Mitt. POLLICHIA	72	5–137	109 Abb.	2 Tab.	Bad Dürkheim/Pfalz 1984
					ISSN 0341–9665

Michael LANDMESSER

Das Problem der Achatgenese*

Kurzfassung

LANDMESSER, M. (1984): Das Problem der Achatgenese. – Mitt. POLLICHIA, 72: 5–137, Bad Dürkheim/Pfalz.

Das alte, bis heute sehr umstrittene Problem der Achatgenese wird ausführlich diskutiert. Dabei werden zunächst die bisherigen Achattheorien, etwa von der Mitte des 19. Jahrhunderts an, unter einheitlichen Gesichtspunkten dargestellt, beurteilt und z. T. widerlegt. Darüber hinaus werden Grundzüge einer „neuen" Achattheorie erarbeitet. Achate entstehen im sedimentär-diagenetischen P-T-Bereich aus polydispersen kolloiden Systemen. Spezielle Vorstellungen zur Genese der vielfältigen Strukturbildungen in Achaten werden entwickelt. Schließlich wird über eine Reihe von neuen makroskopischen, mikroskopischen und elektronenmikroskopischen Entdeckungen berichtet.

Abstract

LANDMESSER, M. (1984): Das Problem der Achatgenese [The Problem of the Agate Genesis]. – Mitt. POLLICHIA, 72: 5–137, Bad Dürkheim/Pfalz.

The old problem of the agate genesis is discussed. Theories published since the middle of the 19th century are described and evaluated. The fundamentals of a "new" agate theory are also presented.

Because of the diversity of structures in agates, the petrological problem of agate genesis is also a morphological problem; i.e. a problem concerning the formation of macroscopic inorganic structures in rock. Very important for the question of agate genesis was and still is the explanation of five more common structures, which may be called macroscopic main structures:

1.: ordinary banding („gemeine Achatbänderung"), which is characteristic of agates (fig. 1);
2.: the horizontal Uruguay-banding or Uruguay-structure („Uruguay-Bänderung", „Uruguay-Struktur") (fig. 2);
3.: frequently occurring, characteristic deformations of the ordinary banding (so-called „Infiltrationskanäle") (fig. 4);
4.: the moss agate structure („Moosachat-Struktur") (fig. 3);
5.: the membrane fragment structure („Membrantrümmer-Struktur") (fig. 5).

*) Der Druck der farbigen Abbildungen in dieser Arbeit wurde durch namhafte Zuschüsse folgender Institutionen ermöglicht: Verein für Heimatkunde im Landkreis Birkenfeld, Dr. Kurt Becker-Stiftung Birkenfeld, Georg von Neumayer-Stiftung Bad Dürkheim, Kreisverwaltung Kusel, Gebr. Kuhn GmbH (Neupotz und Waldhambach).

Ihnen allen wird für die Förderung naturwissenschaftlicher Forschung hiermit bestens gedankt.

For the explanation of rhythmic structures in agates two concepts introduced by LIESEGANG, "external and internal rhythm" („äußerer und innerer Rhythmus"), are of fundamental importance. I define these concepts as follows: External rhythms („äußere Rhythmen") are inconstant or periodic changes of the conditions in the environment around the nascent agate, which are, as such, independent of the process of agate genesis, but affect the system of the nascent agate. These changes come from outside the agate. Internal rhythms („innere Rhythmen") are inconstant or periodic changes, which develop in the nascent agate during the process of agate genesis and would not exist without this process. These changes develop within the agate.

Examples of other important problems are the cause and mechanism of the SiO_2-accumulation in agates, the role of pigments during agate genesis, and more general petrological questions such as the P-T-conditions of agate genesis.

In most agate theories external rhythms are called on to explain rhythmic structures. Many theories explain the ordinary banding by successive depositions of separate SiO_2-layers, which evenly line preexisting cavities. SiO_2-deposition is supposed to result from changes in the physical or chemical conditions of silica solutions that are repeatedly added and removed from the cavity. The mechanism of the SiO_2-accumulation is based on external rhythms, which are said also to produce macroscopic agate structures. A wide variety of different processes are advocated by different authors to explain the external rhythms. However, this basic concept about agate genesis is contradicted by the morphology of agates. The individual bands of the ordinary banding do not really line the cavity within which they form evenly in all directions; on the contrary what is found are separate concentric band systems (spherulites) (fig. 13–20, 22), whose number and distance determine the morphology of the ordinary banding (fig. 21). Moreover corresponding bands of adjacent spherulites often are not connected. The simple idea of uniform cavity wall lining caused by SiO_2-deposition in the cavity and controlled by an external rhythm, is therefore untenable. A second general criticism comes from the genetic assumption on which these theories are based: the assumption that external rhythms affect the whole rock environment of the nascent agate. If the flow of solutions and SiO_2-precipitations, controlled by external rhythms, is accepted as a hypothesis for the explanation of agates, then adjacent cavities should be equally affected by these external rhythms. Adjacent amygdules should show equal infillings and adjacent agates equal sequences of bands. However, in nature we find the contrary situation: Adjacent amygdules often show different infillings and adjacent agates usually show no definite sequence of bands, and often very different structures (fig. 24–31). A "stratigraphy" of all agates in the same locality cannot be established. Thus agates are not formed by a periodic supply of substances, determined by an external rhythm. Moreover, there are a number of special problems inherent to external rhythm agate theories, that cannot be solved; e.g. the sharp angles in ordinary banding which reappear in a succession of bands in the same sharpness (fig. 1).

The most important, classical agate theory using internal rhythms was proposed by LIESEGANG who suggested that rhythmic precipitations of Fe-pigments spontaneously produce banded structures (Liesegang rings) in silica gels in rocks. The pigments are supposed to hinder or prevent subsequent crystallization of the gel so that the silica of agates also receives a banded morphology. These ideas of LIESEGANG are fully disproved by theoretical arguments as well as by microscopic investigations of the morphology of agates. There are definite morphologic differences between ordinary agate banding and Liesegang rings. The distribution of pigments in agates does not correspond to the laws of Liesegang rings. Furthermore the correlation between the distribution of pigments and the ordinary banding, as postulated by LIESEGANG, is not found in agates. Additional hypotheses, proposed by LIESEGANG to explain the macroscopic main structures, are discussed.

Theories in which agates are interpreted as special products of volcanic or postvolcanic processes are disproved. The formation of agates is not directly connected with the formation of the igneous rocks in which they are found. The idea that the critical temperature of water or aqueous solutions is an important factor during agate formation, is untenable.

Finally the melt-drop-theories of agate formation are fully disproved. Agates are not intramagmatic products.

The following fundamentals of agate genesis are elaborated: Agates are formed as cavity fillings under the P-T-conditions of sedimentation/diagenesis. They are formed not only in igneous rocks, but also in various other rocks, such as sediments (fig. 70–74). Agates originate from polydispersed colloidal systems as a result of a process in which the vapour-pressure curve of these systems is not exceeded. Internal rhythms play an important role in agate genesis, but these rhythms are different from those that form Liesegang rings. In this study, real Liesegang rings were found in an agate, but running discordantly to the ordinary banding (fig. 46, 47). This fact, as well as further considerations, show that agate zones with ordinary banding normally go through a gel-state. The structure of the infiltration channels („Infiltrationskanäle") can only be explained by deformation

processes in formerly gelatinous media (fig. 9, 62). Uruguay-structure and moss agate structure develop in silica-sols in the nascent agate: Uruguay-bands are horizontal, recrystallized deposits of silica particles, which flocculated from the sol; moss agate structures are growth products formed in alkali-bearing silica-sols. During agate genesis, substances are transported mainly by diffusion processes: open fissures or ducts to the cavities are not necessary. Silica is transported mainly in its monomeric form. During the course of agate genesis, especially during the crystallization of silica in the nascent agate, silica is constantly supplied to the agate. Agate genesis and the silicification of wood are similar processes.

The basic process that determines the structure of the ordinary banding is the development of spherulites. To perceive the internal structure of these spherulites, some agates were investigated under the scanning electron microscope (REM). The "fibers" of chalcedony, visible under the polarizing microscope, are not real fibers (crystal individuals) but consist of subparticles (fig. 91–98, 107). Chalcedony fibers are merely phenofibers („Phänofasern"). On the periphery of infiltration channels, the phenofibers frequently have a curved form (fig. 80). The ordinary agate banding can be recognized under the scanning electron microscope. Zones of smaller subparticles and smaller cavities (i.e. pores between the subparticles) alternate with zones of bigger subparticles and bigger cavities. The size of the chalcedony subparticles varies periodically, causing the banding (fig. 100–107). The pigments in agates did not play an essential role in the genesis of the ordinary banding.

Résumé

LANDMESSER, M. (1984): Das Problem der Achatgenese [Le problème de la genèse de l'agate]. – Mitt. POLLICHIA, 72: 5–137, Bad Dürkheim/Pfalz.

On discute de manière détaillée du vieux problème, jusqu'à aujourd'hui très controversé, sur la genèse de l'agate. A ce propos on a d'abord présenté et critiqué sous des points de vue unifiés les théories sur l'agate préexistantes, datant du milieu du 19ème siècle. Les bases d'une nouvelle théorie sur l'agate ont été acquises.

Le problème pétrologique de la genèse de l'agate est essentiellement un problème morphologique du fait de la pluralité des structures dans les agates. C'est un problème de la formation des structures anorganiques macroscopiques dans la pierre. Il y a 5 structures macroscopiques particulièrement importantes:

1. la structure de fines zones rubanées typiques pour les agates („gemeine Achatbänderung") (fig. 1);
2. la zone horizontale d'Uruguay ou également la structure d'Uruguay („Uruguay-Bänderung, Uruguay-Struktur") (fig. 2);
3. la structure de «canaux d'infiltration», une déformation caractéristique des fines zones communes (fig. 4);
4. la structure de l'agate moussue („Moosachat-Struktur") (fig. 3);
5. la structure des fragments de membranes („Membrantrümmer-Struktur") (fig. 5).

Les termes «rythme externe et interne», introduit dans le sujet concernant les agates par LIESEGANG, ont une importance considérable pour expliquer les structures rythmiques des agates.

Les rythmes externes sont des changements variables ou périodiques des conditions dans l'environnement de l'agate naissante. En tant que tels, ils sont indépendants du processus de formation de l'agate. Mais ils influencent le système de l'agate naissante.

Les rythmes internes sont des changements variables ou périodiques, qui se développent eux-mêmes lors du processus de la genèse de l'agate. Sans ce processus ils n'exiteraient pas.

Des problèmes importants se posent concernant la genèse de l'agate par exemple les raisons et le mécanisme de l'accumulation de SiO_2 dans l'agate, le rôle des pigments dans la formation de l'agate et des questions générales pétrologiques comme celle concernant le domaine P-T dans la genèse de l'agate.

La plupart des théories sur l'agate, anciennes et nouvelles, tentent d'expliquer les structures rythmiques des agates par des rythmes externes. On prétend souvent que les fines zones rubanées de l'agate se forment par des dépôts successifs de couches séparées de SiO_2, qui couvrent régulièrement les cavités préexistantes. Le dépôt de SiO_2 doit être dû au changement des conditions physiques et chimiques des solutions d'acide silicique et à leurs va-et-vient répétés. Le mécanisme de l'accumulation de SiO_2 s'appuie, selon ce point de vue, sur des rythmes externes, qui doivent avoir pour conséquences des structures macroscopiques de l'agate. Différents auteurs prennent les processus les plus variés pour expliquer les rythmes externes.

Mais ce concept fondamental contredit les faits réels. Les zones rubanées séparées ne couvrent pas régulièrement la cavité préexistante. On trouve même plus d'ensembles de bandes concentriques (les sphérolites) (fig. 13–20, 22). Leur nombre et leur distance déterminent la morphologie des fines zones rubanées de l'agate (fig. 21). Les fines zones correspondantes d'une sphérolite à une sphérolite voisine n'ont pas souvent de lien entre elles. On ne peut pas retenir le concept d'un recouvrement régulier de la cavité qui serait dû à un dépôt de SiO_2 régulé par des rythmes externes dans la cavité. Une deuxième critique générale est fondée sur l'hypothèse génétique fondamentale de ces théories, l'hypothèse d'un rythme externe, qui agirait sur toute la roche. Si on explique la genèse de l'agate par des mouvements des solutions et des dépôts de SiO_2 qui sont influencés par des rythmes externes, on doit trouver la même influence de ces rythmes externes dans les cavités avoisinantes. Il faudrait alors s'attendre à ce que les amandes et les agates voisines possèdent le même contenu et des fines zones identiques. Mais dans la nature, on observe le contraire: Les amandes voisines peuvent posséder différents contenus et les agates ne montrent pas de véritables régularités dans leurs zones et pas de formation unifiée (fig. 24–31). On ne peut pas faire de «stratigraphie» des agates d'un affleurement. Les agates ne se forment pas à partir d'un apport périodique de substances qui est déterminé par un rythme externe identique pour des cavités avoisinantes. En plus de cela on a une série de problèmes spéciaux, qui se présentent dans le cadre des théories séparées sur l'agate avec un rythme externe; ces problèmes sont insolubles à l'intérieur de ces théories. Dans l'hypothèse de ces théories on ne peut pas comprendre que des angles aigus se répètent dans une succession des bandes rubanées (fig. 1).

La plus importante théorie classique sur l'agate avec un rythme interne est la théorie de LIESEGANG: Des précipitations rythmiques des pigments de fer produisent indépendamment des bandes rubanées (anneaux de LIESEGANG) dans des gels de silice dans les roches. Les pigments doivent stopper voire gêner la cristallisation des gels, de telle manière que le SiO_2 des agates reçoive également une morphologie rubanée.

Ces théories de LIESEGANG sont réfutées au moyen de pensées théoriques et de recherches microscopiques sur la morphologie des agates. On trouve des différences morphologiques remarquables entre les fines zones rubanées de l'agate et les anneaux de LIESEGANG. La pigmentation des agates n'est pas conforme à la régularité des anneaux de LIESEGANG. On ne retrouve pas non plus la corrélation avancée par LIESEGANG entre la distribution de la pigmentation et les fines zones rubanées dans les agates. On discute sur le supplément des hypothèses avancées par LIESEGANG, en ce qui concerne l'explication des structures principales macroscopiques.

Quelques théories sont démenties, elles considèrent les agates comme des produits de processus volcanologiques ou postvolcanologiques. L'origine des agates n'est pas directement liée à la formation des magmatites dans lesquelles elles se trouvent souvent. Il est particulièrement impossible de penser que la température critique de l'eau, ou des solutions aquatiques doive jouer un rôle particulier dans la formation de l'agate.

Enfin, les théories des gouttes en fusion sont également formellement réfutées. Les agates ne sont pas des formations intramagmatiques.

On a élaboré les éléments suivants de la genèse de l'agate: Les agates, en tant que contenu des cavités rocheuses, trouvent leur origine dans le domaine P-T sédimentaire et diagénétique. Elles peuvent se former, non seulement dans les magmatites, mais également dans différentes roches, par exemple des sédiments (fig. 70–74). Les agates sont formées de systèmes colloïdaux polydispersés, où la courbe de pression de vapeur de ces systèmes n'est pas dépassée. Lors de la formation, des rythmes internes jouent un rôle déterminant; mais cela n'a pas de rapport avec la rythmique interne des anneaux de LIESEGANG. Dans une agate, on a trouvé pour la première fois de véritables anneaux de LIESEGANG qui traversent de manière discordante les fines zones rubanées (fig. 46, 47). Ce fait, ainsi que des réflexions plus approfondies, montrent que les zones des agates avec des fines zones rubanées doivent être normalement passées par un stade colloïdal. On ne peut comprendre la structure des «canaux d'infiltration» que par des processus de déformation dans des anciennes substances gélatineuses (fig. 9, 62). La structure d'Uruguay et celle de l'agate moussue se développent dans des sols de SiO_2 dans l'agate naissante. Les bandes d'Uruguay sont des dépôts horizontaux recristallisés qui proviennent d'une solution colloïdale. Les structures de l'agate moussue se sont formées dans des solutions colloïdales contenant des silicates alcalins. Les processus de transport de la matière présents dans la genèse de l'agate sont des processus de diffusion. Il n'est pas nécessaire d'avoir des ouvertures dans les cavités. L'acide silicique est essentiellement transporté sous sa forme monomère. Du SiO_2 est constamment apporté dans l'agate, pendant sa formation, et ceci plus particulièrement lors de la cristallisation du SiO_2. La formation des agates et la silification du bois sont des processus apparentés.

La formation des sphérolites est le processus décisif pour la genèse des fines zones rubanées. Afin d'expliquer la structure de ces sphérolites, on a examiné des agates avec un microscope électronique à balayage (REM). On remarque que les fibres visibles (à l'aide d'un microscope polarisant) ne

sont pas de véritables fibres mais se composent de sous-particules (fig. 91–98, 107). Ce sont des phénofibres („Phänofasern"). Sur les bords des «canaux d'infiltration», de tels phénofibres apparaissent souvent sous des formes arquées (fig. 80). Avec un microscope électronique à balayage on peut également reconnaître avec précision les fines zones rubanées de l'agate. On rencontre des zones qui sont formées soit de petites sous-particules et cavités (ce sont des pores entre les sous-particules), soit de grandes. La grosseur des sous-particules de la calcédoine change périodiquement. C'est la raison pour laquelle se forment les fines zones rubanées (fig. 100–107). Les pigments de l'agate ne jouent pas un rôle décisif pendant la formation des fines zones rubanées.

Inhaltsverzeichnis

I. Einleitung 10

II. Aspekte des Achatproblems 10

III. Achattheorien 19
III.1. Ältere Achattheorien mit äußerem Rhythmus 19
III.1.1. Theorien von HAIDINGER, NOEGGERATH und KENNGOTT 20
III.1.2. Die Geysir-Theorie 21
III.1.3. Theorie von HEDDLE und GOODCHILD 23
III.1.4. Theorie von BROCKMEIER 23
III.1.5. Diskussion 24
III.2. Die LIESEGANG'sche Theorie 38
III.2.1. Die gemeine Achatbänderung 38
III.2.2. SiO_2-Akkumulation und „Infiltrationskanäle" 43
III.2.3. Die Moosachat-Struktur 45
III.2.4. Die Membrantrümmer-Struktur 47
III.2.5. Die Uruguay-Struktur 47
III.2.6. Zur Aufnahme der LIESEGANG'schen Achattheorie 48
III.2.7. Diskussion 48
III.3. Theorien der vulkanisch/postvulkanischen Achatbildung 64
III.3.1. Theorie von REIS und FISCHER 64
III.3.2. Die erste NACKEN'sche Theorie 67
III.3.3. Weiterentwicklungen des Ansatzes von NACKEN 68
III.3.4. Diskussion 70
III.4. Die Schmelztropfentheorien der Achate 79
III.4.1. Die Theorie von NACKEN und SCHLOSSMACHER 81
III.4.2. Diskussion 83
III.5. Sonstige Achattheorien 89
III.5.1. Der Ansatz von SUNAGAWA & OHTA 89
III.5.2. Diskussion 89
III.5.3. Theorie von HEINZ und LINCK 91
III.5.4. Diskussion 92
III.5.5. Die Ansätze von SIM, SHAUB, HEROLD und WEISS & WEISS 92

IV. Grundzüge einer neuen Theorie der Achatgenese 94
IV.1. Der petrologische Bereich der Achatgenese 94
IV.2. Äußere und innere Rhythmen 99
IV.3. Gemeine Bänderung, Uruguay-Struktur und „Infiltrationskanäle" 99
IV.4. Moosachat-Struktur und Membrantrümmer-Struktur 104
IV.5. Ergebnis 106

V. Anhang: Zur elektronenmikroskopischen Morphologie der Achate 114

VI. Danksagung . . 127

VII. Literaturverzeichnis . . . 127

I. Einleitung

Das Problem der Achatgenese wird seit mehr als 200 Jahren bis in die jüngste Zeit sehr kontrovers diskutiert. Hierbei ist man sich bis heute nicht einmal im Groben über die Bildungsbedingungen der Achate einig; Theorien der Achatbildung im magmatischen, postmagmatischen und sedimentären Bereich stehen sich unvermittelt gegenüber. Zugleich fehlt in der Literatur eine Gesamtdarstellung der Achatfrage, in der die verschiedenen Theorien, Einwände und relevanten Naturbeobachtungen geschlossen formuliert sind. Diese Gesamtdarstellung zu geben ist das erste Ziel der vorliegenden Arbeit. Hierbei wurde die Literatur von der Mitte des 19. Jahrhunderts an berücksichtigt; ältere Arbeiten spielen in der gegenwärtigen Diskussion keine wesentliche Rolle.

Darüber hinaus werden die Achat-Theorien einer theoretischen Diskussion und Kritik unterworfen, die durch makroskopische, mikroskopische und elektronenmikroskopische Untersuchungen zur Morphologie der Achate unterstützt wird. Das zweite Ziel der Arbeit ist damit, die möglichen Bedingungen der Achatbildung einzugrenzen; es werden so erste Grundzüge einer „neuen" Achattheorie vorgelegt.

II. Aspekte des Achatproblems

„Achate" lassen sich definieren als „gebänderte Chalcedonaggregate". In dieser knappen Formulierung sind die beiden Grundprobleme der Achatgenese bereits angedeutet, die Erklärung der Bänderung und die der SiO_2-Anreicherung im Achat. Hiermit ist das petrologische Problem der Achatentstehung im wesentlichen auch ein morphologisches Problem, ein Problem der Bildung makroskopischer anorganischer Strukturen im Gestein. Neben der genannten Grundstruktur, der „gemeinen Bänderung", können zusätzliche Strukturelemente auftreten, die für die Frage der Achatbildung von großer Bedeutung sind.

Die im folgenden relevanten „makroskopischen Hauptstrukturen" der Achate sind:

- Die „gemeine Achatbänderung" (vgl. Abb. 1).
- Die „Uruguay-Bänderung" („Uruguay-Struktur"). Sie besteht aus horizontalen SiO_2-Lagen, die in der Regel diskordant zur gemeinen Achatbänderung verlaufen (vgl. Abb. 2).
- Die Struktur der sogenannten „Infiltrationskanäle" (vgl. Abb. 4) stellt eine charakteristische Störung im Verlauf der gemeinen Achatbänderung dar. Da eine angemessene Bezeichnung, die noch keine Interpretation dieser makroskopischen Struktur einschließt, in der Literatur nicht auftritt, wird im folgenden die alte Bezeichnung „Infiltrationskanäle" mit Anführungsstrichen verwendet.
- Die „Moosachat-Struktur": Faden- bis röhrenförmige Strukturen durchziehen den Achat (vgl. Abb. 3).
- Die „Membrantrümmer-Struktur": Gebogene Bruchstücke einer Mineralhaut sind im Achat eingeschlossen (vgl. Abb. 5).

Wie berechtigt es ist, diese Hauptstrukturen gemeinsam einer genetischen Diskussion zu unterwerfen, zeigt sich an Stücken, in denen sie unmittelbar nebeneinander vorkommen (Abb. 5, 6, 7, 8, 9, 10).

Tabelle 1: Fundpunkte

Nr.	Fundort	Rechts- und Hochwerte	Anmerkungen
1	Steinbruch Kuhn ESE von Waldhambach (Rheinland-Pfalz)	R: ^{34}27300 H: ^{54}47750	Achate in „Grenzlager"-Vulkaniten
2	Sportplatz „Im Haag" Idar-Oberstein	R: ^{25}93160 H: ^{55}11700	Achate in „Grenzlager"-Vulkaniten
3	Felder NW von Nack (Rheinland-Pfalz)	R: ^{34}27700 H: ^{55}13100 und Umgebung	Achat-Lesesteine, „Grenzlager"-Vulkaniten (Lavaserie I nach HÄFNER 1978) entstammend.
4	Schurf ESE des Welchrötherhofs bei Otzweiler (Rheinland-Pfalz)	R: ^{33}94430 H: ^{55}09300	Achate in „Grenzlager"-Vulkaniten (Decke II nach ABBASSIAN 1979).
5	Felder bei „Wäschertskaulen" Idar-Oberstein	R: ^{25}93200 H: ^{55}12300 und Umgebung	Achat-Lesesteine, „Grenzlager"-Vulkaniten entstammend.
6	Elme, N von Mitteltal (Schwarzwald)	R: ^{34}50400 H: ^{53}78280	Achate in Carneolen (Lesesteine) des Buntsandstein (Violett-Horizont 2 nach ORTLAM) (OBENAUER 1979: 113; vgl. ORTLAM 1966; vgl. EISSELE 1966).
7	Felder W von Limbach (Saarland)	R: ^{25}91750 H: ^{54}64450 und Umgebung	Achate in Carneolen (Lesesteine) des Buntsandstein (vgl. OBENAUER 1979: 115 ff.).

Achate, deren Fundpunkte nicht bekannt sind, sind mit „o. F." (ohne Fundpunktangabe) bezeichnet.

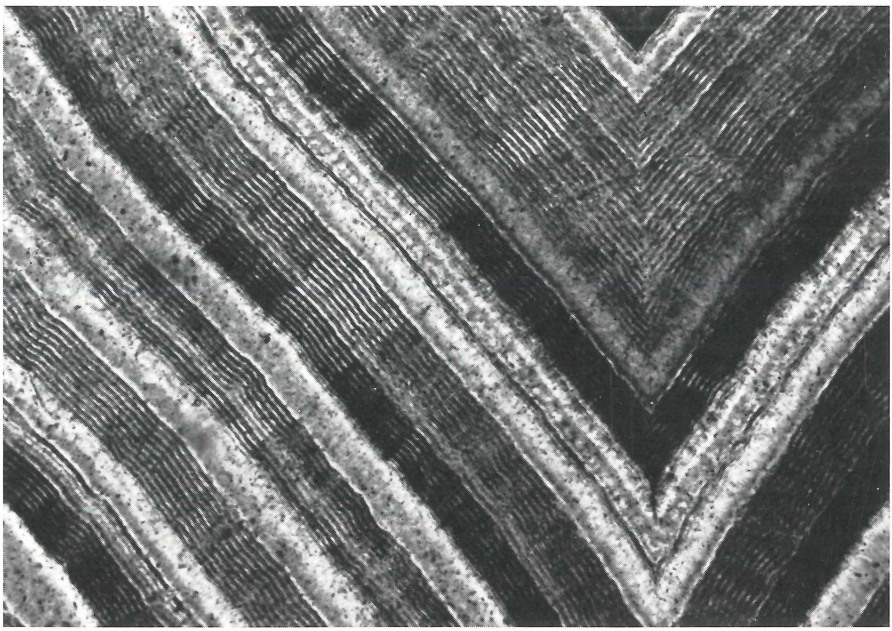


Abb. 1: Gemeine Achatbänderung im Dünnschliff (o. F.). Größe des Bildausschnitts: ca. 0,78 x 0,54 mm.

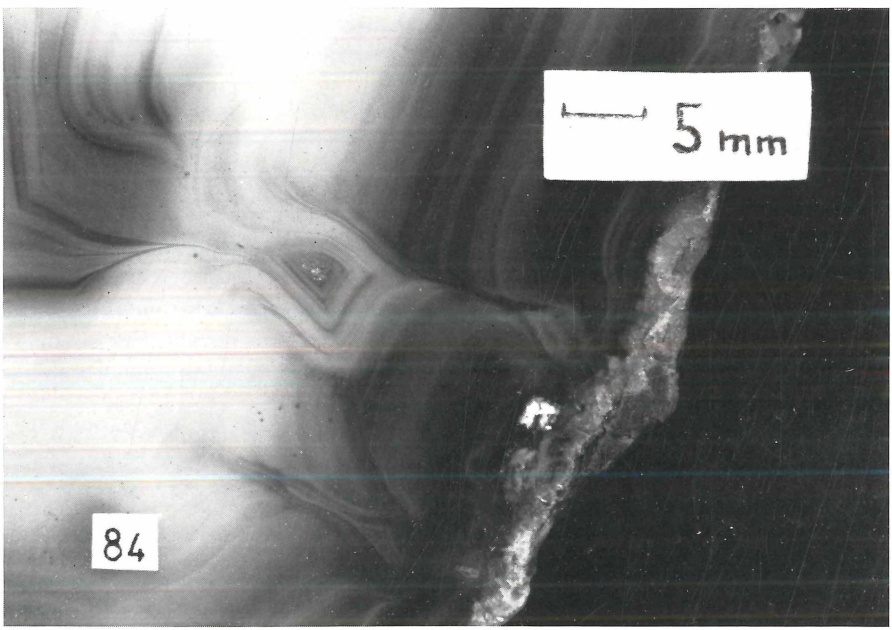


Abb. 4: Achat mit „Infiltrationskanälen" (o. F.).

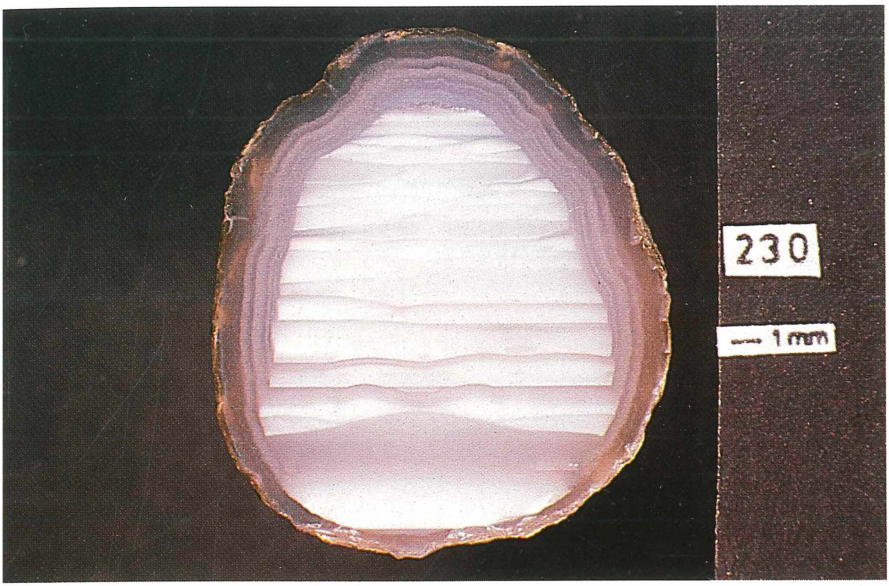


Abb. 2: Achat mit Uruguay-Struktur (o. F.).

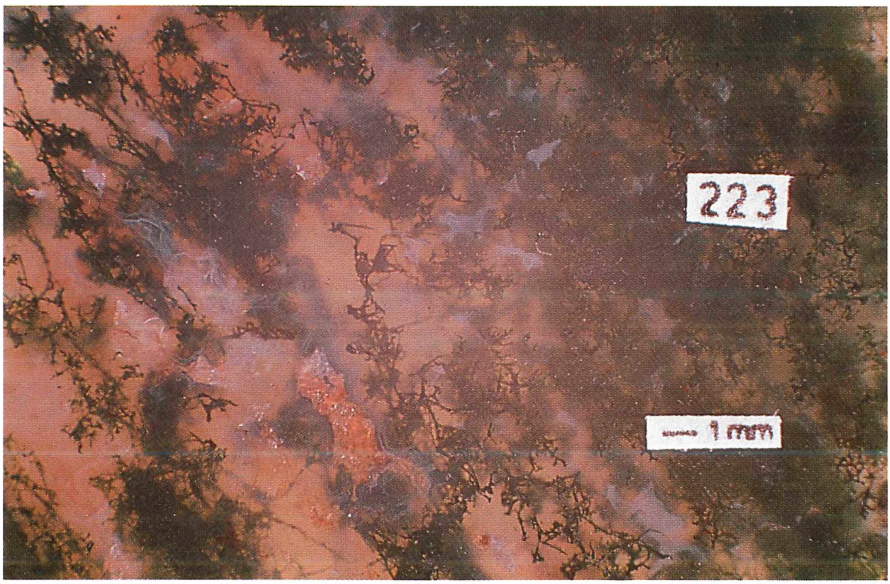


Abb. 3: Moosachat-Struktur (o. F.).

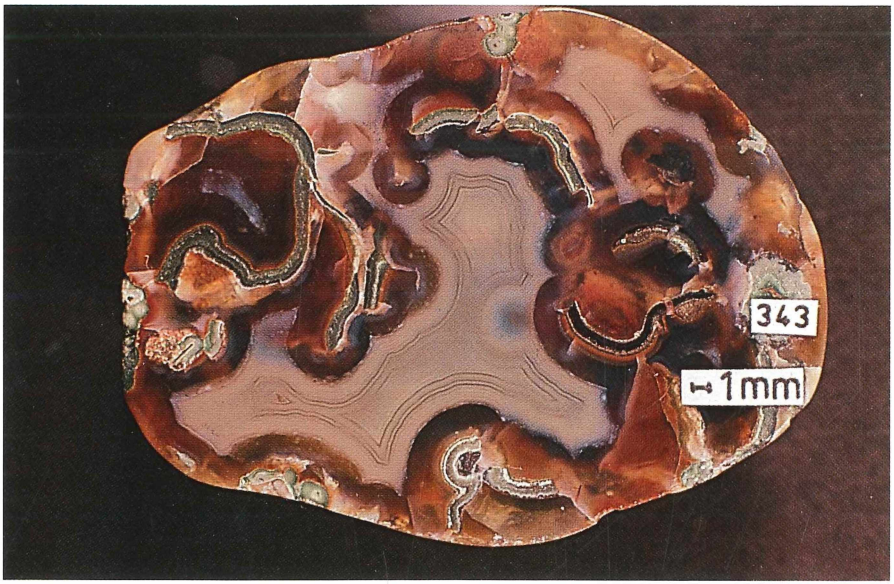


Abb. 5: Achat mit Membrantrümmer-Struktur und gemeiner Bänderung (o. F.).

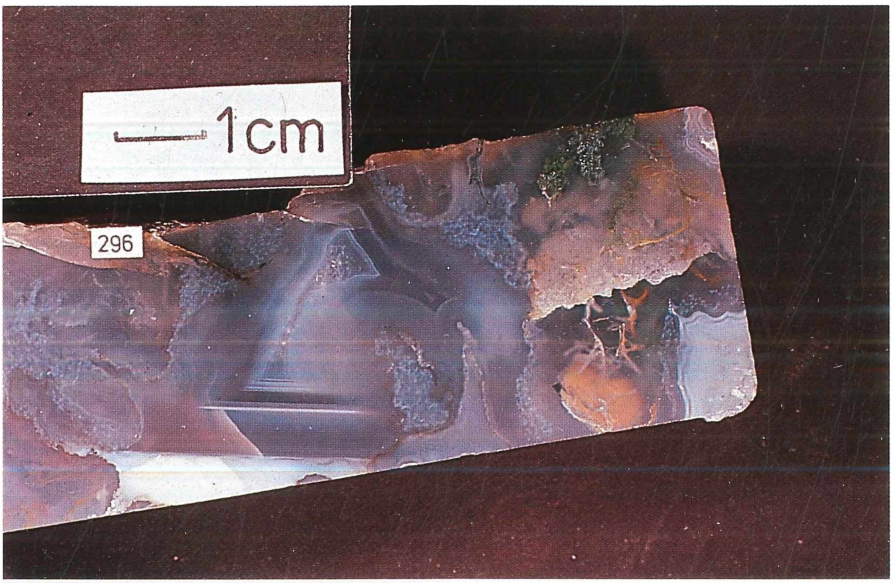


Abb. 6: Achat mit Moosachat-Struktur, Uruguay-Struktur und gemeiner Bänderung in unmittelbarer Nachbarschaft (o. F.).

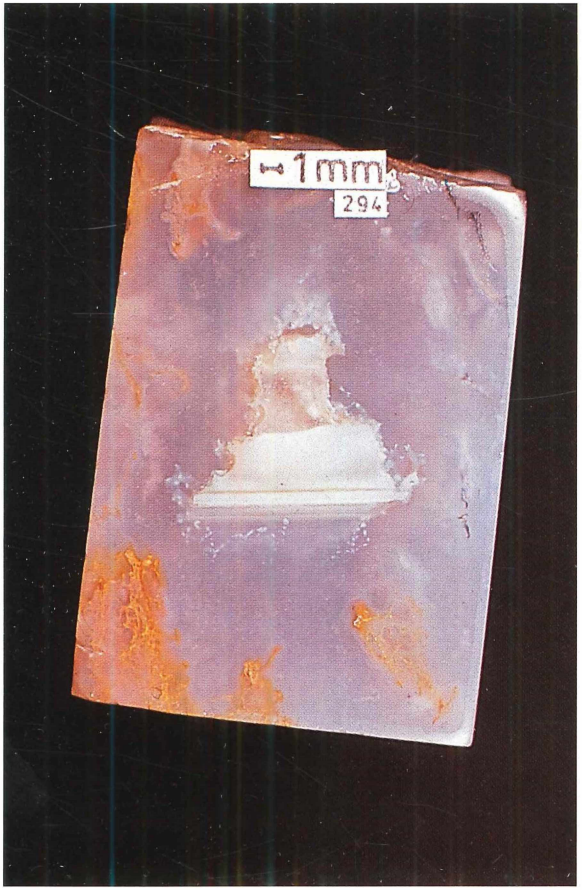


Abb. 7: Achat wie in Abb. 6. Innerhalb des Moosachats taucht die Uruguay-Struktur scheinbar unvermittelt auf.

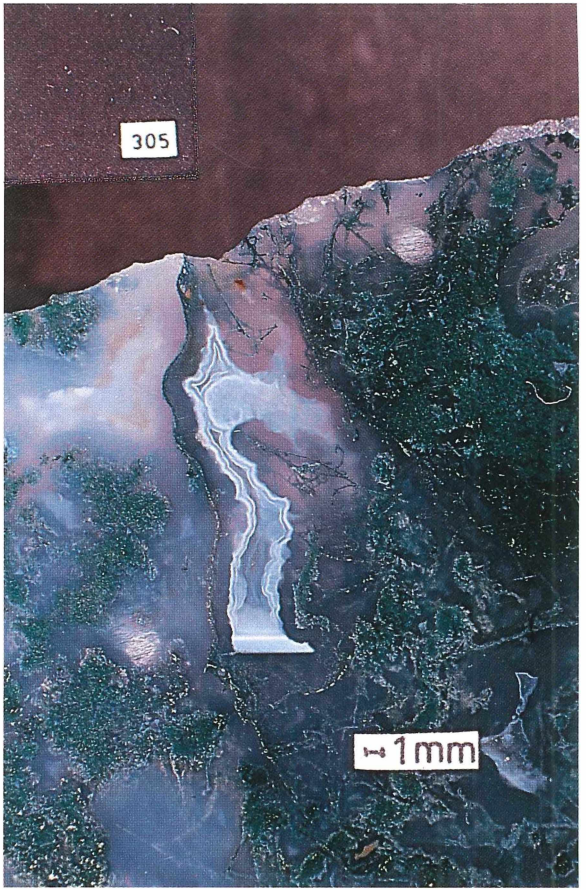


Abb. 8: Uruguay-Struktur in Moosachat (o. F.).

