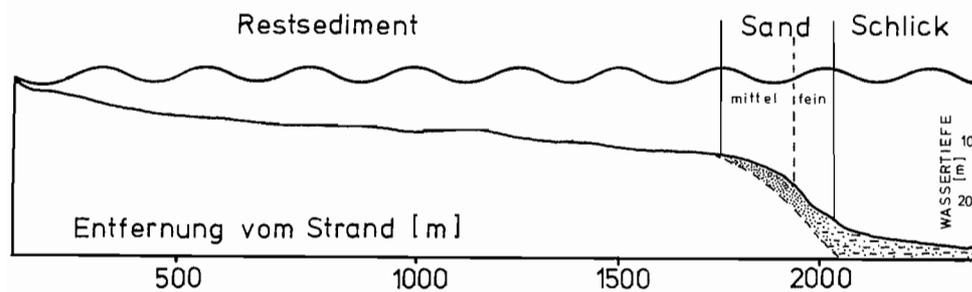


Abb. 1 Profil und Sedimentzonen des „Hausgartens“ (umgezeichnet nach WEFER et al., 1974)

Die Hydrographie des „Hausgartens“ ist ausführlich bei WEFER (1976) dargestellt. Die O_2 -Sättigung des Bodenwassers zeigt einen deutlichen Jahresgang mit sehr niedrigen Werten in den Monaten September/Oktober. In größeren Wassertiefen (24–26 m) kann sogar ein O_2 -Defizit entstehen (HEUSER unpubl.).

Der Sättigungszustand der Wassersäule gegenüber Karbonatmineralen folgt in seinem Jahresgang etwa dem Verlauf des Sauerstoffgehaltes. Eine Untersättigung im Bodenwasser kann jedoch bereits in den Sommermonaten auftreten (WEFER, 1976).

Material

Für die Untersuchung der Oberflächen-Ultrastruktur der Schalen sowie ihrer Veränderung bei Abrasion und Korrosion wurden zwei verschiedene Foraminiferengruppen mit unterschiedlicher Schalenstruktur ausgewählt, als Vertreter der hyalinschaligen Foraminiferen die rotaliide Gattung *Elphidium*, als Vertreter der porzellanschalenigen Milioliden die Gattung *Ophthalmina*.

Die hyaline Schalenstruktur, die bei allen planktischen und zahlreichen benthischen Formen zu finden ist, besteht aus zahlreichen kleinen, lateral unregelmäßig begrenzten und ineinander verzahnten Kalzitplättchen (vgl. Taf. 1 Fig. 2), die übereinanderliegende Säulen (TOWE & CIFELLI, 1967; HANSEN, 1972) oder Stapel (HANSEN & REISS, 1971) bilden können. Sie werden aber auch als Laminae oder Laminaestapel beschrieben (BELLEMO, 1974a, 1974b, 1976). Die einzelnen Plättchen werden bei *Elphidium* aus zahlreichen stengelig-faserigen Kristalliten einheitlicher Orientierung aufgebaut (vgl. Taf. 1 Fig. 4). In der lebenden Foraminifere ist jedes dieser Plättchen von einer organischen Matrix eingehüllt. Dadurch nimmt zum einen die Schalenstabilität zu, zum anderen sind die Plättchenkristallite gegen äußere Einflüsse geschützt.

Beim Wachstum von *Elphidium* wird jede neue Kammer aus einer einzigen Lage von lateral puzzle-artig ineinander verzahnten Kalzitplättchen gebildet (vgl. Taf. 1 Fig. 2). Dabei wird jedoch jede ältere Kammer von einer gleich dicken Schalenlamelle überzogen; das führt zu einer kontinuierlichen Schalenverdickung mit zunehmendem Kammeralter.

Die porzellanige Schalenstruktur, auf die Milioliden beschränkt und ausschließlich aus Hoch-Mg-Kalzit aufgebaut, besteht im wesentlichen aus einem wahllos dreidimensional angeordneten Gefüge winziger, nadelig-stengeliger Kristallite. Sie sind im äußeren Schalenbereich oberflächenparallel orientiert und können dort zu einem geschlossenen parkettartigen Muster zusammentreten (vgl. Taf. 1 Fig. 8).

Beim Wachstum von *Ophthalmina* wird jeweils eine neue, größere Kammer vorgebaut, deren Wandstärke nicht wesentlich von den älteren Kammern abweicht. Es erfolgt keine spätere Schalenverdickung. Lediglich an den Anheftungsstellen kommt es durch die Überlagerung zu einer leistenartigen Verdickung der Schale.

