Erdgeschichte als Langzeit-Experiment : die grössten Revolutionen in der Entwicklung des Lebens

Autor(en): **Seilacher, Adolf**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Eclogae Geologicae Helvetiae**

Band (Jahr): **92 (1999)**

Heft 1

PDF erstellt am: **16.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-168648

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

0012-9402/99/010073-7 $1.50 + 0.20/0
Birkhäuser Verlag, Basel, 1999

Erdgeschichte als Langzeit-Experiment: Die grossen Revolutionen in der Entwicklung des Lebens

ADOLF SEILACHER

Vortrag gehalten am 8. September 1996 in Bern, am Festkolloquium «Erdwissenschaften 2001» zum 60. Geburtstag von Albert Matter und Tjerk Peters.

Key words: Mass extinctions, Mesozoic/Cenozoic, Paleozoic/Mesozoic and Precambrian/Cambrian boundaries, Cretaceous ammonites, rudists, Permian brachiopods, Ediacara fauna, vendobionts

ZUSAMMENFASSUNG

Evolution ist ein historischer, im Einzelnen nicht vorhersagbarer Vorgang. Dennoch lassen die großen Revolutionen der Erdgeschichte ein gemeinsames Muster erkennen. Massenaussterben sind zwar durch globale Katastrophen ausgelöst, aber durch ihre Vorgeschichte bedingt. Das wir hier anhand von fossilen Tiergruppen gezeigt, welche in vorhergehenden Treibhaus-Perioden ungewöhnliche Anpassungsformen hervorgebracht haben. Weil aber Spezialisierung immer Toleranz verringert, ist sie angesichts globaler ökologischer Veränderungen gerade den zuvor noch dominierenden Gruppen zum Verhängnis geworden.

ABSTRACT

Evolution is a historical process and thereby unpredictable; nevertheless the great revolutions in the history of life follow similar patterns. Mass extinction, while being triggered by random catastrophies, are preceded by greenhouse periods that favor the evolution of extreme, and often bizarre, adaptations. Since specialization always reduces tolerance, it is not surprising that previously dominating groups of organisms were doomed in the face of global ecological changes.

Wissenschaft im dritten Jahrtausend? Geschichtliche Prozesse, ob auf der Ebene der Evolution, der Politik oder der Wissenschaft, sind synergetischer Natur und daher im Prinzip unvorhersagbar. Statt Prophezeiungen für das nächste Jahrhundert zu wagen, möchte ich mich deshalb mit einer anderen Wende befassen, über die wir uns viel mehr Gedanken machen sollten, weil sie nicht nur Artefakt eines geschichtlichen Nullpunktes und eines dezimalen Zahlensystems ist: Die vom Menschen verursachte globale ökologische Krise. Wenn es stimmt, dass augenblicklich Arten fast im Stundentakt von der Erdoberfläche verschwinden, dann leben wir inmitten eines Massenaussterbens. In der Langzeitperspektive des Geologen ist das kein singuläres Phänomen. In abgestufter Intensität markieren derartige Ereignisse die seit langem etablierte Skala der Erdgeschichte; aber erst seit kurzem beginnen wir die kausalen Zusammenhänge solcher «Faunenschnitte» zu verstehen. (Wobei die Betonung der Faunen – also der Tiere – ein anthropozentrisches Relikt darstellt, denn Entsprechendes gilt natürlich auch für Pflanzen). In der Hoffnung, dass wir wenigstens in diesem Fall aus der Geschichte lernen können, möchte ich Sie in diesem Vortrag Jahrmillionen zurückführen und dabei aus Zeitgründen nur die wichtigsten Faunenschnitte berühren – nämlich die an den Grenzen der grossen Erdzeitalter. Weil ich von Herzen Morphologe bin, werden dabei keine Zahlen erscheinen. Vielmehr möchte ich anhand von repräsentativen Organismengruppen folgende Hypothesen darlegen:

1. Dass erdgeschichtliche Revolutionen durch das Aussterbe-Ereignis und den evolutionären Neubeginn nur unvollständig beschrieben werden. Vielmehr ist – wie bei Revolutionen in der Menschheitsgeschichte auch – die Kenntnis ihrer Vorgeschichte unerlässlich. Bei einem solchen Vergleich zeigt sich, dass der Katastrophe in allen Fällen ein «Goldenes Zeitalter» voranging, in dem ein über lange Zeitabschnitte ausgeglichenes Klima es der darwinistischen Evolution erlaubte, übliche Bauplan-Grenzen zu überschreiten. So entstanden morphologisch (und oft auch grössen-

Engelfriedshalde 25, D-72076 Tübingen, Germany, e-mail: geodolf@tuebingen.netsurf.de

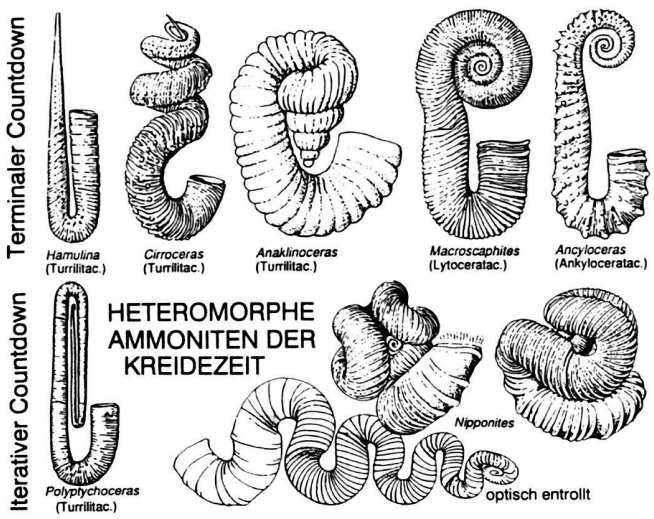

Fig. 1. Heteromorphe Kreide-Ammoniten. Durch determiniertes oder rhythmisches Wachstum ermöglichte Abweichungen vom spiralen Gehäusebau im erwachsenen Zustand oder in Zwischenphasen verbesserten die Filterwirkung eines horizontal ausgebreiteten Tentakelkranzes beim cartesischen Auf- und Abtauchen. (nach Seilacher & La Barbera 1995).

mässig) «aberrante» Arten, welche gleichwohl keineswegs schlechter angepasst waren als ihre «normalen» Ahnen.

