

ACHATGENESE

Der nun folgende Beitrag soll dem interessierten Leser einen Einblick in die Theorie der Achatentstehung vermitteln. Er ist bewusst allgemeinverständlich gehalten und erhebt deshalb auch nicht den Anspruch eines hochwissenschaftlichen Artikels. In seinen wesentlichen Grundzügen ist er angelehnt an die Theorie der Achatgenese nach Michael Landmesser, wobei inhaltlich auch nicht auf alle konkreten Erscheinungsformen der doch recht vielfältigen Achatpalette eingegangen werden konnte.

Ziel ist es, nach Einsicht des kompletten Beitrages den Leser in die Lage zu versetzen, die grundsätzlichen Vorgänge bei der Achatentstehung anhand des derzeitigen wissenschaftlichen Kenntnisstandes nachvollziehen zu können.

Bildungszeitraum der Achate

Wie oben schon erwähnt, fällt die Entstehung der Achate im Saar - Nahebecken in die Permzeit, also etwa vor 250 Millionen Jahren. Zeitlich einhergehend vollzog sich in dieser Epoche ein gigantisches Artensterben, wahrscheinlich verursacht durch permanente Vulkanausbrüche über einen langen Zeitraum von etwa 400.000 Jahren. Mit abnehmender Vulkantätigkeit bildeten sich in den Lavadecken in erster Linie Gasblasen, welche die Grundlage zur Bildung der hiesigen Achate schufen.

Zur Entstehung der Achate

(Peter Nickel, Dortmund)

Achate kommen in Gesteinshohlräumen vor. Sie bestehen aus gebändertem Chalcedon. Chalcedon ist eine extrem feinkristalline Verwachsungsform der Kieselsäure SiO_2 .

Grundsätzlich können Achate in allen Gesteinen, wie Vulkaniten, Plutoniten und Sedimentgesteinen vorkommen und damit auch in verkieselten Hölzern, Saurierknochen und Muschelschalen. Am Häufigsten kommen Achate in Vulkaniten vor, da deren chemische Zusammensetzung die Freisetzung von Kieselsäure begünstigt.

Geeignete Hohlräume sind z.B. Gasblasen in Vulkangestein. Wenn die Lava ausgeflossen ist, kühlt sie in den äußeren Bereichen zuerst ab und wird dort hart. Im noch mehr oder weniger flüssigen Inneren bleibt Gas (Wasserdampf, Kohlendioxid, Schwefeldioxid) noch stecken. Das Gas kann nicht mehr nach oben ausperlen und bildet Blasen Hohlräume. Aber auch in Spalten und Hohlräumen zwischen Vulkanittrümmern können Achate gebildet werden oder in den Hohlräumen von Porphyrkugeln (Litho-physen). In trockengefallenen Meeressedimenten entstehen Hohlräume z.B. dadurch, dass auskristallisierte Salze (Evaporite) durch Regen aufgelöst und abtransportiert werden. Entscheidend ist, dass die Hohlräume abgeschlossen sind. Spätvulkanische Hydrothermalphasen spielen dabei kaum eine Rolle. So sind z. B. die Achate in Brasilien 50 Millionen Jahre jünger als das Muttergestein, Götze 2014. Die Achate im Saar-Naheraum sind 30 bis 50 Millionen Jahre jünger als das Muttergestein, Laarmann 2000 S. 27. Die Blasen in jungen Vulkaniten sind zunächst einmal leer, Lorenz 2015 S.170f.

Sobald die erkaltete Lava, aber auch Tuffe und vulkanische Aschen den Einflüssen von Wasser, Sauerstoff usw. ausgesetzt sind, kommt es zu chemischen Umwandlungsprozessen, bei denen monomer gelöste Kieselsäure $\text{Si}(\text{OH})_4$ frei wird.

Um zu verstehen, wie es zu der starken Konzentration von Kieselsäure in den Gesteinshohlräumen kommt, müssen zwei Punkte vorweg erörtert werden.

Lösungsausfällungsgleichgewicht

Wirft man ein Stück Würfelzucker in ein Glas Wasser und rührt **nicht** um, so wird sich trotzdem nach einer gewissen Zeit der Zucker in dem Wasser aufgelöst und gleichmäßig verteilt haben. Wirft man nun ein weiteres Stück Zucker in das Wassergefäß, so wird sich auch dieses in dem Wasser auflösen und verteilen. Wirft man nun weitere Zuckerstücke in das Gefäß, so wird irgendwann der Sättigungspunkt des Wassers erreicht sein, kein weiterer Zucker geht in Lösung, es bildet sich ein Bodensatz von Zucker. Dann ist das Lösungsausfällungsgleichgewicht erreicht.