Exemplare der Gattungen *Elphidium* und *Ophthalmina* sind in der Kieler Bucht häufig und lassen sich daher leicht in größeren Mengen gewinnen. Aus einer Wassertiefe von 23 m wurde *E. incertum* und *E. albiumbilicatum*, aus dem flacheren Wasser *E. excavatum excavatum* untersucht. Die Miliolidenart *O. kilianensis* lebt auf Algen im Flachwasser. Zur Untersuchung des natürlichen Zerfalls mußte bei dieser Species auf Material aus größeren Wassertiefen zurückgegriffen werden, da im Sediment des Flachwasserbereichs keine Exemplare gefunden wurden. Offensichtlich werden die von den Algen abfallenden Schalen rasch durch Strömung und Wasserbewegung in größere Tiefen verfrachtet.

Probennahme und Methoden

Die Probennahme erfolgte durch Taucher mit einem „Airlift“. In verschiedenen Wassertiefen wurde auf diese Weise jeweils 1 m² Meeresboden abgesaugt. O.

kilianensis besiedelt auf Geröllen wachsende Algen im flachen Wasser. Diese wurden von Tauchern vorsichtig von ihrer Unterlage gelöst und unter Wasser in weithalsige Flaschen gefüllt.

Alle Proben wurden sofort mit der doppelten Volumenmenge einer Lösung von Bengalrosa in Spiritus versetzt und gut geschüttelt. Die Sandfraktion wurde nach acht Tagen durch nasses Sieben abgetrennt, bei 80° C getrocknet und die Foraminiferen durch zweimaliges Konzentrieren mit Tetrachloräthylen vom Sediment getrennt. Eine weitere Abtrennung der Gattungen *Elphidium* und *Ophthalmina* vom Konzentrat und eine Aufteilung in lebende und tote Exemplare (Trennung rosa/weiße Schalen) erfolgte durch Auslesen mit einem feuchten Pinsel unter dem Mikroskop.

Alle Foraminiferen wurden nach dem Auslesen 10 Minuten mit Ultraschall behandelt, um störende feinste Sedimentpartikel abzulösen. Die Beseitigung der organischen Substanz der lebenden Foraminiferen erfolgte durch Oxidation mit Chlorbleichlauge (Natriumhypochlorit, NaOCl).

Zur experimentellen Darstellung des Gehäusezerfalls durch Korrosion wurden die Foraminiferen kontrolliert einer 0,01 molaren Titriplex-Lösung ausgesetzt. Bei der gewählten Konzentration ist eine Foraminifere nach etwa zwei Stunden vollständig gelöst. Die einzelnen Zerfallsstadien lassen sich dann gut in Lösungsintervallen von mehreren Minuten erfassen. Zur Ermittlung des Gewichtsverlustes wurden jeweils acht Foraminiferen gewogen, gemeinsam einem Lösungsintervall ausgesetzt, gewaschen, getrocknet und wieder gewogen.

Für die Untersuchung im Raster-Elektronenmikroskop wurden die Foraminiferen mit Hilfe von Fotopapier und doppelseitigem Klebeband auf REM-Objekträger montiert und mit Kohle und Gold-Palladium bedampft.

Experimentreihen zur Korrosion von *E. incertum* und *O. kilianensis*

Die organische Matrix, die alle Schalenelemente einhüllt, ist ein natürlicher Schutz gegen Korrosion. Vor der Durchführung der Anlösungsexperimente wurde diese Matrix daher oxidativ entfernt.

Die Abhängigkeit des Gewichtsverlustes von der Lösungszeit bei der Behandlung von *E. incertum* und *O. kilianensis* mit Titriplex ist in Abb. 2 dargestellt. Darin entspricht jeder Punkt einem Durchschnittswert aus acht bzw. fünf Testexemplaren je Lösungsintervall. Der rasche Anstieg des Lösungsverlustes zu Beginn bei *Elphidium* sp. ist im wesentlichen auf den sehr schnellen Verlust der letzten Kammer zurückzuführen (vgl. Taf. 1 Fig. 1). Eine mechanische Zerstörung beim Bewegen der Exemplare während der Präparation ist nicht auszuschließen, da die letzte Kammer nur aus einer Lage besteht und deshalb sehr zerbrechlich ist.

Einige Lösungsstadien von *E. incertum* sind exemplarisch auf Taf. 1 dargestellt. Ein Lösungsverlust von 5% (Taf. 1 Fig. 1–2) zeigt, neben dem Zusammenbruch der letzten Kammer, im wesentlichen eine schwache Herauspräparierung der einzelnen Plättchenkristallite. Die letzte Kammer weist sowohl eckige Bruchkanten als auch zum Rand hin ausgekeilte Wände mit gerundeten Kanten auf. Erscheinungen, die sowohl auf mechanisches Zerbrechen als auch auf rein lösende Vorgänge schließen lassen.

