

Versteinerte Kolonien von Mikroorganismen in Achaten von Kerrouchen, Atlas-Gebirge, Marokko

von Ulf Thewalt und Gerda Dörfner (Gerstetten, Deutschland)

„Blumenkohlartig“ aussehende mm- bis cm-große Einschlüsse kommen in Achaten von Kerrouchen (Marokko) häufig vor. In den inneren Bereichen solcher Aggregate fallen vor allem die filigranen, verästelten, schlauchförmig aussehenden Bauelemente auf. Auch stromatolithenähnliche und dendritenartige Bildungen sind zu beobachten. Die Morphologie dieser Gebilde und ihrer Baukomponenten deutet darauf hin, dass Mikroorganismen bei der Entstehung eine Rolle gespielt haben.

Die „Blumenkohle“ sind als frühe, in einer wässrigen Lösung entstandene Bildungen auf den Wänden ehemaliger Gesteinshohlräume anzusehen.



Abb. 1: Achat von Kerrouchen, Marokko. 16,8 cm. Beispiel eines Achates, bei dem die Wand des ehemaligen Geodenhohlraumes mit vielen relativ kleinen „Blumenkohlen“ bewachsen ist. Alle Fotos in diesem Artikel stammen von den Autoren. Die abgebildeten Objekte befinden sich in der Sammlung der Autoren.

1 Einführung

Im vorliegenden Aufsatz geht es vor allem um die mm- bis cm-großen, gestrüppartig und blumenkohlähnlich aussehenden Einschlüsse, die in großer Zahl in Achaten von Kerrouchen (Atlasgebirge, Marokko) vorkommen (Abb. 1, 2). Es stellt sich die Frage, wie das Gesehene zu interpretieren ist? Handelt es sich um anorganisch entstandene Objekte oder stecken Organismen dahinter? Die Morphologie der Baukomponenten der Gebilde deutet jedenfalls auf ein Mitwirken von Organismen bei der Entstehung hin. Als entsprechende Organismen kommen Bakterien in Betracht.

Dass die Gebilde eine auffallende Morphologie haben, wird gelegentlich konstatiert. McMahan (2009:634) beispielsweise erwähnt sie und bezeichnet sie als „Plumes“. Über Details sind keine Angaben zu finden. Auch wir können die Gebilde hier nur beschreiben. Ein Mikrobiologe könnte sicher mehr dazu sagen. Auf kleinere, ebenfalls als Biosignaturen gedeutete Einschlüsse in Achaten aus der Gegend von Kerrouchen haben wir in einer vorausgehenden Notiz aufmerksam gemacht (Thewalt & Dörfner 2024).



Abb. 2: Achatgeode von Kerrouchen, Marokko. 13,1 cm.

Hier fällt auf, dass die „Gewächse“ unterschiedlich groß sind. Der wahrscheinliche Grund dafür wird im Text näher erläutert.

2 Erscheinungsbild der „Blumenkohle“

Der Einfachheit halber werden im Folgenden die hier interessierenden Gebilde als „Blumenkohle“ und „Büsche“ und ihre Komponenten als „Schläuche“ (jeweils mit Anführungszeichen) bezeichnet.

Beim Betrachten der „Blumenkohle“ unter einer Stereolupe zeigt sich, dass sie im Wesentlichen (1) aus einem zentralen Bereich bestehen, in dem filigrane Bauele-

mente – vor allem schlauchartig aussehende – vorkommen (Abb. 3) und (2) aus gelben bis dunkelbraunen, warzigen Hüllen, die gewissermaßen darüber gestülpt sind (Abb. 4). Diese Hüllen sind es, die das „blumenkohlartige“ Erscheinungsbild bewirken. Zu bemerken ist allerdings, dass auch „Faden-Schlauch“-Aggregate ohne besondere Hüllen vorkommen.



Abb. 3: Innerer Bereich eines „Blumenkohls“. In diesem Beispiel fallen die vielen schlauchartigen Komponenten auf. Bildausschnitt: 1,6 mm.



Abb. 4: „Blumenkohle“. Bildbreite 4 mm.

In der Abbildung 4 sieht man einen „Blumenkohl“, eingebettet in schwach trübem Chalcedon. Die Oberfläche sieht unregelmäßig warzig aus. Dies deutet darauf hin, dass bei ihrer Entstehung nicht Chalcedon strukturbestimmend war. Sonst hätten sich die für Chalcedon charakteristischen glatten halbkugelförmigen Flächen gebildet. Eisenoxidierende Bakterien stören, indem die entstehenden Eisenminerale eigene Baupläne mitbrachten. Der Grund für die auffallende längliche Form eines Teils der „Blumenkohle“ in Abb. 2

besteht wahrscheinlich darin, dass die betreffenden Gebilde von der Decke der ehemaligen Achathohlräume unter dem Einfluss der Erdanziehung nach unten hängend gewachsen sind. Eine solche Entstehung wird auch für die „Pseudostalaktiten“ in Achaten aus den Basalten der Dekkan-Vulkanprovinz in Indien verantwortlich gemacht (Götze & al. 2023). Baumaterialien der „Blumenkohle“ sind vor allem oxidische Eisenminerale und einbettender Chalcedon (Abb. 5).



Abb. 5: Ein poliertes Achatfragment mit eingeschlossenen kleinen „Blumenkohlen“ wurde mit verdünnter Flusssäure behandelt. Das SiO_2 wurde dabei deutlich angegriffen.

Gut erhalten ist das Gerüst aus oxidischen Eisenmineralien.

Bildbreite 1,6 mm.

3 Näheres zu den Hüllen der „Blumenkohle“

Die Hüllen können recht unterschiedlich strukturiert sein: Ihre Dicke variiert und neben einfachen Hüllen kommen mehrere übereinander gepackte dünne, wie in Abb. 6 oder unregelmäßig warzige vor (Abb. 4). Die Feinstruktur der Hüllen hängt mit der Menge an Eisenmineralen zusammen, die im Chalcedon eingebaut sind. Bei geringem Anteil hat man Chalcedonbänder, in denen Eisenoxidpartikel schwimmen oder auch Chalcedonbänder, zwischen denen kleine flache Eisenoxidabscheidungen vorliegen.