2. Bei Massenaussterben werden Fitness-Kriterien ausser Kraft gesetzt, welche im «normalen» Konkurrenzkampf gegolten hatten. Anders wäre das Aussterben ganzer Tiergruppen nicht zu verstehen, welche noch kurz zuvor in Blüte standen und ein breites Spektrum ökologischer Nischen abdeckten.
3. Wenn Massenaussterben weitgehend auf einem durch Spezialisierung erhöhten Niveau ökologischer Empfindlichkeit beruht, spielt die Art des auslösenden Ereignisses nur eine sekundäre Rolle. Auch ganze Bündel von Extinktionen und verschiedenste Auslöser werden dann plausibel.

1. Mesozoikum/Känozoikum – Grenze

Die Ereignisse an der Kreide/Tertiär-Grenze sind uns durch die Diskussion der letzten zwei Jahrzehnte am vertrautesten. Im Zusammenwirken von Astronomen, Geochemikern und Stratigraphen ist es gelungen, einen Asteroiden als Schuldigen zu identifizieren. Auch die Opfer sind geläufig: Auf dem Land waren es vor allem die Dinosaurier, deren Verschwinden es den Säugetieren (mit einiger Verzögerung) erlaubte, die Herrschaft zu übernehmen und nebenbei auch das Phänomen Mensch hervorzubringen. Im Meer wurden neben Ammoniten und Belemniten auch die in der Kreidezeit dominierenden Muschelgruppen der Inoceramen und der Rudisten ausgelöscht. Natürlich war es weniger der Einschlag selbst als seine globalen ökologischen Folgen, welche das Artensterben bewirkten. Deshalb ist es nicht verwunderlich, dass sich dieser Prozess als Nachhall über das eigentliche Ereignis hinaus fortsetzte. Es sollte aber zu denken geben, dass z.B. die Rudisten schon einige Jahrmillionen vorher von der Bildfläche verschwanden. Ihnen ist also offenbar ein anderes Ereignis (z.B. eine Meeresspiegel-Absenkung) zum Verhängnis geworden.

Es ist sicher kein Zufall, dass all diese Tiergruppen gerade in der Kreidezeit die nach Form und Grösse groteskesten Formen ihrer Geschichte hervorbrachten. Früher hat man versucht, dieses Phänomen in Analogie zu den Spenglerschen Gedanken («Untergang des Abendlandes») als eine Art von stammesgeschichtlicher Alterserscheinung oder Dekadenz zu deuten. Im beschreibenden Rückblick ist das nicht unbedingt falsch; aber Tiergruppen sind nun einmal keine Organismen höherer Ordnung, sondern ein nur im geschichtlichen Rückblick vereintes Konglomerat unabhängiger Arten bzw. Populationen. Der Haupteinwand liegt aber in der Gleichzeitigkeit derartiger «Typolysen» (Schindewolf 1950) in verschiedensten Stammeslinien. Das wäre etwa so, als wollte man einen gleichzeitigen Niedergang alter Kulturen in China, Europa und Südamerika konstatieren.

Wie wir heute wissen, liegt der eigentliche Grund in der Klimageschichte. Isotopenkurven weisen die Kreidezeit als eine Periode ungewöhnlich ausgeglichenen Klimas aus. Insbesondere in der Mittelkreide war die Erde ein Greenhouse ohne Eiskappen an den Polen und mit einem entsprechend hohen Meeresspiegel, welcher weite Teile der Kontinente mit warmen Epikontinentalmeeren überflutete. Unter den Bedingungen klimatischer Langzeit-Stabilität gelang es nicht nur den Dinosauriern, sondern auch vielen marinen Tiergruppen, die Grenzen eines vorgegebenen Bauplanes zu überschreiten. Das sei im Folgenden an zwei Gruppen demonstriert.

Unter den mesozoischen Cephalopoden waren die **Ammoniten** die nach Zahl und Formenreichtum vorherrschende Gruppe. Ihre in einer Ebene eingerollten und mit Luftkammern ausgestatteten Gehäuse dienten wie beim heutigen *Nautilus* nicht nur dem Schutz des Weichkörpers, sondern zugleich als Schwebeapparat. In der Kreide beobachten wir nun bei vielen Arten eine Abweichung von dem planispiralen Programm des Gehäusewachstums. Manche entrollen sich und werden kerzengerade *(Baculites)*, andere ähneln Turmschnecken *(Turrilites)* und wieder andere weichen erst im Alter oder phasenhaft vom spiralen Grundplan ab. Die Erklärung für solche Aberranz kann man auf der funktionellen oder auf der entwicklungsgeschichtlichen (morphogenetischen) Ebene suchen.