Bei einem Lösungsverlust von 35% (Taf. 1 Fig. 3–4) zeigt sich eine weitgehende Zerstörung der Schale im Kielbereich. An den Rändern der sich rasch erweiternden Löcher dünnt die Schale bis auf $< 1 \mu\text{m}$ aus. Die stengelartig-nadeligen Kristallite, in den einzelnen Plättchenelementen unterschiedlich orientiert, sind deutlich herauspräpariert (Taf. 1 Fig. 4).

Bei einem Lösungsverlust von 50 % (Taf. 1 Fig. 5–6) ist die äußere Windung, bestehend aus etwa zehn Kammern, bis auf randliche Septenteile zerstört. Auf den inneren Teilen lassen sich häufig Reste der von REISIG (1965) aus Ostseesedimenten beschriebenen Innentapeten beobachten (Taf. 1 Fig. 6).

Bei einem Lösungsverlust von 75 % bleibt von den Foraminiferen nur ein kleiner aber massiver Kern bestehen. Er wird von den innersten und ältesten Kammern gebildet, deren Widerstandsfähigkeit sehr groß ist, da die Schale in diesem Bereich aus zahlreichen, übereinandergelagerten Lamellen besteht.

Eine zusammenfassende Betrachtung des Lösungsverlaufes bei *E. incertum* zeigt ein Fortschreiten der Zerstörung von der jüngsten Kammer zu älteren hin. Das hat seine Ursache in der in gleicher Richtung zunehmenden Schalendicke. Parallel dazu zeigt sich ein Fortschreiten der Lösung vom Kielbereich zum Nabel hin; die Ursache ist in der stärkeren Perforation des Kiels zu suchen.

Als typische Lösungsstruktur ist bei *Elphidium* in erster Linie das Auftreten von nadelig-stengeligen Kristalliten (Taf. 1 Fig. 4) in den einzelnen Plattenelementen zu nennen. Charakteristisch sind darüber hinaus abgerundete Kanten und besonders das Ausdünnen der Schale an den Rändern von Löchern durch sukzessiven Verlust einzelner Schalenlamellen.

O. kilianensis ist im Lösungsexperiment schwierig zu handhaben. Die Schale ist sehr dünn (ca. 10 μm) und besteht nicht, wie bei *Elphidium*, aus mehreren Lamellen. Außerdem können die einzelnen Kammern mehr als 100 μm lang werden und auch dadurch an mechanischer Stabilität verlieren. Schon nach relativ kurzen Anlösungszeiten und entsprechenden Gewichtsverlusten (Abb. 2) ist die Schale so dünn geworden, daß auf den Kammern große Löcher erscheinen (Taf. 2 Fig. 1).

Als typisches Korrosionsmuster ist bei *O. kilianensis* nur eine allgemeine Abrundung der (?mechanischen Bruch-) Kanten zu beobachten (vgl. Taf. 1 Fig. 8).

Der Vergleich der Lösungsverläufe von *O. kilianensis* und *E. incertum* ergibt bei beiden eine lineare Abhängigkeit zwischen Gewichtsverlust und Lösungsdauer. Dies stimmt mit Beobachtungen von BE et al. (1975) an *Globorotalia truncatulinoides* überein. Die Steigungen der Regressionsgeraden, als ein Maß für die Lösungsgeschwindigkeit, sind unterschiedlich. *Ophthalmina* wird schneller gelöst als *Elphidium*, was zu erwarten ist, da ihre Schale aus dem gegenüber Kalzit leichter löslicher Hoch-Mg-Kalzit besteht.

Abrasion bei *Elphidium* sp. und *O. kilianensis*

Auf abrasive Schalenzerstörung hinweisende Strukturen konnten besonders deutlich an *E. excavatum excavatum* aus der Restsedimentzone beobachtet werden.

Auch bei der Abrasion beginnt die Zerstörung an den jüngsten Kammern, da dort die Schale am dünnsten ist. Taf. 2 Fig. 1 zeigt ein leeres Gehäuse, an dem die letzte Kammer vollständig, die vorletzte nur teilweise abgebrochen ist. Die Brüche zeigen scharfe Konturen und Kanten (Taf. 2 Fig. 2). Die strukturierte Oberfläche läßt wohl die Begrenzungsstrukturen der einzelnen Kalzitplättchen erkennen (die organische Matrix ist schon durch natürliche Oxidation entfernt), nicht aber ein Auffasern in einzelne faserig-stengelige Kristallite (vgl. Taf. 1 Fig. 2 und 4).

Häufig sind Exemplare zu beobachten, denen zahlreiche Kammern oder ganze Windungen fehlen und bei denen die Schalenstruktur nur an den Bruchstellen zu

erkennen ist, während die übrigen Schalenteile noch mit organischer Matrix bedeckt sind. Diese Foraminiferen müssen also noch im Lebendstadium oder sehr kurz danach mechanisch zerstört worden sein.