Bei hohem Anteil bestimmen die Eisenminerale die Feinstruktur der Krusten, woraus auch die unregelmäßig warzige Struktur resultiert (Abb. 4). Die intensiv-gelbe Farbe, die vielfach zu beobachten ist, wird durch winzige nadelförmige Kriställchen bewirkt. Manchmal ist die Ausbildung auch körnig (Abb. 8). Dass es sich dabei um Goethit handelt, ist wahrscheinlich. Der Farbton hellgelb ist durch die besondere Form und Größe der Kriställchen verursacht (Cornell & Schwertmann 1996).



Abb. 6: Hier treten ineinander gepackte, dünne, hüllenartig aussehende Ausscheidungen auf, die abwechselnd mit fast durchsichtigen Chalcedonlagen entstanden sind.

Bildbreite 1,6 mm.

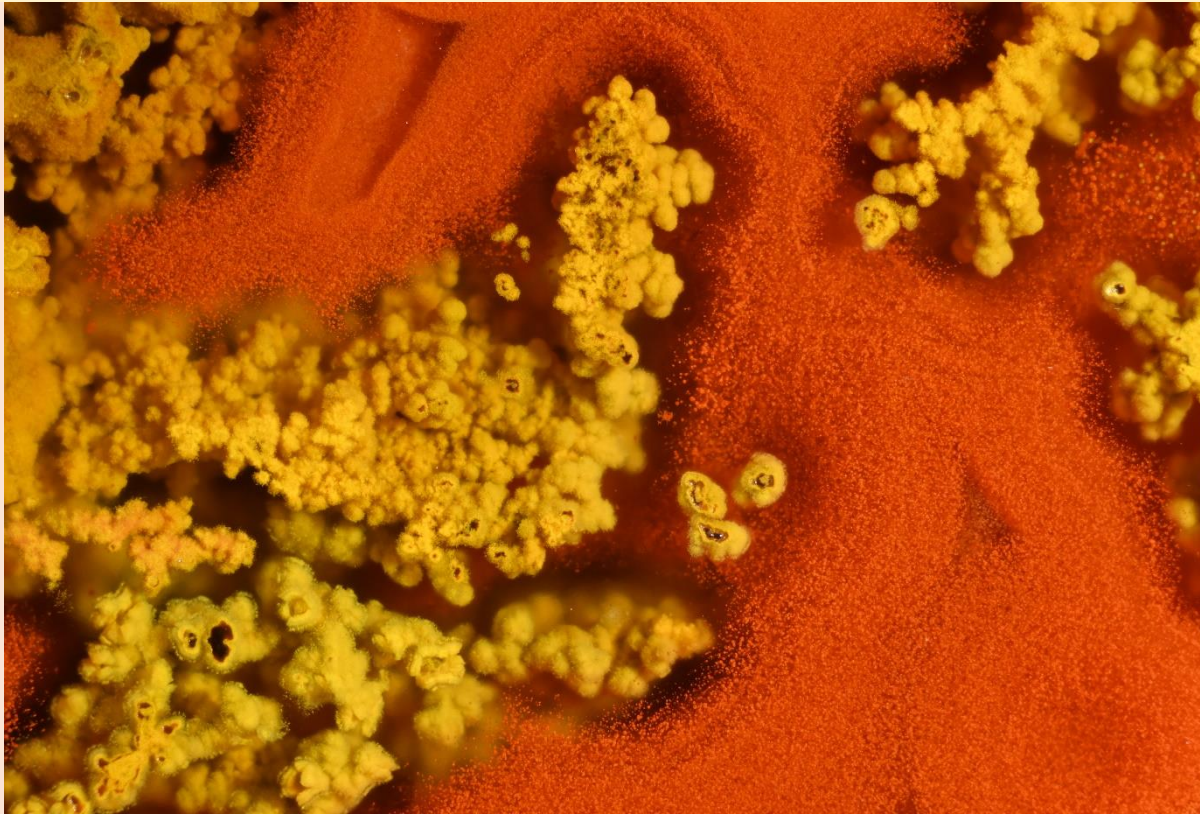


Abb. 7: Die Hüllen der „Gewächse“ zeigen häufig eine kanariengelbe Farbe. Bildbreite 4 mm.



Abb. 8: Das gelbe Material ist teils nadelig, teils feinkörnig ausgebildet. Letzteres ist bei den hier abgebildeten „Schläuchen“ der Fall. Bildbreite 1,6 mm.

4 Schlauchähnlich aussehende Baugruppen

Solche Gruppen spielen bei der Mehrzahl der „Blumenkohle“ eine Rolle. Zwei Typen fallen auf:

(1) Solche mit einem erkennbaren zentralen, sehr dünnen Faden (Abb. 9). Es können auch mehrere derartige Fäden innerhalb eines „Schlauchs“ zusammengepackt sein. Die Fäden stammen von ehemaligen Bakterienkolonien, wie sie in Moosachatzen von vielen Fundpunkten weltweit zu finden (und zu erkennen) sind (Thewalt & Dörfner 2012). In den Kerrouchen-Achatzen spielen Kombinationen aus „Schlauch“ und (erkennbarem) zentralem Faden eine eher untergeordnete

Rolle (Das bedeutet nicht, dass Zentralfäden fehlen, sondern nur, dass sie nicht oder nur schlecht erhalten sind). Dünne, als Bakterienkolonien gedeutete Fäden ohne Hüllen dagegen sind in den Kerrouchen-Achatzen häufiger zu finden, so auch an einigen Stellen in den Abbildungen 10, 11 und 19. Auf die prinzipielle, Moosachate betreffende Frage, was die schlauchähnlichen Bildungen um die zentralen Fäden herum eigentlich sind und warum sie sich gerade dort gebildet haben, soll hier nicht eingegangen werden.