Funktionsmorphologen haben oft eine abweichende (z.B. benthonische, also am Boden kriechende) Lebensweise solcher «heteromorpher» Ammoniten angenommen. Ich möchte eher meinen, dass man das *Nautilus*-Modell nicht überstrapazieren sollte. Viele taphonomische und morphologische Daten (z.B. die Umwandlung des Unterkiefers in einen mit Springfeder ausgestatteten Deckel, den Aptychus) deuten darauf hin, dass Ammoniten zum grossen Teil mikrophage Filtrierer gewesen sind. Ferner lässt sich die extreme Septenverfaltung (Lobenlinien!) am besten durch die Annahme erklären, dass

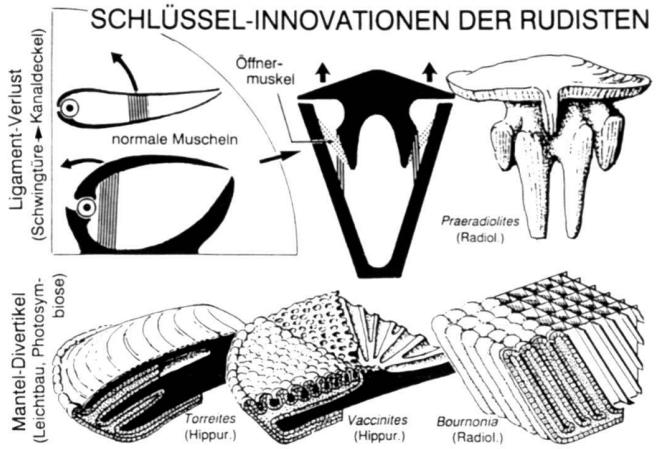

Fig. 2. Das Ligament normaler Muscheln erzwingt ± symmetrisches Wachstum der beiden Klappen. Erst sein Verlust ermöglichte die extreme Ungleichklappigkeit der Rudisten, wobei verlängerte Muskelzapfen und Schlosszähne einen Ersatz der Ligamentfunktion durch Öffnermuskeln nahelegen. Eine zweite Innovation sind durch Mantelfortsätze erzeugte Schalenkanäle. Wenn die Mantel-Divertikel in der Schale verblieben, konnten sie auch als Algengärten genutzt werden. (nach Seilacher 1998).

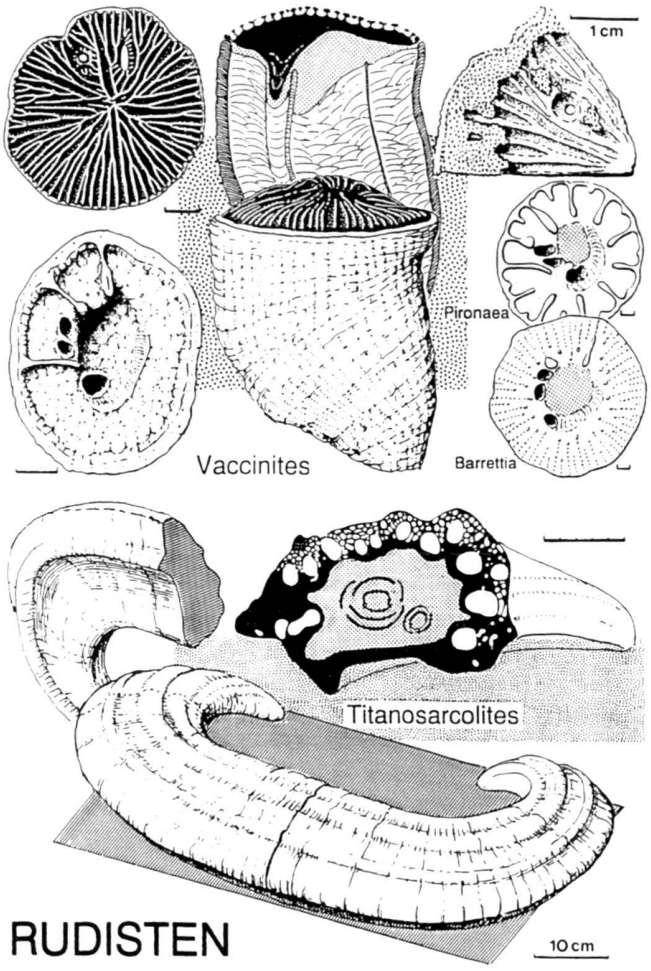

Fig. 3. Viele Rudisten steckten mit der kegelförmigen Unterklappe im Sediment. Deshalb sind Kanäle nur in der Oberklappe ausgebildet. Durch Poren in der äusseren Schalenschicht konnten sich die Divertikel von *Vaccinites* mit ihren Symbionten sogar direkt im Sonnenlicht ausbreiten. Grössere Formen (*Pironaea*, *Barrettia*) unterstützten den Deckel durch zusätzliche Einfaltungen („Pfeiler") der Unterklappe. Der riesige *Titanosarcolites* (bis 2 m Spannweite!) ist sekundär zum freien Liegen übergegangen. Divertikel beschränken sich deshalb auf die exponierte Oberseite beider Klappen. Das Fehlen von Kanälen auf der abgeflachten Unterseite erhöhte die Stabilität. (nach Seilacher 1998).

die jeweils letzte Kammerscheidewand bis zur Anlage der nächsten Kammer gummiartig elastisch blieb. Die antiklastische Konfiguration erlaubte dann aufliegenden Septalmuskeln, das Volumen der dahinter gelegenen Kammer wie eine Schwimmblase aktiv zu verändern und so den Körper als Cartesischen Taucher energiesparend in der Wassersäule auf und ab zu bewegen. Bei einer solchen «vertikalen» Lebensweise war ein horizontal ausgebreiteter Tentakelkranz und eine nach oben gerichtete Gehäuseöffnung von grossem Vorteil. Ausserdem liess sich die Filterwirkung durch die Rotation verbessern, welche ein helicospirales Gehäuse induzierte.