Scharfe Kanten, fehlende Auflösung ultrastruktureller Details und weitgehende Erhaltung der organischen Matrix sind die wesentlichen Hinweise auf eine mechanisch abrasive Schalenzerstörung und ein Hinweis darauf, daß eine lösende Zerstörung noch nicht begonnen hat.

An Schalenresten von *O. kilianensis* konnten keine eindeutigen Abrasionsmuster beobachtet werden. Trotz starker Zerstörung der gesamten Schale ist häufig noch in großen Restbereichen die parkettartige Oberflächenschicht erhalten. Nur an exponierten Stellen ist sie nicht mehr zu erkennen. (Taf. 1 Fig. 7). Dies deutet darauf hin, daß wesentliche Teile der Schale während des Transportes aus der Restsedimentzone in das Schlickgebiet hinein mechanisch abgebrochen bzw. abgeschliffen wurden. Die Bruchkanten zeigen dagegen eine starke Zurundung (Taf. 1 Fig. 8), was ein Hinweis auf Auflösung ist.

Sehr wahrscheinlich werden in der Westlichen Ostsee miliolide Foraminiferen bedeutend leichter angelöst als rotaliide Foraminiferen, da sie aus Hoch-Mg-Kalzit bestehen. Dies wird die Ursache dafür sein, daß am gleichen Ort *Elphidium* Abrasions- und *Ophthalmina* Korrosionsstrukturen zeigt.

Zerfall von *Elphidium*

Ein Vergleich der Abrasions- und Korrosionsmuster mit der Ultrastruktur natürlich zerstörter Foraminiferen zeigt, daß der „Zerfall“ bei der Fragmentierung eine ganz wesentliche Rolle spielt. Darunter wird im Folgenden die Art der Fragmentierung verstanden, bei der die Schale nur durch Lockerung des Schalengefüges ohne weiteren mechanischen Angriff zerfällt.

Die organische Matrix, die die Schale der lebenden Foraminifere ebenso wie jeden einzelnen Schalenbaustein einhüllt, erhöht die mechanische Festigkeit der Schale und bildet gleichzeitig einen gewissen Schutz gegen Korrosion, macht aber auch eine Beobachtung der Schalenstruktur unmöglich (Taf. 2 Fig. 3). Nach dem Absterben der Foraminifere erfolgt am Meeresboden eine rasche bakterielle Oxidation des organischen Materials. Dadurch wird zunächst die Ultrastruktur der Schalenoberfläche sichtbar (Taf. 2 Fig. 4). Die Kalzitplättchen sind deutlich durch Suturen gegeneinander abgesetzt. Die Suturen sind in der lebenden Foraminifere mit organischer Matrix gefüllt, die Kalzitplättchen schwimmen also in ihr. Durch den Verlust der organischen Matrix werden die puzzle-artig ineinandergreifenden Plättchen in ihrem Verband zunehmend gelockert, und die Foraminiferenschale beginnt entsprechend ihrer Struktur in einzelne Lamellen und Kalzitplättchen zu zerfallen (Taf. 2 Fig. 6).

Der Zerfall beginnt an der jüngsten Kammer und ergreift fortschreitend immer ältere Kammern derart, daß ganze Lamellen flächig abgelöst werden. Dabei beginnt die Zerstörung bevorzugt am Kiel und verläuft in Richtung auf den Nabel.

Im Vergleich mit den experimentell angelösten Schalen lassen sich Schätzwerte des prozentualen Gewichtsverlustes ableiten; für das Exemplar in Taf. 2 Fig. 5 beträgt der Verlust ca. 30 %.

Ergebnisse und Diskussion

Die Ultrastrukturen der Schalenoberflächen benthischer Foraminiferen (*Elphidium sp.* und *O. kilianensis*) aus der Kieler Bucht zeigen spezifische Muster, die nach ihrer Entstehung verschiedenen schalenzerstörenden Prozessen, nämlich Oxidation, Korrosion und Abrasion zugeordnet werden können.

Unter Oxidation wird der bakterielle Abbau der organischen Matrix der Foraminiferenschale verstanden, der sich in einer Lockerung des Gefüges mit anschließendem Zerfall in die einzelnen Schalenelemente (= Kalzitplättchen bei *Elphidium sp.*) äußert. Der Vorgang der Oxidation läuft grundsätzlich in allen Bereichen des Untersuchungsgebiets ab. Zerfallsmuster können sich aber nur außerhalb des Abrasionsgebietes ausbilden. Das charakteristische Zerfallsmuster ist bei *Elphidium* das flächige Ablösen einzelner Schalenlamellen, verbunden mit einem gleichzeitigen Zerfall in isolierte Kalzitplättchen (vgl. Taf. 2 Fig. 6 und 7).