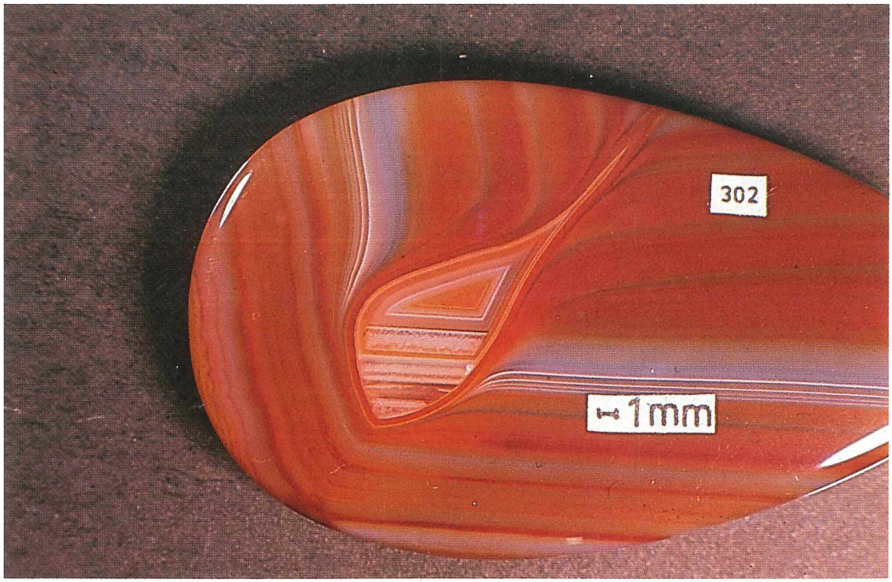


Abb. 9: Achat mit gemeiner Bänderung, „Infiltrationskanal" und Uruguay-Struktur in unmittelbarer Nachbarschaft (o. F.).

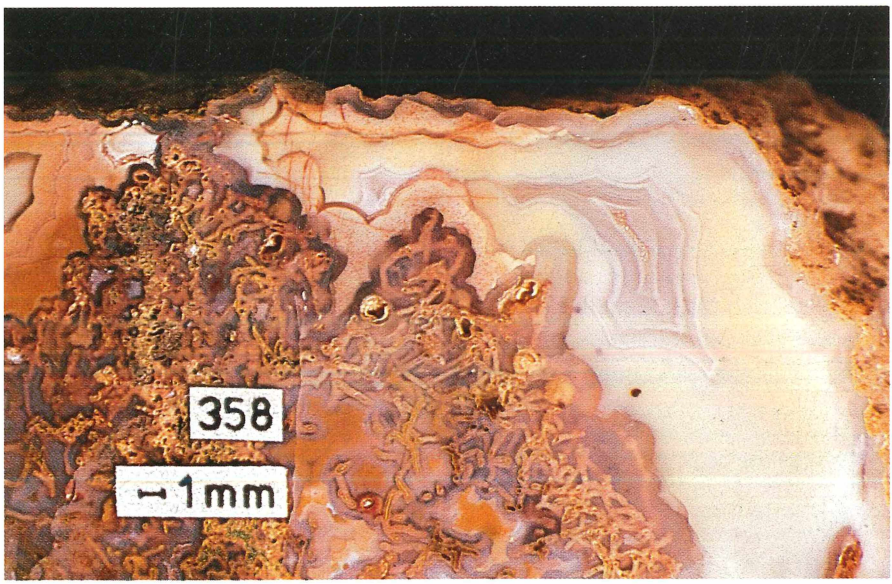


Abb. 10: Achat mit gemeiner Bänderung und Moosachat-Struktur in unmittelbarer Nachbarschaft (o. F.).

Für die gemeine Achatbänderung drängte sich vielen Wissenschaftlern im 19. Jahrhundert zunächst als unmittelbar naheliegende Erklärung ein in irgendeiner Weise wechselhafter SiO_2-Absatz in Hohlräumen auf; die Rhythmik der gemeinen Achatbänderung hatte damit ihren Grund in einem von außen vorgegebenen Wechsel der Bildungsbedingungen. Die spezielle Vorstellung des schubweisen SiO_2-Absatzes rief zwar schon sehr bald Kritik hervor (LEONHARD 1823: 16 f.; MOHS 1842: 18 f.), eine andere Ursache der gemeinen Achatbänderung als ein wechselhafter oder periodischer Prozeß in der Umgebung des Achats schien jedoch kaum denkbar. Dies änderte sich, als gegen Ende des 19. Jahrhunderts R. E. LIESEGANG entdeckte, daß bei Diffusionsprozessen in Gallerten durch periodische Ausfällung gebänderte Strukturen ohne irgendeinen Wechsel der äußeren Bedingungen entstehen können. Indem LIESEGANG diesen Prozeß der Bildung sogenannter „LIESEGANG'scher Ringe" (Abb. 11) bei der Erklärung der Achatstrukturen verwendete, führte er zugleich das für die Achat-Forschung grundlegend wichtige Begriffspaar „äußerer und innerer Rhythmus" (LIESEGANG 1911a: 507) in die Diskussion ein. Äußere Rhythmen sind wechselhafte oder periodische Änderungen der Bedingungen in der Umgebung des entstehenden Achats, die als solche vom Prozeß der Achatbildung

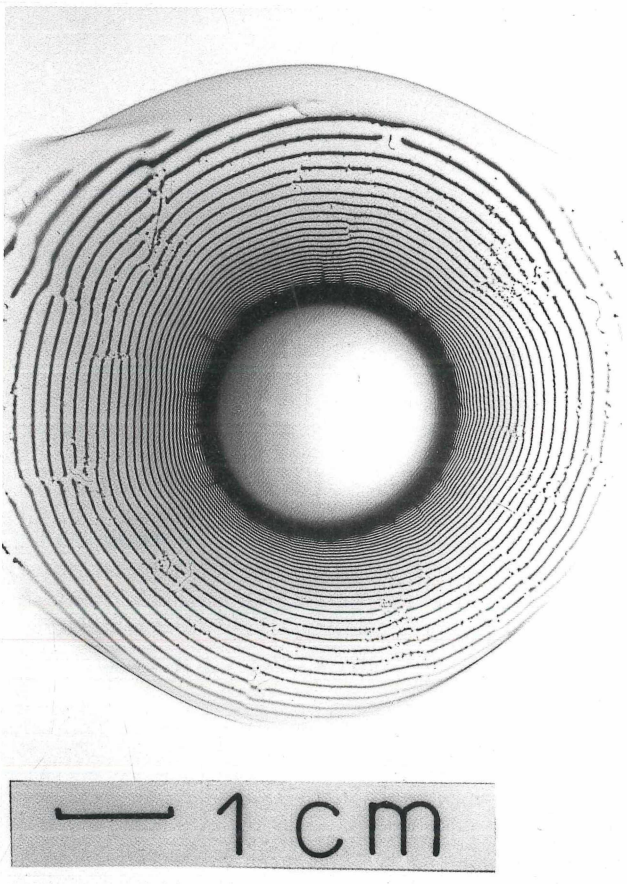


Abb. 11: LIESEGANG'sche Ringe, hervorgerufen durch rhythmische Ausfällung von Silberchromat bei der Diffusion von Silbernitrat in eine kaliumbichromathaltige Gelatinegallertschicht.

unabhängig sind, das System des sich bildenden Achats aber erfassen; es sind Änderungen, die dieses System von außen erfährt. Innere Rhythmen sind wechselhafte oder periodische Veränderungen, die im sich bildenden Achat beim Prozeß der Achatgenese selbst entstehen und ohne diesen Prozeß nicht vorhanden wären; es sind damit Änderungen, die das System „von innen" erfährt. Entsprechend läßt sich dieses Begriffspaar für beliebige andere Systeme definieren.

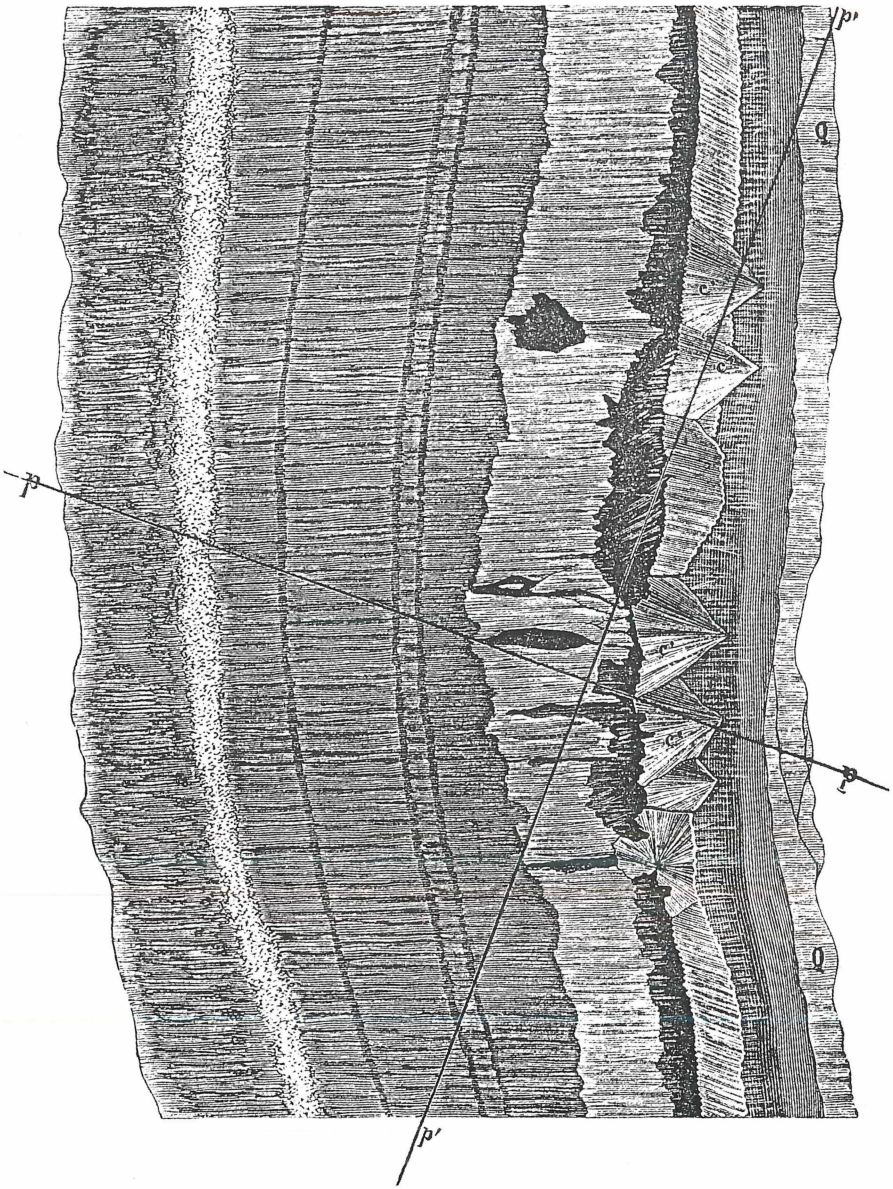


Abb. 12: Umgewandeltes Glas mit achatähnlicher Struktur; + N. Aus: DAUBRÉE (1880: 132).

Die mögliche Bedeutung innerer Rhythmen bei der Entstehung der Achatbänderung wurde noch unterstrichen durch DAUBRÉEs Versuche bei der Umwandlung von Glas durch überhitztes Wasser (T ≈ 400° C und mehr; P in der Größenordnung von 1000 at) (DAUBRÉE 1880: 121). Glasröhren bildeten sich z. T. zu konzentrischen Schalen um, wobei bis zu zehn Schichten pro Millimeter entstanden (DAUBRÉE 1880: 123). Da bei solchen Versuchen zudem Chalcedon als Reaktionsprodukt nachweisbar war (DAUBRÉE 1880: 130), mußte die Analogie zum Bau der Achate DAUBRÉE sofort auffallen (DAUBRÉE 1880: 123, 126). Weil dieser aber dennoch seine Beobachtung nicht auf die Achatfrage anwandte (DAUBRÉE 1880: 158–163), ging sie zunächst nicht in die Achat-Diskussion ein. Erst LIESEGANG betont die Wichtigkeit der DAUBRÉE'schen Entdeckung für die Achattheorie: Indem er eine enge physikalische Verwandtschaft zwischen seinen Diffusionsstrukturen in Gelen und DAUBRÉEs gebänderten Umwandlungsprodukten des Glases vermutet, faßt er letztere als Produkte eines Prozesses mit innerer Rhythmik auf, die für das Verständnis der Achate von Bedeutung sein könnten (LIESEGANG 1915b: 114 f.).

Mit der Möglichkeit der Strukturbildung durch rhythmische Fällungen in Gallerten wird auch die Pigmentverteilung im Achat und ihr Verhältnis zur Achatbänderung zu einem weiteren wichtigen Aspekt des Achatproblems.

Schließlich ist das eigenartige faserige Wachstumsverhalten des Chalcedons im engeren Sinne (length-fast chalcedony; Chalcedon mit negativem Charakter in der Faserrichtung) problematisch.

Im folgenden werden nun Achattheorien insbesondere im Hinblick auf die vorgestellten Aspekte des Achatproblems, d. h. die Ursache von SiO_2-Akkumulation und makroskopischen Hauptstrukturen, die Erklärung durch äußere oder innere Rhythmen und die Beurteilung der Pigmentverteilung im Achat, dargestellt und diskutiert. Weitere Fragestellungen ergeben sich aus der jeweiligen Theorie. Das spezielle und wichtige Problem des ungewöhnlichen Aufbaus von Chalcedon kann vorläufig weitgehend aus der Betrachtung ausgeklammert werden, weil es zunächst in allen Achattheorien gleichermaßen als Spezialproblem auftaucht und so zusätzlicher Erklärung bedarf.

III. Achattheorien

III.1. Ältere Achattheorien mit äußerem Rhythmus

In der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts war die Entstehung der Achate, auch im Rahmen der Erklärung der Mandelsteine bei der Plutonismus-Neptunismus-Kontroverse dieser Zeit, bereits ein vieldiskutiertes Problem. In der Mitte des 19. Jahrhunderts wurde dieses Problem erneut aufgegriffen und es entwickelte sich von hier an die bis in die Gegenwart andauernde „moderne" Achatdiskussion. Anlaß zu dieser Entwicklung wurde eine Arbeit von Wilhelm HAIDINGER „Über die Metamorphose der Gebirgsarten" von 1848. Im Rahmen seiner Theorie der „Gebirgsfeuchtigkeit" entwickelt HAIDINGER die Vorstellung, Wasser bewege sich in den Poren und Hohlräumen der Vulkanite durch einen Mechanismus, der der Wasserbewegung durch Papierfilter ähnlich ist und so „Infiltration" (auch „Durchschwitzen") genannt wird; sämtliche Poren und Hohlräume im Gestein sind mit wäßrigen Lösungen erfüllt (HAIDINGER 1848: 112, 113). Da sich einige Komponenten, speziell aber die Kieselsäure, in den Vulkaniten durch den Schmelzprozeß in einem „aufgeschlossenen" Zustand befinden, lösen sie sich, unterstützt vom Auflastdruck des Gesteins, in der „Gebirgsfeuchtigkeit" auf und setzen sich an den Wänden der Hohlräume wieder ab. Der Stofftransport erfolgt hierbei durch „Infiltration", so daß die Annahme einer Öffnung in den Blasenräumen (sog. „Infiltrationspunct") überflüssig und damit unwesentlich erscheint. Änderungen in der Zusammensetzung der Gebirgsfeuchtigkeit bedingen so sukzessiv unterschiedliche Absätze in den Blasenräumen (HAIDINGER 1848: 112, 113).

Diese HAIDINGER'sche Skizze einer Achattheorie veranlaßte J. NOEGGERATH zu ausführlichen Stellungnahmen, die von HAIDINGER verarbeitet und durch KENNGOTT ergänzt wurden. Da die so entwickelten Theorien dieser drei Forscher in ihren Grundzügen sehr ähnlich sind, werden sie im folgenden geschlossen vorgestellt.

III.1.1. Theorien von HAIDINGER, NOEGGERATH und KENNGOTT

HAIDINGER, NOEGGERATH und KENNGOTT sind sich über den petrologischen Bereich der Achatgenese einig: Eruptivmassen mit Gasblasen kühlen ab und zerklüften sich hierbei. Achate entstehen danach in den Gasblasen und Klüften der weitgehend abgekühlten Magmatite durch sukzessiven SiO_2-Absatz aus CO_2-haltigen warmen Lösungen, Nachwirkungen der vulkanischen Tätigkeit. Die Achatgenese ist an diese Lösungen gebunden und mit dem Ende ihrer Produktion abgeschlossen (HAIDINGER 1850: 63, 64, 65; NOEGGERATH 1849: 244, 250, 253; NOEGGERATH 1850a: 94, 98, 100; KENNGOTT 1851: 72, 83, 91, 101). Über die Herkunft des SiO_2 gehen die Meinungen der drei Wissenschaftler dann etwas auseinander. HAIDINGER (1848: 112; 1850: 64) vertritt die Ansicht, das SiO_2 der Achate werde aus den umgebenden Magmatiten selbst herausgelöst, während NOEGGERATH hier sehr unbestimmt bleibt; KENNGOTT vermutet dagegen, daß die Kieselsäure nicht aus den Magmatiten selbst, sondern aus den umgebenden Gesteinen stammt, die durch den Kontakt mit der frischen Eruptivmasse „für Zersetzungen empfänglich gemacht" sind (KENNGOTT 1851: 85). Über den Mechanismus der Lösungszufuhr sind sich HAIDINGER und NOEGGERATH zwar zunächst uneinig (HAIDINGER 1848; NOEGGERATH 1849), verständigen sich dann aber in etwa auf folgende Vorstellung: Der erste Chalcedon-Absatz in einem Blasenraum, der von einer kieselsäurehaltigen Lösung erreicht wird, kann durch Infiltration von allen Seiten her gleichmäßig erfolgen, ohne daß die Blase eine Öffnung aufweist (HAIDINGER 1850: 64; NOEGGERATH 1849: 253, 254; NOEGGERATH 1850a: 100, 101). Wegen der Undurchdringlichkeit mancher Achatlagen für wäßrige Lösungen ist der Absatz weiterer Schichten dann von der Existenz von Öffnungen im ersten Absatz abhängig. NOEGGERATH interpretiert die in Abb. 4 dargestellte Hauptstruktur daher als wirklichen Infiltrationskanal, der schließlich selbst mit Chalcedon erfüllt wurde. HAIDINGER schließt sich schließlich dieser Auffassung an und gibt sogar eine Erklärung für das Entstehen solcher Kanäle (HAIDINGER 1850: 63, 64): Sie bilden sich an Stellen des ersten Chalcedon-Absatzes, die nicht völlig mit Kieselsäure abgedichtet wurden.

Grundlage dieser Auffassung ist die Beobachtung der Undurchdringlichkeit mancher Achatschichten für wäßrige Lösungen, die man beim Färben der Achate macht (NOEGGERATH 1849: 254; NOEGGERATH 1850a: 101; NOEGGERATH 1850b: 150). Da HAIDINGER und NOEGGERATH dem Verhalten der Achate beim Prozeß der künstlichen Färbung so große Bedeutung für die Frage des Füllungsmechanismus der Achatmandeln zumessen, läßt sich schließen, daß beide der Auffassung sind, der Chalcedon setze sich unmittelbar in der dichten Form ab, in der er heute vorliegt. Diese Ansicht wird dagegen von KENNGOTT (1851: 91, 92) bestritten: Der SiO_2-Absatz ist zunächst weich und erhärtet erst langsam unter Kontraktion; der noch nicht verfestigte Absatz bleibt für nachdrängende Lösungen noch durchlässig, so daß eine sukzessive Füllung der Blasen auch ohne Infiltrationskanäle möglich ist. Der Schluß von der Unfärbbarkeit von Achatlagen auf deren Undurchdringlichkeit für Lösungen zur Zeit der Achatbildung ist voreilig. Obgleich also Infiltrationskanäle nach KENNGOTT zur Achatbildung nicht unbedingt notwendig sind, folgt dieser der Interpretation von HAIDINGER und NOEGGERATH, daß Strukturen wie die in Abb. 4 wirkliche Infiltrationskanäle darstellen (KENNGOTT 1851: 91, 92).

Die Theorie von HAIDINGER, NOEGGERATH und KENNGOTT verlangt, daß die Lösungen nach Absatz des SiO_2 die Hohlräume wieder verlassen und zwar durch die gleichen Öffnungen, durch die sie eingedrungen waren (NOEGGERATH 1850b: 154). Daß diese Lösungen eine Temperatur von höchstens 100° C haben konnten, wodurch der Temperaturbereich der Achatbildung abgegrenzt ist, ergibt sich bei HAIDINGER und NOEGGERATH implizit und wird von KENNGOTT (1851: 82) direkt angegeben. Zusammenfassend läßt sich feststellen: Für HAIDINGER, NOEGGERATH und KENNGOTT erklärt sich die SiO_2-Anreicherung und die Bildung makroskopischer Achatstrukturen durch den äußeren Rhythmus, den warme Lösungen den Hohlräumen im Gestein aufprägen; die SiO_2-Anreicherung ist unmittelbar mit der Bildung makroskopischer Strukturen verbunden. Die gemeine Achatbänderung beruht auf Schwankungen in den Eigenschaften der zugeführten Lösungen (Zusammensetzung, Temperatur u. a.) sowie der zeitweisen Unterbrechung der Lösungszufuhr (KENNGOTT 1851: 85). Daß die gemeine Bänderung die Blasenwände auskleidet, wird der „Adhäsions- und Krystallisationskraft" zugeschrieben, während die Bildung der Schichten vom Uruguay-Typ durch eine Schicht-Verbreiterung aufgrund der Schwerkraft erklärt wird (NOEGGERATH 1849: 257; NOEGGERATH 1850a: 103). Die Struktur der sogenannten „Infiltrationskanäle" wird als wirkliches Relikt ehemaliger Infiltrationsöffnungen gedeutet und die Moosachat-Strukturen als Stalaktit-Bildungen [1] aus Chalcedon interpretiert (NOEGGERATH 1850b: 150, 151; NOEGGERATH 1858: VII). Die Membrantrümmer-Struktur tritt erst bei LIESEGANG in der Achat-Diskussion auf. Die Pigmente im Achat schließlich sind Zeugen der variierenden Zusammensetzung der zugeführten Lösungen.

III.1.2. Die Geysir-Theorie

Die Theorie von HAIDINGER, NOEGGERATH und KENNGOTT nimmt äußere Rhythmen bei der Zufuhr von Lösungen als wesentliche Voraussetzung der Achatbildung an; die Art und Ursache dieser Rhythmen aber wird nicht näher verfolgt, sondern in eher unbestimmter Weise als gegeben vorausgesetzt. Will man hier einen Schritt weiter gehen, so liegt es nahe, an die rhythmische Lösungsbewegung zu denken, welche in intermittierenden Thermen (Geysiren) auftritt. Diesen Weg beschritten REUSCH, LANGE, BAUER und ERDMANN im 19. Jahrhundert. Ihre Theorien werden im folgenden wiederum geschlossen dargestellt.

Nimmt man intermittierende Thermen für die Lösungszufuhr an, so ist das Konzept der „Infiltration" durch eine Zufuhr durch Spalten und Klüfte zu ersetzen, die die Blasenräume verbinden (REUSCH 1864: 109). REUSCH (1864: 103) geht in seiner Achattheorie davon aus, daß die Schichten der Achate (gemeint ist hier die gemeine Bänderung) ein System von äquidistanten, den Hohlraumformen folgenden Flächen bilden. Dieses „Äquidistantengesetz" nennt REUSCH (1864: 108) „das oberste Gesetz der Agatbildung", wobei ihm LANGE (1868: 13, 17) folgt. Zur Erklärung der Achatbildung zieht REUSCH nun zum Vergleich den technischen Prozeß des ‚Stürzens' heran. Man versteht hierunter das Eingießen einer Flüssigkeit o. ä. (z. B. geschmolzenes Wachs, Zinn oder auch dünnen

[1] An dieser Stelle wird eine Analogie von Achat- und Tropfsteinbildung deutlich. In verschärfter Form findet sich diese Auffassung später bei GÜMBEL (1880: 253, 254): Achate bilden sich in Hohlräumen, wenn diesen durch Kapillaren SiO_2-Lösung von außen zugeführt wird; durch Verdunstung des Wassers im Hohlraum setzt sich die Kieselsäure krustenartig an der Blasenwand ab.

Auf diese Extremposition gehe ich nicht näher ein, weil hier die kapillare Lösungszufuhr mit der Forderung nach ständiger Wasserverdunstung im allseitig geschlossenen Hohlraum in offensichtlichem Widerspruch steht.

Gipsbrei) in einen Hohlraum, die dann wieder abgegossen wird, wobei eine Schicht der Substanz an den Innenwänden haften bleibt. Wiederholt man diesen Prozeß und läßt die Schichten jeweils erhärten, so entsteht eine achatähnliche Füllung (REUSCH 1864: 104). In Analogie zum Prozeß des Stürzens entstehen die Achate nach REUSCH, BAUER, und ERDMANN (nicht aber nach LANGE; s. u.) durch periodische Füllung von Gasblasen mit Kieselsäurelösung und jeweils folgende Entleerung (REUSCH 1864: 108; ERDMANN 1899: 476; BAUER 1896: 582). Intermittierende Thermen lösen SiO_2 aus den Silikaten der Magmatite heraus (REUSCH 1864: 109; ERDMANN 1899: 476; BAUER 1896: 582). Die Lösungen füllen die Hohlräume, wenn sie, durch nachdrängenden Dampf getrieben, nach oben gedrängt werden; erreicht der Dampf selbst die Blasenräume, so entleeren sie sich wieder. Nach Entweichen des Dampfes an der Erdoberfläche durchfließt die Lösung in entgegengesetzter Richtung erneut die Hohlräume, was zu einer zweiten Füllung und Entleerung führt (REUSCH 1864: 109). (ERDMANN (1899: 476) rechnet nur mit einer Füllung und Entleerung pro Lösungsaufstieg; es ergibt sich hieraus aber für das Prinzip der Achatbildung keine Differenz.) Bei jedem Füllungsprozeß bildet sich aus der am Blasenrand haftenden Lösung eine feine Achatschicht (ERDMANN 1899: 476; REUSCH 1864; BAUER 1896: 582). Im Gegensatz zu REUSCH, BAUER und ERDMANN, die die Bildung der gemeinen Achatbänderung dadurch erklären, daß bei jeder Füllung etwas SiO_2-Lösung an den Blasenwänden haften bleibt, vermutet LANGE hier einen komplizierteren Mechanismus: Fließt die Kieselsäurelösung nach einem Ausbruch der Therme wieder ins Gestein zurück und erfüllt dort die Hohlräume, so fällt SiO_2 als Gallerte am Blasenboden aus. Der überhitzte Wasserdampf des folgenden Ausbruchs bringt das Wasser der Gallerte zum Verdampfen, so daß es entweicht, wobei sich die Kieselsäure an der Blasenwand gleichmäßig absetzt (LANGE 1868: 18, 19).

Nach REUSCH, LANGE, BAUER und ERDMANN beruht die Achatbildung also auf einer SiO_2-Anreicherung in Blasenräumen durch intermittierende Thermen. Die gemeine Achatbänderung ist das Resultat eines durch diese bestimmten äußeren Rhythmus; die Pigmentverteilung spiegelt Variationen in der chemischen Zusammensetzung der Lösungen wider (REUSCH 1864: 108, 110; LANGE 1868: 20). Die „Infiltrationskanäle" werden als wirkliche ehemalige Zufuhrwege für Lösungen gedeutet, bei denen das Äquidistantengesetz entsprechend verletzt sein muß (REUSCH 1864: 106, 107). Solche Kanäle entstehen auch während der fortschreitenden Achatbildung häufig dadurch von neuem, daß beim Erhitzen der Blase entstehender Dampf die noch weichen älteren Schichten stellenweise durchbricht und nach außen entweicht (LANGE 1868: 19); ERDMANN (1899: 477) läßt neue Kanäle entsprechend dadurch entstehen, daß die Luft, die in Förderpausen die Blasen erfüllt, beim Ausbruch der Thermen unter hydrostatischem Druck die älteren, noch gelartigen Achatschichten nach außen verbiegt und entweicht. LANGE (1868: 19) schlägt aus diesem Grunde vor, die „Infiltrationskanäle" besser Eruptionskanäle zu nennen.

Für die Bildung von Moosachat und Membrantrümmerachat geben LANGE, ERDMANN, BAUER und REUSCH keine Erklärung. Die Schichten vom Uruguay-Typ entstehen als horizontale SiO_2-Absätze, wenn die Kieselsäurelösung im Blasenraum stehen bleibt (ERDMANN 1899: 479; LANGE 1868: 19, 20).

Die Geysir-Theorie der Achate fand auch im 20. Jahrhundert noch Anhänger; hier sei etwa HINTZE (1915: 1478 f.) genannt. In jüngster Zeit haben GRAY, STEINEN & ANDERSON (1978: 45) am Beispiel von gebändertem Chalcedon in mesozoischen Basalten von Connecticut erneut Achatbildungen durch intermittierende Thermen zu erklären versucht: SiO_2-übersättigtes Thermalwasser dringt durch „exit passages" in die Blasenräume ein und setzt Chalcedon am kälteren Nebengestein ab. Die Achatbänderung spiegelt den wiederholten Einfluß von heißem Wasser wider, der durch einen geysirähnlichen Mechanismus verursacht wird.

III.1.3 Theorie von HEDDLE und GOODCHILD

Im Gegensatz zur Geysir-Theorie, die zur SiO_2-Akkumulation eine Lösungsbewegung auf offenen Spalten behauptet, vertreten HEDDLE und GOODCHILD erneut einen Stofftransport durch das Nebengestein hindurch. Achate entstehen als Mineralneubildungen in Gasblasen aus Lösungen, die sich bei der Verwitterung des umgebenden Magmatits bilden. Hierbei spiegelt sich die sukzessive Verwitterung des Magmatits in der entstehenden Mineralabfolge grob wider. Die äußerste grüne Haut (Seladonit, Delessit o. ä.) entstammt der Verwitterung von Augit. Die nachfolgende Feldspat-Verwitterung führt zum Absatz von Zeolithen (Natrolith, Heulandit) in den Blasen; es folgen die Chalcedonlagen des Achats (GOODCHILD 1899: 191, 192, 194; HEDDLE 1900: 153, 156; HEDDLE 1901: 58, 60). Achate bilden sich demnach als Mineralabsätze in kaltem Wasser; Oberflächenwasser, das im wesentlichen durch CO_2 angesäuert ist, zersetzt langsam das magmatische Gestein und bewirkt Mineralneubildungen in tieferen Niveaus (GOODCHILD 1899: 182, 183, 190). Der Lösungstransport erfolgt durch Diffusionsprozesse im Gestein [2], da die Blasen in der Regel vollkommen vom Gestein umschlossen werden. Die Lösung tritt durch Diffusion in die Blase ein, setzt dort gelöste Substanzen ab und verläßt die Blase wieder durch Diffusion, falls in der Umgebung Lösungen höherer Konzentration vorhanden sind; die Diffusion vollzieht sich auch durch ältere Absätze hindurch (GOODCHILD 1899: 191, 192; HEDDLE 1900: 153; HEDDLE 1901: 58). SiO_2 wird durch diesen Mechanismus nur sehr langsam der Blase zugeführt, es bilden sich jeweils nur sehr dünne Chalcedonschichten über Kieselgel als Zwischenstadium (GOODCHILD 1899: 196; HEDDLE 1900: 166; HEDDLE 1901: 69).

HEDDLE und GOODCHILD legen hiermit eine Achattheorie mit äußerem Rhythmus vor; wesentlicher „äußerer" Faktor ist die Konzentration der Verwitterungslösung im Gestein. Die gemeine Achatbänderung erklärt sich durch den sukzessiven SiO_2-Absatz aufgrund variierender Konzentrationsverhältnisse. Die Uruguay-Struktur entsteht, wenn das ausgefällte SiO_2 koaguliert und nicht durch Adhäsion an den Hohlraumwänden gehalten wird, sondern gravitativ absinkt und horizontale Opal-Lagen bildet (HEDDLE 1900: 164; HEDDLE 1901: 66; GOODCHILD 1899: 197). Moosachate bilden sich nach HEDDLE (1900: 156, 157; 1901: 61), wenn sich die erste Mineralhaut (Seladonit bzw. Delessit) fadenförmig ausbildet und diese Fäden von nachfolgendem SiO_2 ummantelt werden. Nach GOODCHILD (1899: 192) entsteht Moosachat dagegen, wenn sich Teile des noch nicht verfestigten ersten Blasenabsatzes (Seladonit o. ä.) beim Eindringen von Kieselsäurelösung vom Rand lösen und von Kieselgel ummantelt werden, das schließlich erhärtet. Die Struktur der „Infiltrationskanäle" schließlich entsteht, wenn in der Blase z. B. durch Temperaturerhöhung der Druck ansteigt und die noch gelatinösen Achatschichten an schwachen Stellen nach außen verformt werden; „Infiltrationskanäle" sind somit in Wirklichkeit ‚tubes of escape' (GOODCHILD 1899: 199).

III.1.4. Theorie von BROCKMEIER

Eine späte Weiterentwicklung der ursprünglichen Vorstellungen von HAIDINGER (1848) stellt die Theorie von BROCKMEIER (1927) dar. Achate bilden sich in Hohlräumen von Gesteinen; sie sind nicht auf Blasenräume in Magmatiten beschränkt, sondern ent-

[2] GOODCHILD und HEDDLE sprechen irrtümlich von Osmose bzw. Endosmose, was jedoch gar keinen Sinn ergibt, da im wesentlichen der Transport der gelösten Substanzen erklärt werden soll; gemeint ist ganz offensichtlich Diffusion. Wegen dieser Unklarheiten im Text stieß HEDDLEs Theorie auf Unverständnis (BOWMAN 1902: 93).

stehen z. B. auch in Hohlräumen von Sedimenten. Die SiO_2-Zufuhr erfolgt durch Infiltration wäßriger Lösungen (BROCKMEIER 1927: 164, 165). Die Achatgenese findet im sedimentären Bereich, z. T. auch im Bereich von Bodenbildungen statt. BROCKMEIER (1927: 166) vermutet, daß achatbildende Lösungen speziell aus Humusböden tropischer Wälder stammen. Die gemeine Achatbänderung entsteht dadurch, daß von allen Seiten durch das Nebengestein hindurch SiO_2-Lösungen die Blasenwände erreichen und hier Kieselsäure absetzen (BROCKMEIER 1927: 167). Als Ursache für diese Ausfällung hält BROCKMEIER (1927: 166) neben dem Zusammentreffen verschiedener Lösungen im Bereich der Hohlräume den Gehalt an organischen Komponenten in den Lösungen für wesentlich, der durch die Aktivität von Bakterien verändert werden kann. BROCKMEIER bleibt hier jedoch sehr unbestimmt. Die gemeine Achatbänderung entsteht jedenfalls durch sukzessiven SiO_2-Absatz, ohne daß Infiltrationskanäle nötig sind (BROCKMEIER 1927: 164, 165, 166). Die „Infiltrationskanäle" interpretiert BROCKMEIER (1927: 166, 167) als „Entgasungskanäle": Die Blasen im Gestein sind während des SiO_2-Absatzes noch mit Gas gefüllt, das zunehmend verdrängt wird und beim Entweichen die bereits ausgefällten Schichten nach außen verbiegt. Als äußere Rhythmen, die die gemeine Achatbänderung verursachen, treten Variationen in der Wasserführung des Bodens (z. B. durch regenreiche und regenarme Zeiten) u. ä. auf (BROCKMEIER 1927: 167). Die Uruguay-Struktur entsteht, wenn sich SiO_2 in horizontalen Schichten aus einem „Tümpel" abscheidet, der sich am Boden der Gasblase gebildet hat (BROCKMEIER 1927: 167). Achate können sich nach BROCKMEIER sehr nahe der Erdoberfläche bilden; so interpretiert er z. B. röhrenförmige Gebilde in Achaten als Relikte von Pflanzenwurzeln (BROCKMEIER 1927: 169); vermutlich sind hiermit Moosachat-Strukturen gemeint.

III.1.5. Diskussion

Alle älteren Achattheorien mit äußerem Rhythmus erklären die gemeine Bänderung der Achate durch einen von äußeren Bedingungen geregelten Mechanismus der Zufuhr von SiO_2-Lösung. Das Problem der SiO_2-Akkumulation ist so mit dem der Entstehung der gemeinen Bänderung aufs engste verknüpft. Der Lösung dieser beiden Probleme durch HAIDINGER, NOEGGERATH und KENNGOTT wurde bereits von REUSCH (1864: 107, 108) mit Recht entgegengehalten, daß sie „die wunderbare Feinheit der Schichten" und deren z. T. sehr gleichmäßige Ausbildung nicht zu erklären vermag. Aber auch die Geysir-Theorie erklärt die Morphologie der gemeinen Achatbänder nicht. REUSCH (1864: 104) hatte bemerkt, daß bei den gebänderten Produkten des Stürzens „in der Nähe scharfer Ecken und Kanten eine mit der Anzahl der Schichten zunehmende Abrundung der entsprechenden Ecken und Kanten der Aequidistanten, gleichsam eine Milderung der geometrischen Härte eintritt". Diese Eigenschaft zeigen die Achate aber nicht. Es ist im Gegenteil ein sehr auffälliges Merkmal von Achaten, daß Ecken und Kanten in aufeinanderfolgenden Bändern jeweils in gleicher Schärfe (z. T. mit veränderten Winkeln) wieder auftreten. Ein Beispiel gibt die Abb. 1. Der Prozeß des Stürzens ist so zur Erklärung der gemeinen Achatbänderung nicht geeignet. Ebenso steht die Grundannahme der Geysir-Theorie, die Existenz offener Spalten zwischen den Gesteinsblasen, die so breit sind, daß sich Lösungen darin frei bewegen können, mit der Beobachtung im Widerspruch. In den allermeisten Fällen fehlen solche Klüfte oder Gangfüllungen zwischen den Achatmandeln. Auch treten „Infiltrationskanäle" nicht in allen Achaten auf (GOERG 1929: 12). Schließlich weist BRAUNS (1906: 456) mit Recht darauf hin, daß Strukturen, die der gemeinen Bänderung der Achate durchaus analog sind, auch in völlig anderen Mineralaggregaten (Malachit, Schalenblende, Glaskopf u. a.) auftreten können; er schließt daraus, „daß man die Annahme, es sei ihre Entstehung an ganz besondere äußere Verhältnisse, wie etwa Geisertätigkeit, gebunden, von der Hand weisen muß".