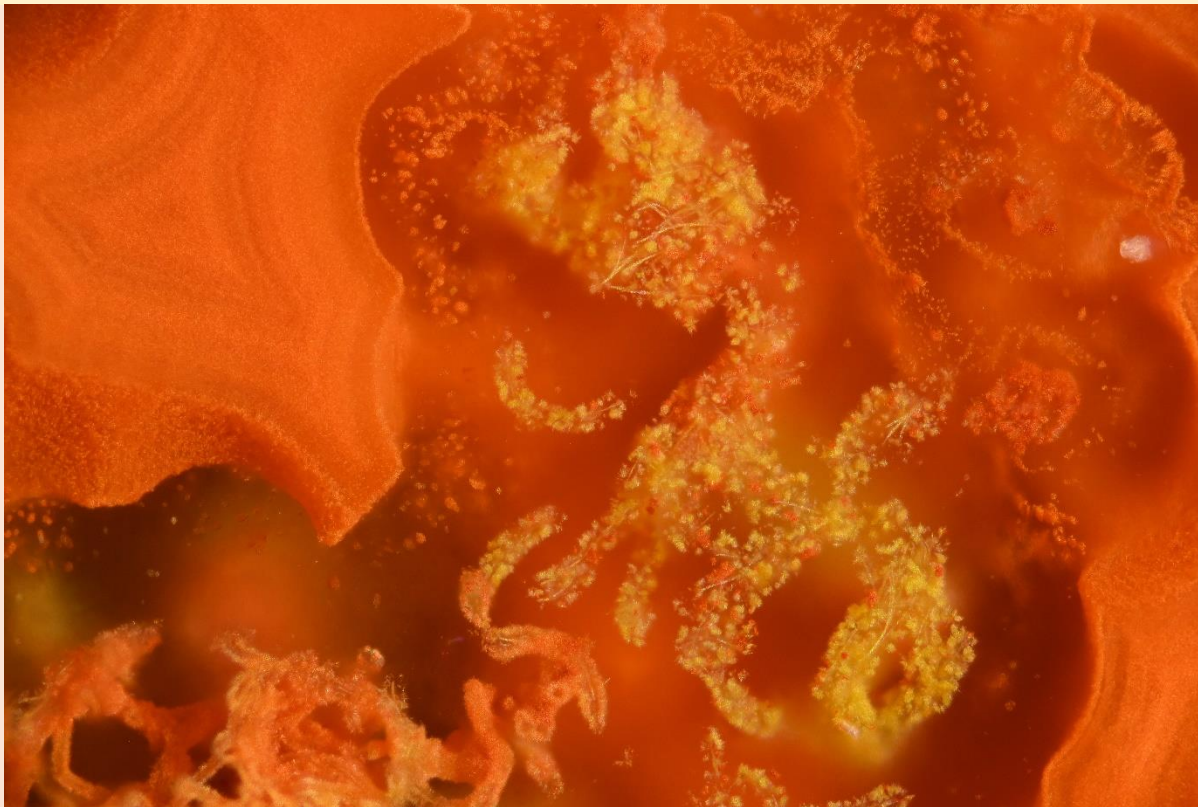


Abb. 9: Aus dem Randbereich eines „Schlauchaggregates“ stammende, stark korrodierte Faden-Schlauch-Kombinationen. Das Besondere: Stellenweise sind die Zentralfäden noch erhalten und sichtbar. Durch frühzeitige Einkieselung sind sie konserviert worden.

Bildbreite 0,8 mm.

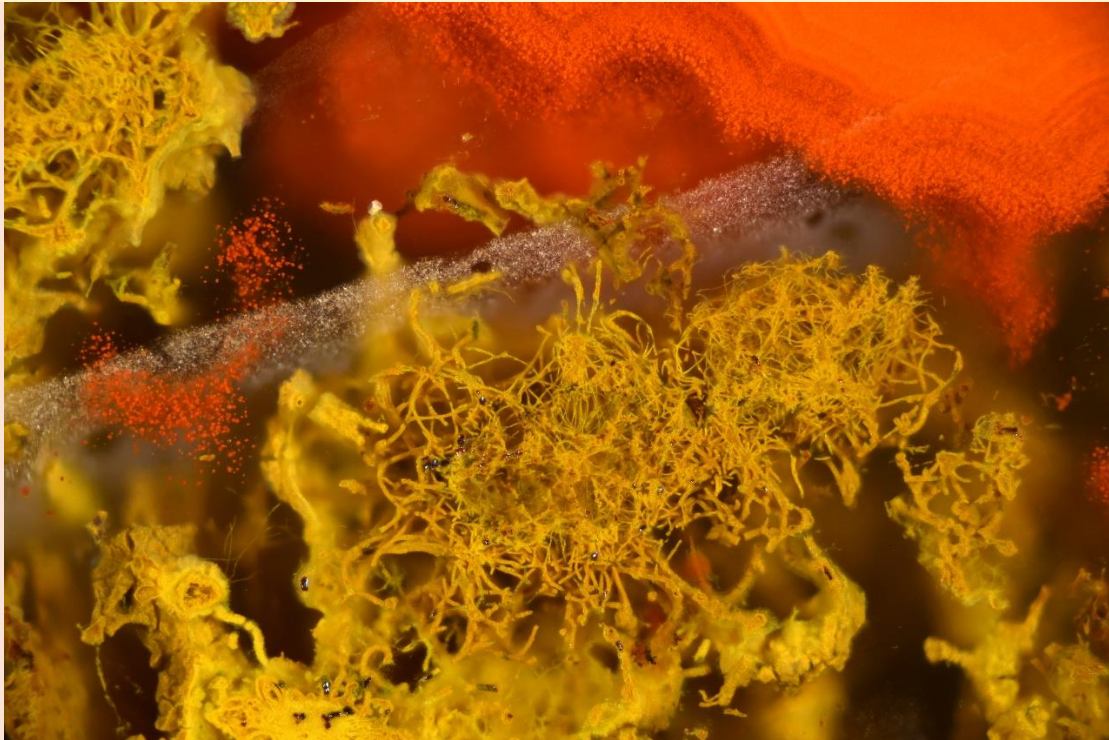


Abb. 10: Hier liegen Zentralfäden vor, die offensichtlich in unterschiedlichem Ausmaß mit kleinen gelben Kristallen (Goethit?) umkrustet sind. Bildbreite 1,6 mm.