Bei den Experimenten zur Korrosion ergaben sich für *O. kilianensis* nur sehr wenig spezifische Muster. Der Verlust der parkettartigen Oberflächenstruktur ist auch durch einen mechanischen Schleifeffekt zu erklären. Typisch für Anlösung sind lediglich abgerundete Kanten, die aber auch als korrosiv überprägte Bruchkanten betrachtet werden können (Taf. 1 Fig. 8).

Bei *Elphidium sp.* zeigen sich dagegen noch weitere, sehr charakteristische Korrosionsmuster. Besonders das Ausdünnen der Schale an den Rändern von Löchern durch Verlust einzelner Schalenlamellen in Verbindung mit einem Auffasern der Kalzitplättchen in zahlreiche, parallel orientierte nadelig-stengelige Kristallite ist typisch.

Allgemein ist festzustellen, daß bei einer leichten Schalenanlösung die Ultrastruktur in ihren Details am deutlichsten zu erkennen ist. Dieser Effekt wird bei der Untersuchung der Ultrastrukturen von Kalkschalen schon lange ausgenutzt.

Strukturabhängig ist bei *Elphidium sp.* die Richtung des Fragmentierungsverlaufs, sowohl beim Zerfall als auch bei der Korrosion. Die Schale bricht zunächst am Kiel, ausgehend von der jüngsten Kammer zu älteren Kammern hin auf; die entstehenden Löcher verbreitern sich rasch in Richtung auf den Nabel. Die Septalwände bleiben dabei am längsten erhalten (Taf. 1 Fig. 5).

Auf Abrasion zurückzuführende Strukturmuster sind im wesentlichen auf Schalen aus dem Flachwasserbereich beschränkt. Die primäre Schalenstabilität, von der Schalenstruktur vorgegeben, spielt dabei eine wesentliche Rolle. So wird die sehr dünnschalige, zerbrechliche *O. kilianensis* sehr rasch zerbrochen und in tieferes Wasser transportiert, wo die Abrasionsmuster jedoch sehr rasch durch Anlösungsstrukturen überprägt werden (vgl. Taf. 1 Fig. 8).

Typische Abrasionsstrukturen, wie sie bei *Elphidium sp.* häufig auftreten, sind Bruchstellen mit eckigen Konturen und scharfen Kanten (Taf. 2 Fig. 2). Häufig sind Gehäuse bis auf die Mündungsstrukturen zerstört, ohne daß sichtbare Lösungs- oder Zerfallsmuster auftreten. Nicht selten findet die abrasive Zerstörung sehr frühzeitig noch vor der Oxidation der organischen Matrix statt, die dann noch große Bereiche zwischen den Bruchstrukturen bedecken kann (vgl. Taf. 2 Fig. 3).

Unter natürlichen Verhältnissen sind Oxidation der organischen Matrix mit anschließendem Zerfall sowie Korrosion und Abrasion keine isoliert voneinander ablaufende Prozesse. Sie sind in der Regel eng miteinander verknüpft, wobei aber, je

nach den lokalen Bedingungen, der eine oder andere Prozess dominieren kann. Dies läßt sich mittels der beschriebenen spezifischen Oberflächenstrukturen der Foraminiferenfragmente auch für das Hausgartengebiet schwerpunktmäßig abschätzen.

Setzt man die Strukturmuster natürlich fragmentierter Foraminiferenschalen aus den verschiedenen Bereichen des „Hausgartens“ und die aus ihnen abgeleiteten Fragmentierungsprozesse in Beziehung zu den Umweltparametern des „Hausgartens“, wie z.B. Sediment, Wasserbewegung, Wassertiefe, Sauerstoffsättigung oder Karbonatsättigung des Bodenwassers, so ergeben sich für ein Profil vom Flachwasser bis in das Rinnentiefste mehrere Fragmentierungszonen mit jeweils charakteristischer Karbonaterstörung: 1) Abrasionszone, 2) Zerfallszone und 3) Korrosionszone. Diese drei Bereiche entsprechen ungefähr den Sedimentationszonen nach WEFER et al. (1974; vgl. Abb. 1).

Die Abrasionszone umfaßt den Flachwasserbereich bis in eine Wassertiefe von etwa 13 m und entspricht der Zone der Restsedimente. Hier erfolgt die Fragmentierung der Foraminiferen (gleiches gilt auch für andere Kalkschalen), hauptsächlich durch mechanischen Abrieb bei starker Sedimentbewegung. Zerfalls- und Anlösungsmuster konnten ebenfalls beobachtet werden, doch tragen die entsprechenden Prozesse hier nicht maßgeblich zur Fragmentierung bei. Die zerkleinerten Karbonatpartikel werden aus diesem Gebiet mit der Strömung in größere Wassertiefen verfrachtet.