Ein weiteres fundamental wichtiges aber ungelöstes Problem tritt in den Theorien von HAIDINGER, NOEGGERATH und KENNGOTT sowie HEDDLE und GOODCHILD auf: In beiden Theorien werden Kieselsäurelösungen den Hohlräumen zugeführt, setzen dort SiO_2 ab und entweichen wieder. Eine Ursache, warum die Kieselsäure gerade in den Hohlräumen ausfallen soll, wird nicht angegeben. Ohne eine solche Ursache aber wird die SiO_2-Akkumulation in den Blasen zu einem sehr unwahrscheinlichen Prozeß: Nimmt man nur irgendwelche Variationen der physikalisch-chemischen Bedingungen der Lösungen an, so sollten Variationen, die zur SiO_2-Ausfällung und solche, die zur weiteren Auflösung von SiO_2 führen, etwa gleich wahrscheinlich sein. Eine starke Anreicherung von Kieselsäure ist auf diese Weise nicht möglich. Die Vorstellung, Kieselsäurelösung dringe in die Blasen ein, setze dort SiO_2 ab und entweiche dann wieder, hat einen stark teleologischen Charakter.

Ein besonderes Problem für alle älteren Theorien mit äußerem Rhythmus stellt die Moosachat-Struktur dar. Ihre Interpretation als stalaktitähnliche Bildung muß bereits bei einer oberflächlichen Betrachtung der Moosachat-Morphologie scheitern. Diese Gebilde sind häufig in vielfältiger Weise verwunden und nur selten streng parallel (Abb. 3, 7, 8, 10). Hierauf und insbesondere auch auf das Fehlen entsprechender Stalagmitbildungen wies bereits LIESEGANG (1914c: 242; 1915a: 60; 1915b: 74, 76) mehrfach hin. Auch die Erklärungen von HEDDLE und GOODCHILD erscheinen eher hilflos. GOODCHILDs Deutung der Moosachat-Strukturen als ummantelte abgelöste Teile des ersten Mineralabsatzes steht mit der fadenförmigen Morphologie der Moosachat-Struktur im Widerspruch, während HEDDLE einfach postuliert, die erste Mineralhaut habe sich fadenförmig ausgebildet, ohne aber einen zureichenden Grund hierfür angeben zu können. Vollkommen abwegig ist schließlich die Rückführung von Moosachat-Strukturen auf Pflanzenwurzeln, die BROCKMEIER andeutet. Ganz und gar in die falsche Richtung geht auch BROCKMEIERs Versuch, achatbildende Lösungen aus den Böden tropischer Wälder abzuleiten. Im Saar-Nahe-Gebiet etwa waren derartige klimatische Bedingungen weder im Oberrotliegenden (FALKE 1974) noch danach gegeben.

All diese Einwände (die sich noch leicht vermehren ließen) beziehen sich nun auf spezielle Theorien oder Details in ihnen, die sich so widerlegen lassen. Die Grundvorstellung der älteren Achattheorien mit äußerem Rhythmus ist aber von einer solchen Kritik noch nicht betroffen. Diese Grundvorstellung besteht in der Auffassung, Achate seien Produkte eines durch äußere Rhythmen bedingten sukzessiven SiO_2-Absatzes aus Lösungen in Gesteinshohlräumen. Es liegt dem die Ansicht zu Grunde, daß die einzelnen Achatlagen der gemeinen Bänderung den ihnen zur Verfügung stehenden Hohlraum jeweils nach allen Seiten hin gleichmäßig auskleiden. Diese Grundannahme aber beruht auf einer ungenauen Naturbeobachtung und läßt sich mikroskopisch, z. T. sogar schon makroskopisch widerlegen: Im Polarisationsmikroskop zeigt sich zunächst eine Faserung des Chalcedons senkrecht zur gemeinen Bänderung. Diese lichtmikroskopisch sichtbaren Fasern werden im folgenden mit PENSE (1966: 10) als „Phänofasern" bezeichnet. Träfe nun die Grundannahme der vorgestellten älteren Achattheorien zu, so müßten die Phänofasern auch jeweils etwa senkrecht auf der ausgekleideten Wand stehen. Tatsächlich aber bilden sie stets Sphärolithe, d. h. die Phänofasern sind von einzelnen Zentren ausgehend radial angeordnet. Da die gemeine Achatbänderung aber senkrecht auf den Phänofasern steht, so verläuft sie nicht äquidistant zur Blasenwand, sondern bildet jeweils kugelige Formen aus. Besonders deutlich wird dieser Sachverhalt, wenn ein Achat aus nur wenigen Sphärolithen aufgebaut ist. Die Abbildungen 13 bis 20 und 22 geben Beispiele hierfür. Treten dagegen sehr viele Sphärolithe dicht nebeneinander auf, so ergibt sich aus geometrischen

Gründen eine Achatbänderung, die makroskopisch äquidistant zum Blasenraum zu verlaufen scheint [3] (vgl. Abb. 21). Mikroskopisch sind die tatsächlichen Verhältnisse aber auch dann meist noch leicht zu identifizieren.

Es besteht also eine unmittelbare Korrelation zwischen der Ausbildung der gemeinen Achatbänderung und der der Sphärolithe in ihr. Auf die genetische Beziehung zwischen beiden wird erst in Kap. III.2.7. (S. 62) eingegangen. Für die Diskussion der älteren Achattheorien mit äußerem Rhythmus genügt nämlich bereits dieser bloße Befund: Die gemeine Achatbänderung kleidet vorgegebene Hohlräume nicht gleichmäßig aus. Aus der dargestellten Korrelation zwischen der gemeinen Achatbänderung und dem Sphärolithenbau der Phänofasern ergibt sich aber noch ein zweiter Widerspruch zur Grundkonzeption der vorgestellten Theorien. Die einzelnen Achatbänder kleiden nicht nur die Blasenräume nicht gleichmäßig aus, sie bilden oftmals nicht einmal geschlossene Flächen. Hierbei konnten zwei Fälle unterschieden werden. Treten die Sphärolithe in relativ großen Abständen voneinander auf, so stehen entsprechende Bänder aus verschiedenen Sphärolithen untereinander nicht in Verbindung. Dies findet sich häufig bei Bändern nahe dem Sphärolithzentrum. Die Bänder beginnen und enden dann, dem Sphärolithenbau entsprechend, auf dessen jeweiliger Unterlage, ohne dort irgend eine Fortsetzung zu finden (Abb. 13, 14). Ein zweiter Fall tritt auf, wenn die ersten Bänder eines Sphäroliths im Nachbarsphärolith gar nicht ausgebildet sind (Abb. 15, 16).

Hieraus folgt, daß die Achatbänderung nicht als Resultat einer sukzessiven Ablagerung einzelner Schichten im Sinne der dargestellten Theorien zu verstehen sein kann. Auch das angebliche Grundgesetz der Achatbildung, das Äquidistantengesetz, läßt sich nur aufgrund bloß makroskopischer Untersuchung ausgewählter Exemplare vermuten. Ein Stück, durch das bereits bei makroskopischer Betrachtung dieses „Gesetz" falsifiziert werden kann, zeigt Abb. 23. Die Bänder der gemeinen Achatbänderung zeigen untereinander keine strenge Äquidistanz.

Eine zweite allgemeine Kritik läßt sich auf der fundamentalen genetischen Annahme der vorgestellten Theorien, der Annahme eines den ganzen Gesteinsverband erfassenden äußeren Rhythmus, aufbauen. Nimmt man zur Erklärung der Achate Lösungsbewegungen und SiO_2-Ausfällungen an, die durch äußere Rhythmen gesteuert werden, so sollten benachbarte Blasenräume von diesen äußeren Rhythmen ganz gleichermaßen betroffen werden. Zu erwarten wäre also, daß benachbarte Achate und erst recht benachbarte Blasenfüllungen überhaupt den gleichen Aufbau aufweisen. Beobachtet wird dagegen das Gegenteil. In zumindest sehr vielen Fällen [4] ist eine solche Korrelation nicht möglich. Interessanterweise stellt GOODCHILD (1899: 193) diese Tatsache selbst fest:

[3] Der Sphärolithenbau der Achate und seine Beziehung zur Achatbänderung sind an sich bekannt (z. B. BRAITSCH 1957: 351 f.; FRONDEL 1978: 24 f.). Die Möglichkeiten, hieraus genetische Schlüsse zu ziehen, wurden aber bisher zu wenig beachtet.

[4] Wichtig ist hierbei, daß ein äußerer Rhythmus des Lösungsverhaltens noch nicht bewiesen wäre, wenn man in einem möglichen Paar benachbarter Blasen eine identische Abfolge von Schichten finden würde. Dagegen läßt sich das Vorliegen eines äußeren Rhythmus einigermaßen sicher widerlegen, wenn eine solche Parallelisierung nicht möglich ist bzw. völlig verschiedene Blasenfüllungen in unmittelbarer Nähe im Gestein auftreten. Zur Falsifikation sind nur wenige Beispiele nötig.

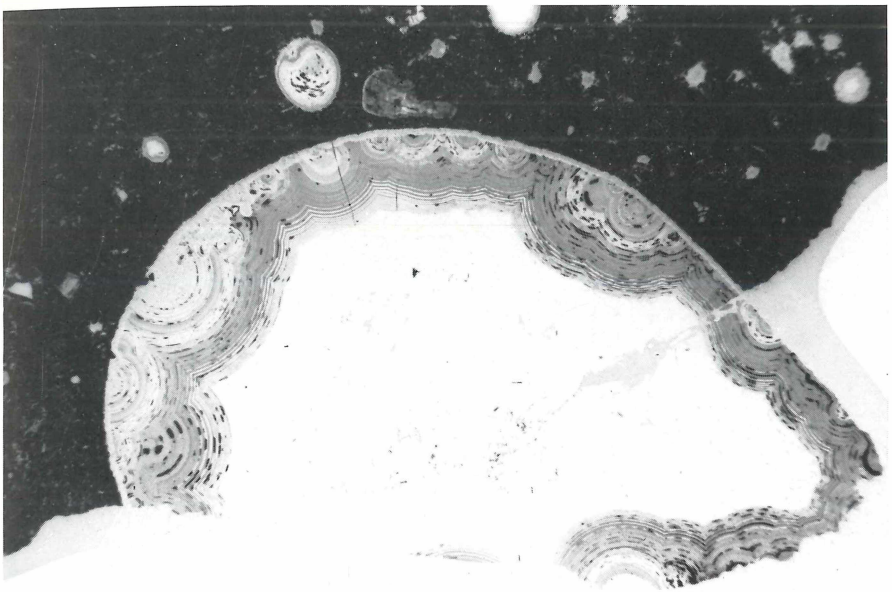


Abb. 13: Achat im vulkanischen Nebengestein (Fundpunkt 1); die Bänderung folgt dem Sphärolithenbau, nicht der Blasenwand. Dünnschliffaufnahme. Probe L. A. 26. Bildausschnitt: ca. 2,0 x 1,4 cm.

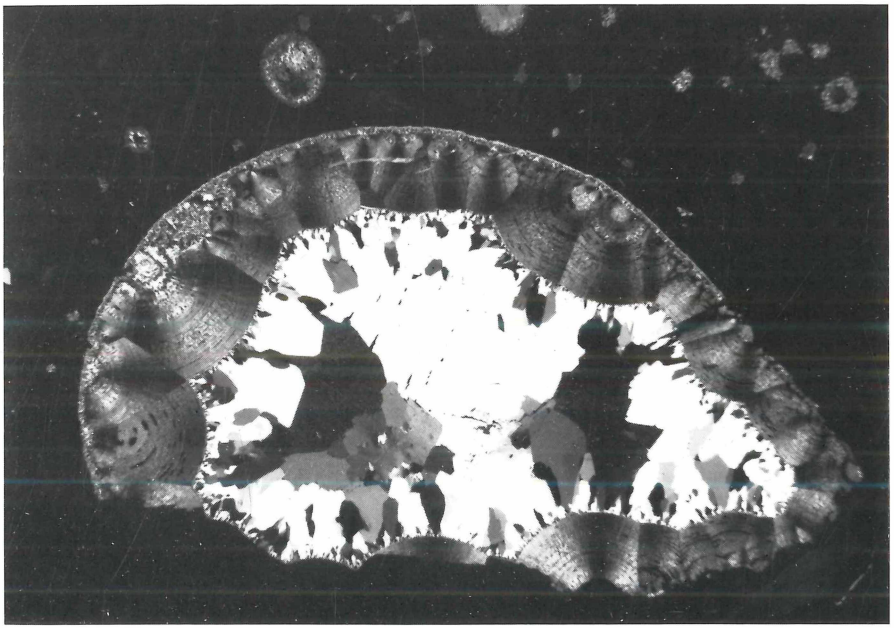


Abb. 14: Wie Abb. 13; + N.



Abb. 15: Dünnschliffaufnahme eines Achats (o. F.) mit deutlicher Sphärolithstruktur. Die Bänderung endet abrupt an der Unterlage des Sphäroliths. Größe des Bildausschnitts: ca. 3,0 x 2,1 mm.

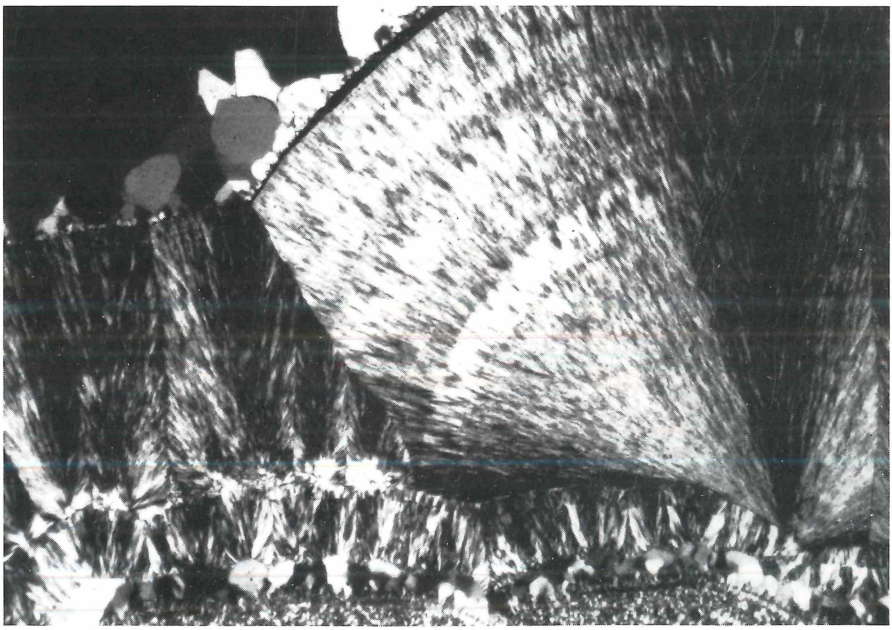


Abb. 16: Wie Abb. 15; + N. Die Phänofasern sind deutlich ausgeprägt.

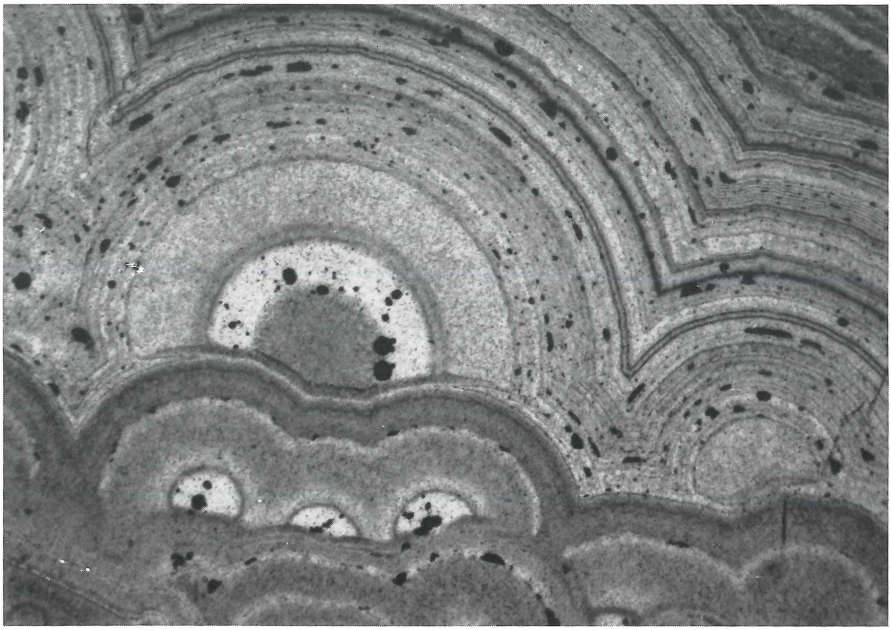


Abb. 17: Dünnschliffaufnahme eines Achats (Fundpunkt 1): Die Chalcedon-Quarzin-Sphärolithe sind strukturbestimmend. Größe des Bildausschnitts: ca. 3,0 x 2,1 mm.

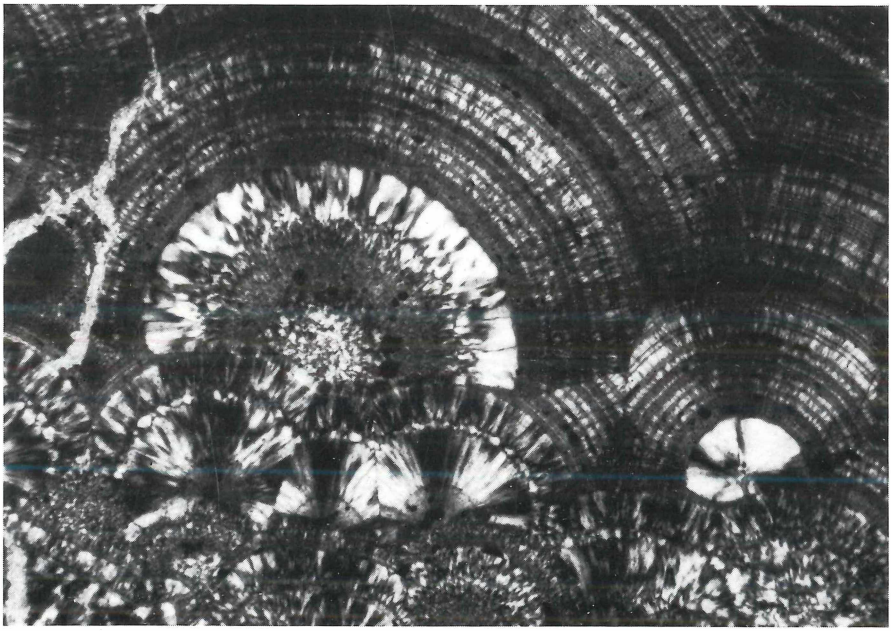


Abb. 18: Wie Abb. 17; + N.

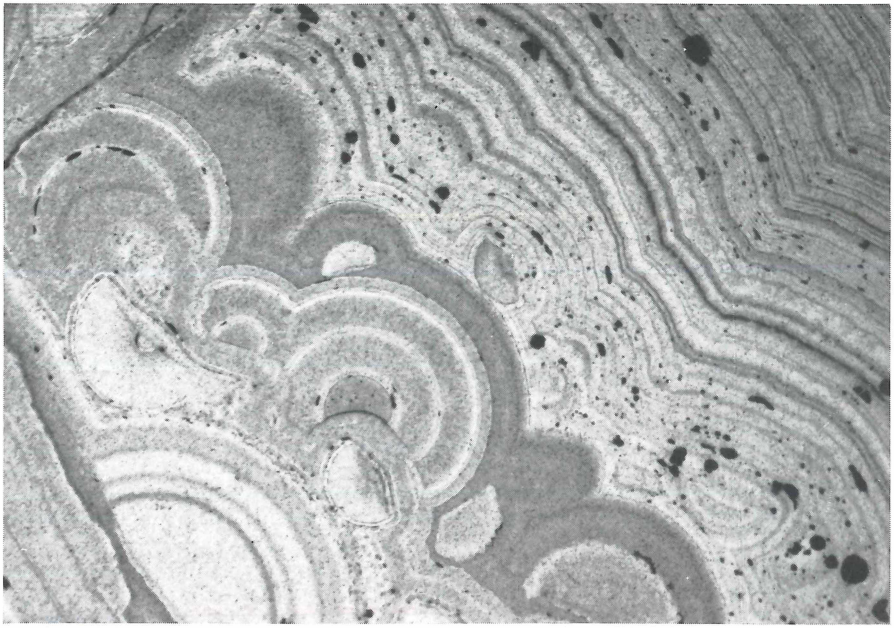


Abb. 19: Dünnschliffaufnahme eines Achats (Fundpunkt 1) (gleiche Probe wie in Abb. 17 und 18): Die Chalcedon-Quarzin-Sphärolithe sind strukturbestimmend. Größe des Bildausschnitts: ca. 3,0 x 2,1 mm.

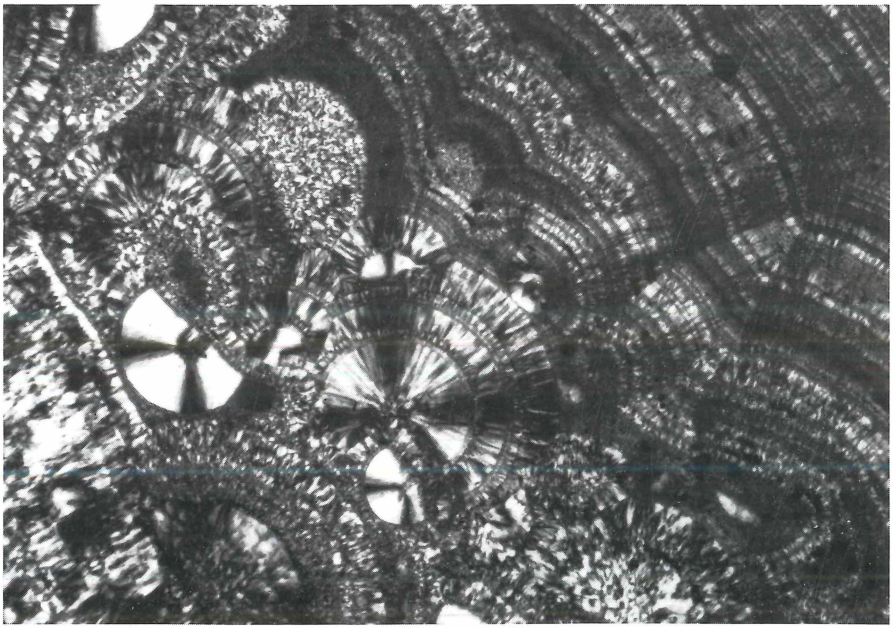


Abb. 20: Wie Abb. 19; + N.

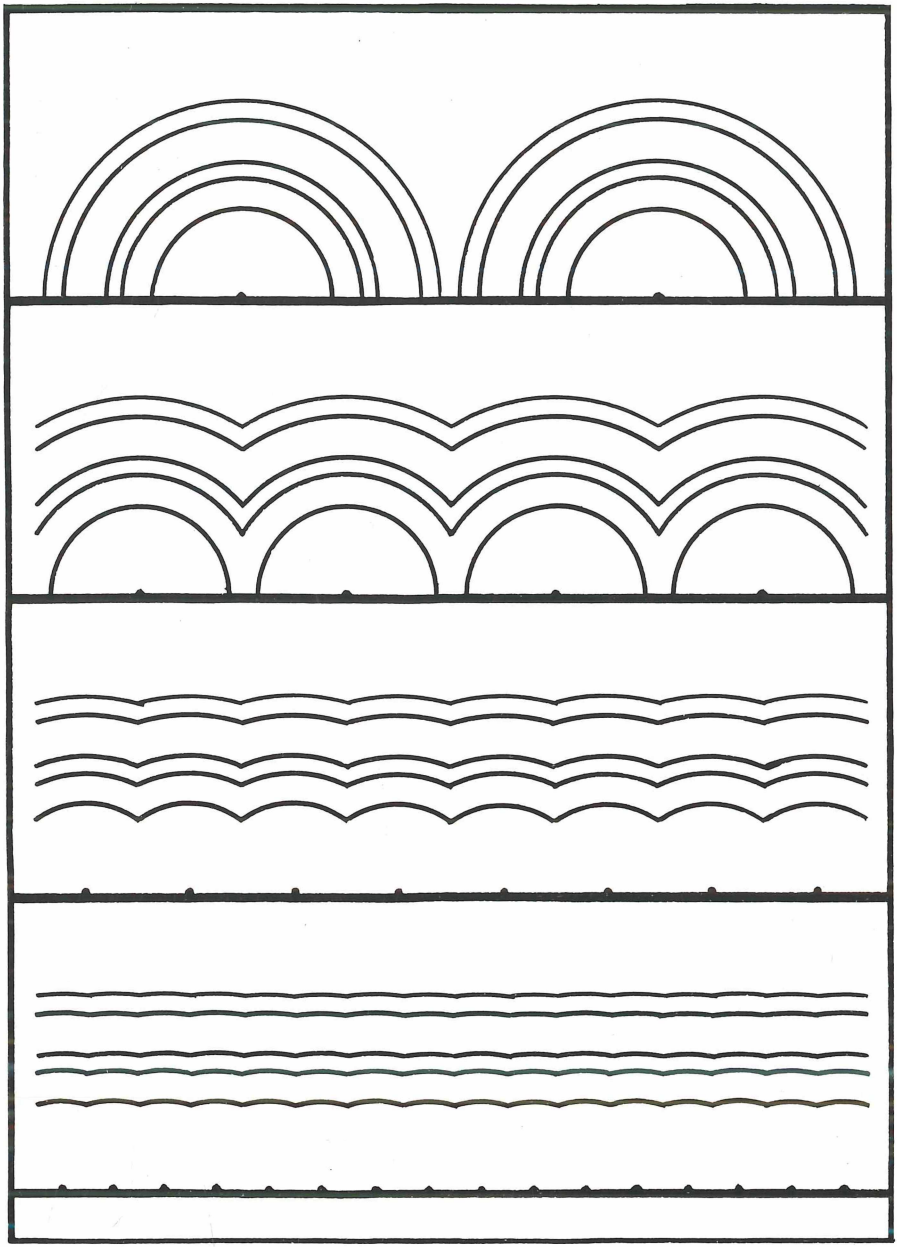


Abb. 21: Schemazeichnung: Die Morphologie der gemeinen Achatbänderung ist von Zahl und Abstand konkurrierender Chalcedonsphärolithe abhängig.

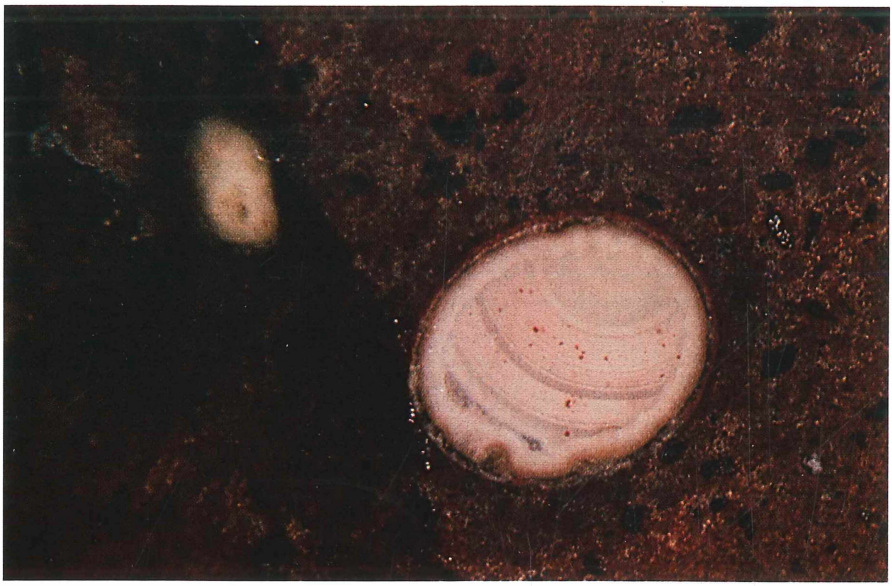


Abb. 22: Achat im Nebengestein (Fundpunkt 1), bestehend aus einem einzigen Sphärolithen. Hier zeigt sich die Ausbildung selbständiger (d. h. von den Hohlraumformen unabhängiger) konzentrischer Bändersysteme besonders deutlich. Kleiner Halbmesser der Mandel: ca. 1 mm.

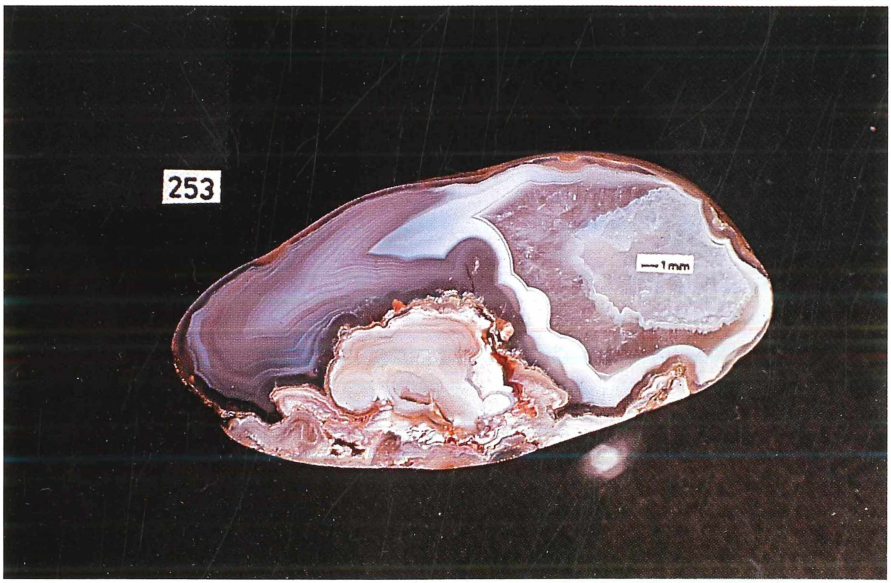


Abb. 23: Achat (o. F.) mit deutlich ungleichmäßiger Ausbildung der gemeinen Bänderung. Es ergibt sich dadurch ein asymmetrischer Achataufbau.

"It is by no means clear why adjacent cavities, penetrated, it is to be supposed, by solutions which are alike, should, in one case, contain chalcedony, in another – distant, perhaps, only a fraction of an inch – should contain a serpentinous mineral, while a third may contain an agate, a fourth Calcite, and a fifth remain unfilled. Yet such is the fact." Anstatt aber hierin einen schweren Einwand gegen seine Grundkonzeption zu bemerken, fährt GOODCHILD fort: "Leaving this to be explained by the results of future investigations, . . .". Innerhalb des Rahmens der älteren Theorien mit äußerem Rhythmus ist der Spielraum für solche Erklärungen allerdings eng begrenzt. KENNGOTT (1851: 91) etwa, der dieses Problem offenbar gesehen hat, meint, daß durch die Verstopfung von Zufuhrwegen irgendwelcher Art die Füllung einzelner Mandeln vorzeitig beendet werden kann; auch könnten durch eine solche Verstopfung und spätere Wiederöffnung bestimmte Mineralabsätze in einzelnen Blasen fehlen; derartige Verstopfungsprozesse hält KENNGOTT dann allerdings für sehr selten. Eine solche Annahme (deren ad-hoc-Charakter auffällt) wäre aber nur zufriedenstellend, wenn bei einzelnen Blasenfüllungen bestimmte Partien einer für die Blasen im ganzen umgebenden Gesteinsverband typischen Sukzession von Achatlagen fehlen würden. Die Variationsfähigkeit von Achaten (und Blasenfüllungen allgemein) geht aber sehr viel weiter. Die Abbildungen 24 und 25 zeigen drei Blasenfüllungen in unmittelbarer Nachbarschaft in einem Dünnschliff; die unterschiedliche Füllung der Blasen, insbesondere aber auch die vollkommene Verschiedenheit der Bänderung der beiden Achatfüllungen ist offensichtlich. Die Abbildungen 26 und 27 zeigen einen Ausschnitt, in dem dies noch deutlicher wird. Der Befund ist insofern besonders bemerkenswert, als der Abstand dieser Blasen gerade 1 mm beträgt. Es handelt sich hierbei aber keineswegs um einen Sonderfall; die Unterschiedlichkeit der Bänderungen benachbarter Achate konnte in zwei weiteren Dünnschliffen ebenfalls festgestellt werden. Auch wurden acht Blasenfüllungen aus anstehendem Magmatit (Fundpunkt 2) entnommen und im Dünnschliff verglichen. Ihr Aufbau ließ sich nicht korrelieren; neben Achatfüllungen traten reine Calcitfüllungen auf; die Achatfüllungen zeigten auch untereinander weder in ihrer Feinbänderung noch in ihrem groben Aufbau (Abfolgen von Chalcedon-, Quarzin- und Quarzzonen) eine definierte, allgemein auftretende Sukzession. Weitere Beispiele für die vollkommene Verschiedenheit benachbarter Blasenfüllungen geben die Abbildungen 28, 29, 30, 31. Daß es sich hierbei ganz offensichtlich um eine charakteristische Eigenart von Achatvorkommen allgemein handelt, zeigen auch Berichte über verschiedene Fundorte in der Literatur. So schreibt KIND (1957: 134) über ein Achatvorkommen im Thüringer Wald:

„Man könnte vermuten, daß benachbarte Mandeln eine gleiche oder ähnliche Füllung haben und daß sich die Farbbänder benachbarter Mandeln wenigstens in groben Zügen parallelisieren lassen. Aber das ist keineswegs der Fall. . . . In keinem Fall konnten am Schneekopf Achatbänder benachbart entstandener Kugeln parallelisiert werden."

Auch KAŠPAR (1944: 104), der sich insbesondere mit den Achaten des Riesengebirgsvorlandes befaßte, weist auf die Möglichkeit des unterschiedlichen Aufbaus benachbarter Achate hin. Schließlich ist in diesem Zusammenhang auch die Beobachtung von WALGER (1954: 24, 26) erwähnenswert, daß in einem Aufschluß südlich Flonheim (Rheinhessen) Achate mit und ohne Uruguay-Struktur in engster Nachbarschaft anstanden (vgl. Kap. III.3.4., S. 70 f).

Es läßt sich somit allgemein feststellen, daß eine „Stratigraphie der Achate" eines bestimmten Vorkommens nicht möglich ist. Achate bilden sich daher **nicht** aufgrund einer periodischen Stoffzufuhr, **die von einem für benachbarte Blasen identischen äußeren Rhythmus bestimmt wird.**

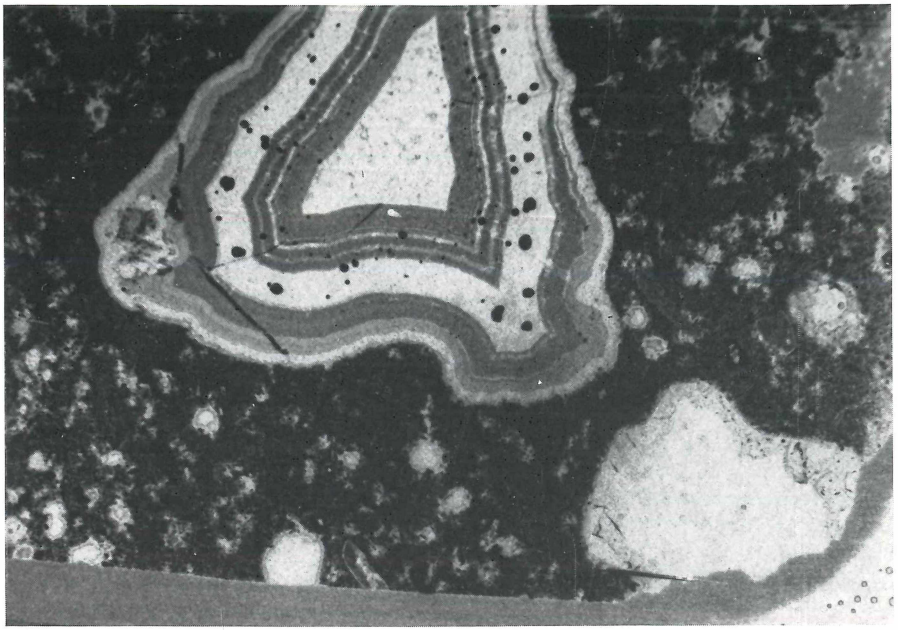


Abb. 24: In unmittelbarer Nachbarschaft im Gestein (Fundpunkt 1) treten zwei deutlich verschieden aufgebaute Achatfüllungen und eine (kleine) Quarzfüllung auf. Dünnschliffaufnahme. Größe des Bildausschnitts: ca. 1,8 x 1,3 cm.

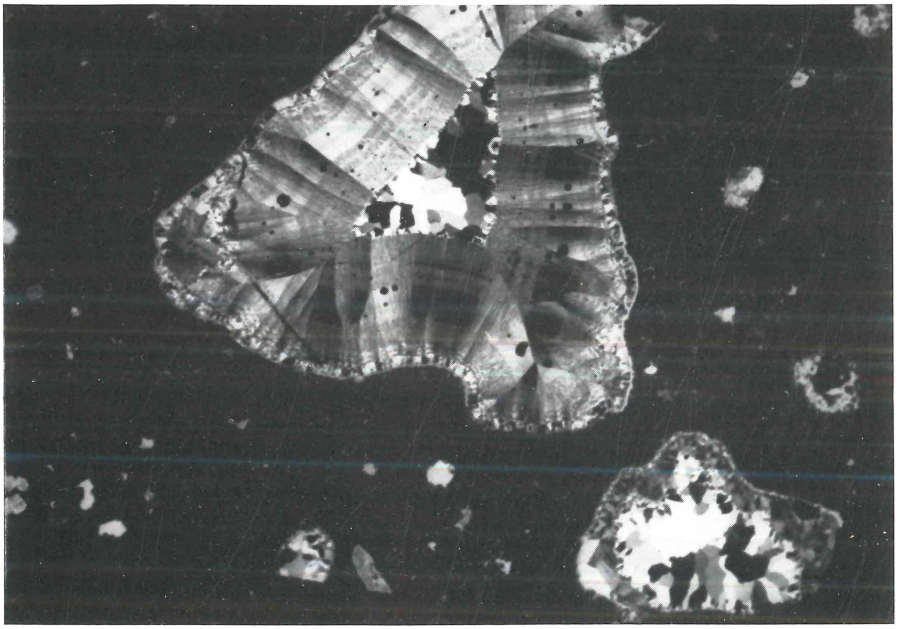


Abb. 25: Wie Abb. 24; + N.

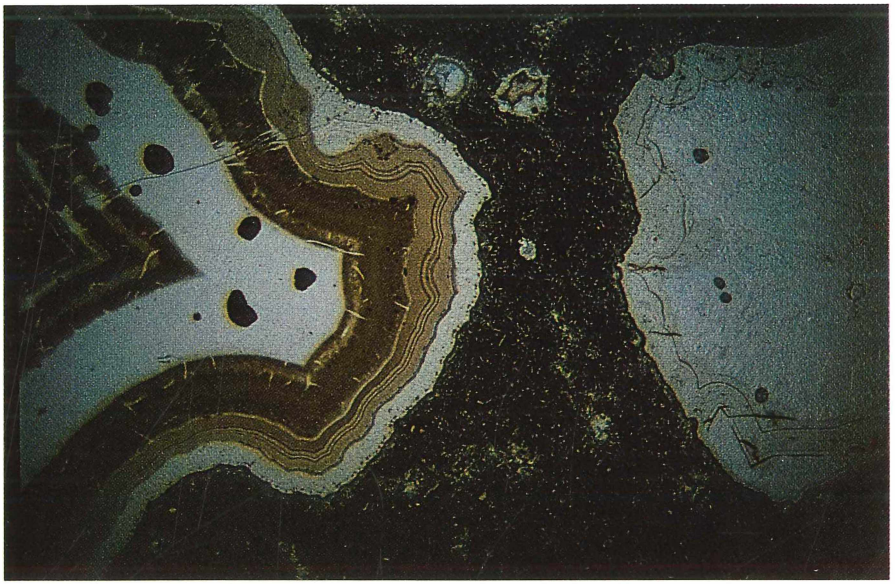


Abb. 26: Ausschnitt aus Abb. 24. Abstand der Blasen: 1mm.