In dem Gefäß herrscht aber kein statischer Zustand, sondern es geht ständig Zucker in Lösung und gleichzeitig wird Zucker auf molekularer Ebene als Bodensatz ausgefällt (dynamisches Gleichgewicht).

Unterschiedliche Reifungszustände von SiO₂

SiO₂ kann unterschiedliche Zustände annehmen, es kann als monomer gelöste Kieselsäure Si(OH)₄, es kann als amorphes SiO₂ (Gel, Opal A), als Opal CT, als Chalcedon und als Quarz vorkommen. Aus monomer gelöster Kieselsäure entwickelt sich als unreifste Form das Kieselgel, Quarz ist der reifste Zustand. Die Reife bestimmt sich daran, wie geordnet das SiO₂ Material ist. Die Reifung geht unter Vorhandensein von Wasser mit der Zeit vor sich. Sie kann durch verschiedene Substanzen, z.B. von Eisenverbindungen, etwas beschleunigt werden.

Bei den einzelnen Reifungszuständen der Kieselsäure sind nun die Lösungsausfällungsgleichgewichte unterschiedlich. Je reifer das SiO₂ ist, desto niedriger ist das Lösungsausfällungsgleichgewicht. Bei Kieselgel ist das Lösungsausfällungsgleichgewicht also am höchsten, bei Quarz an niedrigsten.

Ohne Wasser geht es also nicht. In der Regel steht erst bei Wasserbedeckung ausreichend und gleichmäßig Wasser zur Verfügung. Das heißt, potentielle Achatmuttergesteine müssen durch geologische Vorgänge mindestens in den Bereich des (stationären) Grundwassers abgesenkt worden sein. Gesteine, die nicht abgesenkt werden, fallen der Erosion zum Opfer. Das Saar-Nahe Gebiet war beispielsweise im Perm zeitweise mit Wasser bedeckt ("Saar-Nahe-Senke").

Zwischen den beiden im Steinbruch Juchem bei Idar-Oberstein aufgeschlossenen Lavadecken befindet sich eine 6 Meter dicke Schicht von Sedimenten (Synsedimentärer Vulkanismus), Schmitt-Riegraf & Riegraf 2015 S. 72.

Über Risschen, Fugen an Korngrenzen und Kapillaren dringt das Wasser in das Gestein ein. Das Wasser sickert auch in die Hohlräume. Das eventuell vorhandene Gas (Kohlendioxid, Schwefeldioxid) geht dabei in Lösung. Das Wasser kann auch nicht aus den Hohlräumen unten wieder heraussickern, da das Gestein unter den Hohlräumen ja auch schon mit Wasser durchtränkt ist. Es besteht kein Gefälle.

In diesem Feuchtigkeitssystem verteilt sich nun durch Diffusion die monomer gelöste Kieselsäure Si(OH)₄, die bei der chemischen Umsetzung des Vulkanits nach und nach frei wird. Genauso wie in dem Wassergefäß nicht umgerührt wurde und der Zucker sich trotzdem verteilt hat, so verteilt sich das Si(OH)₄ nach und nach in dem Feuchtigkeitssystem, **ohne dass das Wasser sich bewegt**. Nun finden sich in nahezu allen Gesteinen ganz fein und nicht immer gleichmäßig verteilt Metalloxidpartikel, z.B. von Eisen, unter anderem auch an den Rändern der Hohlräume. Hier bewirkt das Eisen nun eine leichte Reifungsbeschleunigung des dort vorhandenen Si(OH)₄. Damit sinkt an dieser Stelle das Lösungsausfällungsgleichgewicht. Es wird dann dort monomer gelöste Kieselsäure ausgeschieden. Damit sinkt in der unmittelbaren Umgebung des Hohlraums der Gehalt an Si(OH)₄. Da das Gesamtsystem aber einen Ausgleich von Konzentrationsunterschieden „anstrebt“, diffundiert neues Si(OH)₄ zu dieser Stelle hin und wird wegen des Reifungsvorsprungs wiederum ausgeschieden. So kommt es zu einer langsamen Anreicherung von Si(OH)₄ in dem Hohlraum. Der Vorgang unterhält sich selbst, solange immer neues Si(OH)₄ nachgeliefert wird, d.h. zum Hohlraum hin diffundiert. Wasser fließt dabei nicht. Je nach Mineralbestand des Vulkanits kann es als erste Mineralisation in dem Hohlraum auch zum Absatz von Delessit oder Seladonit kommen, kompliziert aufgebaute, meist grün aussehende Silikate, die neben anderen Substanzen auch wieder Eisenverbindungen enthalten.