Die Zerfallszone liegt zwischen etwa 13 m und 26m Wassertiefe und entspricht grob dem küstenfernen Sandanhäufungsgebiet. Hier kommt der aus dem Restsedimentgebiet herantransportierte Sandanteil zur Ablagerung. Mit zunehmender Wassertiefe nimmt die Abrasion ab und die Korrosion zu. Das läßt sich auch aus den Strukturmustern der Schalen ablesen. Den wichtigsten Beitrag zum Zerfall der Schalen leistet in dieser Zone jedoch die Oxidation der organischen Matrix und die damit verbundene Gefügelockerung der Schalen. Auch ALEXANDERSSON (1979) hält die Zerstörung der organischen Matrix für einen ganz wesentlichen Beitrag zur Fragmentierung von Karbonatschalen. KLÄHN (1936) gebrauchte den Begriff „Kreidigkeit“ für die Gefügelockerung durch Abbau der organischen Substanz im Kalkgerüst von Molluskenschalen. Ähnliche Beobachtungen beschreibt (LEWY (1975) von *Arctica islandica*.

Die Korrosionszone wird in ihrer Abgrenzung zur Zerfallszone bestimmt durch den Karbonatsättigungszustand des Bodenwassers, der eine starke saisonale Abhängigkeit zeigt (WEFER, 1976). Abgesehen von einer deutlichen Übergangszone mit entsprechenden Schalenstrukturen (Taf. 2 Fig. 7 und 8) ist eine stärkere Untersättigung und damit Korrosion in Wassertiefen unterhalb 26 m zu erwarten.

Die An- und Auflösung der Karbonatschalen erfolgt nur im freien Bodenwasser. Schon in 1 cm Sedimenttiefe wurde in Ostseesedimenten bereits Kalzitübersättigung gemessen (SUESS et al., 1975). Eine Erhaltung der Schalen ist also nur möglich, wenn sie rechtzeitig im Sediment eingebettet werden. Dies kann nur über Bioturbation geschehen, da eine durch Wasserbewegung verursachte Sedimentumlagerung in dieser Zone, da Schlickzone, nicht stattfindet (vgl. WEFER, 1976).

In Tabelle 1 sind die wichtigsten für die Schalenfragmentierung verantwortlichen Prozesse zusammengefaßt und die sie jeweils begleitenden Vorgänge für die einzelnen Zonen aufgeführt.

	Wasser- tiefe	Sedimentzone	vorherrschender Zerstörungs- mechanismus	begleitende Vorgänge
ABRASIONSZONE	0 – 13 m	Restsediment	Abrasion	Oxidation Korrosion
ZERFALLSZONE	13 – 26 m	küstenfernes Sandan- häufungs Gebiet	Oxidation	Korrosion Abrasion
KORROSIONSZONE	26 – 30 m	Schlick-Gebiet	Korrosion	Oxidation

Literatur

- ALEXANDERSSON, E.T. (1979): Marine maceration of skeletal carbonates in the Skagerrak, North Sea.- *Sedimentology*, **26**: 845–852.
- 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.
- FLEMMING, B. & WEFER, G. (1973): Tauchbeobachtungen an Wellenrippeln und Abrasionserscheinungen in der Westlichen Ostsee südöstlich Bokniseck. – *Meyniana*, **23**: 9–18.
- HANSEN, H.J. (1972): Two species of foraminifera of the genus *Turrilina* with different wall structure. – *Lethaia*, **5**: 39–45.
- HANSEN, H.J. & REISS, Z. (1971): Electron microscopy of rotaliacean wall structures. – *Bull. Geol. Soc. Denmark*, **20**: 329–346.
- KLÄHN, H. (1936): Die Anlösungsgeschwindigkeit kalkiger anorganischer und organischer Körper innerhalb eines wäßrigen Mediums. – *Zentral. f. Mineral., Abt. A*, 1936: 328–348, 369–384.
- LEWY, Z. (1975): Early diagenesis of calcareous skeletons in the Baltic Sea, Western Germany. – *Meyniana*, **27**: 29–33.
- LUTZE, G.F. (1974): Foraminiferen der Kieler Bucht (Westliche Ostsee): 1. „Hausgartengebiet“ des SFB 95 der Univ. Kiel. – *Meyniana*, **26**: 9–22.
- RESIG, J.M. (1965): Lösungserscheinungen an Foraminiferen der Ostseesedimente. – *Diss. 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.
- SUESS, E., MÜLLER, P., WEFER, G. & WHITCAR, M. (1975): in GRASSHOFF, K.: *Fahrtbericht, Meteor-Fahrt Nr. 37, „Baltic 75“*.
- WEFER, G. (1976): Umwelt, Produktion und Sedimentation benthischer Foraminiferen in der westlichen Ostsee. – *Diss. Universität Kiel*.