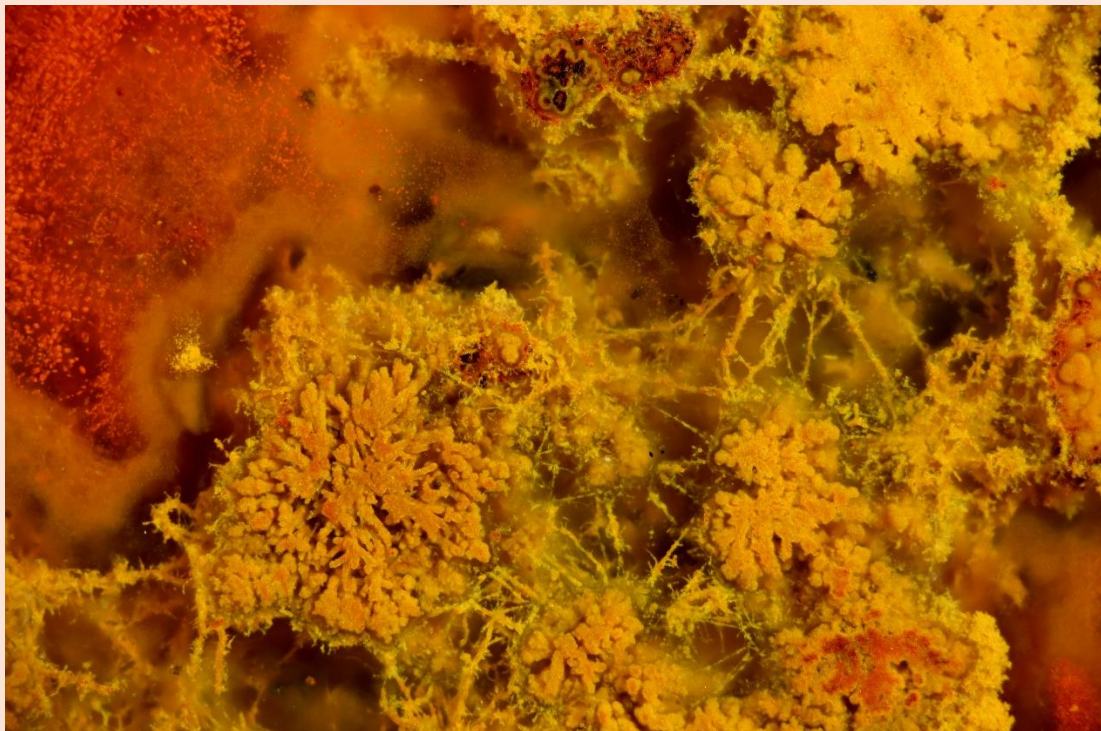


Abb. 11: Unterschiedliche Baustile sind erkennbar (entsprechend unterschiedlichen Bakterienarten?): (1) Rosettenförmige, dendritenähnliche Kolonien aus plumpen Bauelementen, (2) Relativ dünne, mehr oder weniger mit kleinen gelben Kristallen umkrustete, gerade verlaufende Fäden. Bildbreite 1,6 mm.

(2) Beim zweiten Typ schlauchartig aussehender Bildungen handelt es sich um kompakte, weitgehend aus einem gelben bis schwarzen Material bestehende Gebilde (oxidisches Eisenmineral, Tonmineral, Bitumen?) (Abb. 12). Ein Muster von ineinander steckenden Schläuchen und radial orientierten nadeligen Kriställchen ist stellenweise erkennbar, ein zentraler dünner Faden aber nicht. Dies lässt sich so deuten, dass die Bakterienstränge bzw. Zentralfäden mit ihrem Überzug aus biogenen Eisenmineralen von vergleichsweise großen Men-

gen dunkler Minerale überkrustet und so gewissermaßen geschluckt wurden und zwar, bevor die strukturerhaltende SiO_2 -Abscheidung startete. Die zugehörigen „Schläuche“ sind oft mit einem Pelz aus kleinen gelben Kristallen überkrustet (Abb. 9). Auffallend ist, dass die Durchmesser der „Schläuche“ stark variieren, auch jene eng benachbarter Exemplare. Dies dürfte mit kleinräumig unterschiedlicher Verfügbarkeit/Konzentration gelöster Salze zusammenhängen, aus denen sich die Hüllen gebildet haben.

