

Wie Bakterien Steine bauen¹

Judith A. McKenzie, Miriam S. Andres & Crisogono Vasconcelos, Zürich

Zusammenfassung

Der multidisziplinäre Ansatz, der die Erde als ein geo-bio-chemisch-physikalisches System betrachtet, ermöglicht es, chemische Sedimente zu verstehen. Mit diesem Ansatz können die Gesteine auf der geologischen Zeitskala mit Prozessen der heutigen Umwelten verglichen werden. Diese wiederum liefern uns Material und Modelle, welche wir in unseren Labors testen können. Studien an Gesteinen zeigen, wie das Zusammenspiel von Bakterien und ihrer Umwelt in der Ausfällung chemischer Sedimente resultierte, angefangen bei den ältesten, auf 3,5 Milliarden Jahre datierten Sedimenten. Dagegen können uns Untersuchungen in modernen Umwelten Rückschlüsse auf die vorherrschenden Bedingungen in der erdgeschichtlichen Vergangenheit erlauben. Die Ausfällung von Dolomit ist ein Beispiel eines chemischen Sediments, welches den Einfluss der geomikrobiellen Aktivität bei der Entstehung von Dolomitgestein im Laufe der Erdgeschichte illustriert.

How do bacteria make rocks?

An earth-system-science approach to the study of chemically produced sedimentary rocks is multidisciplinary, involving an integration of biology, chemistry and physics. With this approach, the study of rocks on a geological time scale is linked to processes observed in modern natural environments, which in turn provide material and models that can be tested in the laboratory. Studies of ancient rocks demonstrate that the interaction of bacteria with their environment has resulted in the precipitation of chemical sediments throughout geologic time, beginning with the oldest known sedimentary rocks from 3.5 Ga, whereas studies of modern environments provide information on the conditions prevailing in the geologic past. Dolomite precipitation is presented as an example of a chemical sediment that illustrates the influence of geomicrobial activity on the production of the rock dolomite throughout geologic time.

1 EINLEITUNG

Geologen sind die Historiker der Erde. Die Gesteine sind ihre Bücher, und die Wörter in diesen Büchern sind die Mineralien. Mineralien beinhalten Information über die physikalisch-chemischen Bedingungen, welche zur Zeit ihrer Entstehung geherrscht haben. Im Gegensatz zu den anorganisch ausgefallten Mineralien können solche auch durch mikrobiologische Prozesse, durch sog. Biomineralisation entstehen. Diese mikrobiologischen Produkte können als eine Art Fossilien betrachtet werden. Bakterielle Fossilien entstanden durch die gesamte geologische Geschichte; wegen ihrer geringen Grösse sind sie aber keine begehrten Sammelobjekte, wie Dinosaurierknochen oder schöne Ammonitenschalen. Trotz ihrer Winzigkeit liefern uns die bakteriellen Fossilien aber wertvolle Information über die lange Geschichte der

Erde, und dies sozusagen seit der ersten Stunde des Lebens auf unserem Planeten.

Schon früh während der Entstehung unseres Sonnensystems gab es chemische Reaktionen, und diese Reaktionen ergaben, zumindest auf unserem Planeten, organische Verbindungen. In einem uns unbekanntem Moment begann das Leben. Wie dies geschah, ist bis heute ein grosses Rätsel geblieben. Mit diesem Aufsatz wollen wir zeigen, wie Untersuchungen an den Biomineralien und den mit ihnen verbundenen Bakterien, sowie die Bedingungen, unter denen sie gewachsen sind, unser Verständnis für den Ursprung des Lebens auf der Erde, vielleicht sogar des Sonnensystems, vergrössern.

Das Ziel unserer Forschung ist es, zu zeigen, dass die Nachfahren dieser uralten Bakterien immer noch unter uns

¹ Nach der Einführungsvorlesung von J.A. McKenzie vom 3. Februar 1997 als Professorin an der Abteilung für Erdwissenschaften der ETH Zürich.

leben, wenn auch oft in extreme Umwelten zurückgedrängt. Im Bestreben, mehr über die Zeit zu lernen, in der Urbakterien zum ersten Mal auftraten, untersuchen wir ihre Nachkommen in unserer heutigen Umwelt und züchten sie unter kontrollierten Bedingungen in unseren Laboratorien. Mit dem Sprung von der Natur ins Labor und dann zurück in die erdgeschichtliche Urzeit lernen wir vielleicht besser verstehen, wie das Leben entstand und sich im Laufe der Millionen von Jahren entwickelte.

2 BIOMINERALISATION

Das Konzept der Biomineralisation ist kein neuer Gedanke. Geomikrobiologen haben schon um die Jahrhundertwende erkannt, welche wichtige Rolle Bakterien bei der Bildung von Mineralien spielen, vor allem bei der Ausfällung von Karbonaten. Und obwohl sie mikrobiologische Experimente durchführten, um dieses Phänomen zu beweisen, wurden ihre Resultate nicht allgemein akzeptiert und ihre Methoden nicht weiter verwendet. Es war damals schwierig, den Zusammenhang zwischen den Bakterien und den neu gebildeten anorganischen Mineralien zu zeigen; die technischen Möglichkeiten waren noch sehr beschränkt. Mit der Entwicklung neuer Technologien, wie z. B. dem Raster-Elektronen-Mikroskop (REM) während der letzten 20 Jahre, wurde es möglich, Prozesse anhand von Bildern im Mikrometerbereich zu beobachten. Als Beispiel zeigt Abb. 1 eine REM-Aufnahme von Bakterien, die über zerfallende organische Materie in einer Kalkprobe aus den Bahamas kriechen. Die neuen visuellen Techniken, zusammen mit weiteren Neuentwicklungen wie z. B. das Massenspektrometer oder die DNA-Sequenzierung, ermöglichen riesengrosse Fortschritte der Wissenschaft, Fortschritte bei der Suche nach dem Ursprung des Lebens.