WEFER, G., FLEMMING, B. & TAUCHGRUPPE KIEL (1976): Submarine Abrasion des Geschiebemergels vor Bokniseck (Westl. Ostsee). – *Meyniana*, **28**: 87–94.

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

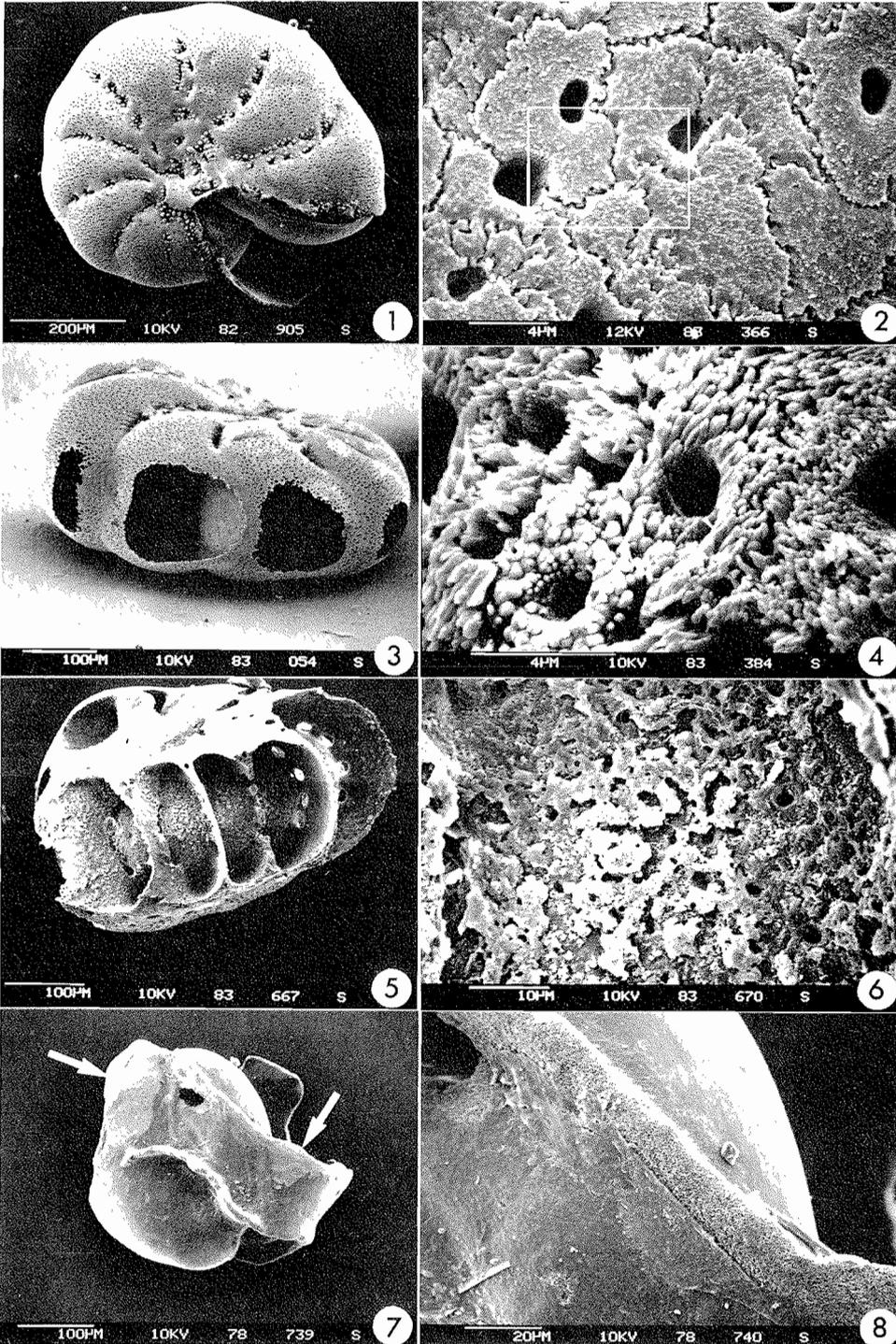
Manuskript eingegangen am 11. 3. 1981

Tafel 1

Figure 1–6 Experimentelle Korrosionsstrukturen von *Elphidium incertum*, „Hausgarten“, 23 m Wassertiefe, organische Matrix oxidiert.