Unter einer solchen Annahme waren die Heteromorphen keine «dekadenten» Abweichler, sondern verkörpern eine extreme Optimierung eines für Ammoniten typischen Lebensformtyps. Warum diese Optimierung erst im Spätstadium der Stammesgeschichte und oft erst am Ende des individuellen Gehäusewachstums eintrat, zeigt die morphogenetische Betrachtungsweise. Beim heutigen *Nautilus* beobachten wir eine ähnliche «Heteromorphie» im Farbmuster des Gehäuses. Sie bewirkt das «counter-shading», d.h. das Gehäuse erscheint von unten hell und von oben dunkel mit einem die Form optisch auflösenden Zebramuster. Dieser Optimalzustand ist aber erst im Adult-Stadium zu verwirklichen, weil das Gehäuse sich beim Wachstum wie ein Riesenrad dreht und Schalenfärbung keine nachträgliche Veränderung erlaubt. Um die vorliegende Schutzfärbung zu erreichen, musste also zuerst das Wachstum gestoppt werden. Von diesem ontogenetischen Fixpunkt aus wurde dann rückwirkend ein «countdown»-Programm aufgebaut (der Begriff ist uns von Raketen-Starts geläufig). Bei *Nautilus* setzt zunächst auf der Externseite, dann zunehmend auch auf den Flanken der End-Wohnkammer die Farbbildung aus, bis am Ende die optimale Anpassungsform erreicht ist. Durch entsprechenden terminalen Countdown lassen sich die adulten Gehäuseformen der abgebildeten Kreideammoniten erklären. Es gibt aber auch die Variante des iterativen Countdowns, bei dem der Idealzustand durch rhythmisches Gehäusewachstum (vielleicht mit dem Reproduktionszyklus gekoppelt) mehrmals im Leben eintrat. (Fig. 1)

Im übrigen wird das cartesische Modell der Ammoniten auch durch ihre im Vergleich zu den Nautiliden viel stärkere

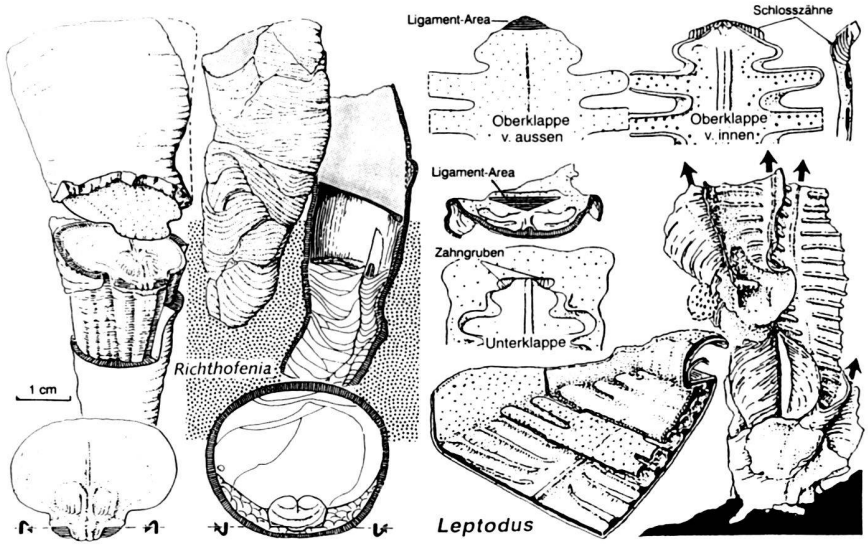

Fig. 4. Productide Brachiopoden waren als Weichbodenbewohner im jüngeren Paläozoikum weit verbreitet. Unter den Extremformen der Permzeit ähnelte *Richthofenia* den späteren Rudisten; aber ihre abgeflachte Oberklappe war tief in den Trichter der Unterklappe versenkt und ganz von Mantelgewebe überzogen. Das galt auch für den Riffbewohner *Leptodus*. Hier war die Oberklappe fingerförmig zerteilt und mit dem Ueberhang der Unterklappe durch ein Ligament (schwarze Ansatzflächen) elastisch verbunden. (nach Seilacher 1998).

Tendenz zur Skulpturbildung und ihren oft dichten Bewuchs mit Muscheln und anderen Aufsiedlern unterstützt. Ihr Ballast war durch Auftriebserhöhung ausgleichbar. Darüber hinaus brachten die blinden Passagiere keinen Nachteil, weil zusätzliche Reibung beim cartesischen Tauchen von der Schwerkraft gratis ausgeglichen wird und die Tauchgeschwindigkeit bei einem Filtrierer kaum eine Rolle spielt.

Dem Einwand, es habe in der Oberkreide neben den aberranten Formen immer auch normal aufgerollte Ammoniten gegeben, ist Folgendes entgegenzuhalten: Erstens muss sich Spezialisierung nicht in der uns allein zugänglichen Gehäusegestalt ausdrücken. Vielmehr sollte man die gehäufte Aberranz in diesem einen Merkmal als Indikator für ein höheres Spezialisierungs-Niveau auch im Weichkörper betrachten. Zweitens ist die Verwundbarkeit gegenüber unvorhersagbaren Umweltveränderungen gerade in physiologischen Besonderheiten zu suchen, welche von der Spezialisierung nicht erfasst wurden und daher alle Vertreter der Gruppe betrafen.