3 BEWEISE FÜR FRÜHESTES LEBEN

Die Geschichte der Erde begann vor 4,6 Milliarden Jahren mit dem Zeitalter des Archaikums (4,6 bis 2,5 Mrd. Jahre). Die dominierende Lebensform während dieser ersten 2 Mrd. Jahre waren Bakterien. Erst im anschliessenden Proterozoikum entstanden namenlose primitivste Eukaryonten (einzellige Organismen mit einem Zellkern), die sich im Laufe der

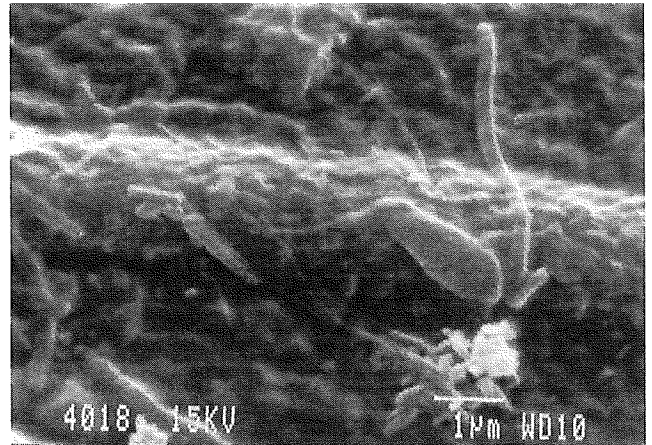


Abb. 1. Rasterelektronenmikroskopische (REM) Aufnahme eines rezenten Cyanobakterienfilaments auf Ooidsanden der Bahamas, welches von kleineren Bakterien besiedelt ist (übernommen von FELDMANN, 1995).

Fig. 1. SEM photomicrograph of a modern cyanobacterial filament on a Bahamian ooid surface being attacked by a number of smaller bacteria. From FELDMANN (1995).

Zeit zu komplizierteren, mehrzelligen Lebensformen entwickelten, besonders während der letzten 570 Mio. Jahre. Bakterien sind die Zeugen ersten Lebens, und sie begleiten uns bis heute. Demzufolge zeichnen bakterielle Fossilien in den Gesteinen die Entwicklung des Lebens und der Umweltbedingungen seit ihren frühesten Anfängen auf.

Besonders in chemisch ausgefällten Sedimenten sind die Spuren bakterieller Aktivität zu erkennen. Bekannte Beispiele sind die Stromatolithen² und gebänderte Eisenerzformationen. Abb. 2 zeigt die Entwicklung des Sauerstoffgehalts der Atmosphäre im Lauf der Erdgeschichte. Cyanobakterien spielten hierbei die wichtigste Rolle. Die Ablagerung von gebänderten Eisensteinen und Stromatolithen fiel in die Zeit, als der Sauerstoffgehalt noch sehr niedrig war. Aus dem ersten Auftreten dieser Ablagerungen kann man schliessen, dass vermutlich bereits vor ungefähr 3,5 Mrd. Jahren die ersten sauerstoffproduzierenden Cyanobakterien existierten. Doch erst vor 2 Mrd. Jahren enthielt die Atmosphäre so viel Sauerstoff, dass sich keine gebänderten Eisensteine mehr bilden konnten. Statt dessen entstanden die ersten kontinentalen Rotsedimente. Das bedeutet, dass die Atmosphäre von sauerstoffarm zu sauerstoffreich gewechselt hat. Um diese Zeit treten darum auch erstmals Eukaryonten auf, deren

² Stromatolithen sind aus lamellenförmigen Schichten aufgebaute (helle, karbonatreiche Lagen wechseln mit dunklen Lagen, die reich an organ. Substanz sind) knollige, brotlaibförmige oder riffartige Ablagerungen. Sie entstehen auch heute noch im Zusammenhang mit Cyanobakterienrasen («Blaualgen»), v. a. im Gezeitenbereich tropischer Meeresküsten, z. B. Shark Bay (Westaustralien), auf den Bahamas und im Pers. Golf. Rund 3,5 Mrd. Jahre alte Stromatolithen aus Simbabwe, Kanada und Australien gelten als älteste Belege für Photosynthese auf der Erde.

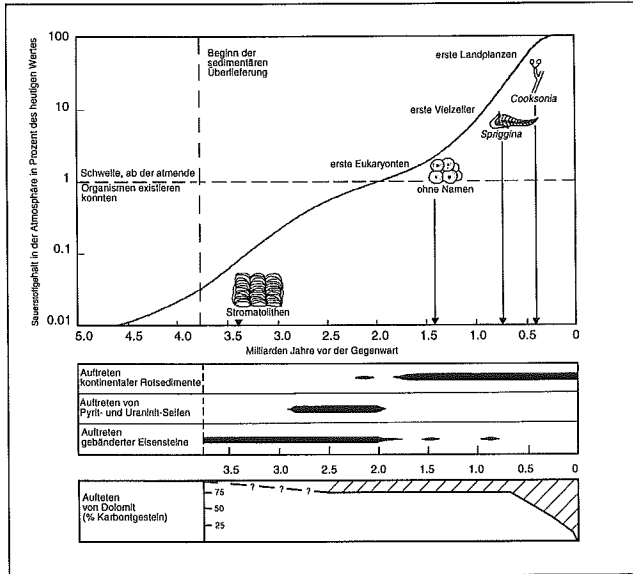


Abb. 2. Das Diagramm zeigt den Sauerstoffanstieg in der Atmosphäre im Verlauf der Erdgeschichte. Die Kurve wurde anhand paläontologischer (oben) und geologischer Daten (unten) rekonstruiert. Modifiziert nach SCHIDLOWSKI (1981).