In dem Hohlraum bilden sich zunächst schwebende Teilchen. Die chemischen Bedingungen in dem Hohlraum sind unterschiedlich. An Stellen, die auf Grund ihrer chemischen Konsistenz, z.B. der Anwesenheit von Eisenoxidpartikeln, die Reifung von Kieselsäure etwas beschleunigen können, lagern sich die Teilchen pustelförmig an der Hohlraumwand an. Die Miniporen zwischen diesen Pusteln setzen sich nach und nach zu. Nach Durchlaufen eines Gelzustands bilden sich aus den Pusteln Sphärolithe, schalig aufgebaute, halbkugelige Gebilde. Je enger die Sphärolithe beieinander sitzen, desto eher ergibt sich im Schnitt eine Annäherung an eine gerade Linie. Wenn Achate im Steinbruch beim Herausschlagen zerbrechen, kann man sehr gut die Sphärolithe beobachten. Die Sphärolithe sitzen rundum an den Wänden des Hohlraums und wachsen kugelschalenförmig nach innen. Da es sich bei dem Hohlraum um ein einheitliches System handelt, zeigen die einzelnen Kugelschalen benachbarter Sphärolithe auch die selbe Struktur und Farbe, so dass der Eindruck von Wandauskleidung entsteht.

Betrachtet man die Bänderung durch ein Elektronenmikroskop, so erkennt man, dass der Achat aus unterschiedlich großen Partikeln besteht, die in seltenen Fällen sogar die Form kleiner Quarzkristalle annehmen. Die Bänderung kommt dadurch zustande, dass einmal eine Lage etwas größerer und einmal eine Lage etwas kleinerer Partikel aufeinander folgen. Teilweise sind die Partikel auch unterschiedlich dicht gepackt. Diese Mikrostruktur ist letztlich auf Selbstorganisationprozesse zurückzuführen.

Die ringsum an den Hohlraumwänden aus kugelschalig aufgebauten Spärolithen bestehende Bänderung wird **gemeine** oder **adhäsionale Bänderung** genannt.

Manchmal kommt es vor, dass durch die Diffusion so viel Si(OH)_4 in den Hohlraum gelangt, dass die Partikel sich im Wasser schwebend zu etwas größeren Einheiten zusammenklumpen. Hier wirkt sich dann die Schwerkraft aus, und die Klumpen sinken zu Boden. Es bilden sich waagrechte Schichten heraus, die unabhängig von der Herkunft des Achats als **Uruguay-Bänderung** oder **gravitationale Bänderung** bezeichnet werden.

Der Achat reift also von außen nach innen. Das Si(OH)_4 , das in dem inneren Bereich kumuliert wird, hat also zunächst die bereits reiferen Bereiche passiert. In diesen äußeren Bereichen ist nun wegen des Reifungsvorsprungs das Lösungsausfällungsgleichgewicht niedriger als in den inneren Bereichen. Dennoch wird die Kieselsäure in den äußeren Bereichen nur in geringem Umfang „eingefangen“. Die Reaktionsgeschwindigkeit ist so niedrig, dass ein Großteil des Si(OH)_4 nach innen diffundieren kann. Die Kieselsäure kann durch die bereits verfestigten äußeren Bereiche hindurch diffundieren, weil der Achat, selbst wenn er ausgereift ist, aus körnigen Partikeln besteht. Bekanntlich sind Achate färbbar. Auf dem selben Weg wie die Farbe diffundiert auch das Si(OH)_4 durch die reiferen Bereiche des Achats. Auch „nicht färbbare“ Bereiche des Achats sind kein Hindernis. Als „nicht färbbar“ werden Achatbereiche bezeichnet, wenn sie z.B. nach 14 Tagen Farbbehandlung noch keine Farbe angenommen haben. Würde die Farbbehandlung über Jahre fortgesetzt, würden natürlich auch diese Bereiche Farbe annehmen. Die Zeit spielt bei den Vorgängen in der Natur keine Rolle.