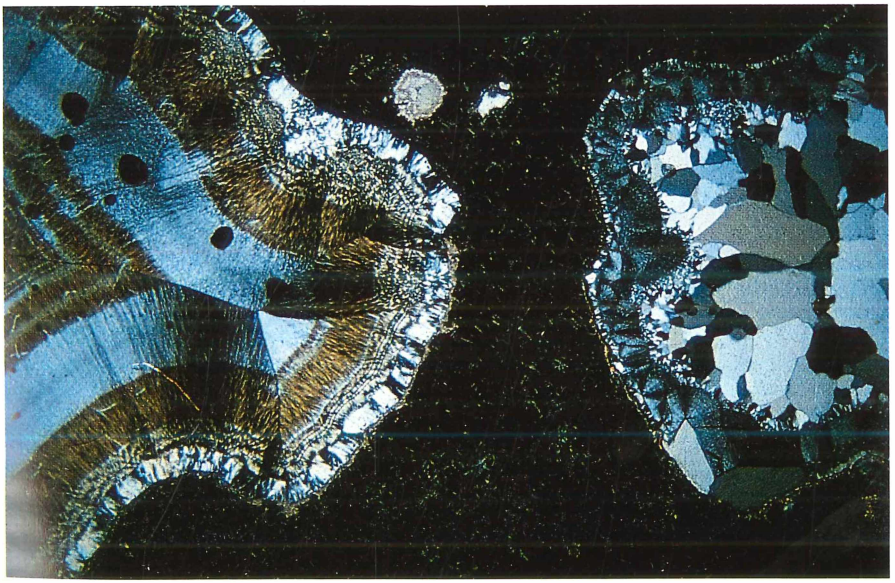


Abb. 27: Wie Abb. 26; + N.



Abb. 28: Verschiedene Hohlraumfüllungen (Achate, Quarzfüllungen) in unmittelbarer Nachbarschaft im Gestein (Fundpunkt 1).

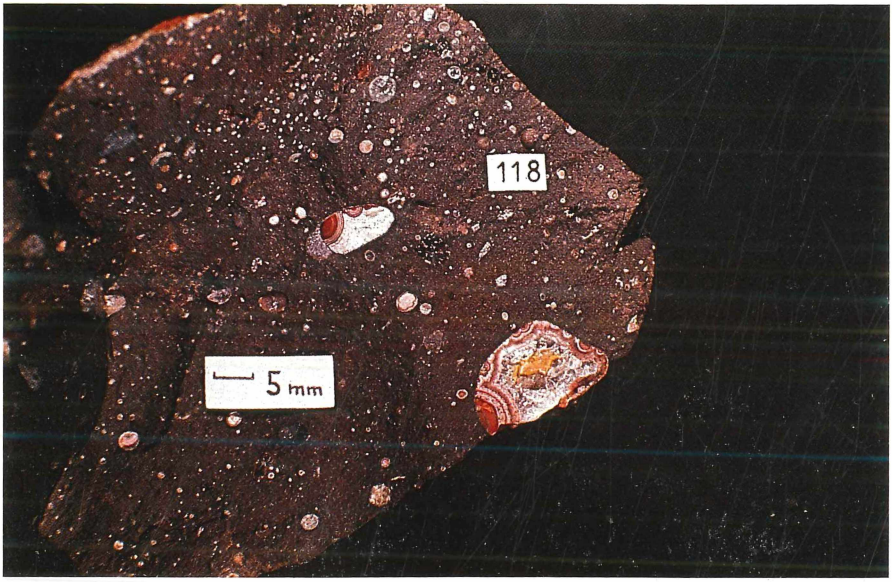


Abb. 29: Achate mit verschiedenem Aufbau in unmittelbarer Nachbarschaft im Gestein (Fundpunkt 1; gleiches Handstück wie in Abb. 28).

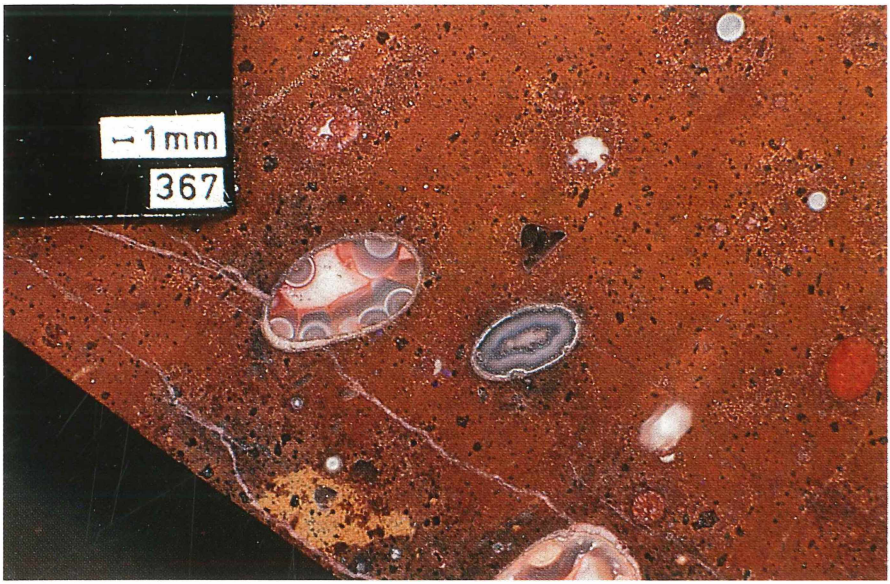


Abb. 30: Unterschiedliche Achat/Quarz-Füllungen in unmittelbarer Nachbarschaft im Gestein (Fundpunkt 1).

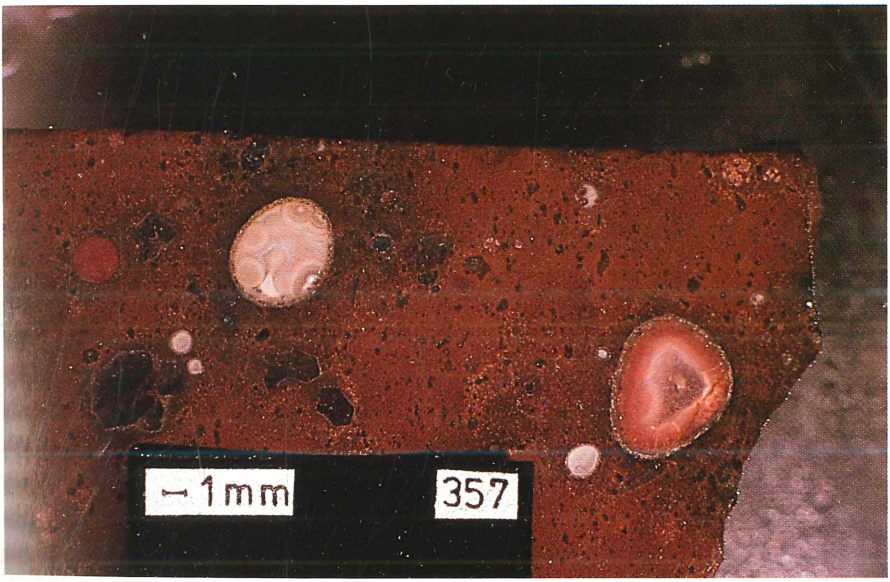


Abb. 31: Unterschiedliche Achat/Quarz-Füllungen sowie eine Hämatit-Füllung in unmittelbarer Nachbarschaft im Gestein (Fundpunkt 1; gleiches Handstück wie in Abb. 30).

III.2. Die LIESEGANG'sche Theorie

Mit der Entdeckung der Möglichkeit von Strukturbildungen durch innere Rhythmen bei Diffusionsprozessen ergaben sich für die Achate völlig neue und grundlegend andersartige Erklärungsmöglichkeiten. Zugleich mußten die älteren Theorien mit äußerem Rhythmus in diesem Horizont plump, umständlich und gewaltsam erscheinen. Besonders eindrücklich kommt dies in einem Text von LIESEGANG (1910b: 593) zum Ausdruck, in dem er sich erstmals mit der Achat-Problematik befaßt:

„Als ich zuerst eine Theorie der Achat-Entstehung hörte, schien sie mir so wunderlich, daß es mir zuerst schien, als habe sich bei dem betreffenden Mineralogen zufällig eine längst überlebte mittelalterliche Anschauung erhalten. Aber dann hörte ich fast die gleiche Theorie von anderen Mineralogen. Es sollte folgendermaßen zugegangen sein: In die Höhlungen, welche sich in dem vulkanischen Melaphyr gebildet hatten, fließt Kieselsäure hinein und wieder hinaus. Dabei bleibt eine außerordentlich dünne Haut an den Wandungen sitzen. Dann fließt wieder Kieselsäure durch eine feine Öffnung hinein und wieder heraus. Dies wiederholte sich unzählige Male. Da die geschmolzene oder gelöste Kieselsäure einmal ziemlich rein, das anderemal mehr oder weniger z. B. durch ein Eisensalz gefärbt ist, haben die aufeinanderfolgenden dünnen Lagen die verschiedene Färbung. Der Eindruck von ‚Flußlinien' wird allerdings häufig bei Achaten erweckt, welche eine sogenannte Zuflußöffnung besitzen. Daß aber diese Öffnung nach einiger Zeit verstopft sein mußte und daß man dann die weitere Bildung im Innern gar nicht erklären könne, wurde nicht berücksichtigt [5]. Ob gewagte Hypothesen darüber ausgesprochen worden sind, wie das rhythmische Hinein- und Herausfließen zustande gekommen sei, welches fast an das Pulsieren der Vakuolen in den Amöben erinnert, ist mir nicht bekannt. Und es schien mir nicht die Mühe zu lohnen, danach zu suchen, ebenso wie nach den anderen Hilfshypothesen dieser seltsamen Anschauung, da schon die oberflächliche Betrachtung einiger Achate durchaus andere Verhältnisse für deren Bildung ahnen ließ."

III.2.1 Die gemeine Achatbänderung

War die Pigmentverteilung im Achat für die älteren Theorien mit äußerem Rhythmus lediglich ein Zeuge von Variationen der Lösungszusammensetzung und für die Achatentstehung von ganz untergeordneter Bedeutung, so wird sie nun zu einem ganz wesentlichen, entscheidenden Faktor der Achatgenese. Die gemeine Bänderung entsteht nach LIESEGANG in der Regel durch rhythmische Fällungen (LIESEGANG'sche Ringe) in Kieselgelen in Gesteinshohlräumen. Es würde hier zu weit führen, den Bildungsmechanismus LIESEGANG'scher Ringe zu diskutieren. Zu diesem interessanten Problem sind viele hundert Arbeiten erschienen. Für die Frage der Achatgenese ist nur wichtig, daß solche periodischen Fällungen möglich sind, unter welchen Voraussetzungen sie entstehen und welche morphologischen Eigenschaften sie aufweisen. Bei den in Abb. 11, 32, 33, 34, 35, 37 wiedergegebenen Präparaten wurde Gelatinelösung mit wenig Kaliumbichromat und Zitronensäure [6] versetzt und auf Glasplatten gelatinieren gelassen. Hierauf wurde

[5] Hier geht LIESEGANG zu weit. Gerade dieser Einwand ist eines der ältesten Argumente der Achat-Diskussion. Bereits LEONHARD (1823: 16) bringt ihn vor und NOEGGERATH (1850b: 155, 156) geht auf ihn ein. Seine allgemein große Rolle in der älteren Achat-Diskussion geht aus Kap. III.1.1. hervor.

[6] Wie gut sich die LIESEGANG'schen Ringe ausbilden, ist u. a. auch von den Eigenschaften der Gelatine (Alter, Zersetzungsprodukte, Verunreinigungen . . .) abhängig. Ein Zusatz von Zitronensäure hat sich hierbei als günstig erwiesen (LIESEGANG 1924: 63, 64, 65). Da der Mechanismus der Bildung rhythmischer Fällungen aber hier nicht besprochen werden soll, möchte ich es bei der bloßen Feststellung dieser Tatsache belassen.

konzentrierte Silbernitratlösung in Tropfen oder Linien aufgebracht. Es erwies sich als günstig, an den entsprechenden Stellen zuvor die Gelatine zu entfernen. Das Silbernitrat diffundiert von diesen Stellen aus in die Gelatine ein und führt dort zur rhythmischen Ausfällung von Silberchromat.

$$2\ Ag^+ + Cr_2O_7^{2-} \rightarrow Ag_2Cr_2O_7$$

Die Ähnlichkeit von Bänderungen, die sich so hervorrufen lassen, mit der gemeinen Achatbänderung ist auf den ersten Blick verblüffend (Abb. 32, 33). Es ist daher nicht erstaunlich, daß LIESEGANG Achate durch rhythmische Fällungen zu erklären suchte:

Die gemeine Achatbänderung entsteht in der Regel (Ausnahmen s. u.) durch rhythmische Ausfällungen in Kieselsäuregelen, die Gesteinshohlräume völlig ausfüllen (LIESEGANG 1915b: 14). Dies kann auf verschiedenen Wegen geschehen, die alle eine mehr oder weniger große Rolle bei der Achatgenese spielen können (LIESEGANG 1913a: 96; 1915b: 14). LIESEGANG gibt folgende Möglichkeiten an:

1. Der Gesteinshohlraum ist zunächst völlig mit ungebändertem Kieselgel erfüllt. Vom Nebengestein aus diffundiert nun ein lösliches Eisensalz in das Gel ein und wird hier rhythmisch gefällt (LIESEGANG 1911a: 497; 1911/12: 564; 1913a: 96; 1914a: 188; 1914b: 170; 1915b: 14). Das Kieselgel entspricht als neutrale Trägersubstanz (LIESEGANG 1913a: 18, 96) der Gelatine des beschriebenen Versuchs, das Eisensalz dem Silbernitrat. Als Ausfällungsprodukt (Analogon zum Silberchromat) tritt Eisenhydroxid auf, das sich nachträglich in Eisenoxid umwandeln kann (LIESEGANG 1913a: 96; 1914a: 188; 1915b: 31). Dem Kaliumbichromat schließlich können verschiedene Substanzen entsprechen. LIESEGANG hält bereits die Ionen des Wassers zur Ausfällung von Eisenhydroxid für hinreichend (Hydrolyse) (LIESEGANG 1914a: 188). Diese wird aber sehr erleichtert, wenn im Kieselgel Spuren von Kalium- oder Natriumsilikat (Wasserglas) vorliegen (LIESEGANG 1911a: 499). Schließlich sollen auch andere Verunreinigungen, z. B. Karbonate, als Reaktionspartner des eindiffundierenden Eisensalzes vorkommen können (LIESEGANG 1911a: 499; 1911/12: 564, 565; 1913a: 96, 97). Diese erste Möglichkeit der Bildung von Achatbändern durch LIESEGANG'sche Ringe geht von der Annahme aus, daß das Eisensalz nach der Kieselsäure durch Diffusion die Blasenräume erreichte (LIESEGANG 1911/12: 564). Zur Erklärung dieses Vorgangs gibt LIESEGANG wiederum mehrere Möglichkeiten an. Die einfachste Annahme wäre die, daß das Eisensalz vom Nebengestein der Achate völlig unabhängig ist; Eisensalzlösungen durchtränken aus größeren Entfernungen kommend das basaltische Gestein und erreichen dabei auch die mit Kieselgel erfüllten Blasen (LIESEGANG 1911a: 498; 1911/12: 564). Diese Deutung schafft aber ein weiteres Problem, die Herkunft der Eisenlösungen. Wahrscheinlicher ist, daß das Eisen dem Magmatit selbst entstammt (LIESEGANG 1911a: 497; 1911/12: 564). Ist dessen Herkunft das Eisenoxid, das in solchen Mandelsteinen oft reichlich vorkommt, so muß dieses zunächst durch irgendeinen Prozeß diffusibel gemacht, d. h. in eine lösliche Form umgesetzt worden sein (LIESEGANG 1911a: 498). Einfacher ist die Erklärung, daß es sich bei den Eisensalzlösungen um Verwitterungsprodukte des basaltischen Nebengesteins handelt. So könnte das Gestein in höherem Niveau unter Bildung von SiO_2 und löslichen Eisensalzen verwittert sein; durch ihre größere Diffusionsgeschwindigkeit erreicht die Kieselsäure dann vor der Eisensalzlösung die Hohlräume (LIESEGANG 1913a: 97). Als weitere Möglichkeit gibt LIESEGANG speziell die Verwitterung von Olivinkristallen des Magmatits an. Hierdurch läßt sich besonders gut eine lokal verschieden starke Fe-Lieferung verstehen. Treten solche verwitternden Olivinkörner an Blasenrändern der entstehenden Achate als Diffusionszentren auf, so wird die Ausbildung einzelner Sphärolithe im Achat verständlich (LIESEGANG 1913a: 98; 1914a: 188). Schließlich ist eine rhythmische Fällung außer durch Eisen- auch durch Manganlösungen möglich (LIESEGANG 1914a: 188).

Abb. 33

Abb. 32

Simulation der gemeinen Achatbänderung durch LIESEGANG'sche Ringe von Silberchromat.

2. Der Gesteinshohlraum ist zunächst völlig mit ungebändertem Kieselgel erfüllt, das aber zugleich ein Eisensalz in diffusibler Form enthält (LIESEGANG 1911a: 498; 1912c: 274; 1913a: 96; 1914a: 188; 1914b: 170; 1915b: 14). Das Eisensalz entspricht nun dem Kaliumbichromat des oben beschriebenen Versuchs [7]. Die rhythmische Fällung dieses Eisensalzes erfolgt nun durch irgendeinen Reaktionspartner, der von außen zutritt (LIESEGANG 1914a: 188; 1914b: 170). Zur Illustration der Möglichkeit einer solchen rhythmischen Ausfällung von Eisenhydroxid in Kieselgel nennt LIESEGANG (1919: 184) folgenden Versuch: Gibt man Eisenchlorid in ein SiO_2-Sol, läßt es gelatinieren und überschichtet es dann mit Ammoniakwasser, so tritt ein rhythmischer Niederschlag (bis zu sieben Schichten pro Zentimeter wurden beobachtet) von Eisenhydroxid im Kieselgel auf. Als Prozeß bei der Achatbildung favorisiert LIESEGANG hier aber eine Fällung durch eindiffundierenden Sauerstoff, der eine Oxydation von Eisen(II) zu Eisen(III) bewirkt (LIESEGANG 1912c: 274; 1914a: 188). Als entsprechenden Laborversuch gibt LIESEGANG die Oxydation eines Eisen(II)-Salzes in einer Kieselsäuregallerte durch den Sauerstoff der Luft an; hierbei wird Eisenhydroxid in gebänderter Form ausgefällt (LIESEGANG 1915b: 14).

3. Als dritte Möglichkeit der Bildung von Achatbänderungen durch rhythmische Fällung kommt ein etwas komplizierterer Prozeß in Frage. Gibt man einen Tropfen NaCl-Lösung auf eine mit $AgNO_3$ versetzte Gelatineschicht, so bildet sich ein kontinuierlicher AgCl-Niederschlag um den aufgesetzten Tropfen herum; eine Schichtung tritt nicht auf. Setzt man aber vor Beginn der NaCl-Diffusion einige Silberchromatkörner um den Tropfen herum auf die Gelatine auf, so ergibt sich ein komplizierteres Resultat. Die Silberchromatkörner sind wasserunlöslich und diffundieren daher nicht in die Gelatine ein. Werden sie aber von der Diffusionsfront des NaCl erreicht, so setzen sie sich mit diesem zu AgCl und $Na_2Cr_2O_7$ um. $Na_2Cr_2O_7$ diffundiert nun seinerseits vor der NaCl-Front und bildet dort mit $AgNO_3$ rhythmische Niederschläge von Silberchromat. Dieses wird aber vom nachfolgenden NaCl erneut zu AgCl und $Na_2Cr_2O_7$ zersetzt. Auf diese Weise diffundiert stets $Na_2Cr_2O_7$ vor dem NaCl her und erzeugt rhythmische Fällungen von Silberchromat, die dann vom NaCl zu AgCl umgesetzt werden. Es liegt gewissermaßen eine ‚Pseudomorphose' von Silberchlorid nach Silberchromat vor. Wichtig ist, daß zum Erzielen einer rhythmischen Ausfällung von AgCl statt einer kontinuierlichen nur sehr geringe Mengen an Silberchromat nötig sind, das während des Prozesses immer wieder regeneriert wird. Es hat daher bei der Entstehung von AgCl-Niederschlägen in gebänderter Form eine einem Katalysator ähnliche Funktion, weshalb LIESEGANG es „Formkatalysator" nennt (LIESEGANG 1912b: 331–334).

   Bei der Entstehung der gemeinen Achatbänderung durch rhythmische Fällungen hält LIESEGANG das Auftreten solcher Formkatalysatoren für möglich und gibt speziell $CaCO_3$ und Mangansalze als denkbar an, ohne aber hierauf im Detail einzugehen (LIESEGANG 1913a: 96, 100).

4. Schließlich ergibt sich noch die Möglichkeit, daß das Eisenpigment der Achate insgesamt eine „Pseudomorphose" nach einem anderen, länger zuvor rhythmisch gefällten Stoff darstellt. LIESEGANG hält hier speziell die ursprüngliche Fällung von Kupferverbindungen für möglich, weil diese bei Diffusionsversuchen in Kieselsäuregallerten besonders leicht LIESEGANG'sche Ringe bilden. Einen Beweis für eine solche Funktion von Kupferverbindungen bei der Achatgenese kann er jedoch nicht antreten (LIESEGANG 1915b: 104, 105).

[7] Auch bei solchen Diffusionsversuchen und speziell bei der Reaktion von Kaliumbichromat und Silbernitrat sind die Reaktionspartner in der Regel vertauschbar.

Mit der Ausbildung LIESEGANG'scher Ringe in einer Kieselgallerte ist das erste Stadium der Achatgenese, der wichtigste strukturbildende Prozeß, abgeschlossen. Damit nun ein Achat entsteht, muß eine Erhärtung und Kristallisation des Kieselgels folgen. Es zeigt sich nun aber, daß die Bänderung der Achate und die Orientierung der Chalcedonfasern in der Regel gut korreliert sind (s. o.). Nimmt man also, wie LIESEGANG, eine Bänderbildung durch Pigmente in Kieselsäuregallerten an, so müssen diese Pigmentbänder die Kristallisation der Kieselsäure stark beeinflußt haben. LIESEGANG (1910b: 595; 1911a: 505; 1913a: 100, 102; 1914a: 189; 1915b: 15) schreibt dem Eisenpigment die Funktion eines Schutzkolloids bei der Kristallisation des SiO_2 zu. Es hemmt bzw. verhindert die Ausbildung größerer Quarzkristalle in den pigmentierten Zonen der Gallerte durch Adsorption (LIESEGANG 1911a: 505). Durch die Morphologie der LIESEGANG'schen Ringe ergeben sich drei Möglichkeiten unterschiedlicher Pigmentierung im entstehenden Achat. Am Rand der Gallerte wechseln stark pigmentierte Zonen mit pigmentfreien, aber von den benachbarten, stark pigmentierten Zonen beeinflußten Bereichen ab. Die Gallertmitte ist dagegen häufig pigmentarm bzw. -frei, da der zunächst im Gel befindliche Stoff seinem von außen zudringenden Reaktionspartner nach den ersten Fällungen entgegendiffundiert und durch diese Verarmung in der Gallertmitte eine Fällung von Pigment verhindert wird (LIESEGANG 1910b: 596). Die Erstarrung der Kieselsäure erfolgt nun durch zwei mit einer Wasserabgabe verbundene Vorgänge, durch Schrumpfung (Synärese) und Kristallisation. In der Achatmitte entsteht durch die Kontraktion der Gallerte häufig ein größerer Hohlraum (LIESEGANG 1913a: 101). Die Pigmentarmut der Gallertmitte ermöglicht außerdem dort die Ausbildung größerer Quarzkristalle [8] (LIESEGANG 1914d: 20). In den pigmentierten Bändern wird die Kristallisation noch verhindert, während sie in den pigmentfreien Zonen zwischen diesen bereits stattfindet (LIESEGANG 1911a: 505; 1913a: 100). Ist die äußere Form des Gels schon so starr, daß seine Schrumpfung als Ganzes nicht mehr möglich ist, so tritt eine innere Schrumpfung auf; sie führt (neben der Bildung von Hohlräumen in Achatzentren) zur Porosität der Achate, der Ursache ihrer Färbbarkeit (LIESEGANG 1911a: 503; 1911/12: 566; 1913a: 101; 1914a: 189). Entsprechend führt LIESEGANG (1913a: 101; 1915b: 25) die Ausbildung und Orientierung der Chalcedonfasern auf Spannungen zurück, die bei dieser Innenschrumpfung entstehen. Die Chalcedonfasern bilden sich zunächst in den pigmentfreien Zonen, können sich aber mit der Zeit auch in die pigmentierten Lagen hinein fortsetzen und so mehrere Achatbänder durchziehen (LIESEGANG 1911a: 505; 1913a: 100).

Aus den dargestellten Prozessen ergibt sich nun folgendes Grundmuster für den Aufbau von Achaten:

Die gemeine Bänderung ist vom Kontakt zum Nebengestein aus ins Achatinnere fortschreitend ausgebildet und wird in der Regel im Achatzentrum von einer Grobquarzzone und einem Hohlraum gefolgt. Nun gibt es aber viele Achate, die diese schematische Reihenfolge nicht zeigen. So können z. B. große Quarzkristalle am Blasenrand sitzen und zur Mitte hin von Achat gefolgt werden, eine Abfolge ‚Achat→Grobquarz' kann mehrfach hintereinander auftreten u. ä. Zur Erklärung solcher Stücke muß LIESEGANG nun zu zusätzlichen Hypothesen greifen:

[8] Als zweite mögliche Begründung für das häufige Vorkommen großer Quarze im Zentrum der Achate gibt LIESEGANG (1910b: 596; 1911/12: 566; 1913a: 102; 1914a: 189) an, daß die Kristallisation des Kieselgels bereits während der Bildung rhythmischer Fällungen erfolgt. Da das Zentrum des Gels erst zuletzt von der Pigmentierung betroffen wurde, war hier zur Ausbildung größerer Kristalle am meisten Zeit.

Bei dieser Erklärung stehen aber die großen, zur Kristallisation von Kieselgel nötigen Zeiträume in keinem sinnvollen Verhältnis mehr zur vermutlichen Diffusionsgeschwindigkeit des hypothetischen Eisensalzes; ich gehe daher im Weiteren auf diese Deutung nicht näher ein.

Nach der Ausbildung der geordneten Pigmentverteilung in der Gallerte trat hier eine Schrumpfung der gesamten Masse ein. Es bildete sich so ein Hohlraum zwischen geschrumpftem Gel und Nebengestein. Hierin kann durch eine zweite SiO_2-Zufuhr und gegebenenfalls darauf folgende Eisendiffusion ein neuer Achat außerhalb des ersten entstehen (LIESEGANG 1911a: 500, 501; 1913a: 104; 1914a: 189; 1914b: 173; 1915b: 111).

Da die Pigmentverteilung im Achat für LIESEGANG eine entscheidende Rolle sowohl bei der Entstehung gebänderter Strukturen als auch bei der folgenden Kristallisation des Gels spielt, stellt die Deutung pigmentfreier Achate ein besonderes Problem für ihn dar. Neben einer nachträglichen Entfernung des Pigments aus dem fertigen Achat (LIESEGANG 1915b: 16, 30) hält LIESEGANG eine rhythmische Fällung farbloser Substanzen anstelle von Eisenhydroxid für denkbar (LIESEGANG 1915b: 16). Eine weitere Möglichkeit, die Entstehung von Schichtungen durch Austrocknungserscheinungen in Gelen, wird von LIESEGANG (1911a: 498; 1914a: 188) nur erwähnt, nicht aber im einzelnen auf die Frage der Achatgenese angewandt.

III.2.2. SiO_2-Akkumulation und „Infiltrationskanäle"

Achate entstehen nach LIESEGANG in der Regel bei niedrigen Temperaturen und Drücken. Der SiO_2-Transport erfolgt durch gewöhnliche wäßrige Lösungen (LIESEGANG 1915b: 2), SiO_2 und Eisensalze entstammen meist der Verwitterung von Gesteinen der näheren oder weiteren Umgebung (LIESEGANG 1913a: 97; 1915b: 2). Mögliche höhere Temperaturen sind für die Achatgenese unwesentlich. Das schließt aber nicht aus, daß im einen oder anderen Fall Thermen, postvulkanische Vorgänge o. ä. eine Rolle gespielt haben können (LIESEGANG 1913a: 97; 1915b: 2). So protestiert LIESEGANG (1918) auch nicht, als NACKEN (1917) seine Achattheorie vorstellt, in der die kritische Temperatur des Wassers eine große Rolle spielt (s. u.). Daß die magmatischen Prozesse der Entstehung der eruptiven Muttergesteine eine Rolle gespielt haben könnten, schließt er dagegen ausdrücklich aus (LIESEGANG 1915b: 2, 5). Überhaupt ist das Vorhandensein von Eruptivgesteinen nach seiner Achattheorie unwesentlich; sie sind nur als SiO_2-Lieferanten und Bildungsorte der Achate von Bedeutung (LIESEGANG 1915b: 2, 16). Da die Blasenräume der Eruptivgesteine häufig allseitig geschlossen sind, kommt als wesentlicher und hinreichender Prozeß für den SiO_2-Transport nur Diffusion durch kleinste wassererfüllte Poren in Frage (LIESEGANG 1913a: 78). Als Ursache für die SiO_2-Diffusion zum und SiO_2-Akkumulation im Blasenraum hält LIESEGANG (1913a: 73) z. B. die Druckdifferenz zwischen Blasenraum und Gesteinsinnerem und die entsprechende Differenz der SiO_2-Löslichkeit für möglich. Aber auch ein zweiter Vorgang ist von Bedeutung: Bekanntlich wächst die Löslichkeit eines Stoffes mit seinem Zerteilungsgrad. Nun ist in Gesteinshohlräumen im Gegensatz zum Gestein selbst die Ausbildung größerer Kristalle, d. h. eines stabileren Zustandes möglich. Der Gradient in der SiO_2-Konzentration, der sich hieraus ergibt, ermöglicht eine SiO_2-Diffusion vom Gestein zu seinen Hohlräumen hin (LIESEGANG 1913a: 71, 72). Für die Erklärung der gemeinen Bänderung ist es zwar nicht nötig, eine sukzessive Diffusion anzunehmen. Allerdings können durchaus in Einzelfällen mehrere SiO_2-Schübe stattgefunden haben, wie etwa die Verkittung von Trümmerachaten zeigt (LIESEGANG 1911a: 501; 1915b: 63, 111).

Die „Infiltrationskanäle" interpretiert LIESEGANG nun ebenfalls als durch Diffusionsprozesse entstandene Gebilde. die Pigmentarmut von Achatzentren wurde ja dadurch erklärt, daß einer der an der rhythmischen Fällung beteiligten Reaktionspartner von innen nach außen diffundiert (s. o.). Der gleiche Effekt einer fällungsfreien Zone kann auftreten, wenn die Diffusion von zwei nahe beisammen liegenden Zentren ausgeht (Abb. 34).

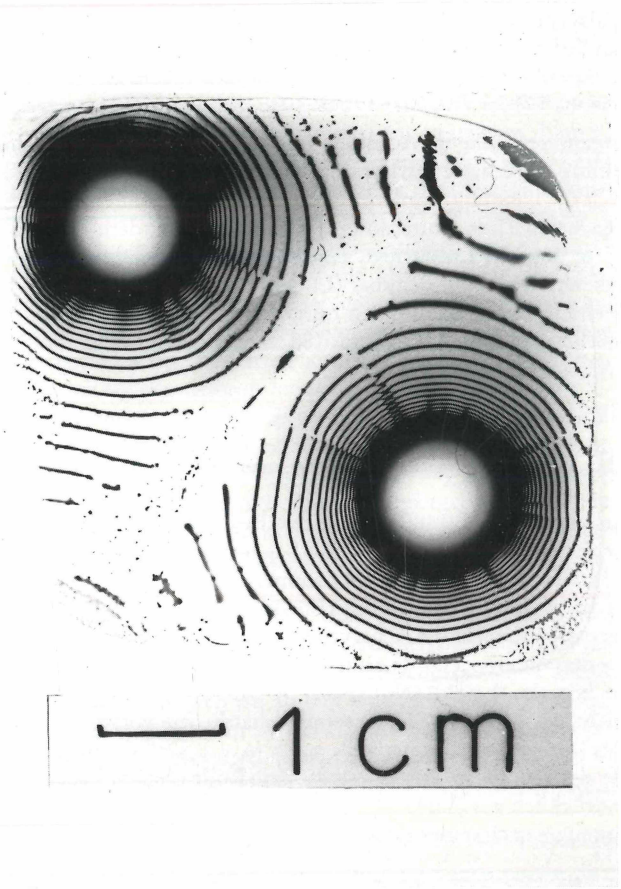


Abb. 34: Zwei Systeme LIESEGANG'scher Ringe (Silberchromatpräparat) stören sich an ihrem Kontakt; es entsteht eine weitgehend fällungsfreie Zone.

Diffundiert also an der Achatperipherie der von außen kommende Stoff von zwei Zentren aus, so kann eine pigmentfreie Zone vom Achatrand zur Mitte hin entstehen (LIESEGANG 1914a: 188). LIESEGANG gibt hierzu zwei Möglichkeiten an: Zum einen kann die Hohlraumwand an einer Stelle so geformt sein, daß zwei Wandabschnitte etwa parallel und dicht beisammen liegen (LIESEGANG 1913a: 102, 103, Fig. 8; 1915b: 19). Zum anderen kann ein Diffusionshindernis wie etwa ein größerer Kristall an der Achatperipherie liegen. Dann diffundiert das zudringende Salz dem Bereich hinter dem Hindernis von verschiedenen Seiten her entgegen. Diese Anordnung läßt sich in Diffusionsversuchen dadurch simulieren, daß man eine mit Silbernitratlösung gezogene Linie nicht ganz schließt (LIESEGANG 1915b: 19, Fig. 9) (Abb. 35). Die so entstehende Form der rhythmischen Fällungen hält LIESEGANG für „Infiltrationskanälen" ähnlich.

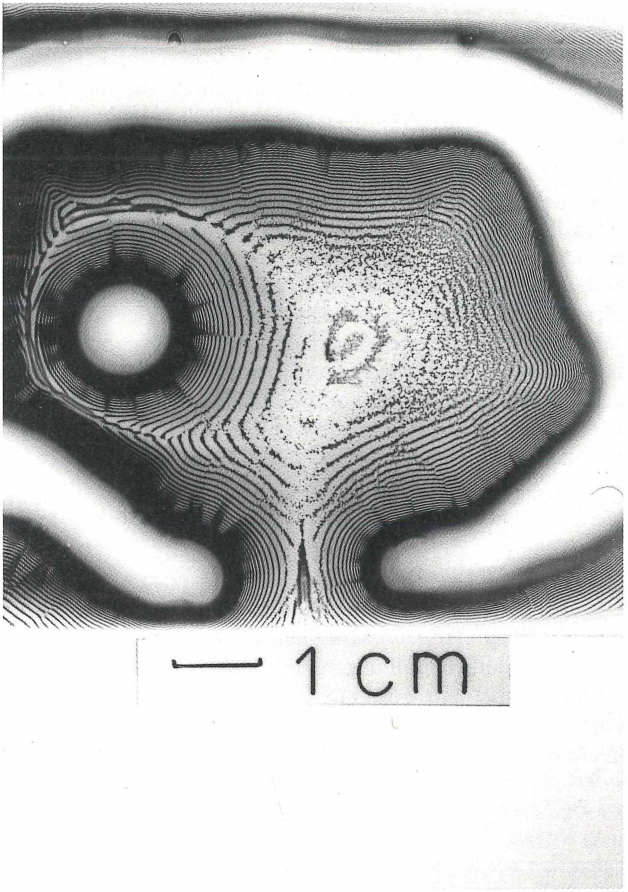


Abb. 35: Simulation eines Achats mit „Infiltrationskanal" nach LIESEGANG (Silberchromatpräparat).

III.2.3. Die Moosachat-Struktur

Zwischen den feineren Moosachat-Gebilden und groben röhrenförmigen Strukturen, die an Stalaktiten erinnern, besteht kein prinzipieller Unterschied. Beide zeigen einen röhrenförmigen Aufbau, wobei die Röhren in der Regel mit Eisenhydroxid o. ä. erfüllt sind (LIESEGANG 1913d: 129; 1915b: 63; 1930a: 107). Aber auch ihrer Größe nach stellen diese beiden Strukturen nur die Extrema einer kontinuierlichen Reihe dar (LIESEGANG 1914c: 241; 1915b: 74). Moosachat-Strukturen und große röhrenförmige Gebilde in Achaten haben daher gleiche Ursachen (LIESEGANG 1915b: 65). Sie erklären sich durch Vorgänge, die denen der Bildung sogenannter Silikatgewächse entsprechen (LIESEGANG 1915b: 65, 74; 1924: 50). Gibt man Körnchen von Salzen, deren Lösungen sauer reagieren, wie etwa $FeCl_3$, $FeSO_4$ o. ä. in Wasserglas, so reagieren sie sofort mit diesem und überziehen sich mit einer SiO_2-Haut. Zum Ausgleich der Konzentrationsverhältnisse auf beiden Seiten dieser Membran diffundiert nun H_2O durch die Membran zum Salzkorn (Osmose) und bildet eine Salzlösung. Der hierbei entstehende Druck innerhalb der

Membran steigt nun mit fortschreitender Osmose so stark an, daß die SiO_2-Membran an einer Stelle aufbricht und sich ein Strahl der Salzlösung in das Wasserglas ergießt. Dieser umgibt sich sofort wieder mit einer neuen SiO_2-Membran und der Prozeß beginnt von neuem. Auf diese Weise können Systeme verzweigter Röhrenbildungen entstehen (LIESEGANG 1914c: 242, 243; 1924: 50; 1930a: 108). Nimmt man Eisenchlorid als reagierendes Salz, so sind die Röhren mit Eisenchloridlösung erfüllt, in der sich mit fortschreitender Reaktion immer mehr Eisenhydroxid in kolloider Verteilung anreichert, bis das Eisenchlorid völlig aufgebraucht ist (LIESEGANG 1914c: 242). Als Endprodukt entsteht so ein System feiner, mit Eisenhydroxid erfüllter SiO_2-Röhrchen (LIESEGANG 1914c: 243). Diese Silikatgewächse ummanteln sich häufig gegen Ende ihrer Bildung konzentrisch-schalig mit mehreren SiO_2-Hüllen, weil die Reaktion von Metallsalz und Wasserglas in ihrer letzten Phase nur noch durch Diffusionsprozesse stattfinden kann, die zu einer SiO_2-Ausfällung an der Außenfläche der Silikatgewächse führen (LIESEGANG 1914c: 243; 1915b: 58; 1924: 50). Für die Orientierung der Silikatgewächse ist u. a. das Verhältnis der Dichten von Wasserglas und Salzlösung entscheidend; Silikatgewächse können sich entsprechend aufwärts, abwärts oder auch in relativ wirrer Orientierung bilden (LIESEGANG 1914c: 244; 1915b: 57).