Fig. 2. Diagram illustrating the increase of atmospheric oxygen versus geologic time. The curve was reconstructed based on available paleontological data (above) and geological data (below). Modified after SCHIDLOWSKI (1981).

effizienteres Energiesystem auf der Sauerstoffatmung beruht. Beachtenswert ist, dass Bakterien nicht nur die ersten Lebensformen sind, sondern das Leben für komplexere Organismen erst ermöglichten. Der Wechsel von einer anaeroben zu einer aeroben Atmosphäre hatte zur Folge, dass die vormals dominierenden anaeroben Bakterien nur noch in eingeschränkten Nischen mit extremen Umweltbedingungen überleben konnten.

Die Ausfällung von Dolomit ist auch ein Beispiel eines biomineralogischen Prozesses. Er dominierte während des Zeitalters des Proterozoikums, wurde dann im Laufe der geologischen Zeit immer unbedeutender und findet heute nur noch unter ganz speziellen Umweltbedingungen statt (vgl. Tab. 1 und Abb. 2). Gemessen an Kalkstein war Dolomit in der Zeit des Präkambriums viel weiter verbreitet, während er heute nur noch selten in Sedimenten gefunden wird (GARRELS & MACKENZIE, 1971). Da aber das Vorkommen archaischer Gesteine auf der Erdoberfläche nur sehr beschränkt ist, ist es schwierig abzuschätzen, wie weit er tatsächlich verbreitet war –, einmal abgesehen von der Tatsache, dass es Dolomit gab. Während der anaeroben Zeit des Proterozoikums dominierte Dolomit über Kalkstein im Verhältnis 3 zu 1. Diese ungleiche Verbreitung von Dolomit in der geologi-

Tab. 1. Vorkommen von Dolomit in der geologischen Geschichte.

Tab. 1. Occurrence of dolomite in geological history.

Geologische Zeit	Alter in Mio. Jahre	Dolomit-Kalzit-Verhältnis
Archaikum	4600–2500	???
Proterozoikum	2500–570	3:1
Paläozoikum	590–248	1:2
Mesozoikum	245–65	1:9
Känozoikum	65–0	1:25
Holozän	letzte 10 000 Jahre	1: > 100

schen Erdgeschichte, zusammen mit dem Unvermögen Dolomit im Labor herzustellen, wird als sog. Dolomitproblem bezeichnet. – Ein Problem mit einer 200jährigen Geschichte (MCKENZIE, 1991)!

4 DAS DOLOMITPROBLEM

Dolomit ist ein Calcium-Magnesium-Karbonat $[CaMg(CO_3)_2]$ und wurde als ein eigenständiges Mineral schon vor 200 Jahren erkannt. Im Jahre 1791 beschrieb Déodat de Gratet de Dolomieu ein ungewöhnliches Mg-Karbonat, welches er in den Bergen des Südtirols gefunden hatte. Ein Jahr später, 1792, publizierte der Genfer Naturforscher H. de Saussure die chemische Zusammensetzung dieses neuen Minerals. Er nannte es Dolomit nach dem Entdecker Dolomieu (ZENGER et al., 1994).

Die chemische Reaktion der Dolomitausfällung wurde schon früh von HAIDINGER (1845) erkannt. In Abb. 3 können

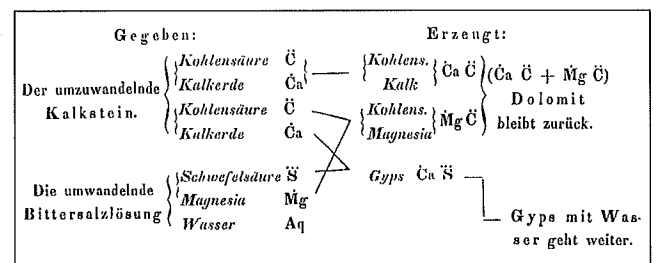


Abb. 3. Reproduktion der originalen Haidinger-Gleichung (1845). Beim Ersetzen von Calcium durch Magnesium in einem Kalkstein $[CaCO_3]$ wird Dolomit $[CaMg(CO_3)_2]$, neben Gips $[CaSO_4 \cdot H_2O]$, ausgefällt. Übernommen von VON MORLOT (1847).

Fig. 3. Reproduction of the original Haidinger Equation (1845). With the replacement of calcium by magnesium limestone $[CaCO_3]$ is converted to dolomite $[CaMg(CO_3)_2]$ with gypsum $[CaSO_4 \cdot H_2O]$ being a by-product. From VON MORLOT (1847).

wir die Reaktion anhand der Haidinger-Gleichung verfolgen. Beim Ersetzen von Ca durch Mg in einem Kalkstein wird Dolomit und – als Nebenprodukt – Gips ausgefällt. Diese frühe Beschreibung hat sich als richtig erwiesen. Dolomit entsteht heute unter anderem durch die Verdunstung von Meerwasser in Trockengebieten. Ein Beispiel für solche Evaporitbecken sind die Salzebenen (sog. Sabkhas) von Abu Dhabi am Persischen Golf. Dolomit entsteht jedoch nicht nur durch sekundären Ersatz von Magnesium, sondern kann auch primär ausgefällt werden.

Das Mineral ist sehr stabil und diese Stabilität kennen die Geologen seit Dolomieu. Im Feld tropft ein Geologe schwache Salzsäure auf das Karbonatgestein. Wenn es braust ist es Kalzit, wenn nicht, so ist es Dolomit. Dieses kleine Experiment funktioniert, weil Dolomit die stabilere Form der beiden Karbonate ist. Die Stabilität basiert auf der sehr geordneten Kristallstruktur, in der die Dolomithomboeder eine 3-Lagen-Struktur aufzeigen. Die einzelne Lage wird jeweils ausschliesslich von einer der drei Ionenarten Mg^{2+} , Ca^{2+} bzw. CO_3^{2-} aufgebaut. Zwischen den Lagen mit Karbonat-Ionen alternieren Magnesium- und Kalziumlagen, nach dem Muster Mg - CO_3 - Ca - CO_3 - Mg usw.