In den Hohlräumen trennt sich im Laufe des weiteren Reifungsprozesses die Kieselsäure von dem Wasser. Als Folge der Diffusion gerät immer mehr „Materie“ in den ursprünglich schon mit Wasser gefüllten Hohlraum. Da das Gestein außerhalb des Hohlräume auch schon mit Wasser durchtränkt ist, besteht kein Gefälle nach außen. Es baut sich tendenziell ein Überdruck in dem Hohlraum auf. Das Wasser sucht sich einen Weg nach draußen. Der werdende Achat ist noch relativ lange plastisch verformbar. Es kommt zur Bildung der sogenannten Ausflusskanäle. Dabei geht das Wasser naturgemäß den Weg des geringsten Widerstands. Das hat zur Folge, dass die Ausflusskanäle insbesondere bei größeren Achaten keineswegs radial auf kürzestem Wege nach draußen führen, sondern sie verlaufen gekrümmt, teilweise direkt erratisch. Sehr häufig verlaufen die Ausflusskanäle an der Grenze zwischen benachbarten Spärolithen. Manchmal handelt es sich auch gar nicht um röhrenförmige Kanäle sondern eher um Spalten, die nur im zweidimensionalen Schnittbild wie Röhren aussehen. Unter Druck durchdringt das Wasser dann auch die bereits verfestigten äußeren Schichten. Die Ausflusskanäle sind zusammen mit dem zentralen Hohlraum die letzten noch offenen Bereiche und werden deshalb auch als letzte mineralisiert. Bei bergfrischen unbeschädigten Rohachaten aus unverwittertem Muttergestein kann man nur in der allerseltensten Fällen außen die Ausflussöffnung erkennen, Das liegt daran, dass die äußeren Bereiche meist schon so weit verfestigt waren, dass das Wasser sich nicht mehr einen direkten Weg durch sie hindurch bahnen konnte. Das Wasser konnte dann nur, wie gesagt, die bereits verfestigten äußeren Schichten langsam durchdringen. Der tendenzielle Überdruck ist auch die Ursache dafür, dass bei manchen Achaten das Zentrum mit dem Quarzkern nicht in der Mitte zu finden ist sondern zur Seite gedrückt wurde. Die Bänder erscheinen dann oft ganz ungleichmäßig breit, was aber auch teilweise daran liegen kann, dass die Bänder spitzwinklig zur Schnittebene liegen.

Lässt die Zufuhr von Si(OH)_4 nach, bilden sich in der nur noch schwach gesättigten Lösung Quarze. Oft handelt es sich um die letzte Mineralisation. Bei der Kristallisation der Quarze kommt es manchmal zu mikroskopisch kleinen Einschlüssen der umgebenden Flüssigkeit in den wachsenden Kristall. Wegen des vorherrschenden Drucks sind in der Flüssigkeit Gase, meist Kohlendioxid, gelöst. Im Lauf der Zeit lässt der Druck im Achathohlraum und damit auch irgend wann in den

Flüssigkeitseinschlüssen in den Quarzen nach. Es kommt zu einer Phasentrennung, oberhalb der Flüssigkeit bildet sich eine kleine Gasblase. Dies kann man aber nur bei sehr starker Vergrößerung erkennen.

Die Ausbildung eines Achats dauert je nach Größe sehr lange Zeit, unter Umständen mehrere tausend Jahre. Achate lassen sich deshalb nicht künstlich herstellen. Denn wenn man versucht, Zeit durch Druck oder

Hitze zu ersetzen, erhält man nicht Chalcedon sondern grobkristallinen Quarz, da SiO_2 immer den höchsten, unter den gegebenen physikalisch-chemischen Bedingungen möglichen, Reifungszustand annimmt. Die Eigenfarbe der Achate ist grau. Die bunten Farben mancher Achate werden durch Eisen bzw. durch dessen Oxidationsformen in unterschiedlichen Mischungsverhältnissen verursacht. Manchmal ist auch Mangan beteiligt. Bei Achaten aus Mali wurde kürzlich Kohlenstoff als farbgebende Substanz entdeckt. Bei dem „Moos“ in den sogenannten Moosachaten handelt es sich offenbar weitgehend um die Lebensspuren von Bakterien. Es gibt sogar Stromatolithe in Achaten. Unregelmäßige Rotverfärbungen in Achaten (sofern nicht durch Auslaugung verursacht) sind möglicherweise auch auf Bakterien zurückzuführen, Schmitt-Riegraf & Riegraf 2015, S.115ff, S. 128.