Moosachate entstehen damit nach LIESEGANG durch die Ausbildung von Silikatgewächsen in Gesteinshohlräumen, die mit wasserglashaltigen wäßrigen Lösungen erfüllt sind (LIESEGANG 1914c: 243; 1915b: 56; 1931a: 152). Wichtig ist, daß hier kein präexistierendes Kieselgel am Anfang der Achatbildung steht (LIESEGANG 1914b: 171; 1914c: 243; 1915b: 56, 63; 1931b: 256). Moosachate haben also eine von Achaten mit vorwiegend gemeiner Bänderung (Kap. III.2.1.) abweichende Entwicklungsgeschichte. Es muß zunächst eine wasserglasähnliche Füllung vorhanden gewesen sein, zu der dann ein lösliches Eisensalz hinzutrat (LIESEGANG 1915b: 56, 111, 112). Hierbei ist etwa die Aktivierung einer vorher schon vorhandenen, unlöslichen Eisenverbindung denkbar (LIESEGANG 1915a: 60; 1915b: 111, 112). Die so entstandenen Silikatgewächse konnten später nochmals verändert werden. Dringt nämlich SiO_2 nach ihrer Ausbildung zu, so kann das Eisenhydroxid der Röhrenhohlräume durch SiO_2 ersetzt werden; solche SiO_2-Füllungen beobachtet man gelegentlich in Moosachaten (LIESEGANG 1915b: 63, 111). Einen schönen Beweis für den ehemals kolloiden Zustand der Moosachat-Strukturen stellen Stücke dar, bei denen die Röhrenwandungen aus Edelopal bestehen (LIESEGANG 1915a: 60).

Entstehen aber Moosachat-Strukturen nicht in Kieselgelen, so wird es fraglich, ob die in Moosachaten vorkommende gemeine Bänderung noch durch LIESEGANG'sche Ringe erklärbar ist. Für diese Fälle bietet sich eine andere Deutung an. Wie bereits erwähnt ummanteln sich Silikatgewächse häufig konzentrisch-schalig mit SiO_2. Diesen Vorgang macht LIESEGANG (1914c: 243; 1915b: 58) für die Ausbildung gemeiner Achatbänderungen in Moosachaten verantwortlich. Diese Bänderungen beruhen im Gegensatz zu LIESEGANG'schen Ringen auf Apposition, aber einer Apposition, die durch einen inneren Rhythmus geregelt wird (LIESEGANG 1931a: 147; 1943: 147). Die gallertigen SiO_2-Schalen kristallisieren dann zu Chalcedon, wobei die auftretenden Spannungen wieder eine große Rolle spielen (LIESEGANG 1930b: 872; 1931a: 150).

Die Idee, Moosachat-Strukturen durch Silikatgewächse zu erklären, äußerte vor LIESEGANG bereits P. J. GERGENS (1858), auf den sich LIESEGANG z. T. bezieht. Weniger beachtet wurde die Arbeit von I'ANSON & PANKHURST (1882), die eine entsprechende Deutung der Moosachate gibt. I'ANSON & PANKHURST (1882: 37) erklären darüber hinaus die gemeine Bänderung dadurch, daß sich eine wasserglasähnliche Lösung in einem Gesteinshohlraum befindet; tritt nun von allen Seiten durch das Gestein hindurch eine saure Lösung zu, so wird SiO_2 am Blasenrand in gebänderter Form gefällt. Werden diese gelatinösen SiO_2-Lagen nach außen verbogen, wenn die restliche Lösung aus der Blase entweicht, so entstehen „Infiltrationskanäle" (I'ANSON & PANKHURST 1882: 39).

Den Versuch aber, durch solche kolloidchemischen Erklärungen von Achatstrukturen eine ausgearbeitete Theorie zu entwickeln, unternahm erst LIESEGANG.

III.2.4. Die Membrantrümmer-Struktur

Die Membrantrümmer-Struktur hat eine der Moosachat-Struktur ähnliche Ursache. Fließt eine Eisenlösung in ein wasserglashaltiges Sol, so bilden sich größere, den Silikatgewächsen entsprechend aufgebaute rundliche Zellen aus (LIESEGANG 1912a: 66; 1914e: 276). Erhöht sich der Innendruck dieser Zellen durch Osmose, so zerreißen sie, der Riß heilt aber sofort durch eine neue Membranbildung aus, so daß sich die Zelle insgesamt vergrößert (LIESEGANG 1912a: 65). Gegen Ende ihres Wachstums kann die Zelle durch diesen osmotischen Druck in Bruchstücke zerbrechen, die dann nicht mehr verheilen; auch eine Zerstörung der Zellen durch leichte mechanische Beanspruchung ist denkbar (LIESEGANG 1912a: 66; 1914e: 276). Die so entstandenen Membrantrümmer wandern zu Boden, wenn die Blasenfüllung noch flüssig ist, oder bleiben etwa gleichmäßig im Blasenraum verteilt, wenn sie bereits gelatiniert ist (LIESEGANG 1914b: 172, 173; 1915b: 94). Letzte Konzentrationsdifferenzen zwischen Membrantrümmern und umgebendem Gel können nun durch die Ausbildung von LIESEGANG'schen Ringen zu einer gemeinen Achatbänderung um die Membrantrümmer herum führen (LIESEGANG 1912a: 67; 1915b: 93).

III.2.5. Die Uruguay-Struktur

Zur kolloidchemischen Erklärung der Uruguay-Struktur ergeben sich mehrere Möglichkeiten. Zunächst könnte sie durch einen Sedimentationsprozeß in einem Sol gedeutet werden. Diffundiert eine SiO_2-fällende Substanz, etwa ein Eisensalz, in ein SiO_2-Sol ein, so können in ihm gefällte SiO_2-Partikelchen absinken und am Gefäß- bzw. Blasenboden horizontale Lagen bilden (LIESEGANG 1911a: 506). Gelatiniert dann der Rest des Sols, so können sich im entstandenen Gel LIESEGANG'sche Ringe, d. h. gemeine Achatbänder ausbilden (LIESEGANG 1911a: 506). Achate, bei denen Schichten vom Uruguay-Typ innerhalb einer Zone gemeiner Achatbänderung auftreten, würden durch diesen Ansatz folgendermaßen erklärt: Zunächst bildet sich in einem Kieselgel vom Rand her eine gemeine Achatbänderung durch LIESEGANG'sche Ringe aus; durch einen Temperaturanstieg geht dann das Gel in seinem Zentrum in ein Sol über, in dem sich durch Sedimentation horizontale Lagen bilden (LIESEGANG 1911a: 506). Eine Stütze findet die Erklärung der Uruguay-Schichtung durch Sedimentation aus einem Sol darin, daß bei der Herstellung von Silikatgewächsen in Wasserglas gelegentlich horizontale Schichtungen um die Silikatgewächse herum beobachtet werden konnten (LIESEGANG 1915b: 79).

Eine zweite Erklärungsmöglichkeit der Uruguay-Struktur bietet die sogenannte LLOYD-Schichtung: Es sei eine wäßrige Lösung (z. B. von NaCl, Zucker, . . .) gegeben, in der die Konzentration der gelösten Substanz kontinuierlich von unten nach oben abnimmt. Erwärmt man nun diese Flüssigkeitssäule, so tritt eine horizontale Schichtung auf, die beim Abkühlen, aber auch bei zu starkem Erhitzen wieder verschwindet (LIESEGANG 1919: 184; 1931a: 151; 1941: 395; LLOYD 1916: 207). Die zuvor kontinuierliche vertikale Konzentrationsverteilung in der Flüssigkeitssäule wird durch die Temperaturänderung sprunghaft. Die unterschiedliche Konzentration in den Schichten zeigt sich etwa im Unterschied ihrer Brechungsindizes (LIESEGANG 1919: 184). Solche LLOYD-Schichtungen können auch auftreten, wenn eine Flüssigkeitssäule mit kontinuierlicher

vertikaler Konzentrationsänderung abgekühlt wird (LIESEGANG 1919: 184) [9]. Wichtig für die mögliche Bedeutung dieser Erscheinung für die Achatfrage ist, daß es gelungen ist, solche Schichtungen in Gelatinelösung durch plötzliches Abkühlen, d. h. durch ein Erstarren zum Gel, ‚einzufrieren' (LIESEGANG 1919: 185, 186; 1941: 395). Auch konnten LLOYD-Schichtungen in Wasserglas erzeugt werden (LIESEGANG 1915c: 15; 1919: 185; 1931a: 151). Für die Entstehung der Uruguay-Struktur gibt LIESEGANG (1919: 186, 188; 1931a: 152; 1941: 396) daher folgende Erklärung als möglich an: Eine heiße Wasserglaslösung erfüllt einen Hohlraum im Gestein. Die Konzentration eines in ihr gelösten Stoffes nimmt hier von unten nach oben hin ab. Durch eine Abkühlung der Lösung wird dieser Konzentrationsabfall sprunghaft, es bilden sich LLOYD-Schichten aus. Weiteres Abkühlen führt dadurch zur Konservierung dieser Schichtung, daß die Lösung zum Gel erstarrt.

LIESEGANG gibt noch eine weitere Möglichkeit der Bildung horizontaler Schichten in Achaten an, die aber nur für sehr spezielle Fälle in Frage kommt: Ist ein Gesteinshohlraum nicht vollständig mit Wasserglas erfüllt und bilden sich in ihm vom Boden bis zum Flüssigkeitsspiegel hin Silikatgewächse aus, so fließt die Metallsalzlösung dort aus. Es bilden sich dann dem Flüssigkeitsspiegel parallele horizontale Schichten von oben nach unten fortschreitend aus (LIESEGANG 1931a: 144, 145).

III.2.6. Zur Aufnahme der LIESEGANG'schen Achattheorie

Die LIESEGANG'sche Achattheorie fand bei vielen, z. T. namhaften Wissenschaftlern Zustimmung (ZSIGMONDY 1927: 95; OSTWALD 1944: 177; EITEL 1925: 121; BRAUNS 1911: 466; DINGER & JEBSEN-MARWEDEL 1958: 143; MARC 1913: 27; 1916: 119; KNOPF 1913: 804, 805; HIMMELBAUER 1913: 42; KNÖLL 1942; STÜRMER 1955).

Aufbauend auf die Ergebnisse von LIESEGANG versuchten BHATNAGAR & MATHUR (1922), Kieselgele durch Entwässerung bei schwachen Drücken und mäßigen Temperaturen so zu behandeln, daß sie die Festigkeit und Härte von Achaten erlangen. Dieser Versuch kann aber kaum als erfolgreich angesehen werden. So erreichte das Gel lediglich MOHS-Härten bis zu 5 und eine Dichte von nur 1,1 g/cm^3 (Chalcedon: $\approx$ 2,6 g/cm^3) (BHATNAGAR & MATHUR 1922: 369).

In der Folgezeit wurde speziell die Erklärung der Moosachat-Struktur durch Silikatgewächse gelegentlich vertreten (GOERG 1930; BROWN 1956; vgl. LEBEDEV 1967); in neueren Arbeiten (BALL & BURNS 1975: 149; GIBBONS 1978) wird auch wieder die Begründung der gemeinen Achatbänderung durch LIESEGANG'sche Ringe vorgebracht, allerdings ohne wesentlich Neues.

III.2.7. Diskussion

Vergleicht man die LIESEGANG'sche Achattheorie mit den älteren Theorien mit äußerem Rhythmus, so erkennt man in ihr einen ganz wesentlichen Fortschritt. Sie ermöglicht es erstmals, die Bildung von komplexen anorganischen Strukturen im Gestein durch relativ einfache Annahmen zu verstehen. War es für die älteren Theorien mit äußerem Rhythmus nötig, zum Verständnis einer komplexen Struktur wie der gemeinen Achatbänderung einen ebenso komplexen Prozeß in der Umgebung des sich bildenden Achats

[9] Wie bei der Behandlung der LIESEGANG'schen Ringe soll hier nicht auf die Erklärung dieses Phänomens selbst eingegangen werden, da es zur Diskussion der Achatfrage hinreichend ist zu wissen, daß und unter welchen Bedingungen solche Schichtungen auftreten können.

anzunehmen, so war hiermit wenig gewonnen; ein solch komplexer Prozeß im Gestein, der gerade den erstaunlich fein gegliederten Aufbau von Achaten zur Folge haben soll, ist als extrem unwahrscheinlich anzusehen.

Dagegen hat die LIESEGANG'sche Theorie den Vorzug, mit der Annahme einer relativ geringen Zahl äußerer Bedingungen, die erfüllt sein müssen, die Entstehung von geordneten Strukturen (durch LIESEGANG'sche Ringe) zu erklären. Mit dem Nachweis der Möglichkeit einer solchen Strukturbildung durch innere Rhythmen, die sich unter bestimmten einfachen äußeren Bedingungen selbständig ausbilden, lieferte LIESEGANG so – unabhängig von der Richtigkeit seiner speziellen Achattheorie – einen ganz wichtigen Beitrag zur Achatforschung.

Allerdings stehen der speziellen LIESEGANG'schen Achattheorie sofort einige wichtige Argumente entgegen. Achate sind gebänderte Chalcedonaggregate. Sie bestehen fast vollständig aus SiO_2. Dieses SiO_2 aber ist nach der LIESEGANG'schen Theorie an der eigentlichen Strukturbildung (LIESEGANG'sche Ringe) nicht beteiligt. Es wirkt in Form von Kieselgel lediglich als Trägersubstanz für Diffusionsvorgänge. Geht man wie LIESEGANG davon aus, daß die Hohlräume im Magmatit zunächst mit Kieselgel erfüllt waren, so müssen zur Ausbildung von Achatstrukturen darüber hinaus innerhalb und außerhalb des Gels aufeinanderzudiffundierende Reaktionspartner auftreten. LIESEGANG'sche Ringe bilden diese Reaktanden aber wiederum nur dann, wenn ganz bestimmte Konzentrationsverhältnisse vorliegen. Beim Modellversuch mit Kaliumbichromat und Silbernitrat etwa mußte eine sehr konzentrierte Silbernitratlösung in ein Gel diffundieren, das Kaliumbichromat nur in sehr niedriger Konzentration enthielt. Bei anderen Konzentrationen sind gleichmäßige Fällungen zu erwarten. Überträgt man diese Bedingungen auf die Natur, so wäre in Mandelsteinen nach LIESEGANGs Ansatz eigentlich folgendes zu erwarten: Vorausgesetzt seien mit Kieselgel erfüllte Hohlräume. Die Mehrzahl dieser Füllungen sollte zu SiO_2-Mandeln kristallisieren, ohne daß Fällungen oder besondere Strukturbildungen in ihnen auftreten. Einige Mandeln, bei denen zufällig geeignete Reaktionspartner außerhalb und innerhalb des Gels vorlagen, sollten Eisenhydroxid-Fällungen zeigen. Aber wiederum nur sehr wenige von diesen Mandeln sollten LIESEGANG'sche Ringe aufweisen, weil die Reaktionspartner gerade in den hierfür geeigneten Konzentrationen auftraten. Die Naturbeobachtung zeigt dagegen ganz andere Verhältnisse: Achatbildungen sind in Mandelsteinen, die SiO_2-Mandeln führen, sehr häufig, geradezu typisch. Gegen die LIESEGANG'sche Theorie ist damit zunächst einzuwenden, daß die Bildung von Achaten in Mandelsteinen nach ihr eine sehr seltene Erscheinung sein sollte, es aber tatsächlich nicht ist. Noch unwahrscheinlicher wird die LIESEGANG'sche Theorie, wenn man zur Erklärung der rhythmischen Fällungen Formkatalysatoren oder eine pseudomorphe Ablagerung von Eisenpigmenten nach anderen rhythmisch gefällten Substanzen (Kupferverbindungen o. ä.) einführt, wie es LIESEGANG für möglich hält (s. o.); hier muß jeweils noch eine weitere Bedingung, das Auftreten der entsprechenden Substanzen, erfüllt sein; die Ausbildung von gebänderten Strukturen wird damit aber weniger wahrscheinlich.

So hat die LIESEGANG'sche Theorie vor den älteren Theorien mit äußerem Rhythmus zwar den Vorzug, die Bänderung im Achat durch einen Prozeß zu erklären, dessen Auftreten viel wahrscheinlicher ist als das der Vorgänge der älteren Theorien. Eine wirklich befriedigende Lösung bietet sie aber deshalb nicht, weil die Ausbildung von LIESEGANG-schen Ringen im Gestein dennoch nur selten zu erwarten ist.

Daß seine Theorie in diesem Punkt eine Schwäche zeigt, scheint LIESEGANG selbst bemerkt zu haben. Er schreibt, insbesondere auch im Hinblick auf mehrfache Chalcedon-Quarz-Abfolgen, die er durch Synärese und erneute Lösungszufuhr zu erklären versucht (s. o.):

„Kommt wirklich immer erst die Kieselsäure und lagert sich als Gallerte ab, und kommt dann erst das Eisen? Und wiederholt sich diese Folge auch zweimal? Die Schwierigkeit wird nicht geringer, wenn man annimmt, die Kieselsäure habe das Eisensalz von vornherein schon enthalten, und dann sei Sauerstoff oder ein anderes lösliches Material zugetreten, welches das Eisensalz rhythmisch gefällt habe. Eine Betrachtung aus anderer Perspektive kann hier vielleicht eine Klärung anbahnen: Daß nur dann Achate entstehen, wenn eben das Eisen der Kieselsäure den Vortritt läßt.". . . „Ist diese Reihenfolge nicht vorhanden, so wird sich eben kein Achat bilden, sondern ein ungefärbter Opal, ein nicht gebänderter Jaspis, Quarz-, Amethyst- oder Zeolithfüllungen. Früher nahm man einen unzählige Male wiederholten Wechsel der Zufuhr von eisenfreier und eisenhaltiger Kieselsäurelösungen an und fand darin vielfach keine besondere Schwierigkeit. Hier wird eine ähnliche Aufeinanderfolge nur einmal und für sehr seltene Fälle zweimal verlangt." (LIESEGANG 1915b: 111, 112).

Die LIESEGANG'sche Bewertung dieser Problematik wäre sicher weniger günstig ausgefallen, hätte er nicht nur die nötige Reihenfolge des Zutritts von Lösungen bedacht, sondern ebenso deren mögliche Konzentrationen. Diese Schwierigkeit in der LIESEGANGschen Theorie beruht letztlich darauf, daß hier der innere Rhythmus bei der Achatbildung vom SiO_2 völlig unabhängig ist. Sie beruht auf der großen Rolle, die LIESEGANG dem Eisenpigment zuschreibt.

Diese Bewertung des Pigments bringt aber noch ein weiteres Problem mit sich. Sehr viele Achate zeigen eine gemeine Bänderung, ohne eine entsprechende Pigmentverteilung aufzuweisen. Um seine Theorie der Strukturbildung durch Pigmentdiffusion in diesen Fällen aufrecht zu erhalten, müßte LIESEGANG bei sehr vielen Achaten eine sekundäre

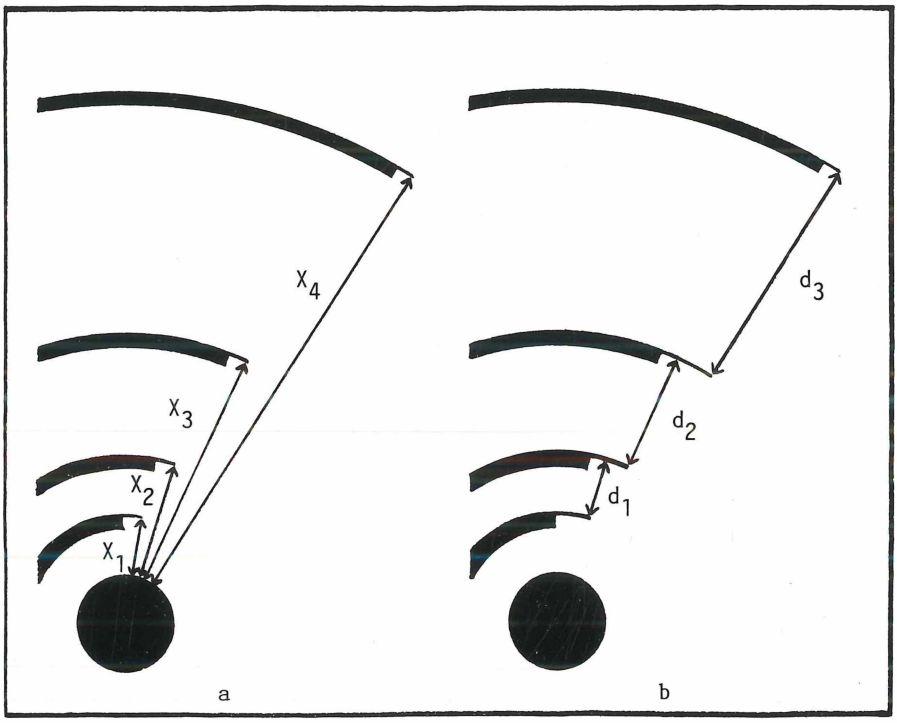


Abb. 36: Schemazeichnung zum Aufbau ungestört ausgebildeter LIESEGANG'scher Ringe.

Entfärbung annehmen. Diese ist wegen der großen Häufigkeit unpigmentierter Achate nicht sehr wahrscheinlich. Auch fehlen bei den meisten pigmentfreien Achaten Anzeichen für solche Entfärbungsprozesse. Als alternative Erklärungsmöglichkeiten hält LIESEGANG hier eine rhythmische Fällung farbloser Substanzen anstelle von Eisenhydroxid sowie eine Schichtbildung durch Austrocknungsprozesse für denkbar (s. o.). Allerdings fehlen für diese Möglichkeiten jegliche empirischen Anhaltspunkte.

Nach diesen allgemeineren Bemerkungen sollen im folgenden einzelne Punkte aus LIESEGANGs Achattheorie einer Prüfung unterzogen werden. Es liegt hierbei nahe, zunächst die Morphologie der Achate mit der Morphologie LIESEGANG'scher Ringe genauer zu vergleichen.

Eine erste wichtige Gesetzmäßigkeit in der Ausbildung rhythmischer Fällungen betrifft die Abstände aufeinanderfolgender Bänder. Die Abstände aufeinanderfolgender Bänder zur Basis der Diffusion (Grenzfläche des Gels) bilden eine geometrische Progression (Folge) mit K>1 (1). Daraus ergibt sich die gleiche Beziehung für die Abstände aufeinanderfolgender Bänder untereinander (2).

Es gilt:

$$\frac{X_{n+1}}{X_n} = K \quad ; \quad K>1 \tag{1}$$

Demnach auch:

$$\frac{X_{n+2}}{X_{n+1}} = K$$

Damit ist

$$\frac{X_{n+2} - X_{n+1}}{X_{n+1} - X_n} = \frac{X_{n+1} \cdot K - X_n \cdot K}{X_{n+1} - X_n} =$$

$$= \frac{K\,(X_{n+1} - X_n)}{X_{n+1} - X_n} = K$$

$$\frac{X_{n+2} - X_{n+1}}{X_{n+1} - X_n} = K \quad ; \quad K>1 \tag{2}$$

Diese Gesetzmäßigkeiten LIESEGANG'scher Ringe [10] wurden von JABŁCZYŃSKI und anderen Autoren beschrieben (JABŁCZYŃSKI 1923b; JABŁCZYŃSKI & KOBRYNER 1926; JABŁCZYŃSKI 1926; HEDGES 1932: 15; KURIEN, VAIDYAN & ITTYACHEN 1983).

Wir vereinfachen im folgenden die Nomenklatur gemäß Abb. 36 b. Es ergibt sich so für (2):

$$\frac{d_{n+1}}{d_n} = K \quad ; \quad K>1 \tag{3}$$

[10] Zu diesen Gesetzmäßigkeiten sind allerdings einige wenige Ausnahmen bekannt; in diesen Fällen nehmen die Abstände zwischen aufeinanderfolgenden Ringen ab (HEDGES 1932: 16). Systeme mit Reaktionspartnern, bei denen dies beobachtet wurde, sind aber ohne jegliche petrologische Bedeutung.

Zu einer ersten Prüfung der LIESEGANG'schen Achattheorie bietet es sich nun an, die Abstandsverhältnisse von Achatbändern mit denen LIESEGANG'scher Ringe zu vergleichen. Erste Messungen hierzu haben JABŁCZYŃSKI und KOBRYNER vorgenommen (JABŁCZYŃSKI 1926: 27, 28; JABŁCZYŃSKI & KOBRYNER 1926: 388). Eindeutige Ergebnisse haben diese Untersuchungen aber nicht erbracht: Die Abstände der Achatbänder (es wurden zwei Achate untersucht) entsprachen den angegebenen Gesetzmäßigkeiten LIESEGANG'scher Ringe zwar nicht genau, zeigten aber andererseits auch keine so großen Abweichungen von ihnen, daß eine Erklärung der gemeinen Achatbänderung durch rhythmische Fällungen hätte ausgeschlossen werden können. Damit lassen JABŁCZYŃSKI und KOBRYNER diese Frage offen (JABŁCZYŃSKI 1923a: 235; 1923b: 1602; 1926: 27, 28; JABŁCZYŃSKI & KOBRYNER 1926: 388). Um hier eine Entscheidung zu ermöglichen, versuchte ich, entsprechende Messungen an einer größeren Zahl von Achatdünnschliffen durchzuführen. Damit eine solche Messung aber überhaupt möglich und sinnvoll ist, muß eine Reihe von Voraussetzungen erfüllt sein.

(a) Zunächst muß die Pigmentverteilung im Achat zumindest im Groben dem in Abb. 36 angegebenen Schema entsprechen: Stärker pigmentierte Zonen müssen von unpigmentierten deutlich getrennt auftreten.

(b) Es muß gewährleistet sein, daß die Pigmentierung primär ist, d. h. daß keine sekundären natürlichen oder künstlichen Färbungen vorliegen.

(c) Auch Stücke mit sekundären natürlichen Entfärbungserscheinungen sind zur Messung ungeeignet.

Unter Berücksichtigung dieser Bedingungen waren von über fünfzig Schliffen gerade zwei für Messungen geeignet. Daß hier aber die meisten Achate schon der wichtigen Bedingung (a) nicht genügen, begründet bereits starke Zweifel an der LIESEGANG'schen Achattheorie: In den wenigsten Fällen ist das Eisenpigment der Achate in der Weise verteilt, die LIESEGANG für die ‚normale' hält.

Die Ergebnisse meiner Messungen an den beiden geeigneten Schliffen sind in Tab. 2 zusammengefaßt. Gemessen wurden d_n-Werte gemäß Abb. 36 b, wobei aber d_1 nicht der erste Abstand überhaupt, sondern der erste gut meßbare Abstand ist. Ersterer ließ sich in den untersuchten Stücken nicht mit Sicherheit bestimmen. Entsprechend war nicht Formel (1), sondern nur (3) auf die Dünnschliffe anwendbar. Da die Gesetze (1) bis (3) nur die Konstanz von Quotienten ausdrücken, war eine Messung in Skalenteilen (Okularmaßskala) sinnvoll und hinreichend.

Bei Schliff L.A. 62 (Fundpunkt 3) sind die Pigmente in größeren Körnchen ausgebildet und deutlich in Bändern angeordnet. In Schliff L.A. 26 (Fundpunkt 1) wurden dagegen Bänderungen von sehr fein verteiltem Pigment gemessen (vgl. Abb. 13).

Tabelle 2

Schliff L.A. 62			Schliff L.A. 26		
n	d_n [Skt]	K	n	d_n [Skt]	K
1	24		1	12	
2	14	0,6	2	10	0,8
3	16	1,1	3	9	0,9
4	9	0,6	4	9	1,0
5	9	1,0	5	10	1,1
6	9	1,0	6	9	0,9
7	14	1,6	7	7	0,8
8	10	0,7	8	5	0,7
9	23	2,3	9	5	1,0
10	9	0,4	10	4	0,8
11	8	0,9			
12	8	1,0		± 0,5	
13	9	1,1			
14	8	0,9			
15	12	1,5			
16	9	0,8			
17	7	0,8			
18	7	1,0			
	± 0,5				

Als Ergebnis läßt sich folgendes festhalten: Die Abstandsverhältnisse in Achaten mit deutlich pigmentierter gemeiner Bänderung entsprechen nicht den Gesetzmäßigkeiten LIESEGANG'scher Ringe: $\frac{d_{n+1}}{d_n}$ ist nicht konstant. Darüber hinaus ist dieser Quotient häufig kleiner als eins.

Hiermit ist die LIESEGANG'sche Achattheorie aber noch nicht widerlegt. LIESEGANG selbst hatte bemerkt, daß die Abstände in der gemeinen Bänderung von Achaten häufig nicht so gleichmäßig in einer Richtung anwachsen wie bei entsprechenden Diffusionspräparaten (LIESEGANG 1910b: 595; 1913a: 98). Es läßt sich aber zeigen, daß die Größe dieser Abstände in Diffusionspräparaten stark von der Temperatur, der Konzentration der eindiffundierenden Lösung u. a. abhängig ist. Ändert man diese Parameter während der Ausbildung der rhythmischen Fällungen, so treten auch hier deutliche Störungen in der Linienfolge auf (LIESEGANG 1913a: 98, 99). Eine entsprechende Erklärung schlägt LIESEGANG auch bei den Achaten vor: Variationen der Temperatur, der Zufuhr der fällenden Salzlösung o. ä. während der Ausbildung der Pigmentbänderung verursachen Unregelmäßigkeiten in den Abständen. Es tritt hier also bei LIESEGANG neben dem Prinzip der inneren Rhythmik doch wieder ein äußerer Rhythmus auf (LIESEGANG 1910b: 595, 596; 1911a: 507; 1913a: 98). Mit diesem Zugeständnis an die Bedeutung äußerer Rhythmen bei der Achatbildung wird die Entstehung von Achaten aber zu einem sehr unwahrscheinlichen Prozeß. Es muß nun eine zu große Anzahl von Bedingungen erfüllt sein:

Zunächst soll Kieselsäure vor einer Eisensalzlösung die Mandelräume erreichen. Dann muß ein zum Eisensalz passender Reaktionspartner im Gel vorliegen, wobei zudem bestimmte, zur Ausbildung rhythmischer Fällungen geeignete Konzentrationsverhält-

nisse erforderlich sind (s. o.). Mit LIESEGANGs Zugeständnis an die Bedeutung äußerer Rhythmen ist es aber dann noch notwendig, daß sich die Temperatur- und Konzentrationsverhältnisse während der Ausbildung der rhythmischen Fällungen sehr häufig verändern, ohne daß aber der Bereich, in dem noch rhythmische Fällungen auftreten können, verlassen wird. Wie unwahrscheinlich diese letzte Bedingung ist, zeigt sich, wenn man etwa die Messungen an Schliff L.A. 62 (Tab. 2) betrachtet: Für jede deutliche Veränderung von K müßte man nach LIESEGANG eine solche Temperatur- oder Konzentrationsänderung annehmen. Auch das Auftreten von K-Werten kleiner als eins ist nur durch solche Veränderungen verständlich. Somit müßten die Temperaturen und/oder Konzentrationen bei beiden gemessenen Schliffen einem ständigen äußeren Wechsel unterworfen gewesen sein. Damit aber werden die Voraussetzungen, die zur Entstehung der gemeinen Achatbänderung nach LIESEGANG erfüllt sein müßten, so zahlreich, daß die Entstehung von Achaten in der Natur sehr unwahrscheinlich und damit extrem selten sein sollte. LIESEGANGs Rückgriff auf äußere Rhythmen ist daher nicht geeignet, die Schwierigkeiten seiner Theorie im Hinblick auf die Gesetze (1) bzw. (3) zu beheben.

Es gibt aber noch weitere morphologische Differenzen zwischen LIESEGANG'schen Ringen und der gemeinen Achatbänderung:

(a) So bilden sich bei rhythmischen Fällungen kaum einmal scharfe Ecken in der Bänderung aus; auch runden sich etwas schärfere Konturen der ersten Bänder in den nachfolgenden Bändern zunehmend ab (vgl. Abb. 35, 37). Bei Achaten treten dagegen häufig scharfe Winkel in der gemeinen Bänderung auf; auch Abrundungserscheinungen in aufeinanderfolgenden Bändern fehlen bei Achaten, scharfe Konturen in der Bänderung tauchen in aufeinanderfolgenden Bändern in gleicher Schärfe auf (vgl. z. B. Abb. 1). Diese morphologische Differenz zwischen Achaten und LIESEGANG-

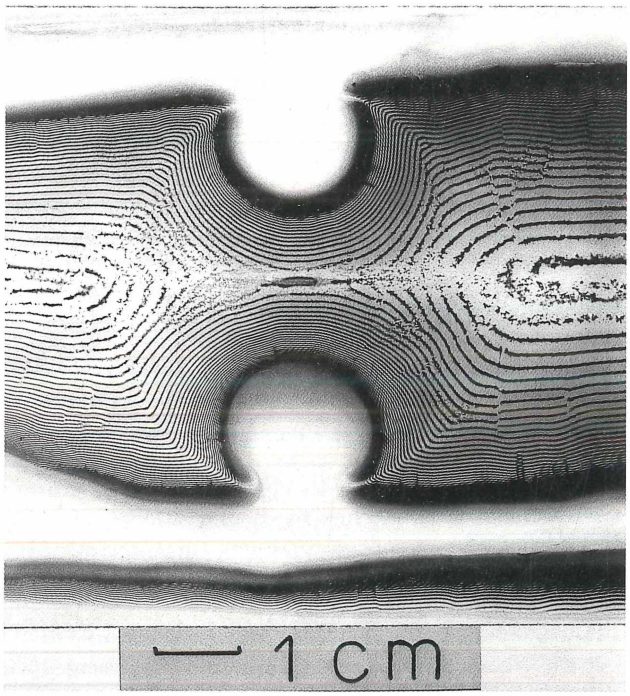


Abb. 37: Silberchromatpräparat.

schen Ringen bildet einen wichtigen Einwand gegen LIESEGANGs Achattheorie. Interessant ist, daß LIESEGANG (1921: 66; 1924: 70; 1926: 788; 1931a: 147, 148) selbst diesen Einwand vorbringt, ohne aber deshalb an seiner Theorie zu zweifeln. Dagegen sieht REIS (1916/17a: 29) in diesem unterschiedlichen Verhalten von Achaten und Diffusionspräparaten mit Recht eine Widerlegung der LIESEGANG'schen Position. Zwar versucht LIESEGANG (1921: 66; 1924: 70; 1931a: 148), seine Theorie durch die Annahme zu retten, die Pigmente könnten bei der Kristallisation des Gels nachträglich verschoben worden sein, so daß sich dann scharfe Winkel ausbilden; eine nähere Erläuterung dieses Prozesses, die erklären würde, warum die Kristallisation eine solche auffällige Pigmentverlagerung zur Folge haben sollte, fehlt aber.

(b) Bilden sich in Diffusionspräparaten LIESEGANG'sche Ringe von verschiedenen Zentren fortschreitend aus, so entstehen zwischen den Zentren Zonen, in denen entweder eine diffuse oder gar keine Fällung auftritt; auf jeden Fall ist der Verlauf der Linien in diesen Bereichen stark gestört (Abb. 34, 37). (Diesen Effekt hatte ja LIESEGANG zur Erklärung der „Infiltrationskanäle" herangezogen (s. o.)). Träfe nun die LIESEGANG-sche Achattheorie zu, so müßten sich an entsprechenden Stellen in Achaten ähnliche Störungen im Verlauf der Bänderung zeigen. Die Abbildungen 38 und 39 zeigen

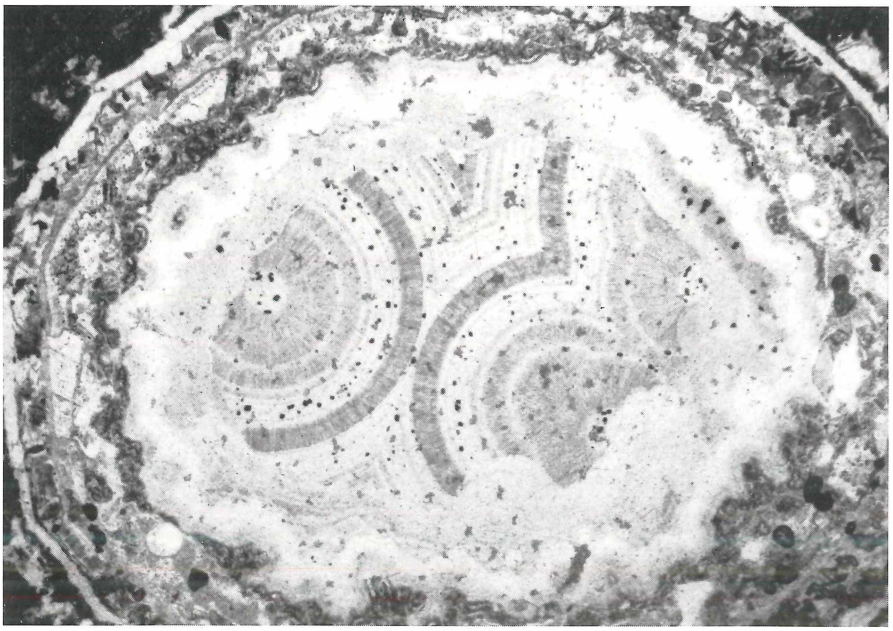


Abb. 38: Zur Achat-Morphologie an den Kontakten zweier Sphärolith-Systeme. Dünnschliffaufnahme (Achat von Fundpunkt 1). Größe des Bildausschnitts: ca. 3,0 x 2,1 mm.

solche Partien in Achaten, die nach LIESEGANG durch Diffusion von wenigen Zentren aus zu erklären wären. Störungen am Kontakt der Liniensysteme fehlen hier aber. Auch in diesem Detail zeigt sich also eine morphologische Differenz zwischen LIESEGANG-Ringen und Achaten.



Abb. 39: Sphärolith-Kontakte im Achat (Fundpunkt 1). Abstand der beiden linken Sphärolithzentren: ca. 4 mm.