Ähnlich steht es mit den **Rudisten**. Ihre morphologische Abweichung vom Muschelbauplan wurde eingeleitet durch den Verlust einer ligamentären Verbindung zwischen beiden Klappen und ihren funktionellen Ersatz durch Oeffnermuskeln (Fig. 2). Infolge dieser Umkonstruktion konnten Sedimentstecker wie *Vaccinites* (Fig. 3) die Unterklappe in einen kegelförmigen Anker umwandeln, den die Oberklappe wie ein Kanaldeckel verschloss. Die zweite Schlüssel-Innovation waren Divertikel des Mantel-Gewebes. Sie dienten primär wohl zur Herstellung materialsparender Leichtbauschalen. Sekundär konnten sie jedoch die Funktion von Algengärten übernehmen. Wenn man bedenkt, dass Photosymbionten (etwa bei Riffkorallen) bis zu 90% ihrer Metabolit-Produktion an den Mietsherren abgeben, war das eine gewaltige Verbesserung, welche die Ausbildung von dichten Rudisten-Rasen (vielleicht sogar echte Riffbildung) ermöglichte. Photosymbiose hat einzelne Arten auch sekundär wieder aus dem schützenden Sediment herausgelockt. So sind bei *Titanosarcolites* beide Klappen hornförmig gekrümmt und die Divertikel-Kanäle fehlen auf der dem Sediment zugekehrten und zu erhöhter Stabilität abgeflachten Liegeseite. Mit Spannweiten bis zu 2 m übertrifft diese Liegeform die – ebenfalls photosymbiotische – heutige *Tridacna* und ist damit ein veritabler Dinosaurier unter den Muscheln (Fig. 3).

Diese Beispiele zeigen zur Genüge: Auch das Aussterben der Rudisten kann nicht auf mangelnde «Fitness», sondern nur auf drastische Umweltänderung globalen Massstabes zurückgeführt werden.

2. Der Umbruch zwischen Paläo- und Mesozoikum

Nach dem Prozentsatz ausgestorbener Arten war die Extinktion am Ende der Permzeit wahrscheinlich die grösste der Erdgeschichte. Ueber ihren Auslöser besteht noch keine Einigkeit – ein Asteroiden-Einschlag ist es offenbar nicht gewesen. Was hier mehr interessiert, ist die klimatische Vorgeschichte: Auf das Ende der permokarbonischen Eiszeit folgte offenbar auch hier ein klimatisch gesehen «Goldenes Zeitalter». Es fand seinen evolutionären Niederschlag vor allem in der Entfaltung «primitiver» Echinodermen-Gruppen (z.B. Blastoideen) und riesiger Muscheln (Alaticonchia) kurz ehe sie dem Aussterbe-Ereignis zum Opfer fielen.

Andere Beispiele finden sich unter den permischen Brachiopoden. Sie belegten im Paläozoikum noch weitgehend solche ökologische Nischen, welche danach von Muscheln übernommen wurden. Als Beispiele seien hier nur zwei extreme

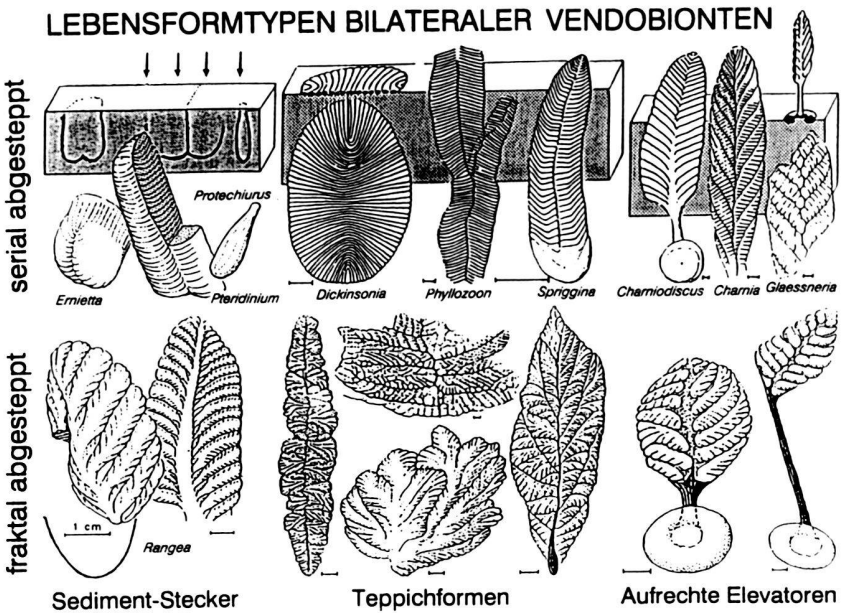

Fig. 5. Die Ediacara-Fossilien (Vendobionten) des ausgehenden Proterozoikums waren nicht nur gross und reich gegliedert, sondern auch an verschiedene Lebensweisen unter, auf und über der Sedimentoberfläche angepasst. Gleichwohl fehlten Organe und aktive Beweglichkeit. (nach Seilacher 1995).

Vertreter der Productaceen angeführt, also Brachiopoden ohne Armgerüst, welche die Weichböden des späten Paläozoikums (Karbon und Perm) in grosser Zahl besiedelten. Bei allen Productiden ist die untere Gehäuseklappe stärker gewölbt als die obere; aber bei *Richthofenia* hat sie die Spiralkrümmung ganz aufgegeben und ist zu einem spitzen Kegel geworden. In ihm rückte der Weichkörper (wie bei den Rudisten) mit der Sedimentation nach oben und schied hinter sich blasenförmige Querböden aus. Die Oberklappe bildete einen flachen Deckel; sie war aber tief in den Trichter der Unterklappe versenkt und öffnete sich weiterhin wie eine Schwingtür. Diese Umwandlung war bei Brachiopoden unproblematischer als bei Muscheln, weil ihre beiden Klappen von Hause aus nicht durch ein Ligament verbunden sind. Darüber hinaus war die Oberklappe von *Richthofenia* auch auf der Aussenseite von lebendem Gewebe bedeckt und diente möglicherweise als Algengarten. (Fig. 4)