Nach unzähligen Versuchen hat es sich gezeigt, dass die Erzeugung von Dolomit im Labor unter normalen Erdoberflächen-Bedingungen (Normaldruck und niedrige Temperaturen) schwierig, wenn nicht unmöglich ist. Thermodynamisch gesehen, sollte Dolomit ausfallen; er scheint aber kinetisch gehemmt zu sein. Vielleicht ist der Grund dafür in der extrem geordneten Kristallstruktur zu suchen, da die kinetischen Bedingungen ein wichtiger Faktor bei der Dolomitausfällung sind.

Wenn wir annehmen, dass auf der Erde die physikalisch-chemischen Prozesse für das Ausfällen von Dolomit immer gleich geblieben sind, stellen sich zwei Fragen:

1. Warum gibt es eine so ungleiche Verteilung von Dolomit durch die geologische Zeit (Tab. 1)?
2. Wieso war es bis anhin unmöglich, Dolomit im Labor unter normalen Bedingungen auszufällen?

Die beiden Fragen umschreiben das Dolomitproblem. Vielleicht hängt die Auflösung dieses Rätsels mit den Umweltbedingungen zur Zeit des Präkambriums zusammen, als Bakterien das Leben auf der Erde dominierten. Diesbezügliche Fragen lauten: Haben Bakterien die Bildung von Dolomit begünstigt? Ist das Dolomitproblem ein mikrobiologisches Problem?

5 REZENTE DOLOMITAUSFÄLLUNG IN LAGOA VERMELHA

Wie oben schon erwähnt, war Dolomit ein häufig vorkommendes Mineral in der geologischen Geschichte. Heute aber ist die Verteilung von Dolomit sehr eingeschränkt. Die Neubildung beschränkt sich im Wesentlichen auf drei gut definierte Gebiete: die Coorong Region in Südaustralien, die Sabkhas von Abu Dhabi und Lagunen in der Nähe des Cabo Frio in Brasilien. In allen Fällen handelt es sich um Küstenlagunen. Daneben kommt Dolomitneubildung in geringerem Mass auch in anderen Mikro-Umwelten vor, z. B. in hypersalinen Seen.

Die hier vorgestellte Arbeit konzentriert sich auf die Dolomitausfällung in der Lagoa Vermelha («Rote Lagune»), einer von mehreren kleinen, aneinandergereihten, von Dünen umgebenen Lagunen an der Küste von Brasilien (Abb. 4), 90 km östlich von Rio de Janeiro. Es ist eine flache Lagune mit einer maximalen Tiefe von 1,7 m. Sie bedeckt eine Fläche von ungefähr 2,4 km² und ist durch eine 400 m breite Dünenbarriere vom Atlantik getrennt. Diese Düne wirkt wie eine Filterleitung für das Meerwasser. Die Lagoa Vermelha dient aber auch als Reservoir für Regenwasser, das durch die pleistozäne Düne auf der Landseite hindurchsickert (VASCONCELOS & MCKENZIE, 1997).

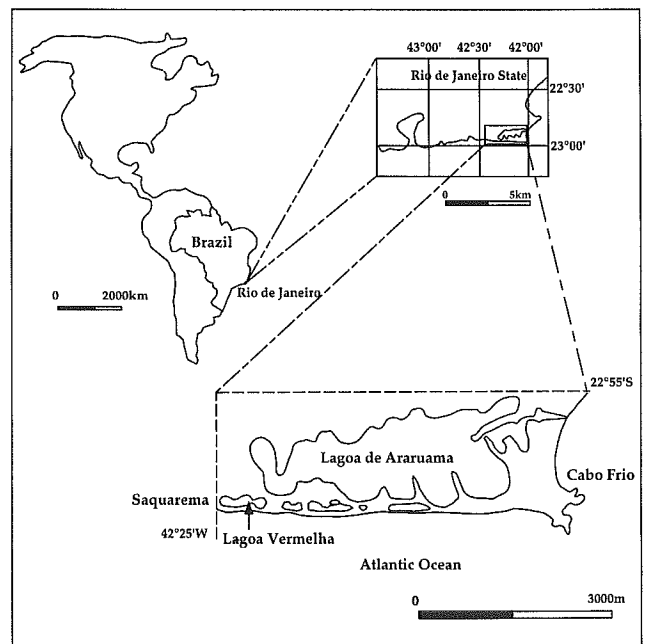


Abb. 4. Kartenausschnitt von Lagoa Vermelha an der Küste von Brasilien, 90 km östlich von Rio de Janeiro.

Fig. 4. Map showing the location of Lagoa Vermelha on the coastline 90 km east of Rio de Janeiro, Brazil.

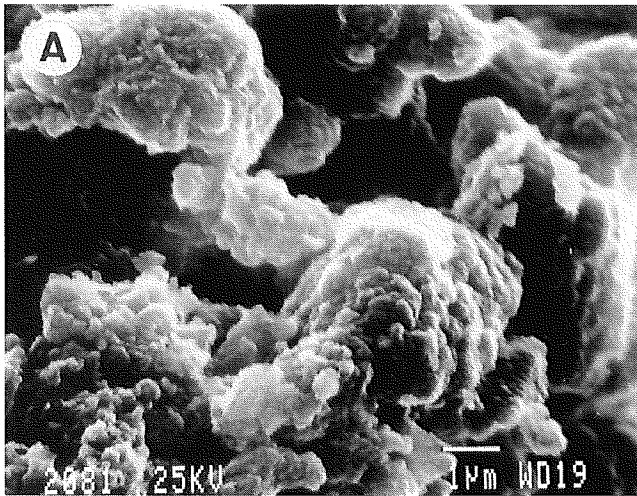


Abb. 5. (A) REM-Aufnahme von frisch ausgefallenem Dolomit aus der schwarzen Schlammschicht von Lagoa Vermelha. (B) REM-Aufnahme von Dolomit, bei dem beginnende diagenetische Prozesse die Kristalloberfläche verändert haben. Die Kristalle gleichen immer mehr den typischen rhomboedrischen Dolomitkristallen. Winzige Hügelchen (Nanobakterien?) überziehen die Oberfläche.