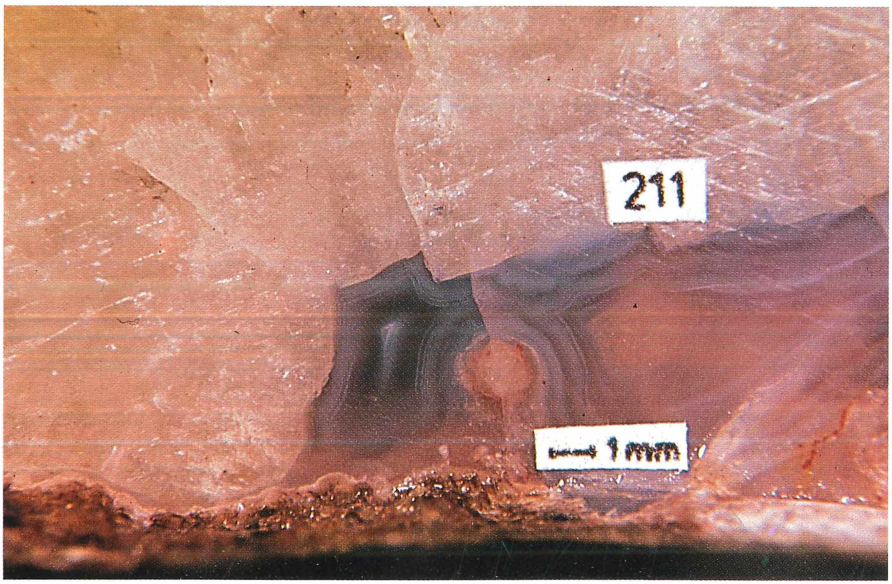


Abb. 40: Achat-Morphologie folgt den Konturen älterer Calcitkristalle (Fundpunkt 4).

(c) Eine weitere Differenz wurde von LIESEGANG (1914e: 268–270; 1915b: 94, 95) selbst entdeckt, aber wiederum nicht als ernstes Argument gegen seine Theorie aufgefaßt: In Diffusionspräparaten treten häufig Störungen in den Linien auf, die sich in Achaten so nicht finden: Die Bänder sind an vielen Stellen unterbrochen und bilden so unzusammenhängende Einzellinien. Solche Störungen können in aufeinanderfolgenden Bändern auftauchen; sie bilden dann eine Störungslinie senkrecht zur Bänderung, an der die Bänder gegeneinander versetzt ausgebildet sind; man hat so fälschlicherweise den Eindruck zerbrochener Bänderungen („Pseudoklase"). Auch können sich einzelne Linien in zwei etwa parallel verlaufende Bänder aufteilen; LIESEGANG nennt sie – botanischen und medizinischen Begriffen entsprechend – „Anastomosen". Beispiele für all diese Erscheinungen finden sich in den Abbildungen 32, 33, 35 und 37. Dagegen sind mir bei meinen Untersuchungen an Achaten entsprechende Erscheinungen nicht vorgekommen. Während sie also bei rhythmischen Fällungen geradezu typisch sind, sind sie bei Achaten zumindest extrem selten [11].

(d) Schließlich weist PILIPENKO (1934: 298) mit Recht darauf hin, daß die Pigmente in ein und demselben Achat sehr verschiedenartig ausgebildet sein können, während die LIESEGANG'sche Theorie eine einheitliche Ausbildung erfordern würde.

Auch die kausale Beziehung zwischen der Verteilung der Pigmente und dem Kristallwachstum in Achaten, die LIESEGANG in seiner Theorie vertritt, muß einer Kritik unterworfen werden. Ist seine These von der Schutzkolloidwirkung der Pigmente auf die Kristallisation des SiO_2 mit dem morphologischen Befund in Achaten vereinbar? Die Beobachtung im Dünnschliff zeigt, daß dies keineswegs der Fall ist. Nach LIESEGANG sollte die Kristallisation in den pigmentfreien Bereichen zwischen den Pigmentbändern beginnen; in den pigmentierten Zonen sollte die Kristallisation verzögert werden und nur sehr kleine Kriställchen sollten zur Ausbildung kommen können. Es müßte die kristalline Ausbildung des SiO_2 (und damit die Ausbildung der Phänofasern) im Achat an Grenzlinien zwischen pigmentierten und unpigmentierten Bändern in gesetzmäßiger Weise eine sprunghafte Veränderung aufweisen.

Zwar erübrigt sich im Grunde genommen eine detaillierte Diskussion der These von der Schutzkolloidwirkung der Pigmente als einem strukturbildenden Vorgang bei der Entstehung von Achaten schon deshalb, weil ihre Grundlage, der Aufbau von Achaten gemäß Abb. 36, bei den meisten Achaten gar nicht gegeben ist. Da die Beziehung zwischen Pigmenten und Phänofasern im Achat aber auch unabhängig hiervon von Interesse ist, möchte ich doch etwas näher auf diese Frage eingehen.

Betrachten wir zunächst die beiden Schliffe (L.A.26, L.A.62), die der LIESEGANG-schen Theorie zumindest insoweit entsprechen, als das in Abb. 36 dargestellte Schema wenigstens im Groben anwendbar ist (d.h.: Bänder mit und ohne primärem Pigment wechseln sich regelmäßig ab), so läßt sich in beiden Fällen folgendes feststellen:

Es zeigt sich keine Differenz in der Ausbildung der Phänofasern in pigmentierten und unpigmentierten Zonen. Die Phänofasern durchlaufen diese Zonen, ohne von der Pigmentierung beeinflußt zu werden. Grenzen zwischen pigmentierten und unpigmentierten Zonen sind nicht zugleich Grenzen in der Ausbildung des Faserbaus. Die Faserbildung beginnt nicht zwischen den pigmentierten Zonen, sondern im Sphärolithzentrum, von wo aus sie sich radial nach außen fortsetzt.

[11] Lediglich aus wissenschaftstheoretischen Gründen möchte ich hier auf die Aussage, es könne derartiges in der gemeinen Achatbänderung nicht auftreten, verzichten. Auch LIESEGANG (1914e: 269, 270; 1915b: 95) kann nur auf einen einzigen Fall hinweisen, bei dem er an einem „Jaspis" vom Isteiner Klotz solche Erscheinungen beobachten konnte. Bei den „Jaspisknollen" vom Isteiner Klotz handelt es sich aber gar nicht um Achatbildungen; ihr Erscheinungsbild im Dünnschliff (KABELAC 1955: 41) weicht von dem der Achate vollkommen ab.

Es kommt zwar gelegentlich in Achaten vor, daß Zonen mit Feinpigment [12] auch eine feinere Ausbildung der Phänofasern aufweisen als die umgebenden unpigmentierten Bereiche. Eine kausale Beziehung läßt sich hier aber keineswegs behaupten, denn häufig tritt eine entsprechende Variation in der Ausbildung der Phänofasern ohne entsprechende Pigmentverteilung auf. Ebenso lassen sich gelegentlich pigmentierte (Feinpigment) Achatbänder finden, in denen die Phänofasern sogar gröber ausgebildet sind als in den angrenzenden unpigmentierten Bändern. In den meisten Fällen beobachtet man aber, daß die Phänofasern pigmentierte und unpigmentierte Zonen völlig ungestört durchziehen. Bei grober Pigmentierung habe ich bisher sogar ausschließlich dieses neutrale Verhältnis von Pigment und Faserbau beobachtet. Ein Beispiel hierzu geben die Abbildungen 41 und 42. Es zeigt sich hier (wie in der überwiegenden Mehrzahl der untersuchten Dünnschliffe) zugleich, daß die gemeine Achatbänderung überhaupt nicht von der Anwesenheit von Pigmenten abhängig ist: Durch die gute Erhaltung der Pigmentpartikel ist gewährleistet, daß es in diesem Achat zu keiner Entfärbung gekommen ist, die Pigmentverteilung also etwa im ursprünglichen Zustand vorliegt. Während ohne gekreuzte Nicols (Abb. 41) von der gemeinen Achatbänderung kaum eine Andeutung zu erkennen ist, tritt diese bei +N mitsamt der entsprechenden Sphärolithstruktur hervor (Abb. 42). Daß die primäre Pigmentverteilung in diesem Stück nicht die Ursache der gemeinen Bänderung sein kann, ist damit offenkundig. Umgekehrt hat aber die gemeine Achatbänderung einigen Einfluß auf die Form bzw. Orientierung der Pigmentpartikel. In Abb. 43 werden diese Verhältnisse nochmals deutlich; Faserbau und gemeine Achatbänderung werden von den Pigmentpartikeln in keiner Weise beeinflußt.

Zusammenfassend läßt sich feststellen: In Achaten sind Grenzen zwischen pigmentierten und unpigmentierten Zonen nicht in gesetzmäßiger Weise zugleich Grenzen in der Ausbildung der Phänofasern. Die Faserbildung beginnt nicht zwischen den pigmentierten Zonen; die Sphärolithe entwickeln sich vielmehr vom Zentrum aus radial nach außen fortschreitend. Die Korrelation von Pigment und gemeiner Bänderung, die nach LIESEGANGs Theorie in Achaten zu erwarten wäre, wird durch die Naturbeobachtung nicht bestätigt. LIESEGANGs These von der Schutzkolloidwirkung der Eisenpigmente gegen die Kristallisation des SiO_2 darf so als widerlegt gelten. Die Pigmentverteilung spielt nicht die zentrale Rolle bei der Strukturbildung (gemeine Bänderung) in Achaten, die LIESEGANG ihr zuschreibt.

Die Resultate meiner Untersuchungen zum Verhältnis zwischen Pigmentierung und Ausbildung der Phänofasern stehen im Einklang mit den Beobachtungen von HEIN (1908: 210, 224, 225), PILIPENKO (1934: 298) und REIS (1918/19: 53).

Ein weiteres wichtiges Argument gegen LIESEGANGs Theorie wurde von BÖGGILD (1913: 622), REIS (1918/19: 75) und REIS & HEIM (1924: 465) vorgebracht: In vielen Fällen findet man Achat, der ganz offensichtlich ältere große Kristalle (Quarz, Calcit) ummantelt. Die LIESEGANG'sche Theorie müßte hier eine starke Diffusion durch den Kristall hindurch annehmen, was aber unmöglich ist. Beispiele für solche Achatbildungen über eindeutig älteren Kristallen geben die Abbildungen 44, 45 und 40. LIESEGANGs ad-hoc-Erklärung zur Rettung seiner Theorie ist nicht diskutabel: Das SiO_2 der Quarzkristalle soll während der Ausbildung der Bänderung in gallertiger Form vorgelegen haben; durch die Ausbildung der Kristalle sollen die Pigmentlagen dann nachträglich entsprechend gefaltet worden sein (LIESEGANG 1915b: 112, 113).

[12] „Feinpigment" nenne ich (im Gegensatz zum groben Pigment) ein Pigment, das sich im Lichtmikroskop nicht in einzelne Pigmentpartikel auflösen läßt.

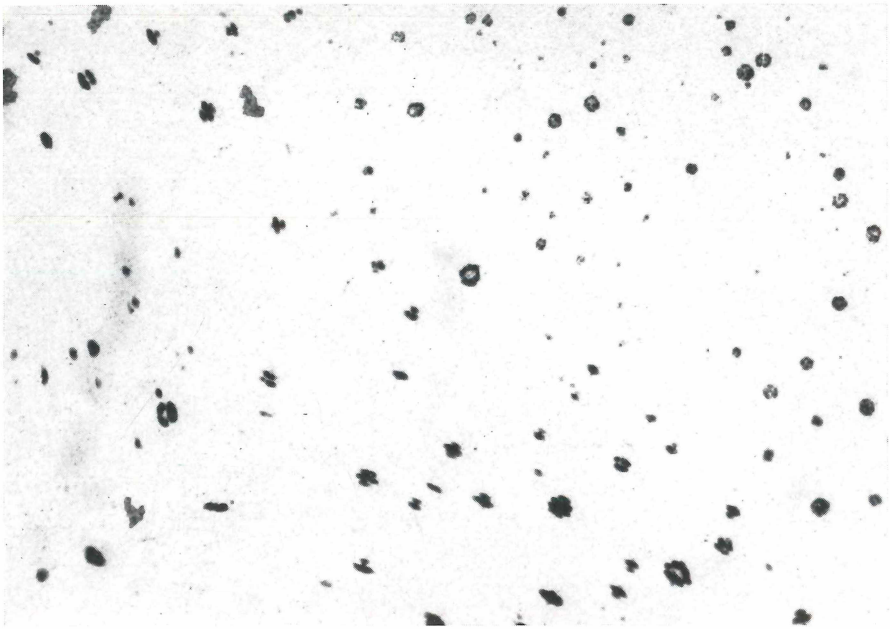


Abb. 41: Verteilung von Pigmentkörnern in einem Achat (Dünnschliffaufnahme) (Fundpunkt 2). Größe des Bildausschnitts: ca. 3,0 x 2,1 mm.

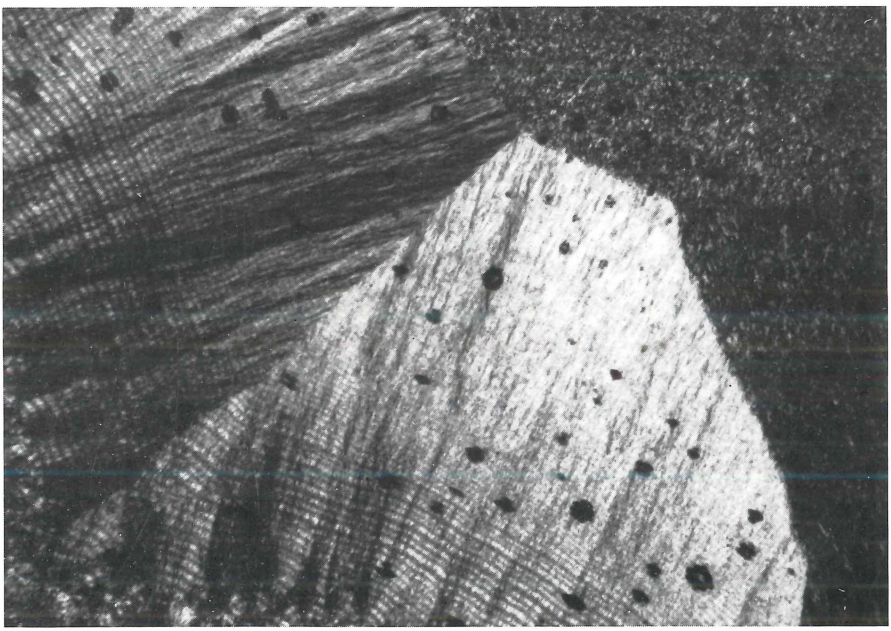


Abb. 42: Wie Abb. 41; + N.

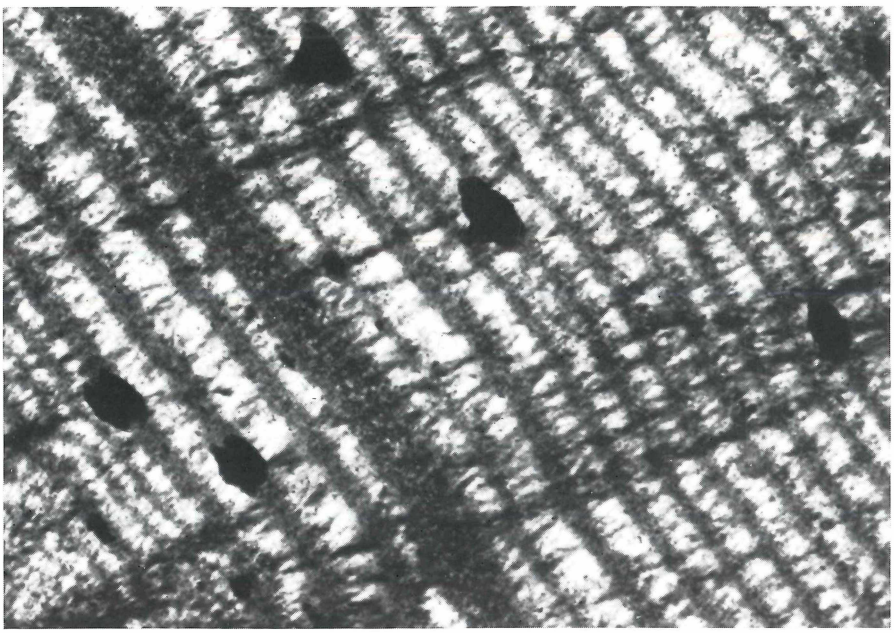


Abb. 43: Dünnschliffaufnahme (Fundpunkt 2); gleiche Achatprobe wie in Abb. 41 und 42; + N. Größe des Bildausschnitts: ca. 0,78 x 0,54 mm.

Durch all diese Detailuntersuchungen ist nun eindeutig bewiesen, daß die gemeine Achatbänderung nicht auf der Bildung LIESEGANG'scher Ringe beruht. Dennoch fehlt bisher ein schlagender Beweis, der diesen Tatbestand unmittelbar und ohne größere theoretische Diskussionen direkt augenfällig macht. Fände man etwa in einem Achat tatsächlich eine deutlich gebänderte Verteilung von primärem Pigment, die aber nicht der gemeinen Achatbänderung entsprechend verläuft, so wäre dieser Beweis erbracht. Das ist mir nun erstmals gelungen: An einem Achatbruchstück fanden sich zwei unabhängige Bereiche, in denen primäre [13] gebänderte Pigmentierungen schief (Abb. 46) bzw. etwa senkrecht (Abb. 47) zur gemeinen Bänderung ausgebildet sind. Sehr wahrscheinlich handelt es sich bei diesen gebänderten Pigmentierungen um echte LIESEGANG'sche Ringe. Hierfür sprechen folgende Beobachtungen:

(a) Die Pigmentbänderung ist sehr gleichmäßig ausgebildet; damit ist die Konstanz von K (Gleichung (3)) erfüllt. Der Wert von K liegt sehr nahe bei 1.

[13] Es könnte hier zunächst ein Bedenken aufkommen: Da die Vorgeschichte der beschriebenen Probe nicht näher bekannt ist, könnte es sich bei den Pigmentbändern ja auch um irgendwelche sekundären, vielleicht künstlichen Färbungen handeln, zumal es LIESEGANG (1915b: 51, 52) gelungen ist, in einem stark verwitterten und damit sehr porösen Achatbruchstück künstliche schwarze LIESEGANG-Ringe mittels Silbernitrat und Eisensulfat zu erzeugen, die der zufälligen Oberfläche des Bruchstücks parallel verliefen. Ein derartiger Effekt scheidet aber bei unserem Stück aus: Weder ist der Achat stark verwittert und damit besonders porös noch laufen die Pigmentbänder irgendwelchen Bruchoberflächen, Rissen o. ä. parallel. Vor allem aber unterscheidet sich das Pigment sehr deutlich von künstlichen Eisenoxidfärbungen in Achaten; es entspricht vielmehr in seiner ganzen Ausbildung den primären natürlichen Eisenoxidpigmenten der Achate. Es liegt so mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit hier eine primäre Pigmentverteilung vor.



Abb. 44: Achat-Morphologie folgt den Konturen älterer Quarzkristalle. Dünnschliffaufnahme (Fundpunkt 5). Größe des Bildausschnitts: ca. 3,0 x 2,1 mm.

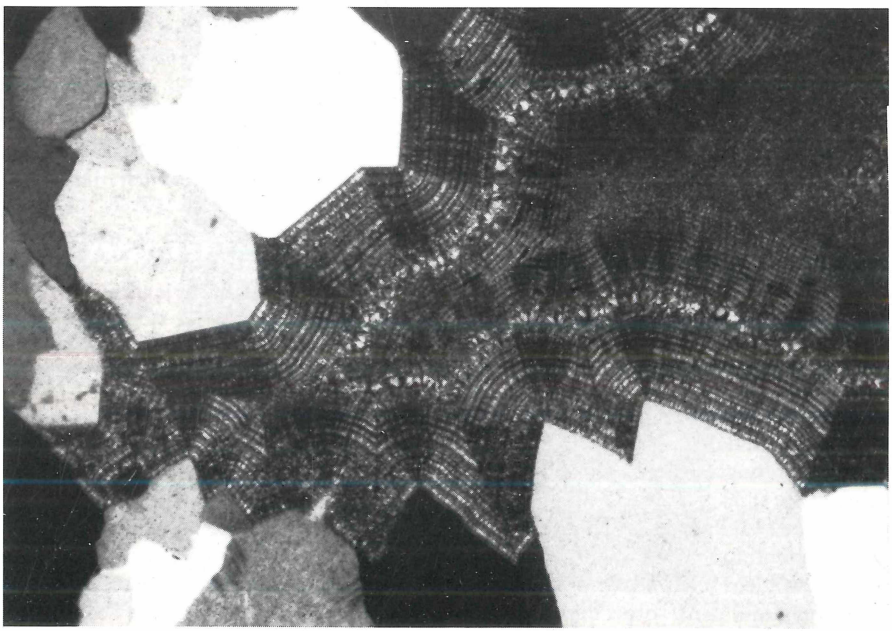


Abb. 45: Wie Abb. 44; + N.

(b) Im unteren Bereich von Abb. 47 sind Anastomosen, wie sie für LIESEGANG-Ringe typisch sind (s. o.), zweimal ausgebildet.
(c) Häufig bestehen bei rhythmischen Fällungen die Bänder selbst aus einer großen Zahl kleinerer Pigmentpartikel, während in den „fällungsfreien" Zonen dazwischen eine kleine Zahl großer Pigmentpartikel auftaucht (HEDGES 1932: 15). Genau dies findet sich auch in unserer Achatprobe.

Mit der Beobachtung des diskordanten Verlaufs von LIESEGANG-Ringen und gemeiner Bänderung im Achat dürfte die LIESEGANG'sche These, die gemeine Achatbänderung beruhe auf der Ausbildung rhythmischer Pigmentfällungen, endgültig widerlegt sein. Es muß ein anderer Prozeß die Entstehung der gemeinen Achatbänderung verursachen. In Kap. III.1.5. (S. 26) wurde darauf hingewiesen, daß eine unmittelbare Korrelation besteht zwischen der Ausbildung der gemeinen Achatbänderung und der der Sphärolithe im Achat. Es wurde nun gezeigt, daß eine Erklärung der Sphärolithe durch ältere Pigmentbänderungen (LIESEGANG-Ringe) nicht möglich ist. Ebensowenig ist die gemeine Achatbänderung durch äußere Rhythmen verständlich. So bleibt nur die Möglichkeit, die Ursache der gemeinen Bänderung in der Entwicklung der Sphärolithe selbst zu suchen. Nach den bisherigen Untersuchungen kann hierzu mit Recht vermutet werden, daß bei dieser Entwicklung innere Rhythmen eine wesentliche Rolle spielen müssen. Die Abbildungen 17 und 18, in denen komplexe Sphärolithbildungen zu sehen sind, die einen ihnen entsprechenden Lagenbau zur Folge haben, machen die Priorität der Sphärolithbildung, d. h. ihre strukturbestimmende Funktion für die gemeine Bänderung besonders deutlich (vgl. auch Abb. 19, 20). Die gemeine Bänderung in Achaten ergibt sich im wesentlichen als Resultat der Bildung von Sphärolithen, die sich in Konkurrenz zueinander ausbilden. Allein hierdurch ist verständlich, daß sich scharfe Winkel in der gemeinen Bänderung über größere Bereiche hinweg durchhalten (z. B. Abb. 1, 18, 39) – eine Tatsache, an der alle bisher besprochenen Theorien gescheitert waren (s. o.). Solche Winkel treten jeweils an den Kontakten zwischen Sphärolithen auf, an denen sie sich gegenseitig in ihrer weiteren Ausbildung einschränken. Von morphologischer Wichtigkeit ist außerdem der Neuansatz von Sphärolithen, wie ihn die Abbildungen 17, 18, 19, 20 zeigen. Inwieweit darüber hinaus gelegentlich Appositionen einzelner Schichten eine Rolle spielen können, soll hier noch nicht entschieden werden.

Der Vollständigkeit halber seien im folgenden noch LIESEGANGs Erklärung der „Infiltrationskanäle" sowie seine Theorie der Uruguay-Struktur behandelt. Daß seine Theorie der „Infiltrationskanäle" problematisch ist, hatte LIESEGANG (1915b: 107, 108) selbst bemerkt, ohne seine Theorie deshalb aber in Frage zu stellen. Dies ist insofern verwunderlich, als die ‚Nachahmungen' der „Infiltrationskanäle" durch LIESEGANG-Ringe wirklich nur eine sehr vage Ähnlichkeit mit den natürlichen Vorbildern aufweisen (vgl. Abb. 35). Da LIESEGANGs Erklärung der „Infiltrationskanäle" mit der Widerlegung der strukturbestimmenden Funktion der LIESEGANG-Ringe fällt, kann hier auf eine nähere Diskussion verzichtet werden.

Anders verhält es sich bei seiner Erklärung der Uruguay-Bänderung durch LLOYD-Schichtungen, da hier ein ganz neues, von LIESEGANG-Ringen unabhängiges Prinzip der Strukturbildung vorgebracht wird. Dennoch dürften LLOYD-Schichtungen in Achaten keine Rolle spielen. Ihre Ausbildung ist an sehr spezielle Bedingungen geknüpft, die bei petrologischen Prozessen kaum erfüllt werden können. Warum sollte sich in einem Gesteinshohlraum eine Lösung mit einem Konzentrationsgradienten von unten nach oben ausbilden? Insbesondere aber der nötige, sehr rasche Temperatursturz, der die Schichtung und dann sofort deren Fixierung (durch Übergang ins Gel) zur Folge haben soll, kann sich in Gesteinshohlräumen nicht abgespielt haben; Gesteine sind hierfür viel zu gute Wärmespeicher.

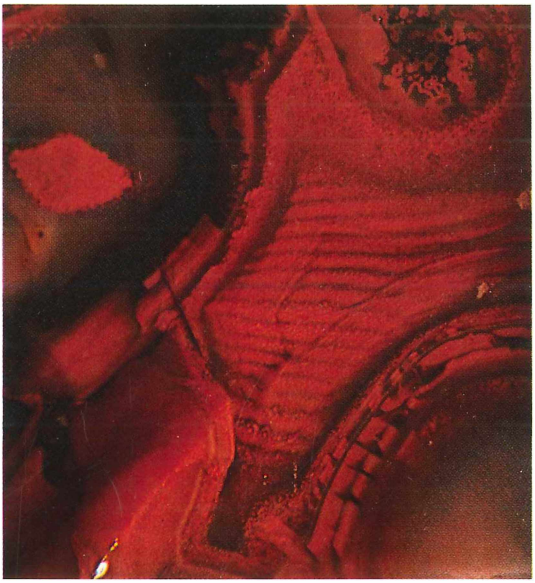


Abb. 46: Achat (o. F.) mit rhythmischer Pigmentbänderung unabhängig von der gemeinen Bänderung. 4 mm

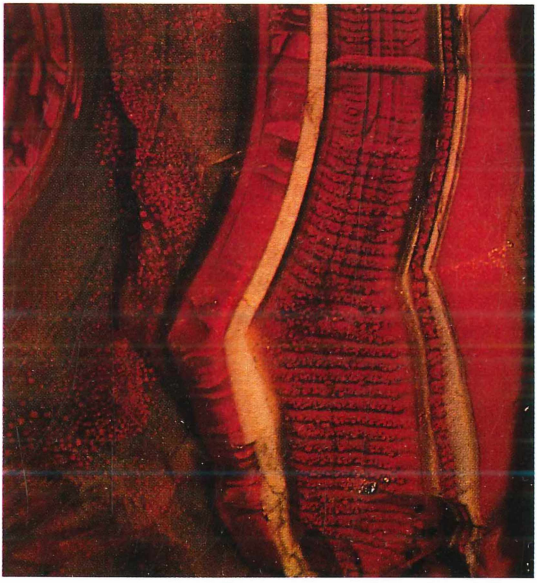


Abb. 47: Achat (o. F.; gleiche Probe wie in Abb. 46) mit rhythmischer Pigmentbänderung unabhängig von der gemeinen Bänderung. 4 mm

Schließlich ist die LIESEGANG'sche Theorie auch in der Frage der SiO_2-Akkumulation nicht ganz zufriedenstellend. LIESEGANG geht bei seiner Argumentation in der Regel von einem mit Kieselgel erfüllten Gesteinshohlraum aus. Nach der Ausbildung der Bänder im Gel soll dieses dann kristallisieren. Hier hat FISCHER (1954: 375) natürlich Recht, wenn er betont, daß eine mit Kieselgel erfüllte Mandel nicht zur Erklärung einer mit Achat erfüllten Mandel ausreicht. Der Gehalt des Gels an SiO_2 ist hierzu viel zu gering. Aus dem gleichen Grund ist LIESEGANGs Erklärung der Porosität von Achaten durch Innenschrumpfung nicht genügend: Achate, insbesondere solche ohne großen Hohlraum im Zentrum, müßten nach dieser Erklärung bei einmaliger Füllung des Hohlraums extrem poröse Gebilde sein.

Abschließend muß betont werden, daß von der Widerlegung der LIESEGANG'schen Achattheorie LIESEGANGs Erklärung der Moosachat-Strukturen nicht betroffen ist. Sie ist von der Erklärung der gemeinen Bänderung durch rhythmische Fällungen unabhängig. Dies gilt auch von LIESEGANGs zweiter Theorie der gemeinen Bänderung, die er im Zusammenhang mit seiner Moosachat-Theorie entwickelt (Kap. III.2.3.), sowie von seiner Deutung der Membrantrümmer-Struktur und schließlich auch von der Möglichkeit, die Uruguay-Struktur durch Sedimentationsprozesse im weitesten Sinne zu erklären. Diese Elemente der LIESEGANG'schen Theorie werden in einem späteren Kapitel (IV) behandelt.

III.3. Theorien der vulkanisch/postvulkanischen Achatbildung

Achate treten sehr häufig in Vulkaniten auf. Trotz dieser auffälligen Korrelation hatte LIESEGANG eine enge Beziehung zwischen der Genese der Vulkanite und der der Achate in ihnen nicht gesehen. Eine ganze Reihe von Autoren aber ist hier anderer Ansicht. Sie behaupten, die Entstehung der Achate sei an vulkanische oder postvulkanische Prozesse gebunden. Durch solche Prozesse sollen Hohlräume in Vulkaniten unter Ausbildung aller Achatstrukturen sukzessiv mit SiO_2 erfüllt worden sein.

III.3.1. Theorie von REIS und FISCHER

Die Theorie von REIS und FISCHER stützt sich im Gegensatz zur LIESEGANG'schen Theorie vornehmlich wieder auf äußere Rhythmen. Der Achataufbau wird mit Schwankungen der vulkanischen Aktivität korreliert und durch diese erklärt. Der Temperaturbereich, in dem sich die Achatgenese abspielt, wird hierbei sehr weit gefaßt (FISCHER 1954: 383); REIS und FISCHER geben drei Stadien der Achatbildung an, die drei Generationen von Mineralabsätzen im Achat zur Folge haben sollen:

1. Stadium: Die erste Generation umfaßt alle Mineralabsätze, die sich bei der Abkühlung der Lava aus deren eigenem Gasgehalt abscheiden. Die Bildung dieser Mineralabscheidungen beginnt bereits unmittelbar nach der Entstehung der Blasen in der ausgeflossenen Lava; zu diesem Zeitpunkt ist die Lava noch beweglich, befindet sich also noch im Bereich oberhalb des Solidus; die Form der Blasen ist in vielen Fällen noch nicht fixiert. Zur ersten Generation zählen auch alle Mineralabsätze aus der Zeit unmittelbar nach der Effusion, in der die Lava erstarrt und sich dann stark abkühlt. Die Absätze der ersten Generation bestehen aus Delessit, ungebändertem Chalcedon und eventuell auch Calcit. Ihre Mächtigkeit ist relativ gering (REIS 1918/19: 28, 37, 59, 60, 68; ARNDT, REIS & SCHWAGER 1918/19: 204; FISCHER 1954: 374, 387; 1956: 41, 42; 1970: 50, 51).

2. Stadium: Wird die erstarrte Lava von weiteren Laven überlagert, so erhöht sich ihre Temperatur wieder und neue mineralabscheidende Lösungen können sie durchziehen. Die so gebildete zweite Generation besteht aus Achat, der gelegentlich mit anderen Mineralen vergesellschaftet sein kann; sie endet zur Blasenmitte hin mit Quarzkristallen (REIS 1918/19: 28, 59, 68; FISCHER 1954: 387).

3. Stadium: Postvulkanische Prozesse (Fumarolen- und Thermentätigkeit) können zur Bildung einer dritten Achatgeneration führen (REIS 1918/19: 59, 68; FISCHER 1956: 41, 42; 1970: 51).

In der Frage der Herkunft des SiO_2 gehen die Ansichten von REIS und FISCHER auseinander. Zunächst behauptet FISCHER (1954: 384; 1956: 41; 1970: 50), man finde große Achatmandeln immer dort, wo die Zersetzung des Magmatits am stärksten ist; dagegen hält es REIS (1916/17a: 17 f.) für eine „auffällige Erfahrung, daß die Achatmandeln scheinbar vorzüglich an normale, möglichst wenig zersetzte und umgewandelte basische Gesteine gebunden sind". Nach REIS soll das SiO_2 der Achate zum einen wohl unmittelbar aus vulkanischen Förderprodukten – gemäß den drei beschriebenen Stadien – stammen, zum anderen aber bei der Zersetzung von Silikaten des Vulkanits in kleinsten Dimensionen frei werden (REIS 1916/17a: 20). Die Zufuhr des SiO_2 zu den Blasenräumen erfolgt durch feinste Poren im Gestein (Poren zwischen Grundmasse und Einsprenglingen) (REIS 1918/19: 60) [14]. REIS nennt diese Art der Lösungsbewegung „Durchsinterung", ohne aber eine exakte Definition dieses Begriffs zu geben (REIS 1916/17a: 18). Zufuhrwege im Gestein, die makroskopisch oder mikroskopisch sichtbar wären, fehlen in der Regel, spielen also bei der Achatgenese keine wesentliche Rolle (REIS 1916/17a: 18; 1918/19: 60). Für die Füllung der Blasenräume macht REIS eine gerichtete Lösungsbewegung zu den Blasen hin verantwortlich. Sie wird ermöglicht durch die Verringerung des Drucks in den gaserfüllten Blasen, die sich aus der Abkühlung der Lava bzw. des erstarrten Vulkanits ergibt (REIS 1916/17a: 20, 22 f.; 1918/19: 60; ARNDT, REIS & SCHWAGER 1918/19: 204; REIS 1923: 98).

Ein anderes Konzept der SiO_2-Herkunft vertritt dagegen FISCHER: Entsprechend seiner Auffassung, das Vorkommen von Achaten sei an zersetzte Magmatite gebunden, soll das SiO_2 der Achate bei der Zersetzung dieser Magmatite durch vulkanische und postvulkanische Gase bzw. Lösungen frei geworden sein (FISCHER 1951: 399; 1954: 386, 387; 1956: 41; 1970: 50). Diese Gase und Lösungen (überhitzter Wasserdampf) dringen bei neuen Eruptionen bzw. während der postvulkanischen Fumarolen- und Thermentätigkeit in die Blasenzone des Vulkanits ein, zersetzen ihn und lagern das entstehende SiO_2 an den Innenwänden der Blasen ab (FISCHER 1954: 379; 1956: 41, 42; 1970: 50, 51). Das SiO_2 liegt während dieses Vorgangs vorwiegend in echter Lösung (molekulardispers) vor (FISCHER 1956: 42; 1970: 51). Diese Lösung durchdringt das Gestein selbst (Diffusion), offene Zufuhrwege sind für die Achatgenese unwesentlich (FISCHER 1954: 382, 387). Durch eine Veränderung der Konzentrationen, des pH-Werts oder der Temperatur fällt die Kieselsäure innerhalb der Blase aus (FISCHER 1956: 41; 1970: 51). Um diesen Mechanismus der SiO_2-Akkumulation zu ermöglichen, sind bei der geringen Löslichkeit von SiO_2 sehr große Wassermengen zum Transport nötig. FISCHER (1954: 388) weist hier auf die starke Wasserförderung des Parícutin hin (aus einem Krater von 2 m Durchmesser entwichen täglich 17 000 t Wasserdampf von 100° C mit einer Geschwindigkeit von

[14] REIS schreibt: „es handelt sich also um jenen allgemeinen Lösungsdurchzug durch die Gesteine, der seit langem bekannt, im wesentlichen als die Grundlage jeder völligen Gesteinsmetamorphose angesehen ist" (REIS 1916/17a: 18). Er knüpft damit wohl an HAIDINGERs Konzept der „Infiltration" an, das dieser in seiner Arbeit „Über die Metamorphose der Gebirgsarten" dargestellt hatte (vgl. S. 19).

100 m/s) [15]. Innerhalb der Gasblasen wird das gelöste SiO_2 direkt in kristalliner Form abgeschieden oder durchläuft nur kurz ein Gel-Stadium; vor der Bildung der nächsten SiO_2-Lage geht es dann in den kristallinen Zustand über (FISCHER 1951: 399; 1954: 379, 380; 1956: 42; 1970: 51).

Die gemeine Bänderung entsteht nach der Theorie von REIS und FISCHER im wesentlichen durch äußere, von der vulkanisch/postvulkanischen Tätigkeit bestimmten Rhythmen. Verursachen die drei beschriebenen Stadien der vulkanischen Tätigkeit große Generationen von Absätzen, so entstehen Bänder innerhalb der Generationen durch kurze Unterbrechungen der Lösungszufuhr (Absatz einzelner Schichten) (REIS 1916/17a: 27, 28; 1918/19: 68; FISCHER 1954: 378, 387; 1956: 42, 43; 1970: 51, 52). Während aber FISCHER ausschließlich mit äußeren Rhythmen bei der Erklärung der gemeinen Achatbänderung arbeiten will, greift REIS ergänzend auch auf innere Rhythmen zurück. So können in Einzelfällen LIESEGANG'sche Ringe Achatbänderungen hervorrufen, ohne aber zur Erklärung dieser Hauptstruktur jemals hinreichend zu sein (REIS 1916/17a: 22, 23, 26, 28, 44; 1916/17b: 200; 1918/19: 62). Interessant ist, daß REIS (1916/17a: 27, 28, 44; 1916/17b: 200) die Schichtenbildung beim DAUBRÉE'schen Versuch als für das Verständnis der Entstehung feinster Achatbänderungen wichtig ansieht: Solche Achatbänderungen sollen z. T. durch dem DAUBRÉE'schen Versuch entsprechende Vorgänge bei der Kristallisation von SiO_2-Gelen entstehen. Auf Details hierzu geht REIS dann allerdings nicht ein. Schließlich ist noch ein weiterer innerer Rhythmus für die gemeine Bänderung von Bedeutung: Es bildet sich beim Eindringen von Kieselsäurelösungen in einen Blasenraum eine diesen auskleidende Gel-Haut; hierdurch wird ein weiteres Zudringen (kolloider) Lösungen verhindert, bis die Gel-Haut kristallisiert ist und dadurch erneut Poren entstehen (REIS 1918/19: 63). Im Gegensatz zum DAUBRÉE-Versuch und LIESEGANG-Ringen ist diese Art innerer Rhythmik aber von REIS konstruiert und ihre Möglichkeit experimentell nicht bewiesen.