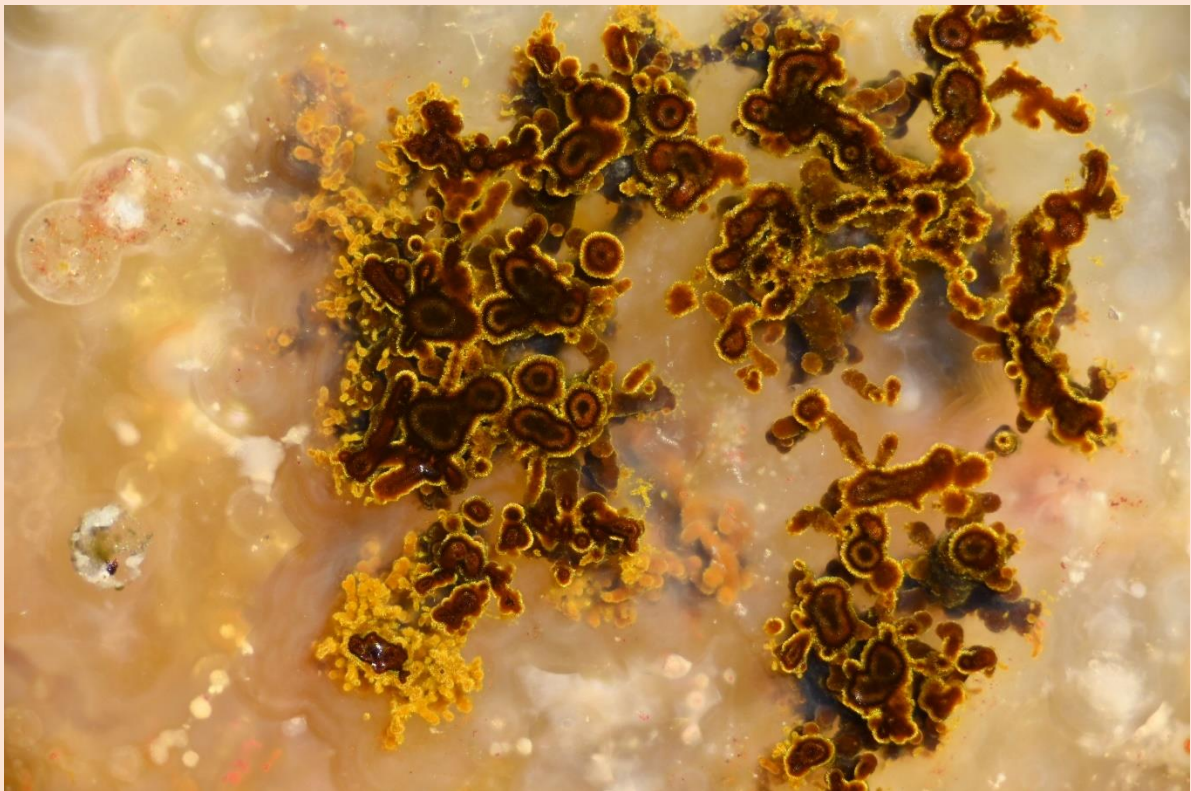


Abb. 12: Die wenig gegliederten „Schläuche“ mit brauner Füllung haben sich vor der Abscheidung von Chalcedon gebildet (andernfalls würde sich auch in ihrem Inneren Chalcedon befinden). Zentrale Fäden/Bakterienstränge lassen sich nicht erkennen.

Bildbreite 1,6 mm.

5 Dendritenartiger Baustil

Auch ein Baumuster, das an Mangandendriten erinnert, ist häufig in den „Blumenkohlen“ realisiert. Hier hat man es im Unterschied zu den zweidimensional ausgebildeten typischen Mangandendriten allerdings mit dreidimensional gewachsenen Gebilden zu tun (Abb. 13, 14). Die Bausteine dieser Dendriten scheinen weitgehend kleine gelbe Kristalle (Goethit?) zu sein. Es ist denkbar, dass diese Gebilde aus Kolonien strangbildender Bakterien hervorgegangen sind und dass das lokale chemische Milieu durch Lösungs- und Umkristallisationspro-

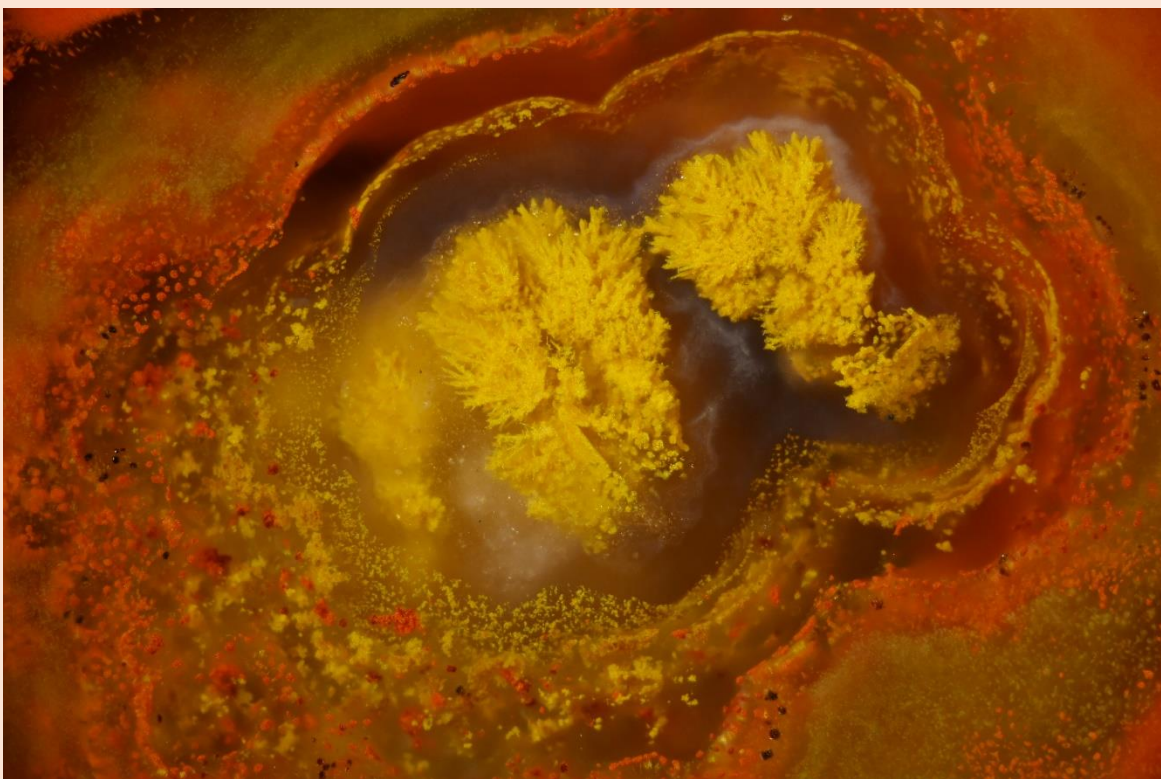
zesse die Fäden zum Verschwinden gebracht hat. Das in Abb. 15 gezeigte Aggregat ist möglicherweise eine entsprechende Vorstufe. Häufig sind viele dendritenartige Aggregate aneinandergedrängt und füllen den verfügbaren Raum weitgehend aus. Direkter Kontakt der einzelnen „Büschel“ wird dabei aber offensichtlich vermieden. Dies deutet auf einen Bildungsmechanismus hin, bei dem Diffusion eine wichtige Rolle gespielt hat (das relevante Schlagwort ist Diffusion Limited Aggregation, DLA).



Abb. 13: Ein in vielen „Blumenkohlen“ auch vorkommendes Muster: dreidimensionale Dendriten. Bildbreite 4 mm.