Ähnliches gilt für *Leptodus* (Fig. 4), nur dass hier die Unterklappe als langer Schuhlöffel nach oben wuchs. Die zerfingerte und ganz von lebendem Gewebe überzogene Oberklappe lag der unteren eng an und liess nur wenig Platz für den eigentlichen Weichkörper: Sie ist damit wahrscheinlich selbst zu einem Filtrierorgan geworden, das zusätzlich noch als Algengarten gedient haben mag. Die Umwandlung der Oberklappe in ein Innenskelett hat es *Leptodus* ausserdem erlaubt, zwischen der Aussenseite der Oberklappe und der überragenden Innenseite der Unterklappe ein Organ auszubilden, welches anderen Brachiopoden versagt geblieben war, nämlich ein elastisches Ligament, das sich durch eine dreieckige Area (schwarz in Fig. 5) in beiden Klappen dokumentiert. Von Degeneration kann also auch hier keine Rede sein. Viel eher handelt es sich um einen vielversprechenden Neuanfang, der durch das Massenaussterben abrupt abgebrochen wurde.

3. Die Wende vom Präkambrium zum Paläozoikum

Der Beginn des Kambriums wird im Allgemeinen als ein grosser Neubeginn beschrieben, als der «Big Bang» in der Evolution der Tierwelt. In der Tat ist das nahezu plötzliche Erscheinen fast aller heutigen Tierstämme das Auffallendste an dieser Wende. Zu dieser Zeit brach ein grosser Urkontinent auseinander und ein Anstieg des Meeresspiegels schuf neue flachmeerische Lebensräume. Gleichwohl wurde diese grösste Radiation in der Geschichte des Lebens vermutlich weniger durch äussere Veränderungen als durch eine biologische Innovation ausgelöst, nämlich das Auftreten mineralisierter Hartskelette. Dieses neue Konstruktions-Element erlaubte es zuvor weichkörperigen Tiergruppen, neue Baupläne auszubilden: Randlich zuwachsende Schnecken-, Muschel- und Brachiopoden-Gehäuse, häutende Arthropodenpanzer und Innenskelette von Echinodermen sind Beispiele dafür. Zugleich konnte mit solchen Skeletten das Wettrüsten zwischen Räubern und Beutetieren beginnen, welches seit dieser Zeit die Evolution rascher vorantreibt.

Wie aber haben die präkambrischen Vorläufer dieser enormen Radiation ausgesehen? Lange hat man die weichkörperigen Organismen der sogenannten «Ediacara-Fauna» dafür gehalten. In der Tat erinnern diese Abdrücke (merkwürdigerweise nicht in feinen Tonen, sondern stets in Sandsteinen erhalten) nach Grösse und komplexer Gliederung an Tiere oder Pflanzen. Der genauere Vergleich zeigt jedoch, dass diese Organismen trotz verschiedenster Gestalt und Lebensweise (Fig. 5) ein eigentümliches Konstruktionsprinzip verkörpern,

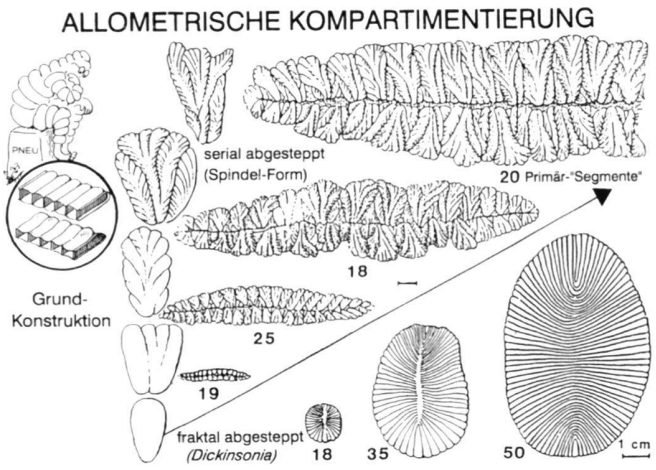

Fig. 6. Die Grundkonstruktion der Vendobionten entspricht einem abgesteppten Pneu. Im Verlauf des Wachstums entstanden zusätzliche Absteppungen entweder serial an einem oder beiden Enden, oder als fraktale Unterteilung bestehender Areale. In beiden Fällen wurde das darin enthaltene Protoplasma so wie bei Grossforaminiferen allometrisch kompartimentiert. (nach Seilacher 1995).

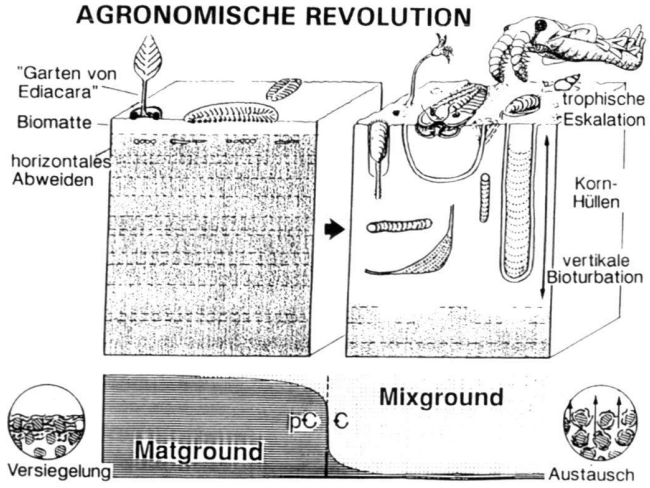

Fig. 7. Während in späteren Faunenschnitten nur etablierte ökologische Nischen durch andere Tiergruppen besetzt wurden, war die kambrische Explosion mit einem grundlegenden ökologischen Umbruch verbunden. Im friedlichen «Garten von Ediacara» gab es praktisch nur Primärproduzenten (Cyanobakterien, Algen, Vendobionten) und Zersetzer (Mikroben, wurmartige Grabtiere), getrennt durch eine lederige Mikroben-Matte. Das Auftreten tierischer Hartskelette setzte den Biomatten und den Vendobionten ein Ende und startete das Wettrüsten zwischen Raub- und Beutetieren als neuen Motor der Evolution. Zugleich erhöhte die Bioturbation nicht nur die Primärproduktion organischer Stoffe, sondern auch deren Wiederaufbereitung – ähnlich wie bei der agronomischen Revolution des Menschen. (nach Seilacher, 1995)