Mit dem Problem der SiO_2-Akkumulation eng verbunden ist die Interpretation der „Infiltrationskanäle". Ausführungen hierzu finden sich nur bei REIS, der diese Strukturen auch „Septalfelder", „Septalräume", „Septalröhren" und „Röhrensepten" nennt (REIS 1916/17a: 44; 1916/17b: 156; 1918/19: 33). Nach REIS sind offene Zufuhrwege für die Achatbildung nicht wesentlich; der entscheidende Prozeß der Lösungszufuhr ist vielmehr die „Durchsinterung" durch das Gestein und durch die jeweils älteren Mineralabsätze der Blasen hindurch (s. o.). Entsprechend interpretiert er die „Infiltrationskanäle" nicht als Zufuhrwege, sondern erklärt ihre Ausbildung durch diese „Durchsinterung" selbst: Bei der ungestörten „Durchsinterung" von Kieselsäurelösungen durch das Gestein werden die Wände der Gesteinsblasen gleichmäßig mit diesen Lösungen benetzt. Es bilden sich hier sukzessiv von außen nach innen fortschreitend Achatbänder als Einzelschichten aus. Wird aber die „Durchsinterung" an einer Stelle der Blasenwand aus irgend einem Grund verhindert, so fehlen an dieser Stelle auch SiO_2-Ausscheidungen und die so entstehende Lücke in der Ausbildung der Schichten schließt sich erst langsam durch spätere Ausfällungen, wie es Abb. 48 schematisch zeigt; es entsteht so die Struktur der „Infiltrationskanäle" (REIS 1916/17a: 23, 24; 1916/17b: 156). Solche „Infiltrationskanäle" können dann, da sie zumindest zeitweise offene Kanäle darstellen, zur Abfuhr von Lösungen dienen; auch gelegentliche spätere Lösungszufuhr durch die Kanäle will REIS nicht ausschließen (REIS 1916/17a: 24, 44; 1916/17b: 171).

[15] Daß aber dennoch in den Blasen der Lava dieses Vulkans keine Kieselsäureausscheidungen beobachtet werden konnten, berichtet FISCHER (1954: 388), ohne deshalb seine Theorie ernsthaft in Frage zu stellen; er nimmt zusätzlich eine sehr lange postvulkanische Thermalwasserförderung zur Füllung der Blasen mit SiO_2 an.

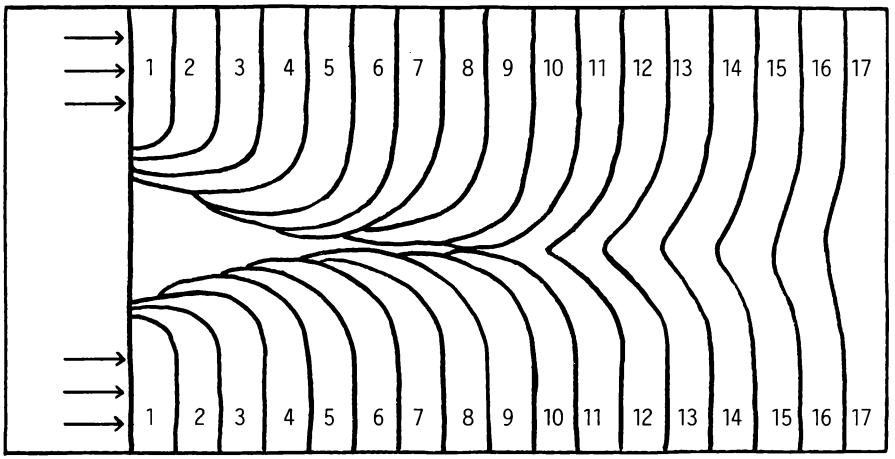


Abb. 48: Skizze zur Erläuterung von REIS' Theorie der Entstehung von „Infiltrationskanälen"; die Einzelschichten sind in der Reihenfolge ihrer Entstehung durchnumeriert.

Die Membrantrümmer-Struktur entwickelt sich nach REIS aus den ersten Mineralabsätzen (1. Generation) der Blasen. Diese Absätze sollen sich ja bereits bilden, wenn die ausgeflossene Lava noch nicht ganz erstarrt ist (s. o.). Letzte Bewegungen der Lava können daher die Blasen in ihrer Form noch verändern, wobei dann die ersten Absätze (Chalcedon, Delessit) von der Blasenwand abplatzen. Es entsteht so die Membrantrümmer-Struktur (REIS 1918/19: 37, 59; ARNDT, REIS & SCHWAGER 1918/19: 204).

Die Uruguay-Struktur entsteht unter speziellen Bedingungen, bei denen die den Blasen zugeführte Kieselsäure körnig ausfällt und sich am Blasenboden in horizontalen Schichten absetzt (REIS 1918/19: 73; FISCHER 1956: 43; 1970: 52).

Für die Moosachat-Struktur geben REIS und FISCHER eine Reihe verschiedener Erklärungsversuche, ohne sich aber festzulegen: So hält FISCHER (1954: 375) eine Entstehung nach Art der Silikatgewächse für möglich. REIS (1918/19: 70, 71) lehnt diese dagegen ab und vermutet, Moosachat-Strukturen seien Pseudomorphosen nach Mineralausblühungen, z. B. nach Eisenblüte (Aragonit) oder nach Ausblühungen von Eisensulfat. Er hält es auch für möglich, daß Moosachat-Strukturen entstehen, wenn Kieselsäurelösungen durch kleine Öffnungen in die Blase eingesaugt werden und dort sofort koagulieren; es sollen sich dabei Gel-Stränge, die späteren Moosachat-Strukturen, bilden (REIS 1923: 101).

III.3.2. Die erste NACKEN'sche Theorie

In seiner ersten Theorie der Achate [16] übernimmt NACKEN wesentliche Elemente der Theorie von LIESEGANG: Die gemeine Bänderung beruht auf der Ausbildung LIESEGANG'scher Ringe in Kieselgel; die gebändert angeordneten Eisenpigmente verzögern die Kristallisation des SiO_2 (NACKEN 1917: 270, 271). Ziel der NACKEN'schen Theorie ist,

[16] Mit seiner Arbeit von 1948 gab NACKEN seine erste Achattheorie auf und wurde zum Mitbegründer der Schmelztropfentheorie der Achate (Kap. III.4.).

unter Wahrung dieser Thesen das Problem der SiO_2-Akkumulation sowie die Ursache der Uruguay-Struktur aufzuklären. Im Gegensatz zu LIESEGANG faßt NACKEN (1917: 271, 292) hierzu die Achatgenese als einen typisch postvulkanischen Vorgang auf: In der erkaltenden Lava entstand zunächst eine Vielzahl auch die Blasenräume durchziehender Risse, die als Zufuhrkanäle bei der Achatbildung wirksam wurden (NACKEN 1917: 273). Die Kieselsäurelösungen, die auf diesen Wegen die Blasen erreichten, sind magmatischen Ursprungs: Als Produkt der Kristallisationsdifferentiation des Magmas soll zunächst eine Alkalisilikatlösung entstehen, die dann durch Säuren weitgehend neutralisiert wird (NACKEN 1917: 274). Es entsteht so eine kolloide Kieselsäurelösung mit einem geringen Gehalt an Alkalisilikaten, die durch die Spalten im Gestein unter erhöhtem Druck in die Blasenräume injiziert wird (NACKEN 1917: 274, 293, 295). Um das Verhalten dieser (kolloiden!) Lösung zu beschreiben, ist das System H_2O selbst als Näherung verwendbar. NACKEN (1917: 271, 272, 293, 295) schreibt nun der kritischen Temperatur dieses Systems eine besondere Bedeutung bei der Achatgenese zu: Bei Temperaturen oberhalb 375° C liegt nur eine Phase (fluide Phase) vor, die den Blasenraum ganz erfüllt; es entstehen hier keine Achate vom Uruguay-Typ. Die Uruguay-Struktur kann nur bei Temperaturen unterhalb des kritischen Punktes von Wasser (d. i. für reines H_2O 374,1° C) entstehen; es treten dann eine flüssige und eine gasförmige Phase nebeneinander auf und ein Meniskus bildet sich in der Blase aus. Diese Art der primären Blasenfüllung ergibt sich etwa, wenn sich eine fluide Phase in der Blase unter den kritischen Punkt abkühlt; bei der Entmischung entstehen zunächst kleinste Tröpfchen, die sich vereinigen und schließlich am Blasenboden in Schichten absetzen. Achate ohne Uruguay-Struktur entstehen also bei der Verfestigung der kolloiden Lösung oberhalb, Achate mit Uruguay-Struktur bei der Verfestigung unterhalb der kritischen Temperatur von Wasser (NACKEN 1917: 271, 272, 293, 294, 296). NACKEN denkt hier offenbar in beiden Fällen an eine Verfestigung zum Gel, denn er folgt ja bei der Erklärung der gemeinen Bänderung der LIESEGANG'schen Theorie (NACKEN 1917: 271, 296); auch soll zur Achatbildung in der Regel nur eine einmalige Füllung des Hohlraums, nur in einigen Fällen sollen mehrere (aber wenige) Füllungsvorgänge nötig sein (NACKEN 1917: 274); gemeint sind hier wohl die Fälle, bei denen auch LIESEGANG mehrere Füllungsprozesse annimmt (s. o.); NACKEN arbeitet nicht mit äußeren Rhythmen bei der Erklärung der Achate. Die Achatgenese spielt sich somit nach NACKEN im Bereich der kritischen Temperatur des Wassers ab; als Obergrenze des hierbei möglichen Temperaturbereichs gibt er 575° C an, weil in Achaten Tief-Quarz, nicht Hoch-Quarz auftritt (NACKEN 1917: 294). Für die Entstehung der Moosachat-Strukturen hält NACKEN (1917: 295) den Mechanismus der Bildung von Silikatgewächsen für möglich (die achatbildende Lösung soll ja einen geringen Gehalt an Alkalisilikaten besitzen), beschäftigt sich aber nicht näher mit solchen und ähnlichen „mehr zufällig gebildeten Produkten" (NACKEN 1917: 271). Die so skizzierte Theorie der Achatgenese hat als wesentliche Voraussetzung, daß Achate mit und ohne Uruguay-Struktur nicht in enger Nachbarschaft zusammen vorkommen, sondern in größeren Gebieten jeweils der eine oder andere Achattyp auftritt (NACKEN 1917: 271, 272, 296).

III.3.3. Weiterentwicklungen des Ansatzes von NACKEN

Der ersten NACKEN'schen Theorie lag als wesentlicher Gedanke zugrunde, die kritische Temperatur im System H_2O für die Entstehung von Achaten mit und ohne Uruguay-Struktur verantwortlich zu machen. Obgleich aber NACKEN seine Theorie 1948 selbst verwarf, tritt der ihr zugrundeliegende Gedanke in der Achatdiskussion immer wieder auf. Im folgenden werden nun zwei Ansätze dargestellt, die den Grundgedanken NACKENs innerhalb veränderter Vorstellungen über die Achatgenese einbringen:

a) Bei den Vorstellungen von ALTHAUS (1979: 27, 28, 29) spielen äußere Rhythmen wieder eine große Rolle: Achate sind Hohlraumfüllungen, die wahrscheinlich in der letzten Phase magmatischer Tätigkeit gebildet wurden. Kieselsäurehaltige Lösungen dringen auf offenen Kanälen in die Blasenräume ein, wo sich SiO_2 durch eine Änderung der physikalischen und chemischen Bedingungen abscheidet. Zur Füllung eines Gesteinshohlraumes bedarf es einer sehr häufigen Wiederholung dieses Vorgangs. Fällt das SiO_2 aus (überkritischer) fluider Phase oder (unterkritischer) Dampfphase aus, so setzen sich Kieselgel-Lagen gleichmäßig an den Hohlraumwänden ab und zeichnen deren Konturen nach. Fällt dagegen SiO_2 aus einer flüssigen Phase aus, so können sich horizontale Lagen durch Sedimentation von SiO_2-Partikelchen ausbilden. Die Uruguay-Struktur bildet sich daher unterhalb, Achatpartien mit gemeiner Bänderung entstehen oberhalb [17] der kritischen Temperatur der betreffenden Lösung. Die gemeine Bänderung und die Ausbildung der Uruguay-Struktur werden nach ALTHAUS durch äußere Rhythmen bedingt. In Ruheperioden gehen die SiO_2-Absätze in Chalcedon oder Quarzin über.

Eine eigenwillige Hypothese trägt ALTHAUS (1979: 27, 29) bezüglich der Förderwege vor: Nicht die Strukturen der „Infiltrationskanäle" führt er als Zeugen ehemaliger Zufuhrwege im Achat an, sondern röhrenförmige Gebilde, „stalaktitenähnliche Zapfen". Es handelt sich hierbei um Strukturen, die LIESEGANG als Silikatgewächse bezeichnet hatte.

Moosachate entstehen nach ALTHAUS (1979: 29) bei gleichzeitigem oder sukzessivem Absatz von Achatsubstanz und verschiedenen Silikaten.

b) In jüngster Zeit haben FLÖRKE et al. (1982) den NACKEN'schen Grundgedanken in ihre Vorstellungen von der Achatgenese einbezogen. Allerdings setzen sie in ihren Untersuchungen einfach voraus, Achate seien vulkanischen Ursprungs (FLÖRKE et al. 1982: 324) [18]. Der eigentliche Chalcedon soll hierbei aus überkritischer (fluider) Phase abgesetzt worden sein. Eine erste Ausscheidung von SiO_2 erfolgt bereits aus der ursprünglichen Füllung der Blasen, die sich durch den Druckabfall bei der Eruption des Magmas ausbilden. In einem zweiten Stadium wird der Blase bei fortschreitender Druckabnahme neue kieselsäurehaltige fluide Phase zugeführt und Chalcedon abgesetzt. Nach einer weiteren Abnahme von Druck und Temperatur kann sich eine flüssige Phase (oder auch ein Gel) in der Blase ausbilden, aus der horizontale Opal- und Feinquarzabsätze gebildet werden; herrschen dagegen während der Zeit der Achatbildung stets höhere Temperaturen, so kommt es nicht zur Ausbildung der Uruguay-Struktur. Die Ausfüllung der Blasen mit fluider Phase wird häufig wiederholt (FLÖRKE et al. 1982: 332).

Nach dieser Theorie erfolgt der Absatz von Chalcedon mit gemeiner Bänderung grundsätzlich vor der Bildung horizontaler Absätze (Uruguay-Struktur), eine gleichzeitige Abscheidung der beiden ist unmöglich, was ausdrücklich betont wird (FLÖRKE

[17] Hier ist ALTHAUS (1979: 29) inkonsequent: Zunächst stellt er zu Recht fest, daß es für einen Absatz aus der Dampfphase unwesentlich ist, ob diese sich oberhalb oder unterhalb der kritischen Temperatur befindet; in beiden Fällen wird der zur Verfügung stehende Raum von der Phase ganz erfüllt. Dann spricht er aber doch von einem „Thermometer" in dem Sinne, daß die Absätze mit gemeiner Bänderung oberhalb der kritischen Temperatur entstanden sein müßten.

[18] Angesichts der Vielfalt grundverschiedener Positionen, die in der Achatforschung vertreten wurden und werden, erscheint dieser unkritische Ansatz ebenso unverständlich wie ungerechtfertigt. Auch verweisen FLÖRKE et al. (1982: 326) bezüglich des vulkanischen Ursprungs ihrer Proben auf eine Arbeit von BANK (1970), in der aber das Achatproblem gar nicht behandelt, geschweige denn gelöst wird.

et al. 1982: 326). Für die Füllung der Blasen ist eine häufig wiederholte Zufuhr fluider Lösungen erforderlich. Entsprechend spiegeln sich in der Bänderung der Achate verschiedene Perioden vulkanischer Tätigkeit wider (FLÖRKE et al. 1982: 330). Gemeine Bänderung und Uruguay-Bänderung beruhen damit auf äußeren Rhythmen.

III.3.4. Diskussion

Die Theorien der vulkanisch/postvulkanischen Achatbildung enthalten – mit Ausnahme der Theorie von NACKEN [19] – als wesentliches Prinzip der Strukturbildung äußere Rhythmen, die Rhythmik der vulkanischen und postvulkanischen Aktivitäten selbst. Diese Rhythmik bedingt die Generationenfolge nach REIS und FISCHER sowie die gemeine Bänderung (FISCHER; ALTHAUS; FLÖRKE et al.) bzw. einen wesentlichen Teil von ihr (REIS). Es kehrt hier also das Prinzip der Strukturbildung aus den älteren Theorien mit äußerem Rhythmus wieder. Entsprechend lassen sich fast alle Einwände gegen diese Theorien (Kap. III.1.5., S. 24 ff.) auch hier vorbringen:

Die Grundannahme des sukzessiven Absatzes von SiO_2, das die Hohlraumwandungen im Gestein gleichmäßig und schichtweise auskleidet, steht mit der Morphologie der Achate im Widerspruch; die „Schichten" der gemeinen Achatbänderung kleiden die Hohlraumwände nicht aus, sondern folgen der Ausbildung einzelner Sphärolithe. Entsprechend sind diese „Schichten" nicht immer als geschlossene Flächen ausgebildet; sie sind häufig gar nicht überall an der Hohlraumwand, sondern nur bei einzelnen Sphärolithen anzutreffen (Kap. III.1.5.). Der Naturbeobachtung nicht gemäß und damit irreführend ist es also, wenn FLÖRKE et al. (1982: 324, 325) Achatpartien mit gemeiner Bänderung als „wall-lining" oder „wall-layered" bezeichnen [20].

Die Theorien der vulkanisch/postvulkanischen Achatbildung mit äußerem Rhythmus können ebenso wie die älteren Theorien mit äußerem Rhythmus nicht erklären, warum sich scharfe Winkel in der gemeinen Bänderung über größere Bereiche hinweg durchhalten (zur Erklärung vgl. Kap. III.2.7., S. 62).

Auch der unterschiedliche Aufbau benachbarter Mandeln und die Unmöglichkeit einer ‚Stratigraphie' der Achate eines Vorkommens (Kap. III.1.5., S. 26, 33–37) erlauben es nicht, die Achatentstehung auf vulkanische oder postvulkanische Lösungen, die das Gestein der vulkanischen Aktivität entsprechend in Schüben durchziehen, zurückzuführen. Dies gilt insbesondere auch für das Auftreten von Achaten mit und ohne Uruguay-Struktur, das ja nach NACKEN (1917), ALTHAUS (1979) und FLÖRKE et al. (1982) von der Temperatur der kieselsäurehaltigen vulkanisch/postvulkanischen Lösung abhängig sein soll. Träfe diese Annahme zu, so müßte die Uruguay-Struktur in benachbarten Achaten ganz gesetzmäßig innerhalb einer Sukzession von Achatschichten auftauchen; als Voraussetzung hierzu sollte zumindest NACKENs Behauptung, Achate vom Uruguay-Typ und solche ohne Uruguay-Struktur kämen jeweils nur deutlich getrennt voneinander vor, wahr sein. Diese Behauptung konnte WALGER (1954: 24; vgl. 1953: 73) an einigen Aufschlüssen in Rheinland-Pfalz exemplarisch widerlegen:

[19] NACKEN folgt bei der Erklärung der gemeinen Bänderung der LIESEGANG'schen Theorie. Von der Widerlegung dieser Theorie (Kap. III.2.7., S. 49–62) sind also auch die entsprechenden Thesen NACKENs betroffen, die daher nicht noch einmal behandelt werden.

[20] Dieser Irrtum ist möglicherweise darauf zurückzuführen, daß FLÖRKE et al. (1982) ihre Behauptungen auf die Untersuchung von nur sieben Proben stützen.

„An einem kleinen Grenzlager-Aufschluß in der Gemarkung Neuwald, südlich Flonheim, wo 17 Uruguay-Achatmandeln anstehen, ist nun aber zu sehen, daß diese regellos zwischen Festungsachatmandeln verteilt sind. Das gleiche Bild war an allen anderen Stellen, wo sich Uruguay-Achate anstehend fanden, ebenfalls zu beobachten."

Daß Achate mit und ohne Uruguay-Struktur in unmittelbarer Nachbarschaft im Gestein vorkommen, ist weder mit NACKENs Theorie noch mit den Ansätzen von ALTHAUS und FLÖRKE et al. vereinbar [21]. So läßt sich zusammenfassend feststellen, daß weder die Abfolge von (gemeinen) Achatbändern noch das Auftreten von Uruguay-Bändern in benachbarten Achaten eine feststehende Ordnung aufweisen. Weder die gemeine Bänderung noch das Auftreten bzw. Fehlen der Uruguay-Struktur läßt sich durch äußere Rhythmen im Sinne der Theorien der vulkanisch/postvulkanischen Achatbildung verstehen. Von einer „geodynamic activation of deposition" (FLÖRKE et al. 1982: 326) kann also gar keine Rede sein.

Ein weiteres Argument gegen die Theorien von NACKEN, ALTHAUS und FLÖRKE et al. betrifft die Achatmorphologie am Kontakt zwischen gemeiner Bänderung und Uruguay-Bändern. Da die gemeine Bänderung oberhalb, die Uruguay-Bänderung aber unterhalb der kritischen Temperatur der Lösung gebildet werden soll, ist der Absatz dieser beiden Typen nach diesen Theorien nur nacheinander, nicht gleichzeitig möglich. Es sollten demnach in Achaten nur Abfolgen wie in Abb. 49a auftreten. Die in Abb. 49b dargestell-

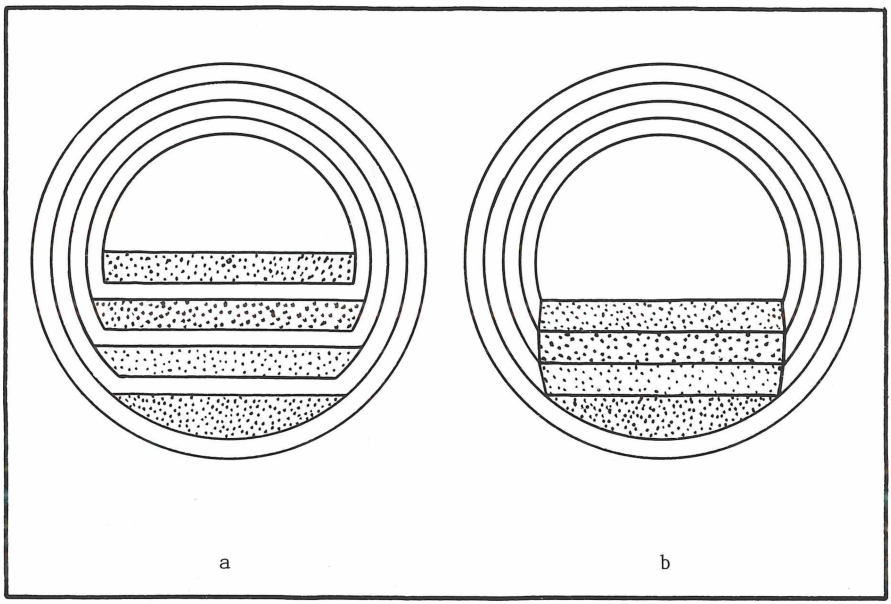


Abb. 49: Schemaskizze zur Illustration der unterschiedlichen Morphologie von Uruguay-Achaten bei abwechselndem (a) bzw. gleichzeitigem (b) Absatz von gemeinen und Uruguay-Bändern. Die Skizze zeigt die Morphologie der gemeinen Bänderung schematisch speziell für den Fall sehr vieler dicht beieinandersitzender Sphärolithe (vermeintlich wandauskleidende Bänderung; vgl. Abb. 21).

[21] Hier jeweils eine Verstopfung und Wiederöffnung der Zufuhrwege zu der einen oder anderen Blase im Gestein anzunehmen, wie es WALGER (1954: 26) noch für denkbar hält, erscheint allzu gewaltsam.

ten Kontakte zwischen gemeiner Bänderung und Uruguay-Bänderung können sich bei der Annahme einzeln abgesetzter Schichten (diese Annahme liegt ja der besprochenen Vorstellung zugrunde) nur ausbilden, wenn Uruguay-Schichten und die Schichten der gemeinen Bänderung gleichzeitig zum Absatz gelangen und sich so gegenseitig in ihrer Ausbildung begrenzen. Die These der besprochenen Theorien, in Achaten könne grundsätzlich nur eine Morphologie gemäß Abb. 49a auftauchen, stimmt nun aber wiederum nicht mit der Naturbeobachtung überein. Es ist zwar unbestreitbar, daß gelegentlich Achate gemäß Abb. 49a vorkommen; die Abbildungen 2 und 50 geben ein Beispiel hierzu. Aber auch Beispiele zu Abb. 49b lassen sich in der Natur finden, wie die Abbildungen 51, 52, 53, 54, 55 und 56 zeigen [22]. Die Verzahnung von Uruguay-Schichten und

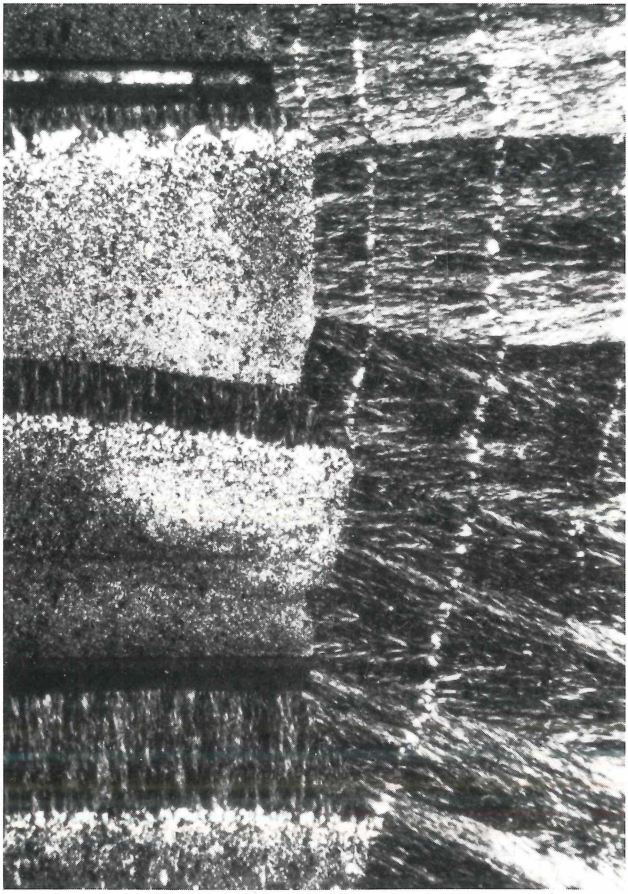


Abb. 50: Dünnschliffaufnahme (+ N) des Achats von Abb. 2. Größe des Bildausschnitts: ca. 3,0 x 2,1 mm.

[22] Ein ähnliches Exemplar ist bei WALGER (1954: 27, Tafel 3. Abb. 2) belegt; es zeigt sich hier aber der relevante Effekt wohl nicht eindeutig genug, denn die Arbeit von WALGER wird auch bei FLÖRKE et al. (1982) zitiert.

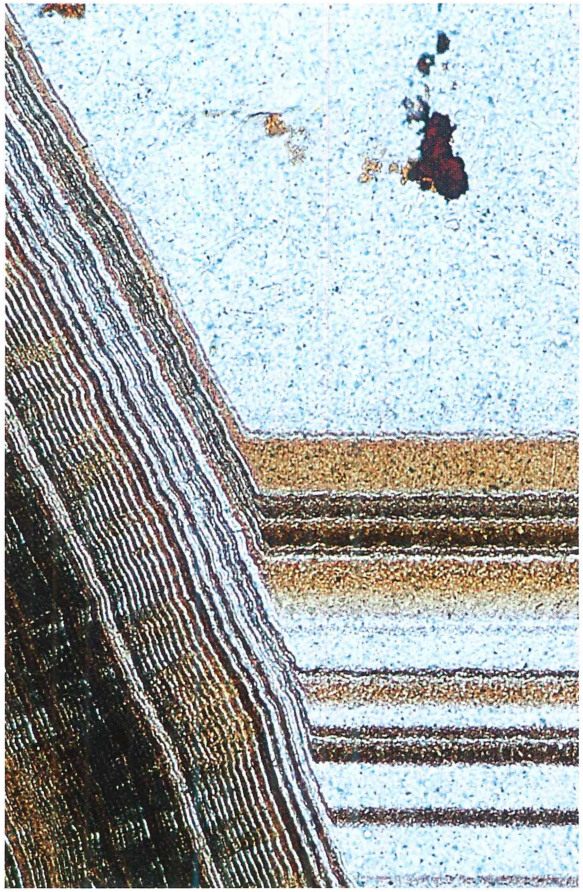


Abb. 51: Dünnschliffaufnahme eines Achats (o. F.); die Morphologie entspricht dem Schema von Abb. 49b. Lange Bildkante: ca. 0,8 mm.

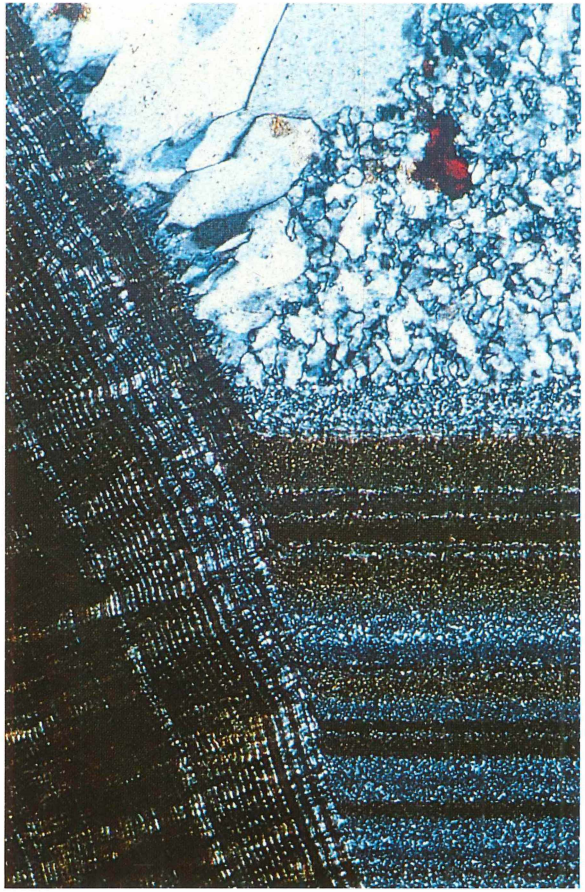


Abb. 52: Wie Abb. 51; + N.

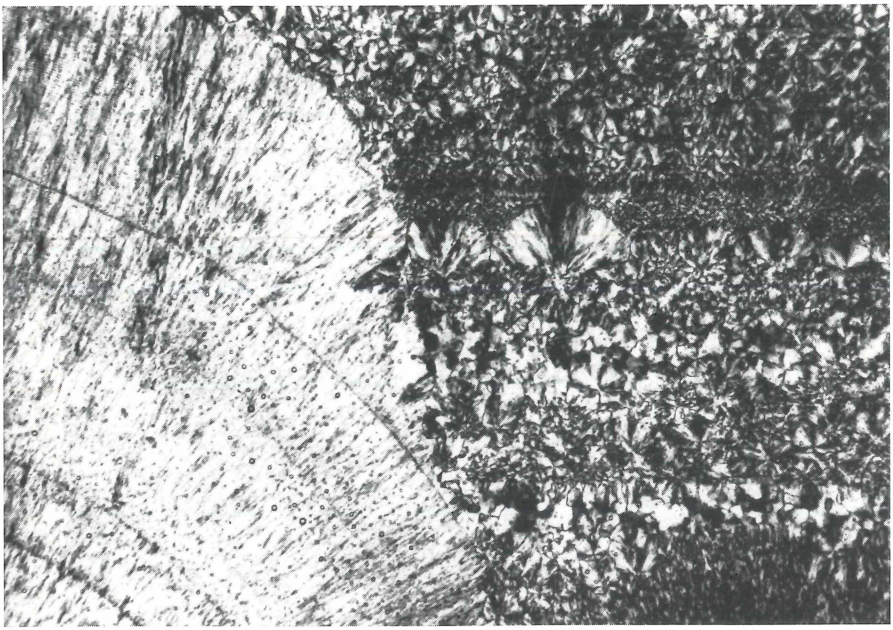


Abb. 53: Dünnschliffaufnahme eines Achats (o. F.); + N. Uruguay-Struktur und Achat-Zone mit gemeiner Bänderung sind in Konkurrenz zueinander ausgebildet. Größe des Bildausschnitts: ca. 3,0 x 2,1 mm.

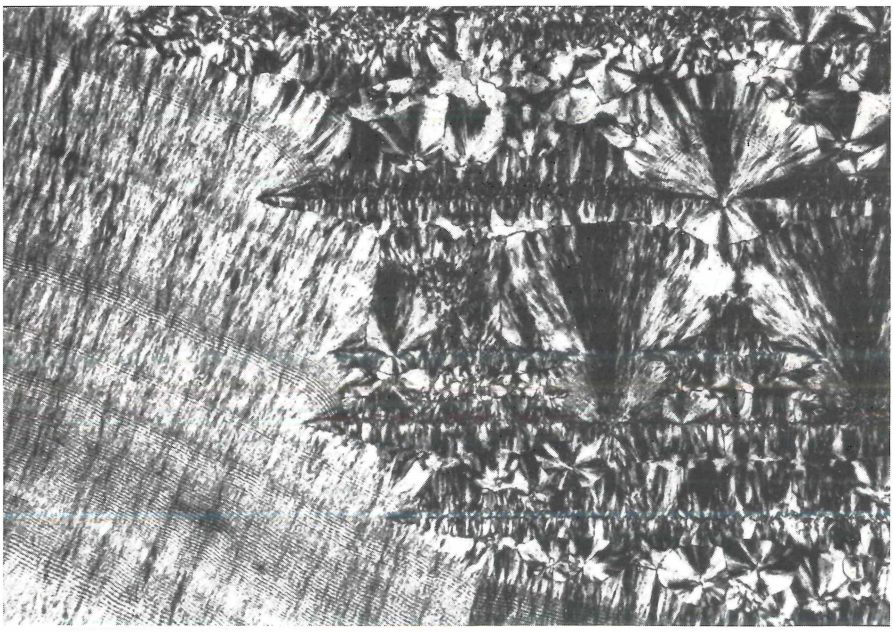


Abb. 54: Dünnschliffaufnahme eines Achats (o. F.); + N. Uruguay-Struktur und Achat-Zone mit gemeiner Bänderung sind ineinander „verzahnt". Größe des Bildausschnitts: ca. 3,0 x 2,1 mm.

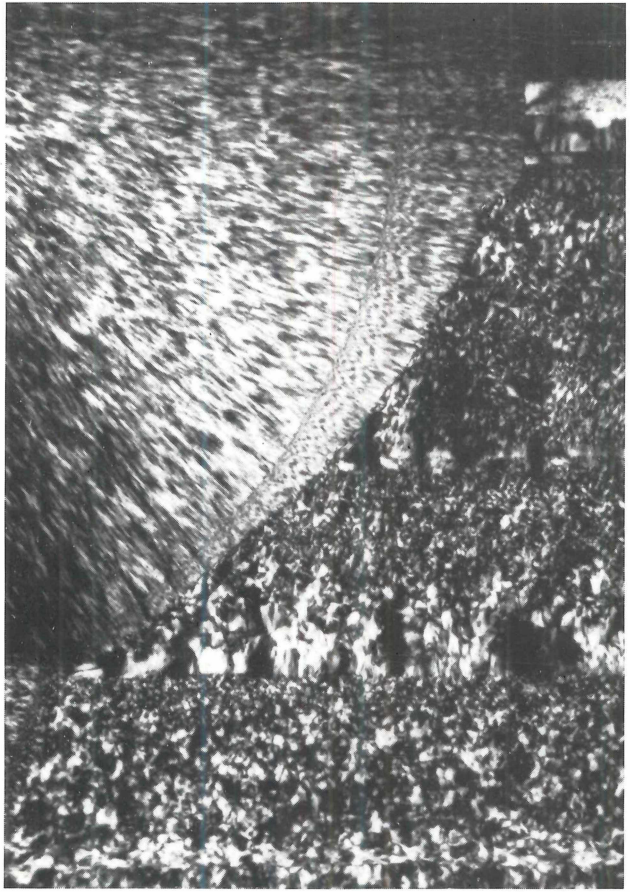


Abb. 55: Dünnschliffaufnahme eines Achats (o. F.); + N. Chalcedon-Sphärolith und Uruguay-Struktur sind in Konkurrenz zueinander ausgebildet; im oberen Teil der Abbildung ist der Sphärolith weiter „gewachsen" als im unteren. Größe des Bildausschnitts: ca. 3,0 x 2,1 mm.

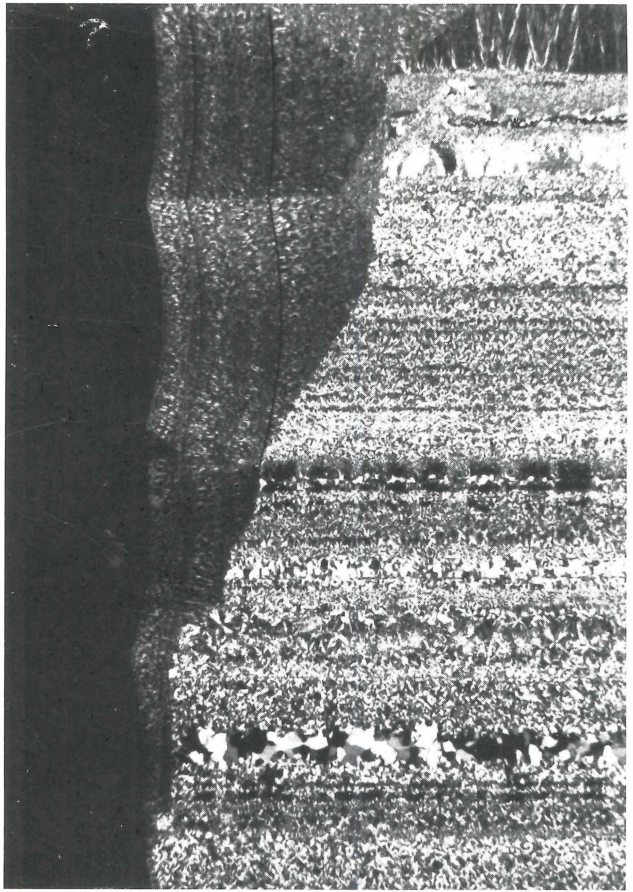


Abb. 56: Dünnschliffaufnahme eines Achats (o. F.); + N. Uruguay-Struktur und Chalcedon-Zone mit gemeiner Bänderung sind – Abb. 49b entsprechend – in Konkurrenz zueinander ausgebildet. Lange Bildkante: ca. 1,1 cm.