**Abb. 14: Ausschnitt aus einer relativ großen dendritischen Struktur eines „Blumenkohls“.
Bildbreite 1,6 mm.**



**Abb. 15: Dieses aus länglichen Komponenten bestehende Aggregat stellt möglicherweise eine
Vorstufe von dreidimensionalen Dendriten dar. Bildbreite 1,6 mm.**

6 Stromatolithenartiger Baustil

Unterschiedlich dicht gepackte und unterschiedlich gefärbte Schichten, die jetzt aus Eisenoxiden und Tonmineralien bestehen, erzeugen den visuellen Eindruck von Stromatolithen (Abb. 16). Ein solches

Muster ist gelegentlich auch im Zusammenhang mit den dünnen, scherbenartigen, in Abschnitt 9(1) erwähnten Einschlüssen zu erkennen.



**Abb. 16: „Ministromatolithen“ als frühe Bildungen in einem Achat von Kerrouchen.
Bildbreite 14,5 mm.**

7 Die Randbereiche der Kolonien

Der Rand der zentralen „Gebüsch“ in den „Blumenkohlen“ zeigt vielfältige Muster. Besonders häufig kommen Fäden und „Schläuche“ vor, die in den umgebenden

Chalcedon hineinragen. (Abb. 17 – 20). Beachtenswert: Der Durchmesser der „Schläuche“ nimmt hier mit wachsendem Abstand vom Zentrum der Blumenkohle zu.



Abb. 17: Die Durchmesser der schlauchähnlichen Komponenten sind im Randbereich des Aggregates deutlich größer als im Inneren. Bildbreite 0,8 mm.

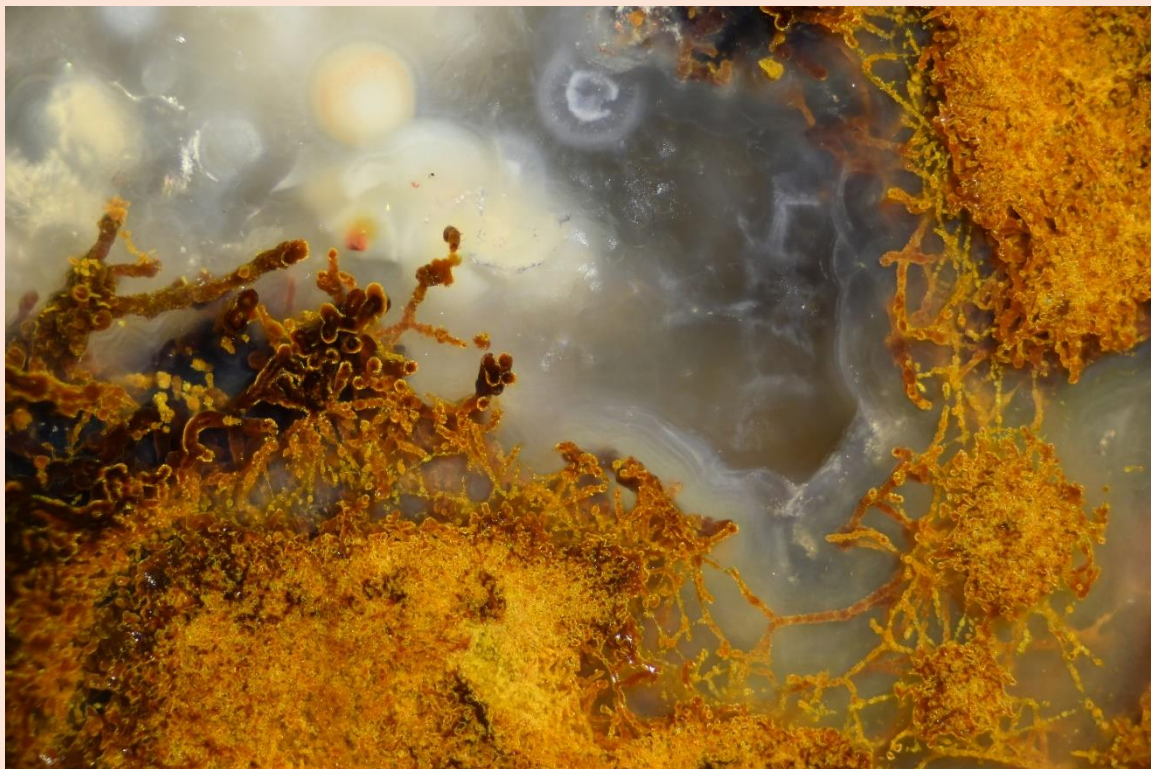


Abb. 18: Auch für dieses Beispiel trifft zu, dass die randlichen „Schläuche“ größere Durchmesser besitzen als die dicht gedrängten inneren. Bildbreite 1,6 mm.