Die Salinität des Wassers in Lagoa Vermelha variiert durch das Jahr, von Brackwasser in der Regenzeit zu hypersalinem Wasser während der Trockenzeit. Und genau in dieser Trockenzeit, unter extrem hypersalinen Bedingungen, wird Dolomit gebildet. Das Wasser der Lagoa Vermelha ist sehr trüb und hat eine rötliche Farbe – daher der Name Rote Lagune! Das trübe Wasser ist reich an organischem Material, und an der Basis der Wassersäule, aber noch über der Sedimentoberfläche, liegt eine dichte schwarze Schlammschicht. Sie besteht aus anaeroben, sulfatreduzierenden Bakterien und frisch ausgefallenem Dolomit.

Die Abb. 5A zeigt eine REM-Mikrophotographie von frischem Dolomit, der aus dem schwarzen Schlamm entnommen wurde. Die Kristallflächen dieses kalziumreichen Dolomits sind sehr rau und uneben. Sobald jedoch die Kristalle aus dem schwarzen Schlamm heraus sinken und Teil des Sediments werden, setzen diagenetische Prozesse ein. Die Kristalle verändern ihre Oberfläche, gehen zunehmend in eine geordnete Kristallstruktur über und gleichen immer mehr den typischen rhomboedrischen Dolomitkristallen (Abb. 5B). Bei genauerem Hinsehen sind die Flächen nicht schön glatt, sondern von winzigsten «Hügelchen» überzogen. Solche Strukturen hat Robert Folk von der Universität von Texas, Austin, als ein charakteristisches Merkmal von «Nanobakterien» oder «Ultramikrobakterien» (30 bis 200 nm) interpretiert (FOLK, 1993). Es scheint, dass die beobachteten Nanostrukturen Reste von sulfatreduzierenden

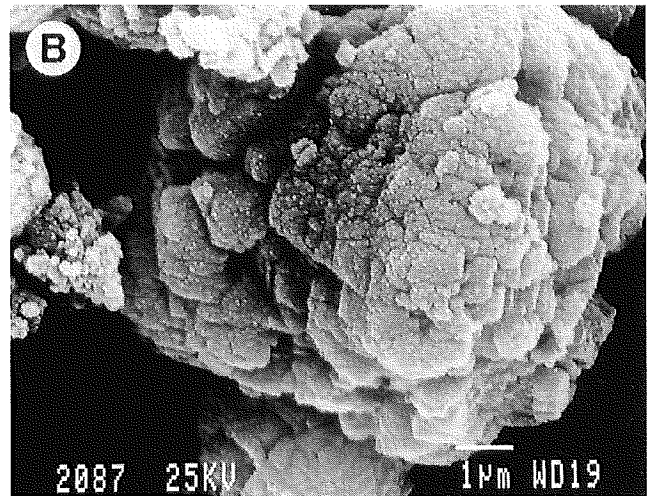


Fig. 5. (A) SEM photomicrograph showing poorly crystallized dolomite in a sample taken from the black sludge layer in Lagoa Vermelha. (B) SEM photomicrograph of sedimented dolomite showing the effects of diagenesis on the crystal faces, which resemble more those of the typical rhombohedra of well-crystallized dolomite. A knobby texture (nanobacteria?) covers the surface.

Nanobakterien sein können, die im Schlamm und im jüngsten Sediment wachsen.

Der Prozess, des sich verändernden Dolomits, kann in den Sedimenten aus grösserer Tiefe verfolgt werden. Kurze Bohrkerne wurden mittels Vibrationsverfahren aus dem Lagunenboden entnommen. In der unteren Hälfte des Bohrkerns, bei ungefähr 70 cm, werden Dolomitknollen oder -konkretionen gefunden, die im Sediment wachsen. Werden die Konkretionen unter dem REM angeschaut, weist dieser – im tieferen Sediment begrabene – Dolomit sehr glatte, rhomboedrische Flächen auf (Abb. 6A). Mit einer schwachen Säure angeätzt, erscheinen auf diesen Flächen wieder die kugelige Körper der Nanofossilien (Abb. 6B).

Damit Dolomit in der Lagune von Lagoa Vermelha ausfallen kann, braucht es in der ersten Phase offenbar die Vermittlung sulfatreduzierender Bakterien, um die kinetische Energie herabzusetzen. Es scheint, dass, wenn Dolomit erst einmal in der Gegenwart der Bakterien ausgefällt ist, eine weitere Ausfällung anorganisch folgen kann. Der Prozess wechselt offenbar von einer mikrobiologisch induzierten Ausfällung zur anorganischen Bildung von Dolomit. Durch das Verfolgen dieses Prozesses in seiner natürlichen Umwelt, konnte abgeschätzt werden, unter welchen Bedingungen diese Bakterien wachsen und Dolomit bilden.