welches an eine abgesteppte, flüssigkeitsgefüllte Luftmatratze erinnert. Im Laufe des Wachstums blieb der Durchmesser der «Segmente» nahezu konstant – gleich ob die Untergliederung serial (d.h. durch Hinzufügen neuer Kompartimente) oder durch fraktale Aufteilung bestehender Areale erfolgte. Dieses allometrische Wachstum (Fig. 6) hatte einen doppelten Effekt: Zum einen wirkte es einer Verringerung der Körperoberfläche im Verhältnis zum eingeschlossenen Volumen entgegen (das spricht für direkten Oberflächenaustausch mit der Umgebung, wie bei Pflanzenblättern); zum anderen wird dadurch erreicht, dass enthaltene Flüssigkeits-Teilchen nie eine bestimmte Distanz zur nächstgelegenen Oberfläche überschreiten. Weil eine ähnliche allometrische Kompartimentierung auch bei allen Gross-Foraminiferen und anderen Riesen-Einzellern zu beobachten ist, kann man die Ediacara-Organismen trotz ihrer Grösse (bis 1 m!) als eine syncytiale Alternative zu den Vielzellern betrachten, welche denselben Effekt durch echte Zellteilung bewirken.

Im Lichte dieser Hypothese erscheinen die spät-präkambrischen **Vendobionten** (so genannt nach dem Vendium, dem letzten Zeitabschnitt des Proterozoikums) als fehlgeschlagenes Experiment der Evolution. Gleichwohl waren diese «Dinosaurier unter den Einzellern» gewiss keine Fehlkonstruktion – das beweist ihr massenhaftes Auftreten in vielen Teilen der Erde. Aber sie waren auf die Dauer nur existenzfähig in einem friedlichen «Garten von Ediacara», in dem die Nahrungskette nur aus Primärproduzenten und Dekompositoren bestand. (Fig. 7)

In diesem frühen Oekosystem gehörten die Vendobionten neben Cyanobakterien und Algen wohl zu den Produzenten – nämlich dann, wenn ihr vielkerniges Protoplasma symbiotische Bakterien enthielt, mit deren Hilfe sie Sonnenlicht oder chemische Energie im Eigenbetrieb umsetzen konnten. Eine weitere Existenzgrundlage der Vendobionten waren die im Präkambrium allgegenwärtigen Biomatten. Das sind in Stockwerke gegliederte Lagen auto- und heterotropher Mikroorganismen (Bakterien, Pilze), welche die obersten Millimeter von Lockersedimenten zu einer lederigen Haut verkitteten (in Schlammpfützen kann man so etwas heute noch beobachten). Auf ihnen waren die Vendobionten, wie man aus ihrem Einbettungsverhalten ableiten kann, entweder mit ganzer Fläche oder mit einer runden Haftscheibe angeklebt.

Unterhalb der Biomatten lebten wahrscheinlich auch die echten Vorfahren der kambrischen Tierstämme. Ihre Anwesenheit dokumentiert sich durch winzige, schicht-parallele Grabgänge, deren Suchverhalten auf wurmartige Tiere mit einem bereits hoch entwickelten zentralen Nervensystem hinweist. Spurenfossilien dieser Art in wesentlich älteren Sandsteinen (über 1,1 Milliarden Jahre) deuten sogar an, dass echte Tiere schon wesentlich früher die Erde bevölkerten als die Vendobionten. Diese entwickelten sich nämlich erst nach der letzten präkambrischen Eiszeit – wieder in einer «goldenen» Klimaperiode. Aber vorerst waren die frühen Tiere noch blosse Zersetzer.

In dieser neuen Sicht zeigt die «kambrische Revolution» dasselbe Muster wie die späteren Umbrüche: Aussterben

zuvor blühender Organismengruppen (Vendobionten), gefolgt von der Radiation anderer, die zuvor im Verborgenen gelebt hatten. (Schliesslich sind auch die Säugetiere schon vor 200 Millionen Jahren entstanden und mussten doch auf das Aussterben der Dinosaurier vor 65 Millionen Jahren warten, um die ökologische Herrschaft zu übernehmen). Was die kambrische Wende von späteren Faunenschnitten unterschied, war freilich, dass sich in ihr das ganze Oekosystem global reorganisierte und nicht einfach vorhandene Nischen von anderen Tiergruppen besetzt wurden.

4. Schlussfolgerung

Kehren wir in einem grossen Zeitsprung zurück zur Situation der gegenwärtigen Biosphäre. Wie eingangs dargestellt, sind wir Zeugen eines Massenaussterbens, das Paläontologen künftiger Jahrmillionen rückblickend als Wende vom Känozoikum zu einem noch nicht definierten «Anthropozoikum» registrieren könnten. In diesem Umbruch spielt der Mensch die Schlüsselrolle. Er übernimmt ungewollt die Funktion des Asteroiden, indem er die Extinktion verursacht. Er bestimmt aber auch die neue Oekologie, welche darauf folgt. Wenn man von ein paar Reservaten im Stile von Aldous Huxley's «Brave New World» absieht, kann das nur eine Ökologie mit enorm verringertem Artenbestand sein – und zwar von solchen Arten, die auf den menschlichen Nutzen zugeschnitten oder durch Gentechnik neu geschaffen wurden. Die grossen Agrarlandschaften unserer Erde sind ein Modell dafür.