Diese zusammenfassende Darstellung beruht auf der von M. Landmesser entwickelten Diffusionstheorie. Alle anderen Theorien zur Achatentstehung (Fließwassertheorie, Schmelztropfentheorie, Entmischungstheorie, Jahreszeitentheorie) sind widerlegt. Die Diffusionstheorie ist die einzige Theorie zur Achatentstehung, die nach gegenwärtigem Kenntnisstand nicht widerlegt werden kann. Weitere mögliche Theorien sind nicht erkennbar. Mit der Diffusionstheorie sind zunächst einmal nur die grundlegenden Vorgänge bei der Anreicherung von Kieselsäure in den Gesteinshohlräumen geklärt. Diese Theorie versetzt einen noch nicht in die Lage, alle Vorgänge zu klären, die sich bei der Entstehung jedes einzelnen Achats abgespielt haben könnten. Wegen der erforderlichen langen Zeiträume sind experimentelle Klärungen meist nicht möglich. Man kann auch nicht immer vom Ergebnis auf die Ausgangssituation zurück schließen. Viele Einflussfaktoren sind einfach nicht mehr fassbar. Da nun aber der grundlegende Vorgang geklärt ist, lässt sich auf dieser Theorie aufbauend in Zukunft sicher noch manche bisher offene Frage beantworten.

Referenzen:

- Götze, J., Vortrag über brasilianische Achate auf der Achatbörse in Niederwörresbach am 8.3.2014.
- Laarmann, U., Wie kommen nun die Edelsteine in die Vulkanite in Extra Lapis Nr. 19 „Achat“, München 2000, S. 26 – 27.
- Landmesser, M., Das Problem der Achatgenese, Mitteilungen der Pollichia Bd. 72 Bad Dürkheim 1984, S. 5 - 137.
- Landmesser, M., Zur Eingrenzung der P-T-Bedingungen der Achatgenese, Chem. der Erde, Bd.45, Jena1986, S.273 – 293.
- Landmesser, M., Transport- und Akkumulationsmechanismen des SiO_2 in petrologischen Systemen: Achate. Z.Dt.Gemmol. Ges. Bd. 36, Stuttgart 1988, S. 101 – 119.
- Landmesser, M., Zur Geothermometrie und Theorie der Achate, Mitteilungen der Pollichia Bd. 79, Bad Dürkheim 1992, S. 159 – 201.
- Landmesser, M., Zur Entstehung von Kieselhölzern in Extra Lapis Nr. 7 Versteinertes Holz München 1994, S. 49 – 80.
- Landmesser, M., Selbstorganisation und Achatgenese: Wissenschaftsgeschichte, Problemfacetten und Resultate der neueren Forschung in Krug, H.J., Kruhl, J.H., Nichtgleichgewichtsprozesse und dissipative Strukturen in den Geowissenschaften, Berlin 2001, S.73 – 139.
- Lorenz, J., Die „Zementeier“ oder „Betoneier“ aus dem Steinbruch Juchem bei Niederwörresbach nahe Idar-Oberstein in Lorenz, J., Müssig, K., Juchem, Achate, Drusen, Sammler. Der berühmte Steinbruch bei Niederwörresbach in der Region Idar-Oberstein, Aschafenburg 2015, S. 164 – 175.
- Schmitt-Riegraf, C. & Riegraf, W., Vulkanite, Mandelstein-Bildungen und Mikrofossilien im Steinbruch Juchem (Unter-Perm Rheinland-Pfalz) in Lorenz, J., Müssig, K., Juchem, Achate, Drusen, Sammler. Der berühmte Steinbruch bei Niederwörresbach in der Region Idar-Oberstein, Aschaffenburg 2015, S. 64 – 161.

Das Heft Extra Lapis „Versteinertes Holz“ ist sehr zu empfehlen, da es sich bewusst an Leser mit nur geringen Vorkenntnissen wendet.

Die anderen Artikel von M. Landmesser können bestellt werden bei www.zvab.com und dann als Suchbegriff „Achatforschung“ eingeben.