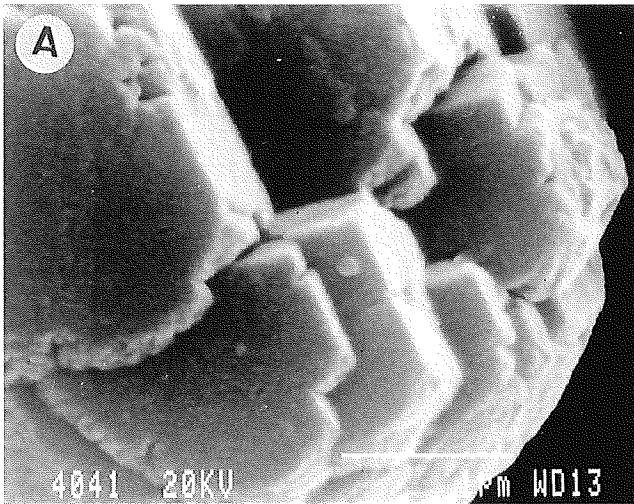


Abb. 6. (A) REM-Aufnahme einer typischen Dolomitkristallfläche von einer Konkretion aus 70 cm Sedimenttiefe. (B) REM-Aufnahme derselben Dolomitkonkretion nach der Reaktion mit 1% HCl Lösung für 30 Sekunden. Sphärische Strukturen tauchen an den angeätzten Oberflächen auf und deuten darauf hin, dass bakterielle Körper von später ausgefälltem Dolomit eingedeckt wurden.

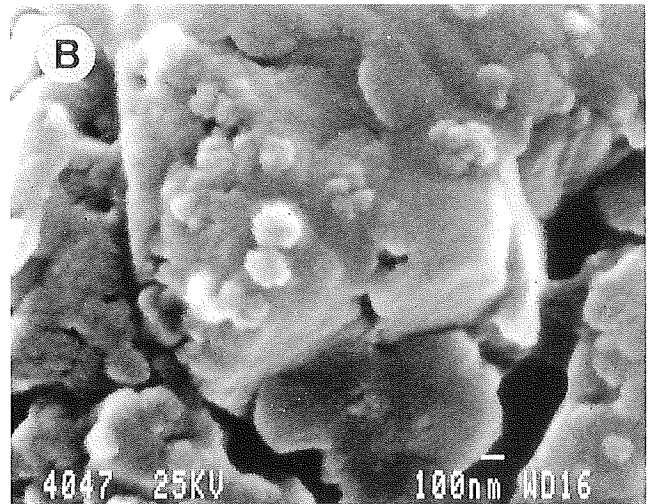


Fig. 6. (A) SEM photomicrograph showing the euhedral crystal faces of a dolomite concretion from 70 cm depth in the Lagoa Vermelha sediments. (B) SEM photomicrograph of the same concretion after reaction with 1% HCl solution for 30 seconds. The appearance of spherical structures on the etched surface indicates that these proposed nanobacterial bodies have been covered by subsequent dolomite precipitation with burial diagenesis.

6 EXPERIMENTE MIT BAKTERIENKULTUREN

Um herauszufinden, ob Dolomit durch Vermittlung von Bakterien auch unter experimentellen Bedingungen ausfallen würde, wurden lebende Bakterien aus der Lagune entnommen und ins Labor gebracht, um sie zu züchten. Zur Vermehrung brauchen Bakterienkulturen die gleichen äusseren Bedingungen wie in der Lagune. In einer Kammer ohne Sauerstoff wurden die Bakterien in Reagenzgläser mit Nährlösung geimpft und mit Quarzsubstrat versetzt, auf dem die Bakterien sich ansiedeln konnten (VASCONCELOS et al., 1995). Die Nährlösung hatte die gleiche chemische Zusammensetzung wie die natürliche Umgebung in der Lagune während der Trockenzeit. Die Reagenzgläser wurden anschliessend versiegelt und 1 Jahr lang bei konstanten 4 °C in einem Kühlschrank gelagert.

Die REM-Aufnahmen dieser Kulturexperimente zeigen, dass Nanobakterien auf dem Quarzsubstrat gewachsen waren (Abb. 7). In Abb. 7A sind Zwillingsbildungen von Nanobakterien zu sehen; sie sind eben dabei, sich zu reproduzieren. Das Vorkommen solcher Zellteilungsfiguren ist der beste Beweis, dass es sich wirklich um lebendige Bakterien handelt und nicht um irgendein anorganisches Phänomen. Zusammen mit den Nanobakterien ist auf dem Quarzsubstrat ein Überzug gewachsen (Abb. 7B). Diese REM-Aufnahme illustriert die verschiedenen Stadien des Dolomitbildungsprozesses: von den kugelförmigen Nanobakterien zu gerundeten

Beulen im Überzug, wo Nanobakterien mehr oder weniger begraben sind. Der Überzug deckt mit der Zeit das Quarzsubstrat vollständig ein. Röntgenanalysen zeigen, dass der Überzug aus einem Ferroandolomit (einem eisenreichen Dolomit) mit einer gut geordneten Kristallstruktur besteht.

Es ist uns somit zum ersten Mal gelungen, experimentell im Labor Dolomit unter Tieftemperatur-Bedingungen zu produzieren. Dieses Ergebnis wurde wegen, oder durch die Anwesenheit bestimmter Bakterien erreicht, denn Kontrollexperimente ohne Bakterien ergaben keine Dolomitbildung. Damit ist für die Wissenschaft ein Riesenschritt im Verständnis der Dolomitbildung gemacht worden.

Wenn wir nun den experimentell produzierten Dolomitüberzug (Abb. 7B) mit den angeätzten Flächen der Konkretionen aus der Lagoa Vermelha (Abb. 6B) vergleichen, stellen wir eine verblüffende Ähnlichkeit fest, und zwar sowohl bezüglich der Grösse als auch der Form der in die Dolomitkristalle eingebetteten Bakterien. Durch Laborexperimente konnte gezeigt werden, dass Bakterien solche kugelförmigen Körperchen bilden, wie sie draussen in der Natur vorkommen. Mit diesem morphologischen Beweis kann der bakterielle Einfluss auf die Dolomitausfällung durch die geologische Zeit verfolgt werden.