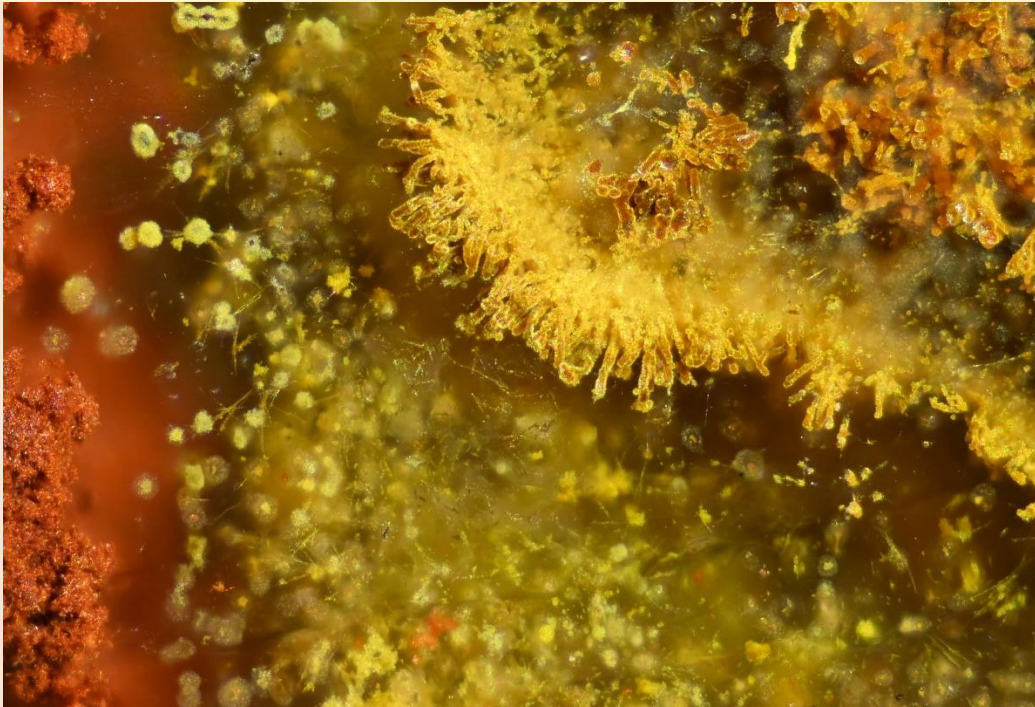


Abb. 19: Im Randbereich dieses „Blumenkohls“ versuchten offensichtlich viele fadenförmige Organismen gleichzeitig unter gleichen äußeren Bedingungen zu wachsen. Dies führte dazu, dass die schlauchförmigen Hüllen annähernd gleich groß sind. In der unteren Bildhälfte sind Reste fadenförmiger Bakterienkolonien zu erkennen. Bildbreite 1,6 mm.

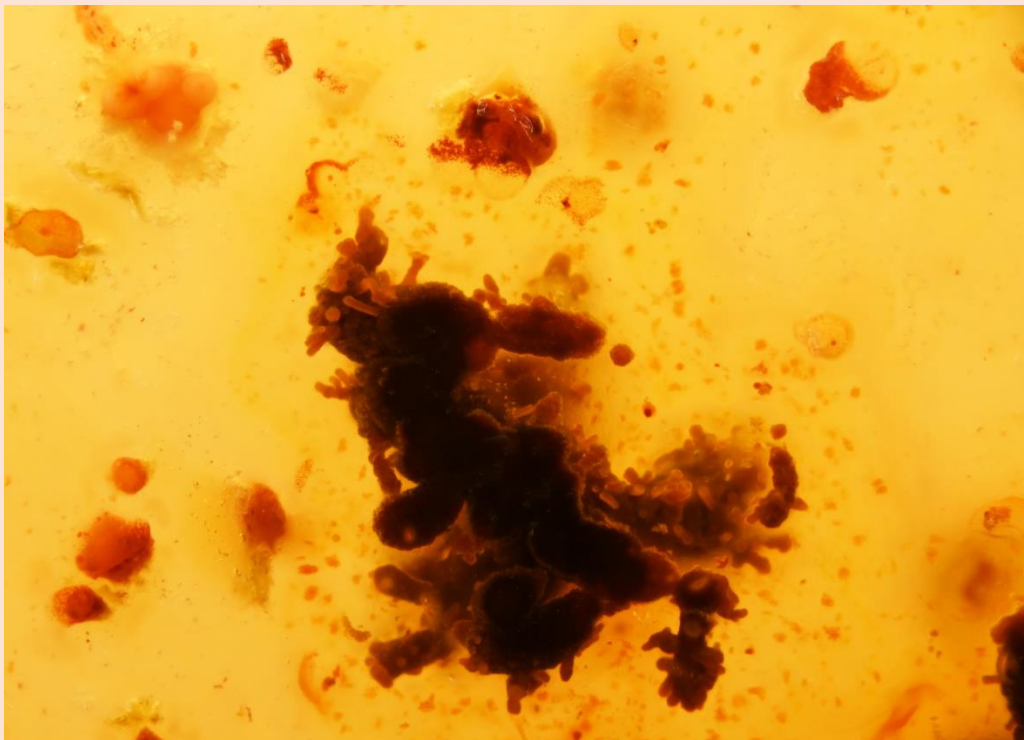


Abb. 20: Hier fällt die glatte Oberfläche der rundlichen Objekte auf. Die Formen sehen sehr „organisch“ aus. Gut zu erkennen ist, dass auf relativ großen, rundlichen Gebilden stellenweise kleine, wurmförmliche wachsen – eventuell die Nachkommen? Bildbreite 0,8 mm.

8 Denkbarer Ablauf der „Blumenkohl“-Entstehung

Eine „anorganische“ Entstehung der faden- und schlauchartigen Gebilde (etwa via „Chemischer Garten“ oder einem ähnlichen mineralchemischen Prozess) ist schwer vorstellbar. Die Morphologie der Gebilde passt viel eher auf dreidimensionale Bakterienkolonien mit möglicherweise mehreren beteiligten Bakterienspezies. Die eisenoxidierende Bakterienart *Gallionella ferruginea* wird gelegentlich genannt. Sie kann jedenfalls büschelartige Kolonien fabrizieren (Schmitt-Riegraf & Riegraf 2015).

Für die Entstehung der Kolonien ist das folgende Szenario plausibel: Die Gesteins-hohlräume, in denen jetzt Achate vorliegen, war anfangs mit einer wässrigen Lösung gefüllt. Diese enthielt gelöste Metallsalze und Kieselsäure (H_4SiO_4), die bei der Verwitterung des vulkanischen Muttergesteins freigesetzt waren. Die Zusammensetzung war offenbar so, dass bestimmte Mikroorganismen leben und sich vermehren konnten. Kolonien bildende Bakterien siedelten auf den Wänden der Hohlräume und bauten ihre artspezifischen Behausungen. Eisenoxidierende Spezies dürften eine wesentliche Rolle gespielt haben. Dem entspricht, dass das Baumaterial der Kolonien gelb bis dunkelbraun und rot ist. Dies sind die Farben oxidischer Eisen(III)-Minerale. Von diesem Material bleibt viel übrig, wenn man den Chalcedon entfernt (Abb. 5).