- Fig. 1 Schale schwach korrodiert, die jüngste Kammer ist weitgehend zerstört (? mechanisch/Lösung?), Lösungsverlust ca. 5%.
- Fig. 2 Ausschnitt von Fig. 1, deutlich erkennbar ist der unregelmäßige Umriß der ineinandergreifenden Kalzitplättchen; durch die schwache Anlösung werden die Plättchenkristallite langsam herauspräpariert, ihre Spitzen werden als helle Punkte sichtbar.
- Fig. 3 Schale stark korrodiert mit fortschreitender Zerstörung im Kielbereich, Lösungsverlust ca. 35%.
- Fig. 4 Ausschnitt von Fig. 3, durch die starke Korrosion werden die stengeligen Kristallite der Kalzitplättchen deutlich herausgearbeitet; die Orientierung der Kristallite ist innerhalb eines Plättchens gleich, wechselt jedoch von Plättchen zu Plättchen.
- Fig. 5 Schale sehr stark korrodiert, der ganze Kielbereich des äußeren Umganges ist bis auf randliche Septenteile zerstört, Lösungsverlust ca. 50%.
- Fig. 6 Ausschnitt von Fig. 5, Detail der inneren Schalenoberfläche mit Resten der sehr widerstandsfähigen, tektinigen Innentapete.
- Fig. 7 *Ophthalmina kilianensis*, natürlich fragmentiert, „Hausgarten“, 23 m Wassertiefe, unbehandelt.
Das Exemplar ist stark zerbrochen (vermutlich abrasiv) die Bruchstellen aber durch Korrosion zugerundet; die parkettartige Oberflächenschicht ist zum großen Teil noch vorhanden, an exponierten Stellen jedoch abrasiv entfernt (Pfeile und hellere Bereiche).
- Fig. 8 Ausschnitt aus Fig. 7, deutlich erkennbar die korrosiv zugerundete Bruchkante; die parkettartige Oberflächenschicht ist fast vollständig erhalten, teilweise noch von organischer Matrix bedeckt.

Tafel 1



Tafel 2

- Fig. 1 Abrasionsstrukturen bei *Elphidium excavatum excavatum*, „Hausgarten“, Restsediment-/Abrasionszone, 8 m Wassertiefe; die letzte Kammer ist bis auf die Ansatzstellen der Mündung (Pfeil) weggebrochen; die angebrochene zweite Kammer zeigt scharfe Kanten.
- Fig. 2 Ausschnitt von Fig. 1, Detail der Bruchkante; die strukturierte Oberfläche läßt deutlich die Plättchengrenzen, aber keine Auflösung in einzelne Kristallite erkennen; im Querschnitt ist der Aufbau der Schale der zweiten Kammer aus zwei Lamellen (a und b) deutlich zu erkennen.
- Fig. 3 *Elphidium incertum*, „Hausgarten“, 21 m Wassertiefe; Oberflächendetail eines lebenden, nicht oxidierten Exemplares; die organische Hülle ist unversehrt und verdeckt die Schalenultrastruktur völlig.
- Fig. 4 *Elphidium incertum*, „Hausgarten“, Zerfallszone, 21 m Wassertiefe; Oberflächendetail eines leeren Gehäuses, dessen organische Matrix natürlich oxidiert ist. Die Suturen zwischen den Kalzitplättchen sind deutlich, Einzelkristallite nur sehr schwach sichtbar; Gewichtsverlust < 5%.
- Fig. 5 *Elphidium incertum*, „Hausgarten“, Zerfallzone, 23 m Wassertiefe, totes Exemplar, dessen organische Matrix natürlich oxidiert ist; dadurch beginnt die Schale ausgehend von der jüngsten Kammer und vom Kiel flächig entsprechend der einzelnen Lamellenlagen zu zerfallen; Gewichtsverlust ca. 30%.
- Fig. 6 Ausschnitt von Fig. 5, deutlich ist die Lockerung des Schalengefüges durch Oxidation der organischen Matrix und der Zerfall in einzelne Lamellen und Kalzitplättchen (Pfeil) zu erkennen.
- Fig. 7 *Elphidium incertum*, „Hausgarten“, Korrosionszone, 27 m Wassertiefe; Schalenausschnitt, der das flächige Ablösen ganzer Schalenlamellen im wesentlichen als Zerfall, jedoch auch schon Zonen intensiver Korrosion (Pfeil) zeigt.
- Fig. 8 Ausschnitt des in Fig. 7 durch Pfeil gekennzeichneten Bereichs; deutlich erkennbar die starke Anlösung mit der Auffaserung der Plättchen in gleichorientierte stengeliger Kristallite. Die Grenzen der einzelnen Plättchen werden weniger durch die Suturen als durch die unterschiedliche Kristallitorientierung in den verschiedenen Plättchen deutlich.

Tafel 2