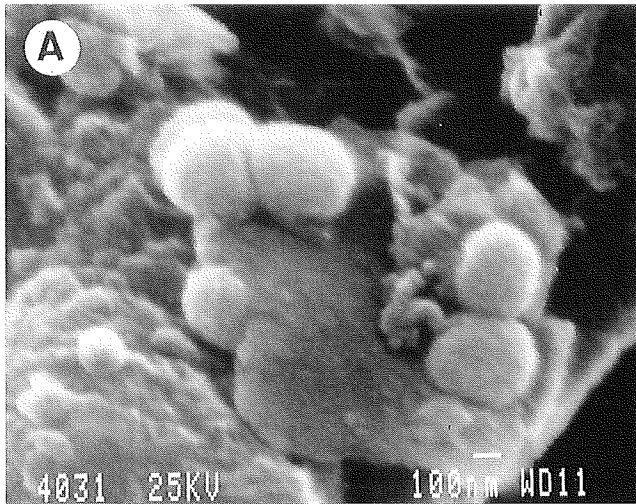


Abb. 7. REM-Aufnahmen vom Überzug aus Ferroandolomit (Eisenreicher Dolomit) auf dem im Experiment verwendeten Quarzsubstrat. (A) Doppelbildungen von Nanobakterien, während der Reproduktion durch Zellteilung. (B) Subsphärische Nanobakterien kolonisieren die Oberfläche und können in verschiedenen Stadien beobachtet werden, von freien über anhaftende Sphären zu Hügelchen von mehr oder weniger stark in den Überzug eingebetteten Bakterien bis zur vollständig vom Überzug eingedeckten Oberfläche.

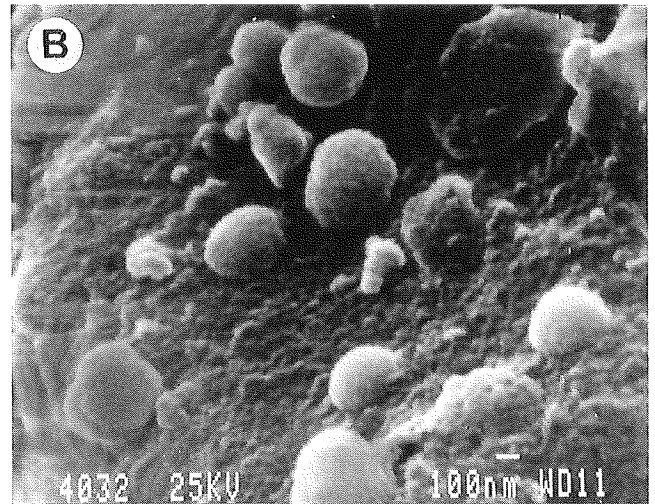


Fig. 7. SEM photomicrographs of the ferroan dolomite coating on the surface of the quartz substrate used in the bacterial culture experiment. (A) Twinned nanobacteria possibly imaged in the process of reproduction by cell division (binary fission). (B) Subspherical nanobacteria colonizing the surface of the substrate. They can be seen in various stages from detached subspherical nanobacterial bodies encrusted by nanocrystals of dolomite to attached or embedded bodies that become rounded bumps entombed in the coating which in turn merge to cover the surface of the substrate.

7 ARCHAISCHE DOLOMITE

Der Pilbara-Kraton in Westaustralien ist eines von drei aus dem mittleren Archaikum stammenden, sehr gut erhaltenen Granitoid-Grünstein-Vorkommen der Welt. Die sedimentären Gesteine der Warawoona-Gruppe lagen für Milliarden von Jahren auf diesem sehr stabilen Kontinent und wurden nur geringfügig durch Metamorphose und Tektonik gestört. Aus diesem Grund bietet die Warawoona-Gruppe die besten Proben für die Untersuchung von Dolomit aus dem Archaikum. In einem Tal im östlichen Pilbara, das die Geologen «Dolomite Creek» nennen, ist ein auf 3,5 Mrd. Jahre datierter Dolomit aufgeschlossen. Obwohl das Gestein zum Teil silifiziert und von vielen Quarzadern durchzogen wurde, blieb es grösstenteils frisch und unverändert. Dieses Gestein wurde nach Spuren von frühem Leben untersucht.

Die REM-Aufnahme einer Probe von Pilbaradolomit zeigt winzige, kugelige Körperchen auf der geätzten Oberfläche (Abb. 8). Sind die im Dolomit eingebetteten bakterienähnlichen Strukturen die gleichen, wie wir sie schon in unseren Experimenten beobachten konnten? Handelt es sich in diesen 3,5 Mrd. Jahre alten Gesteinen um die gleiche oder ähnliche bakterielle Aktivität, die wir auch in den anaeroben

Sedimenten der Lagoa Vermelha finden konnten oder unter anaeroben Laborbedingungen?

Ohne Zweifel werden diese neuen Erkenntnisse die Forschung anregen, doch können wir vorläufig über die Wichtigkeit dieses bakteriellen Phänomens nur spekulieren. In

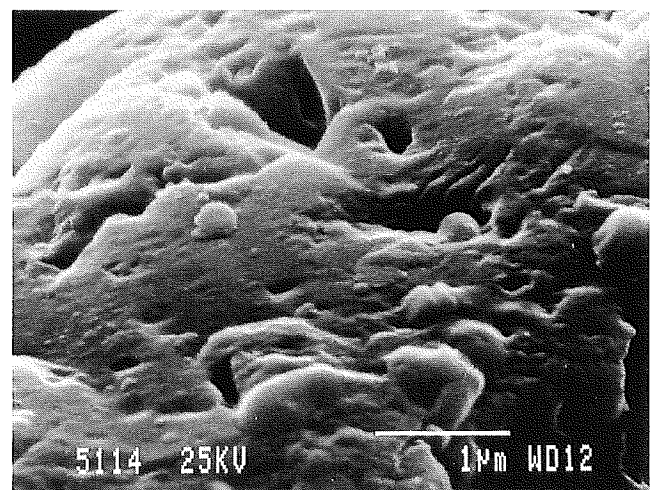


Abb. 8. REM-Aufnahme des Pilbaradolomits mit kugeligen «Nanobakterien» auf der geätzten Oberfläche.