Begann die Abscheidung von SiO_2 schon, als die „Blumenkohle“ sich noch entwickelten oder erst später? Wahrscheinlich trifft das erste zu (Götze & al. 2011). Das SiO_2 schied sich jedenfalls, wie man fast allen gezeigten Abbildungen entnehmen kann, auch innerhalb der locker gebauten Eisenoxidgebilde ab. Während der folgenden Zeitabschnitte bildeten bzw. verfestigten sich

die Chalcedonlagen in den verbliebenen freien Bereichen; d. h. es entwickelte sich die Festungsachatstruktur.

9 Weitere Beobachtungen, die etwas mit Mikroorganismen zu tun haben

(1) In einem Teil der Kerrouchen-Achate kommen scherbenartige dünne flache Einschlüsse vor, die (oft nur auf einer Seite) mit relativ kleinen „Blumenkohlen“ und/oder stromatolithenartigen Aggregaten bewachsen sind (Abb. 16, 21). Wie sind diese flachen Gebilde zu interpretieren? Plausibel erscheint dies: Während der Frühphase der Achatgenese bildeten sich in Geoden-hohlräumen, die nur zum Teil mit wässriger Lösung gefüllt waren, auf der Wasseroberfläche schwimmende Schichten aus Bakterien, Bakterienkolonien und ihren Zersetzungsprodukten. Bei einer Änderung der Höhe des Flüssigkeitspegels zerbrachen die dünnen Krusten und die Bruchstücke sanken auf den Boden der Geodenhohlräume. Eine detailliertere Deutung für die Natur der Scherben findet man bei Campos-Venuti (2018: 176, 2022: 449): Demnach soll das gegenüber hohen Salzkonzentrationen tolerante Bakterium *Haloquadratum walsbyi* dahinterstecken. Dieses Bakterium liebt ebene Unterlagen und fabriziert darauf quadratische Muster. Hieraus soll sich auch ergeben, dass die Scherben senkrecht aufeinander stehen können, wodurch sie Metamorphosen von kubischen Mineralen vortäuschen können.

(2) Außer den Bakterienkolonien gibt es weitere frühe Abscheidungen auf den Geodenwänden. Gemeint sind Minerale, deren Kristalle später durch SiO_2 ersetzt wurden und die nun als Pseudomorphosen vorliegen. Abb. 22 zeigt ein entsprechendes

Beispiel. Die rhomboedrische Gestalt ist verträglich mit Carbonaten zweiwertiger Metalle. Calcit ist ein möglicher Kandidat. Aus der Abbildung lässt sich ablesen, dass die Bakterienkolonie bereits existierte, als der Kristall sich entwickelte.

(3) Wolkenachartartige Bildungen kommen vor, wenn auch nur selten (Abb. 23). Laut Campos-Venuti (2022) waren auch bei der Entstehung dieses Typs von SiO_2 -Abscheidungen Mikroorganismen beteiligt.



Abb. 21: Bruchstücke von dünnen Platten sind häufig in Achaten von Kerrouchen zu finden. Wahrscheinlich haben auch bei deren Entstehung Bakterien mitgewirkt. Bildbreite 1,6 mm.



Abb. 22: „Blumenkohle“ und eine Mineralpseudomorphose liegen hier nebeneinander vor. Der „Blumenkohle“ existierte bereits, als der rhomboedrische Kristall um ihn herum wuchs. Bildbreite 4 mm.



Abb. 23: Eines der für die Lokalität Kerrouchen seltenen Beispiele von „Wolkenachat“. Bildbreite 4 mm.

Anmerkungen

Die Achate, auf denen der vorliegende Bericht basiert, haben wir auf Achatbörsen und via ebay zusammengetragen. Die Mikrofotos wurden mit einem klassischen Mikroskop, kombiniert mit einer Systemkamera, an polierten Anschliffen hergestellt.

Jeweils mehrere Einzelaufnahmen wurden mit Hilfe des Programms Helicon Focus (HeliconSoft 61062 Charkiv, Ukraine) „gestapelt“. Dadurch ließ sich eine gegenüber Einzelaufnahmen erhöhte Tiefenwirkung erreichen.

Literatur

- CAMPOS-VENUTI, M. (2018): Banded agates – a genetic approach. Eigenverlag. 199 S.
- CAMPOS-VENUTI, M. (2022): Biominerals – Microbial Life in Agates and other Minerals. Eigenverlag. 526 S.
- CORNELL, R.M. & SCHWERTMANN, U. (1996): The Iron Oxides. Verlag Chemie. Weinheim, New York, Basel, Cambridge, Tokyo. 573 S.
- GÖTZE, J., MÜLLER, A., POLGARI, M. & PAL-MOLNAR, E. (2011): Biosignaturen in Achat/Chalcedon – Die Rolle von Mikroorganismen bei der Bildung von SiO₂. Mineralien Welt 1/2011. Bode Verlag, Salzhemmendorf. 90-96.
- GÖTZE, J., HOFMANN, B., MACHALOWSKI, T., TSURKAN, M.V., JESIONOWSKY, T., EHRLICH, H., KLEEBERG, R. & OTTENS, B. (2020): Biosignatures in Subsurface Filamentous Fabrics (SFF) from the Deccan Volcanic Province, India. Minerals. 2020, 10, 540. Doi: 10.3390/min10060540.
- MC MAHAN, P. (2009): Einschlüsse in Achat. 516-644. In ZENZ, J.: Achate II. Bode Verlag, Haltern am See. 696 S.
- SCHMITT-RIEGRAF, C. & RIEGRAF, W. (2015): Vulkanite, Mandelsteinbildungen und Mikrofossilien im Steinbruch Juchem (Unter-Perm, Rheinland-Pfalz). In LORENZ, J. & MÜSSIG, K. (Ed.): Juchem – Achate, Drusen, Sammler. Mitt. Naturwiss. Mus. Aschaffenburg, Bd. 27. 64-161.
- THEWALT, U. & DÖRFNER, G. (2012): Wie kommt das Moos in den Moosachat – und wie nicht? Beiträge zu einer alten Frage. Der Aufschluss 63, VFMG, Heidelberg. 1–16.
- THEWALT, U. & DÖRFNER, G. (2024): Biosignaturen in Achaten von Kerrouchen, Marokko. www.agates.click 6/2024.