Das Schlüsselphänomen in diesem Umbruch ist eine Spezies, welche nicht in einem goldenen Zeitalter, sondern in einer Eiszeit entstanden ist. In einer solchen Periode rasch aufeinander folgender extremer Klimaausschläge gilt nicht einseitige Spezialisation, sondern Flexibilität. Ökologisch gesehen ist *Homo sapiens* ein Generalist; aber er erreichte diesen Status nicht durch gesteigerte Toleranz, sondern durch bewussten und reversiblen Respons auf wechselnde Umweltbedingungen. Mit Hilfe von Werkzeugen, Feuer, Kleidern und Behausungen hat er die Klimawechsel der Eiszeit überlebt. Ackerbau und Viehzucht schufen dann die Lebensgrundlage für eine enorm vergrösserte Population. Als auch noch andere Energiequellen, Baumaterialien und Maschinen dazu kamen, wurde die Dominanz vollkommen. Heute kann der Mensch nicht nur in allen Klimazonen leben, er ist sogar in die Tiefsee, die Luft und den Weltraum vorgestossen. Biologisch gesehen setzt eine solche uneingeschränkt anpassungsfähige Spezies die Regeln der Selektion ausser Kraft und wird praktisch unsterblich – es sei denn, sie würde sich selbst ausrotten.

Eine ernste Gefahr droht der Menschheit aber auch vom anderen Ende der evolutionären Skala. Dort haben Viren und andere mikrobielle Krankheitserreger ebenfalls nahezu unbeschränkte Anpassungsfähigkeit entwickelt – in diesem Falle nicht durch Intellekt, sondern durch die Variabilität chemischer Prozessoren in Verbindung mit einer enorm kurzen Generationenfolge. So mag es wohl sein, dass sich das biologische Wettrüsten in der Zukunft von der freien Natur auf pharmazeutische Labors verlagert. Der Kampf gegen den Aids-Virus gibt uns einen Vorgeschmack davon. Andererseits ist der Mensch nicht nur eine biologische, sondern zugleich im höchsten Grade soziale Spezies. Diese Seite hat sich erst nach der Eiszeit durch Agrikultur, Urbanisation und der Industrialisierung entwickelt und ging einher mit einer Bevölkerungs-Explosion, die das Fortbestehen des heutigen Sozialgefüges auf lange Sicht in Frage stellt. In dieser Beziehung hat unsere Spezies trotz der potentiellen Unauslöschbarkeit durchaus auch Züge, die an Dinosaurier erinnern.

Zugegeben, dies ist die Sicht eines Paläontologen, der es gewohnt ist, geschichtliche Abläufe im Masstab von Jahrmillionen zu betrachten. Was hat das mit der Zukunft der Erdwissenschaften im nächsten Jahrhundert zu tun? In so kleinen Zeiträumen stehen Tages- und Wissenschaftspolitik und Fragen der Ausbildung und des Stellenmarktes im Vordergrund. Das gilt auch für die Umweltpolitik, in der sich Geologen zunehmend engagieren. Mit Recht, wie ich meine, weil nur sie über die aktuellen Testergebnisse hinaus auch langfristige Abläufe und Risiken im Auge haben. Darüber hinaus sehe ich die vordringliche Aufgabe kommender Generationen darin, die Bedürfnisse des Menschen mit einer gleichwie reduzierten Umwelt in ökologischen Einklang zu bringen.Dabei haben Erdwissenschaftler ein entscheidendes Wort mitzureden, denn nur sie können das anstehende globale Experiment mit anderen vergleichen, deren Ablauf und Resultat im geologischen Archiv aufgezeichnet ist.

Wir wollen in diesem Ueberblick aber auch den Beitrag Einzelner nicht vergessen, so wie den der beiden Berner Jubilare, Albert Matter und Tjerk Peters. Mögen sie noch lange verfolgen, wie weit sich die in diesem Kolloquium vorgetragenen Prognosen mit der tatsächlichen Entwicklung der Erdwissenschaften decken werden!

LITERATUR

GLAESSNER, M.F. 1984: The dawn of animal life. A biohistoric study. Cambridge University Press, Cambridge, 244pp.

GLEN, W.(ed.) 1994: The Mass-Extinction Debates: How Science works in a Crisis. Stanford University Press.

GOULD, S.J. 1989: Wonderful life. Norton & Co, New York, 347pp.

MARTIN, H. 1992: Menschheit auf dem Prüfstand. Springer Verlag, Berlin, New York.

MCMENAMIN, M.S. & Schulte McMenamin, D.L.,1990: The Emergence of animals. Columbia University Press, New York pp 206.

SCHINDEWOLF, O.H. 1950: Grundfragen der Paläontologie. Bornträger Verlag, Berlin.

SEILACHER, A. 1995: Selbstorganisation in der Frühen Evolution des Lebens. – Jh.Ges.Naturkde. Württemberg, 151:73–82; erschienen in Mitt. SFB 230, Heft 9, S.303–307.

– 1998: Rudists as bivalvian Dinosaurs. In: The Bivalvia: Half a Billion Years of Evolution – Paleobiological Studies Honoring Norman D. Newell, (Ed. by JOHNSTON, P.A. & HAGGART, J.) University of Calgary Press, Calgary: 423–436

SEILACHER, A. & LABARBERA M. 1995: Ammonites as Cartesian Divers. Palaios 10,6:493–50

Manuskript eingegangen 19. Juni 1998
Revidierte Fassung angenommen 10. März 1999