Fig. 8. SEM photomicrograph showing spherical «nanobacteria» on an etched surface of the Pilbara dolomite.

diesem Sinn könnte man etwa fragen: Haben wir die Berge den Bakterien zu verdanken? Welche Rolle spielten Bakterien wirklich bei der Bildung des Dolomits, der sich uns in Form der wunderschönen Bergwelt der Dolomiten präsentiert? Und wo liegt die Verbindung zwischen den heutigen Bakterien und ihren uralten Vorfahren?

8 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Mit einem multidisziplinärem Ansatz, der die Erde als ein geo-bio-chemisches System betrachtet, sollen zukünftige Experimente mit Untersuchungen an modernen Umwelten verbunden werden. Nur so können wir die Welt in der geologischen Vergangenheit besser verstehen; in der gleichen Weise verstehen, wie uns der Vergleich der Resultate unserer Untersuchungen von Lagoa Vermelha und an den Proben aus dem Pilbara aufzeigt, wie Bakterien Steine bauen.

Wir haben gesehen, dass anaerobe Bakterien, die in der Frühzeit des Lebens auf der anaeroben Erde weit verbreitet waren, heute nur noch in isolierten und beschränkten Umwelten, wie z. B. Lagoa Vermelha, überleben. Auf der aeroben modernen Erde dienen ihnen diese Gebiete sozusagen als Zufluchtsorte.

Zum Abschluss: Mit diesem Aufsatz haben wir im geologischen Buch gelesen, um die Bildung gewisser Gesteine und die Biomineralisation durch den Lauf der geologischen Zeit zu verfolgen und besser zu verstehen. Unsere Untersuchungen auf der Erde gaben uns Hinweise auf die frühesten Formen des Lebens und auf gewisse komplexe Wechselwirkungen zwischen diesen Organismen und ihrer Umwelt. Bakterien stehen am Anfang allen Lebens. Sie bildeten Mineralien in einem Mikrobereich. Das Studium von geo-mikrobiologischen Prozessen in diesem Mikrobereich hilft zu einem besseren Verständnis für den Ursprung des Lebens auf der Erde und in unserem Sonnensystem.

9 DANKSAGUNG

Für die Hilfe bei der Vorbereitung dieser Arbeit möchten wir uns ganz speziell bei Urs Gerber bedanken, dessen Aufnahmen und

Bilder immer eine Klasse für sich sind, ebenso bei Daniel Aritztegui, der als Graphiker und Kritiker einen wesentlichen Teil zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

10 LITERATUR

- FELDMANN, M. 1995. Controls on Stromatolite Formation: A Comparative Study of Modern Stromatolites from the Bahamas with Messinian Examples from Southeast Spain. – Ph.D. Thesis, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich. Diss. ETH No. 11119, 128 pp.
- FOLK, R.L. 1993. SEM imaging of bacteria and nannobacteria in carbonate sediments and rocks. – *J. Sed. Petrol.* 63, 990–999.
- GARRELS, R.M. & MCKENZIE, F.T. 1971. Evolution of Sedimentary Rocks. – W.W. Norton, New York, 397 pp.
- HAIDINGER, W. 1845. Über die Pseudomorphosen und ihre anogene und katogene Bildung. – *Abh. k. böhm. Ges. Wiss. Prag, Ser. 5, 3*, 231–259.
- MCKENZIE, J.A. 1991. The Dolomite Problem: An outstanding controversy. In: *Controversies in Modern Geology*. D.W. MÜLLER, J.A. MCKENZIE & H. WEISSERT (eds.), pp. 35–54. – Academic Press, London, xxx pp.
- SCHIDLOWSKI, M. 1981. Die Geschichte der Erdatmosphäre. – *Spektrum der Wissenschaft, Monat*, pp. 16–28.
- VASCONCELOS, C. & MCKENZIE, J.A. 1997. Microbial mediation of modern dolomite precipitation and diagenesis under anoxic conditions (Lagoa Vermelha, Rio de Janeiro, Brazil). – *J. Sed. Res.* 67, 378–390.
- VASCONCELOS, C., MCKENZIE, J.A., BERNASCONI, S., GRUJIC, D. & TIEN, A.J. 1995. Microbial mediation as a possible mechanism for natural dolomite formation at low temperatures. – *Nature*, 377, 220–222.
- MORLOT, A. VON, 1847. Über Dolomit und seine künstliche Darstellung aus Kalkstein. – *Natw. Abh. (W. Haidinger, Hrsg.)*, Wien, 1, 305–315.
- ZENGER, D.H., BOURROUILH-LE JAN, F.G. & CAROZZI, A.V. 1994. Dolomieu and the first description of dolomite. In: *Dolomites: A Volume in Honour of Dolomieu*. B. PURSER, B., M. TUCKER, M. & D.H. ZENGER (eds.). – *Spec. Publ. Int. Ass. Sediment* 21, 21–28.

Prof. Dr. Judith A. McKenzie & Miriam S. Andres, Geologisches Institut, ETH Zentrum, CH-8092 Zürich, Switzerland

Dr. Crisogono Vasconcelos, LAGEMAR, Universidade Federal Fluminense, Niteroi, Rio de Janeiro, Brazil