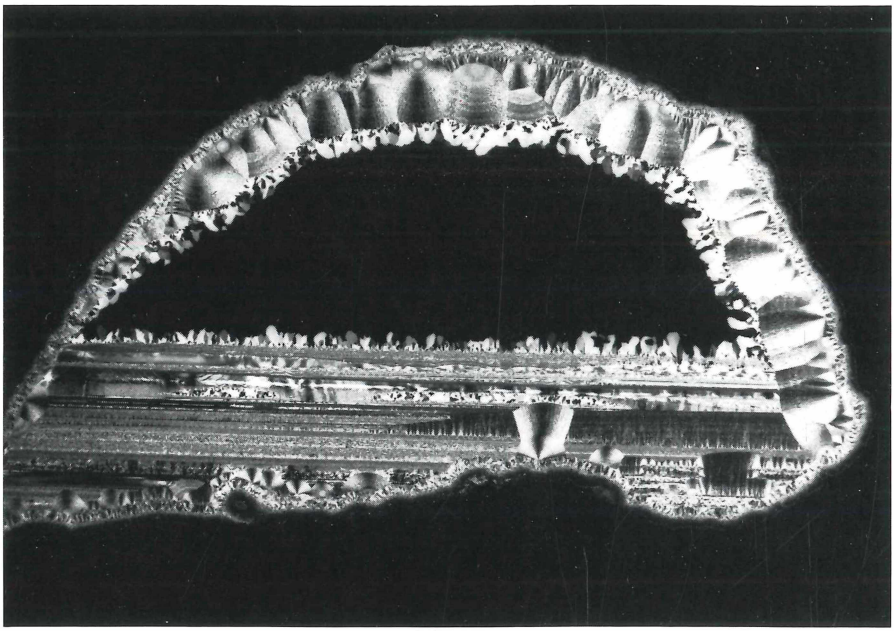


Abb. 57: Dünnschliffaufnahme eines Achats (o. F.); + N. Lange Bildkante: ca. 9 cm.

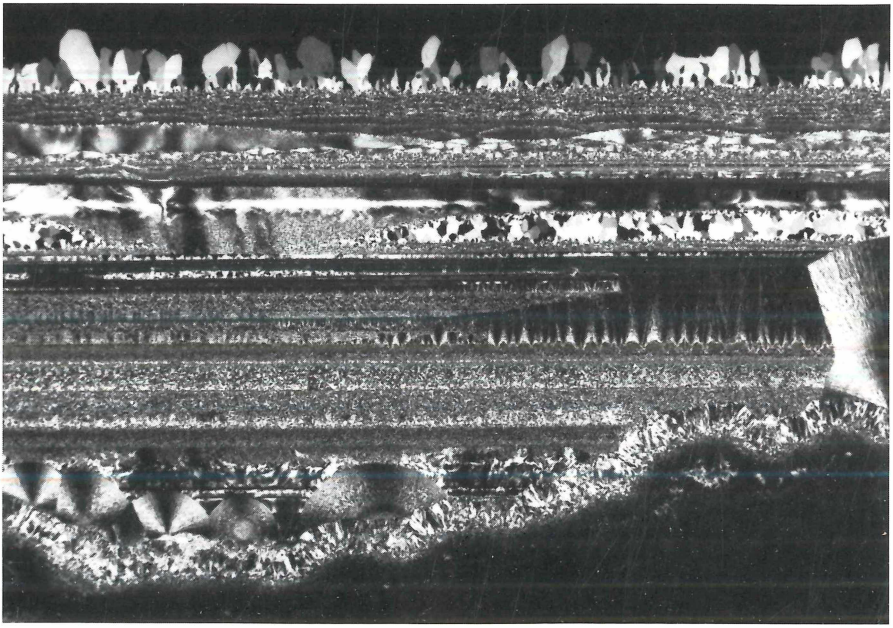


Abb. 58: Ausschnitt aus Abb. 57.

gemeiner Bänderung (vermeintlich ‚wandauskleidenden' Chalcedonlagen) kann sogar so weit gehen, daß letztere innerhalb von Uruguay-Schichten auskeilen, wie die Abbildungen 57 und 58 zeigen. Unter der Voraussetzung (!) eines sukzessiven Absatzes von Chalcedonschichten ist hier nur der Schluß möglich, daß (körnige) Uruguay-Schichten und (faserige) gemeine Achatbänder gleichzeitig und unter gegenseitiger Konkurrenz abgesetzt worden sind.

Die erste Theorie von NACKEN und die Ansätze von ALTHAUS (1979) und FLÖRKE et al. (1982) sind damit bereits hinreichend widerlegt. Offenbar kommt der kritischen Temperatur im System H_2O keine ausgezeichnete Bedeutung für die Achatgenese (im Sinne der dargestellten Theorien) zu [23].

Schon der Grundgedanke [24] dieser Theorien beruht auf einem Fehlschluß: Zwar ist oberhalb der kritischen Temperatur des Wassers die Ausbildung eines Meniskus (d. h. die Ausbildung zweier koexistierender Phasen des Wassers) nicht mehr möglich; unterhalb dieser Temperatur ist es aber sehr wohl möglich, daß ein gegebener Hohlraum mit einer einzigen H_2O-Phase (flüssig oder gasförmig) vollständig erfüllt ist (zu Einzelheiten vgl.: NACKEN (1950); MOSEBACH (1952)); der Übergang von einem ein- zu einem zweiphasigen System ist nicht nur bei der kritischen Temperatur, sondern auch bei Temperaturen unterhalb der kritischen möglich. Wollte man also die Grundidee der ersten NACKEN-schen Theorie aufrecht erhalten, daß Achate ohne Uruguay-Struktur aus einer einzigen, den Hohlraum ganz erfüllenden Phase, die Uruguay-Bänder aber in einem zweiphasigen System (Meniskusbildung !) entstanden sein sollen, so wäre dies ebenso leicht unterhalb der kritischen Temperatur des Wassers möglich (vgl. auch Fußnote 17, S. 69).

Eine besondere Schwierigkeit erhält der NACKEN'sche Ansatz, wenn das ausgefällte SiO_2 zunächst ein Gel-Stadium durchlaufen soll (NACKEN, ALTHAUS); geht hier das System mehrfach von einem ein- in einen zweiphasigen Zustand über und umgekehrt, so sollten die hierbei auftretenden Dichteschwankungen die vorher gebildeten Strukturen, insbesondere auch die Form der gelatinösen SiO_2-Absätze zerstören.

Auch die Vorstellungen von der Lösungszufuhr bei einer vulkanisch/postvulkanischen Achatbildung sind ausgesprochen problematisch. Die achatführenden Vulkanite im Saar-Nahe-Gebiet etwa bestehen aus Decken (aus teils einem, teils mehreren Strömen bestehend) ehemaliger Laven mit erheblicher horizontaler Verbreitung. Tritt nun im Verlauf der vulkanischen Tätigkeit kieselsäurehaltiger Wasserdampf (oberhalb oder unterhalb der kritischen Temperatur) auf, so wird dieser unmittelbar an den Eruptionszentren den ersten Spalten im Magmatit folgend in die Atmosphäre entweichen; es ist daher nicht zu erwarten, daß dieser Wasserdampf sehr weit in horizontaler Richtung in das Gestein eindringen wird. Dies gilt für alle vulkanisch/postvulkanischen Lösungen oberhalb ca. 100° C (es ist hier noch die Siedepunktserhöhung durch gelöste Stoffe zu beachten), weil

[23] Die Rede von Uruguay-Achaten als ‚geologischen Thermometern' wäre selbst dann unzulässig, wenn die NACKEN'sche Grundidee korrekt wäre. Zwar verlagert gelöstes SiO_2 die kritische Temperatur von Wasser nur unwesentlich, andere gelöste Substanzen können sie aber erheblich erhöhen. So liegt die kritische Temperatur einer Lösung mit 5 Gew.% NaCl bereits bei 424° C. Bei Unkenntnis der Lösungszusammensetzung läßt sich also gar keine Aussage über die Lage des kritischen Punktes einer Lösung treffen (KRAUSKOPF 1979: 352 f.). Schon aus diesem Grund ist es sinnlos, irgendwelche Angaben über die Lage des kritischen Punktes einer hypothetischen achatbildenden Lösung zu machen.

[24] Aus einem anderen Grund (vgl. z. B. die Diskussion um das H_2O im Chalcedon bei FLÖRKE et al. (1982)) der kritischen Temperatur eine besondere Bedeutung bei der Achatgenese zuzuschreiben, ist ebenfalls nicht sinnvoll, weil es gar nicht möglich ist, ein Gebiet des ‚fluiden Zustands' ohne Willkür abzugrenzen (NACKEN 1950).

diese Lösungen eindampfen und das Wasser in die Atmosphäre entweicht (offenes System), sobald Spalten im Gestein (die in entsprechenden Vulkaniten immer zu erwarten sind) dies ermöglichen. Ein erwähnenswerter Lösungsdurchzug durch das Gestein in horizontaler Richtung ist daher (bei Lösungen oberhalb ca. 100° C) nicht zu erwarten. Entsprechend kann FISCHER auch nur auf die Beobachtung der Förderung großer Wasserdampfmengen aus Kratern (!) verweisen (s. o.), eine Beobachtung aber, die zum Problem des SiO_2-Transports zu den Blasenräumen im Gestein gar nichts beiträgt.

Alle Theorien der vulkanisch/postvulkanischen Achatbildung gehen von der Annahme aus, daß das SiO_2 der Achate in Blasenräumen bei relativ hohen Temperaturen zum Absatz gelangt sei. Ließe sich nun die Bildungstemperatur dieses SiO_2 (zumindest im Groben) empirisch bestimmen, so könnte eine Entscheidung über die Bedeutung vulkanischer bzw. postvulkanischer Prozesse bei der Achatgenese möglich sein. Hierzu ist die Messung von Sauerstoffisotopen in Achaten geeignet, wie sie von BLANKENBURG, PILOT & WERNER (1982) durchgeführt wurde. Abb. 59 gibt eine Übersicht über $\delta^{18}O$-Werte, die an Gesteinen unterschiedlicher Genese gemessen wurden (Literaturdaten). Die $\delta^{18}O$-Werte sind umso höher, je niedriger die Bildungstemperatur der betreffenden Gesteine war und unabhängig vom Druck. BLANKENBURG, PILOT & WERNER (1982: 214) schließen aus ihren Sauerstoffisotopenuntersuchungen an Achaten zu Recht (vgl. aber Kap. III.4.2.), daß die hohen $\delta^{18}O$-Werte von Achaten (sie gehören „zu den höchsten bisher bekannten Werten überhaupt") nur durch gesteinsbildende Vorgänge im sedimentären Bereich (besser: sedimentär-diagenetischen Bereich; M. L.) erklärbar sind; sie sind mit $\delta^{18}O$-Werten von Cherts vergleichbar.

Achate sind somit nicht Produkte vulkanisch/postvulkanischer Prozesse, sondern wurden im sedimentär-diagenetischen Bereich gebildet [25].

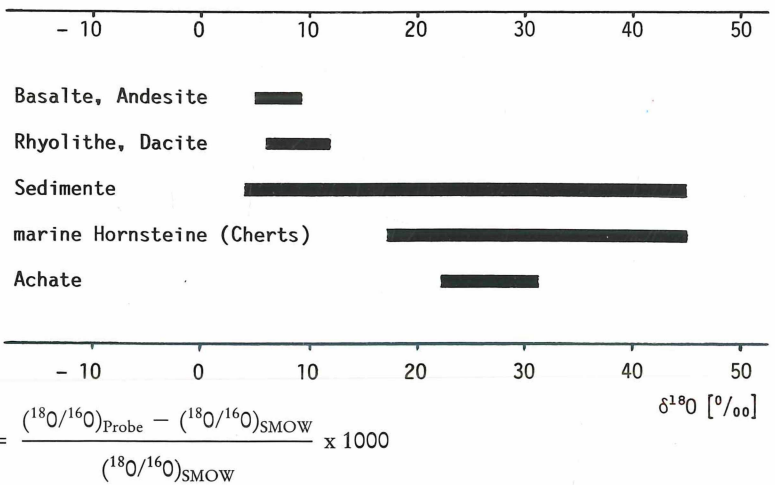


Abb. 59: Zusammengestellt nach Angaben von: HOEFS (1973: 28, 53); COX, BELL & PANKHURST (1979: 388); BLANKENBURG, PILOT & WERNER (1982: 214).
(SMOW = Standard Mean Ocean Water).

[25] Damit ist auch die Vorstellung von KAŠPAR (1944: 101) widerlegt, Achate seien als miarolithische Bildungen in Basalten anzusehen; diese These wurde oben nicht erwähnt, weil KAŠPAR sie zu wenig detailliert vorträgt.

Die Vorstellung, die Entstehung von Achaten sei mit der Entstehung der Magmatite, in denen sie häufig vorkommen, unmittelbar verknüpft, ist durch all diese Argumente vollständig widerlegt. Auch lassen sich wohl noch andere Argumente hierzu finden (und einige davon werden in Kap. IV vorgetragen); ich möchte mich aber im folgenden auf die ergänzende Diskussion weniger Details beschränken:

1. FLÖRKE et al. (1982: 325) stützen ihre Auffassung vom vulkanogenen Charakter der Achate u. a. auf Syntheseprodukte, die beim SiO_2-Transport mittels überkritischem Wasserdampf und Temperaturgefälle entstanden sind und die FLÖRKE (1972: 163) als chalcedon-ähnlich bezeichnet. Mit der Morphologie des Chalcedons in Achaten hat die abgebildete Synthese (FLÖRKE 1972: Fig. 5) allerdings kaum eine Ähnlichkeit. Auch lassen sich die im Experiment angewandten Bedingungen (P = 2 kbar) auf die Verhältnisse in Laven nicht übertragen.

2. Der Gedanke von REIS, durch die Druckverringerung innerhalb der Blasen infolge der Abkühlung der Lava könne eine gerichtete Lösungsbewegung zu den Blasen hin aufrecht erhalten werden, löst das Problem der SiO_2-Akkumulation nicht; eine solche gerichtete Lösungsbewegung könnte zwar eine erste, teilweise Erfüllung der Blase zur Folge haben. Wegen der geringen Löslichkeit von Kieselsäure wird hierdurch aber noch kein nennenswerter SiO_2-Absatz ermöglicht.

3. Moosachat-Struktur, Membrantrümmer-Struktur und „Infiltrationskanäle" werden durch die Theorien der vulkanisch/postvulkanischen Achatbildung mit äußerem Rhythmus nicht verständlich:

   Die Morphologie der Moosachate läßt sich weder durch Pseudomorphosen nach Mineralausblühungen noch durch eine Ausbildung von Gelsträngen (im Sinne von REIS) erklären, wie die Abbildungen 3, 8 und 10 bereits unmittelbar zeigen; solche Thesen erklären weder die Bildung vielfach verzweigter gebogener Röhren noch die z. T. sehr feinen Strukturbildungen. Unbegründet ist auch die ALTHAUS'sche Interpretation solcher röhrenförmiger Strukturen als Förderwege von SiO_2-Lösungen im Achat.

   Daß eine Erklärung der Membrantrümmer-Struktur durch einfaches Abplatzen erster fester Absätze von der Blasenwand (REIS) nicht hinreichend ist, zeigen die Abbildungen 60 und 61: Die Krümmung der „Membrantrümmer" ist z. T. sehr viel stärker als die der Blasenwände. Durch den REIS'schen Bildungsmechanismus der „Infiltrationskanäle" schließlich (vgl. Abb. 48) entsteht nicht die Morphologie, die man in Achaten wirklich antrifft (vgl. Abb. 62).

III.4. Die Schmelztropfentheorien der Achate

Alle bisher besprochenen Theorien der Achate gehen von der Grundvorstellung aus, daß Achate als Füllungen ehemaliger Hohlräume im Gestein anzusehen sind. Mit dieser Vorstellung entsteht das Problem, wie die Ausfüllung der Hohlräume zu denken sei, ein Problem, das wegen der geringen Löslichkeit von SiO_2 in Wasser besondere Schwierigkeiten bereitet. Solche Schwierigkeiten veranlaßten LEONHARD (1823: 16, 17), einen grundsätzlich anderen Gedanken zu entwickeln: Es ist denkbar, daß innerhalb noch flüssiger Laven „geschmolzene, der Hauptmasse fremdartige, und deshalb während des Gestehens sich kugelförmig ausscheidende Substanzen" für die Bildung der Mandelsteine verantwortlich sind.

Diesen Gedanken der Achatbildung durch Entmischung bzw. Nichtmischbarkeit im flüssigen Zustand hat LEONHARD dann allerdings nicht zu einer ausgearbeiteten Achat-

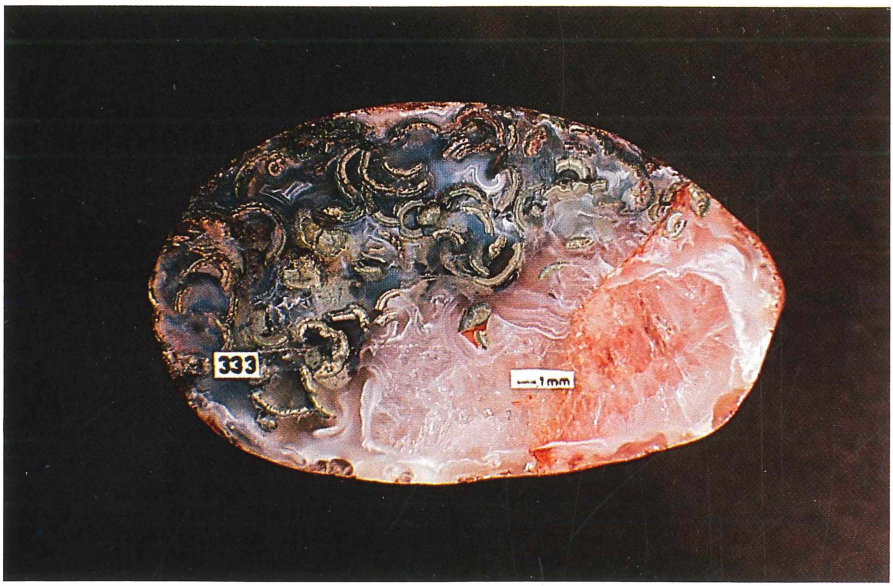


Abb. 60: Membrantrümmer-Achat (o. F.).

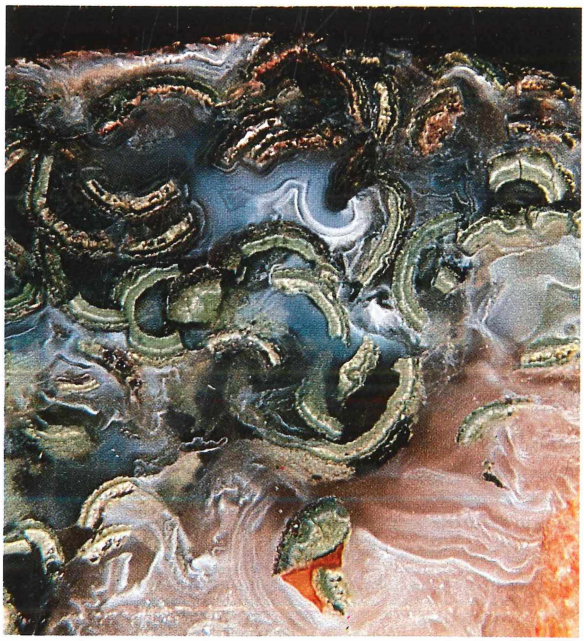


Abb. 61: Ausschnitt aus Abb. 60.

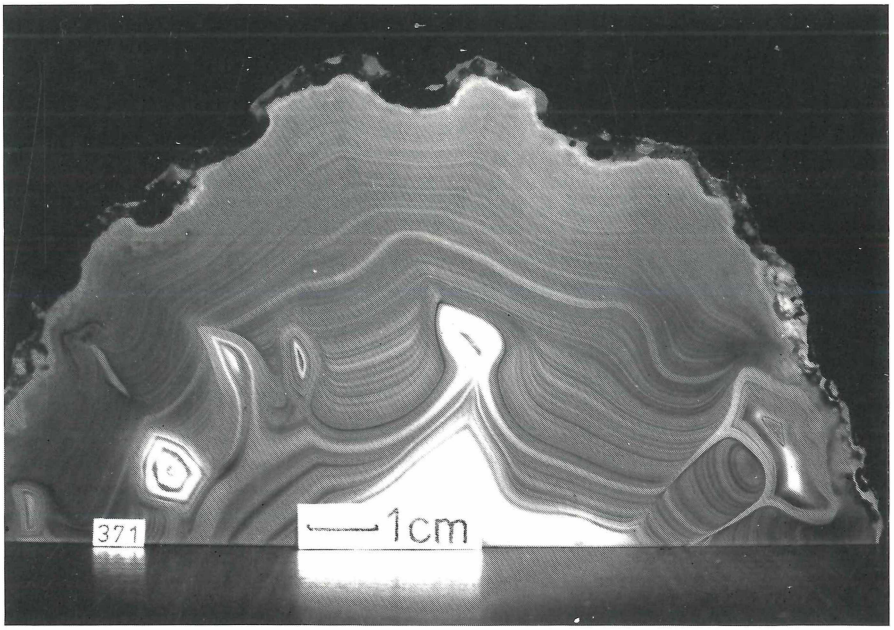


Abb. 62: Achat (o. F.) mit „Infiltrationskanälen".

theorie weiterentwickelt und so trat er in der Achatdiskussion der Folgezeit wieder stark in den Hintergrund. Auch in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts findet man nur wenige Autoren, die eine Achatentstehung aus Schmelztropfen vertreten: So hält es etwa WEIGELT (1921: 68, 69) für möglich, daß Achate (spez. die der Vorkommen bei Ilfeld im Harz) durch Aufschmelzung von Quarzgeröllen aus Konglomeraten des Rotliegenden entstanden sind. TOMKEIEFF (1942: 11, 12) behauptet, die Achate der Insel Rum seien in Laven durch Entmischung im flüssigen Zustand (liquid immiscibility) entstanden, will aber diese Hypothese lediglich auf die Genese der Mandelsteine der Insel Rum angewandt wissen; Mandelsteine anderer Vorkommen lassen sich durch die Ausfüllung von Gasblasen erklären.

Ausführliche Theorien, die Achate auf SiO_2-Schmelztropfen in Laven zurückführen, entstanden aber erst mit der Arbeit von NACKEN (1948) über die Nachbildung von Chalcedon-Mandeln.

III.4.1. Die Theorie von NACKEN und SCHLOSSMACHER

Die Diskussion der Achatgenese ist u. a. deshalb so schwierig und kontrovers, weil eine wirkliche, den natürlichen Bildungen entsprechende Achatsynthese bisher nicht geglückt ist. Ein wichtiger Schritt in diese Richtung gelang aber NACKEN; bei seinen Versuchen zur Züchtung von Quarzkristallen im Autoklaven machte er folgende Entdekkung: Kieselglas kann unter Erhaltung der äußeren Form zu Chalcedon und Quarz kristallisieren, wenn es im Autoklaven schwach alkalischen Lösungen bei einer Temperatur von ca. 400° C ausgesetzt wird. Im Zentrum des umgebildeten Glasstücks entsteht dann

ein Hohlraum aufgrund des Dichteunterschiedes von Quarz (bzw. Chalcedon) und Kieselglas. Es lassen sich so Aggregate herstellen, bei denen auf eine äußere Chalcedon-Zone (mit Bänderung !) zur Mitte hin Quarzkristalle folgen, die in den zentralen Hohlraum hineinragen (NACKEN 1948: 4–6; 1950: 749; MOSEBACH 1952: 433, 434). Ähnliche „Synthesen" gelangen danach auch FRANKE (1951: 211) sowie WHITE & CORWIN (1959; 1961) unter entsprechenden Bedingungen.

Aufgrund dieser Entdeckung entwickelte NACKEN nun eine neue, von seiner Theorie von 1917 völlig abweichende Vorstellung von der Entstehung der Achate: Durch Entmischung im flüssigen Zustand bilden sich in Magmen isolierte SiO_2-Schmelztropfen aus; sie steigen aufgrund ihrer geringeren Dichte in den Laven nach oben und erhalten so eine Form, die der aufsteigender Gasblasen ähnelt; durch Einwirkungen von überhitztem Wasserdampf entwickeln sich dann aus den Kieselglastropfen Achate (NACKEN 1948: 7, 8). Die gemeine Bänderung bedarf hierbei keiner gesonderten Hypothese, weil ähnliche Bänderungen und Sphärolith-Bildungen auch bei den ‚Synthesen' beobachtet wurden (NACKEN 1948: 5; 1950: 749; FRANKE 1951: 211; WHITE & CORWIN 1961). Es handelt sich hierbei wohl um die Folge eines inneren Rhythmus, dessen Mechanismus noch genauer zu klären ist [26].

Diesen Vorstellungen NACKENs folgte nun SCHLOSSMACHER z. T. und baute sie weiter aus:

Achate sind ehemalige Schmelztropfen, die sich im Magma durch Entmischung im flüssigen Zustand ausgebildet haben; sie erlangten durch Fließbewegungen ihre charakteristischen Formen und wurden durch ihr relativ geringes spezifisches Gewicht in den oberen Zonen der Lava angereichert (SCHLOSSMACHER 1950: 23; 1960a: 16, 17). In der Frage der Kristallisation des SiO_2-Tropfens weicht SCHLOSSMACHER dann von den Vorstellungen NACKENs ab. Nicht die Kristallisation erstarrter Glastropfen durch Einwirkung überhitzten Wasserdampfs ist entscheidend; die Kristallisation der Achate erfolgt vielmehr aus der Schmelze beim Absinken der Temperatur in der Lava. Hierbei spiegeln sich dann Variationen in der Abkühlungsgeschwindigkeit der Lava im Achataufbau wider. Die Kristallisation des Schmelztropfens beginnt von außen und schreitet sukzessiv zur Mitte hin fort. Schwankungen im Abkühlungsverlauf verursachen Variationen im Faserbau und rufen Achatschichten unterschiedlicher Mächtigkeit hervor. Es sind zwei Ursachen der diskontinuierlichen Abkühlung zu unterscheiden:

1. Die Lava kühlt sich durch ihre eigene Bewegung ungleichmäßig ab.
2. Die Energieumsätze bei der sukzessiven Kristallisation der einzelnen Minerale in der Lava verursachen Schwankungen der Abkühlungsgeschwindigkeit.

Zusätzlich ist zu beachten, daß bereits auskristallisierter Chalcedon wärmeisolierend wirkt; dies hat eine immer gleichmäßigere Abkühlung zur Achatmitte hin zur Folge (SCHLOSSMACHER 1950: 23, 25, 26; 1960a: 19, 20). Achatmandeln, die neben Chalcedon und Quarz auch Calcit, Chabasit, Pyrit u. a. enthalten, erfordern zur Erklärung weitergehende Annahmen: Der Schmelztropfen enthielt in diesen Fällen als Komponenten nicht nur SiO_2 und H_2O, sondern auch entsprechende Mengen an Al_2O_3, CaO etc.; solch komplexe Schmelztropfen sollen dann feste Ausscheidungsfolgen aufweisen, z. B. Quarz → Calcit → Chabasit (SCHLOSSMACHER 1950: 24). „Infiltrationskanäle" entstehen, wenn bei der Kristallisation des SiO_2 Wasser freigesetzt und durch den entstehenden Druck ein

[26] NACKEN (1948: 2; 1950: 749) spricht auch hier noch von LIESEGANG'schen Ringen, erweitert aber die Bedeutung dieser Bezeichnung, indem er auch rhythmische Kristallisations-Vorgänge darunter fallen läßt. In Anbetracht der Schwierigkeiten, die das Verständnis der LIESEGANG'schen Ringe selbst bereitet, erscheint dieser Sprachgebrauch weder gerechtfertigt noch sinnvoll.

Teil der restlichen Schmelze vom Zentrum nach außen gedrängt wird; „Infiltrationskanäle" sind damit „Druckentlastungsventile" (SCHLOSSMACHER 1950: 26, 56; 1960b: 12, 13, 14).

In jüngster Zeit wird die Schmelztropfentheorie der Achate von BLANKENBURG (mit verschiedenen Koautoren) erneut vertreten: Achate entstehen aus relativ H_2O-reichen SiO_2-Schmelztropfen im Magma. Bei ihrer Kristallisation entwickelt sich im Innern der Tropfen eine fluide Phase. Hierbei kann der Druck so stark ansteigen, daß er größer als der Außendruck wird; es entstehen dann „Eruptionskanäle" („Entgasungsschläuche"); vermutlich ist hiermit die Struktur der „Infiltrationskanäle" gemeint. Für die Kristallisation des Achats aus einer SiO_2-Schmelze werden Temperaturen zwischen 420° C und 1000° C (und höher) angegeben (BLANKENBURG 1981: 107, 108; BLANKENBURG & BERGER 1981: 145; THOMAS & BLANKENBURG 1981: 628, 633). Die Rhythmik im Achataufbau erklärt sich durch Schwankungen von Temperatur und Druck sowie durch Fremdsubstanzen, die Hindernisse und Ausgangspunkte der Kristallisation zugleich bilden. Prinzipiell soll in Achaten die Kristallisationsabfolge Cristobalit → Chalcedon → Quarzin → Quarz → Amethyst (von außen nach innen) auftauchen, wobei nicht immer alle Stufen ausgebildet sein müssen (BLANKENBURG 1981: 106, 107; THOMAS & BLANKENBURG 1981: 631).

III.4.2. Diskussion

Die Schmelztropfentheorie der Achate scheitert bereits an einer einfachen Tatsache: In Magmen von der Zusammensetzung der achatführenden Vulkanite (Basalte, Andesite, Rhyolithe . . .) ist ‚liquid immiscibility', die zur Ausbildung von SiO_2-Schmelztropfen führt, gar nicht möglich. Zwar treten etwa in den Zweistoffsystemen CaO-SiO_2, MgO-SiO_2 und FeO-SiO_2 (u. a.) Entmischungen im flüssigen Zustand auf, die zur Ausbildung einer extrem kieselsäurereichen Schmelze führen. In Vielstoffsystemen aber wird diese Entmischung bereits durch geringe Gehalte der Schmelze an Al_2O_3 und Alkalien ($(Na_2O + K_2O + Al_2O_3) > 5$ Gew. %) unmöglich, eine Grenze, die von Magmen generell überschritten wird. Zudem ist diese Entmischung nur bei extrem hohen Temperaturen (ca. 1700° C) möglich (ROEDDER 1979: 15, 16, 30; PETZOLD & HINZ 1979: 56, 130; IRVINE 1974/75: 484, 486). Beide Bedingungen schließen eine Ausbildung von SiO_2-Schmelztropfen in den relevanten Magmen aus [27]. Eine weitere wichtige Eigenschaft von durch Entmischung im flüssigen Zustand entstandenen Schmelztropfen ist ihre vollkommen einheitliche Zusammensetzung (ROEDDER 1979: 44). Entstünden also Achate durch Schmelztropfenbildung aufgrund einer Entmischung im Magma, so sollten die aus diesen Schmelztropfen hervorgegangenen Mandeln jeweils die gleiche Zusammensetzung aufweisen; im Gestein benachbarte Mandeln sollten grundsätzlich die gleiche chemische Zusammensetzung besitzen. Dies ist nun sicher nicht der Fall (vgl. Kap. III.1.5., S. 26 ff.). Auch sollten Calcium- und Eisenverbindungen in Achaten nur in geringen Mengen vorkommen können, weil die Entmischung im flüssigen Zustand ja gerade auf einer starken Trennung von ($CaO + MgO + FeO + . . .$) einerseits und SiO_2 andererseits beruht. Gerade Calcit und Hämatit kommen aber häufig primär in Achaten vor, was sich etwa daran zeigt, daß die Morphologie des Achats dann von der Ausbildung dieser Minerale abhängt; Beispiele hierzu geben die Abbildungen 63 und 40: Ältere Calcitausscheidungen bestimmen den Achat in seiner Morphologie.

[27] Dies gilt in gleicher Weise für basaltische, andesitische und rhyolithische Magmen; hier suggeriert FISCHER (1954: 370) zu Unrecht, eine entsprechende Entmischung sei bei rhyolithischen Magmen schon eher denkbar als bei basischen.

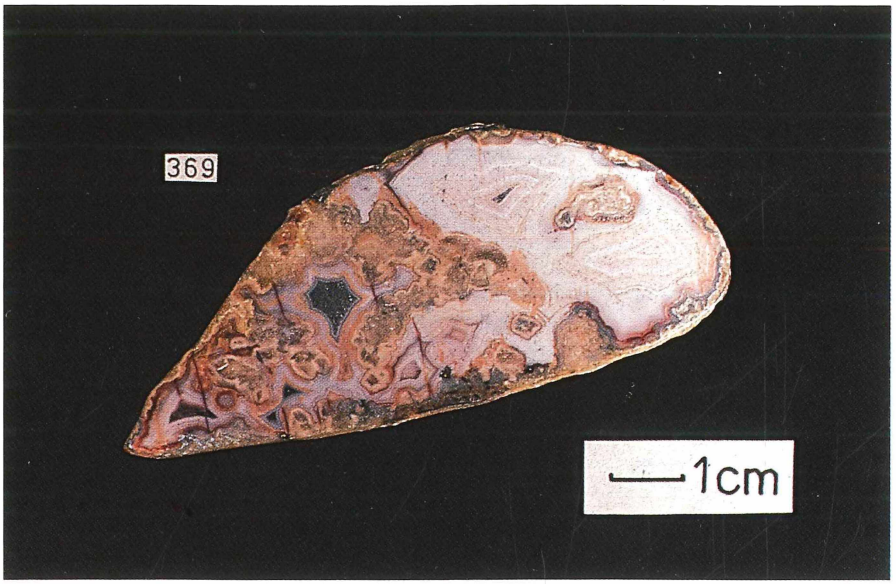


Abb. 63: Achat-Morphologie folgt den Konturen älterer Calcitkristalle (o. F.).

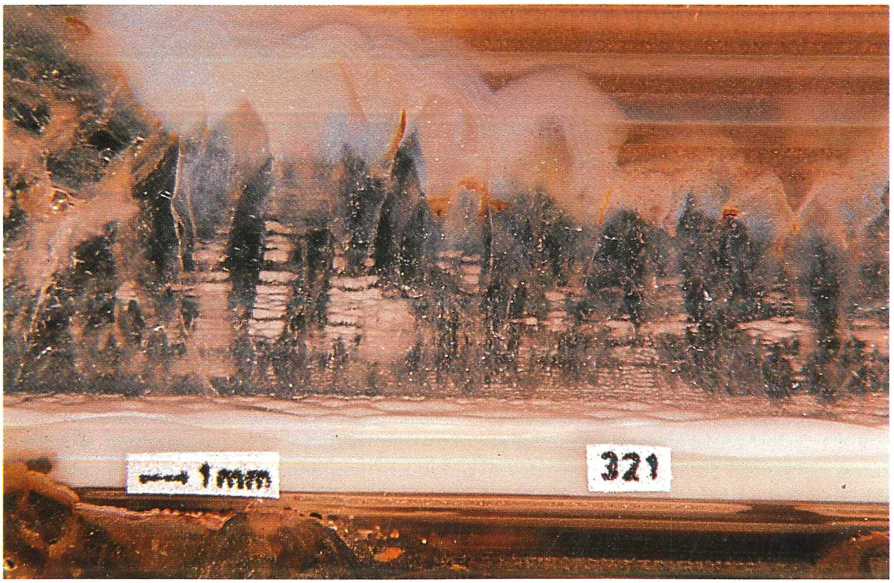


Abb. 64: Achat (o. F.). Uruguay-Struktur und grobe Quarzkristalle kamen gleichzeitig zur Ausbildung.

Schließlich bemerkt FISCHER (1954: 370) zu Recht, daß, falls die Schmelztropfentheorie korrekt wäre, in Magmatiten, die ja selbst in ihrer Grundmasse z. T. noch Gesteinsglas enthalten, gelegentlich auch ehemalige Schmelztropfen (hohe Viskosität !) noch als Kieselglas erhalten vorliegen sollten; dies wurde aber bisher nirgends beobachtet.

In ihren neuesten Arbeiten haben BLANKENBURG und Mitarbeiter nun die Auffassung vertreten, die SiO_2-Schmelztropfen entstünden durch Aufschmelzung von Chert-Xenolithen im Magma (BLANKENBURG, PILOT & WERNER 1982; BLANKENBURG et al. 1983). Mit dieser Auffassung entgeht man aber nur scheinbar der bisherigen Kritik. Zwar ist es nun nicht mehr nötig, eine Konzentration von SiO_2 durch liquid immiscibility zu begründen, weil Chert-Xenolithe als gegeben angesehen werden. Die Aussage, liquid immiscibility sei in den hier relevanten Magmen nicht möglich, bedeutet aber nicht nur, daß keine Entmischung der Magmen stattfindet, sondern auch, daß hypothetische SiO_2-Schmelztropfen beliebiger Herkunft in diesen Magmen nicht stabil sind. Zu erwarten wäre also, daß solche Chert-Xenolithe Assimilationserscheinungen zeigen. Genau dies findet sich in der Natur tatsächlich bei wirklichen Xenolithen, die nahezu vollständig aus SiO_2 bestehen: SiO_2-Xenolithe, die in basischen Magmatiten noch erhalten sind, zeigen an ihrem Rand zunächst einen (oft glasig ausgebildeten) Saum mit Quarz-Feldspat-Zusammensetzung; nach außen folgt dann eine Schicht prismatischer Pyroxene; insbesondere dieser Pyroxen-Saum ist generell ausgebildet (HOLGATE 1954: 439, 440, 447). Entsprechende Erscheinungen in einem Vulkanit bei Idar-Oberstein erwähnt FISCHER (1954: 371) und im (achatführenden) Basalt von Weitendorf/Steiermark LEITMEIER (1909: 228). Im Gegensatz zu diesem Verhalten von SiO_2-Xenolithen besitzen Achatmandeln aber keinen Pyroxen-Saum am Kontakt zum Magmatit. Keinerlei Anzeichen für Assimilations- oder Auflösungserscheinungen liegen vor. Wegen der scharfen Abgrenzung der Mandeln lehnte schon NACKEN (1948: 8) eine Aufschmelzung von Quarzit-Xenolithen als Ursache der Achatbildung ab.

Schließlich ist auch kaum vorstellbar, wie die O-Isotopen-Zusammensetzung von Cherts bei ihrer (nassen) Aufschmelzung im Magma erhalten bleiben soll.

Weiterhin sprechen folgende Gründe gegen die Richtigkeit der Schmelztropfentheorien der Achate:

1. Das Problem der SiO_2-Akkumulation wird in den Schmelztropfentheorien der Achate nur scheinbar gelöst. Die Dichte von SiO_2-Schmelzen ist geringer als die von Quarz bzw. Chalcedon. Legt man für eine Überschlagsrechnung die Dichten von Chalcedon (2,6 g/cm^3) und Kieselglas (2,2 g/cm^3) zugrunde, so ergibt sich bei der Kristallisation von Kieselglas eine Volumenverminderung von ca. 15 %. Ein SiO_2-Schmelz- oder -Glastropfen bildet bei seiner Kristallisation also Hohlräume in der Größenordnung von 15 % des ehemaligen Gesamtvolumens aus. NACKEN hatte mit dieser Erscheinung zwar das Auftreten von Hohlräumen im Zentrum von Achaten erklärt. Es zeigt sich aber, daß er hiermit ‚zu viel bewiesen' hat: Die Schmelztropfentheorie der Achate führt zu einer SiO_2-Akkumulation in den Mandeln von ca. 85 Vol. %. Durch die Konstanz dieses ‚Füllungsgrades' wird die Annahme eines Schmelztropfens für die Lösung des Problems der SiO_2-Akkumulation in Achaten wertlos. Weder Mandeln mit einer nahezu vollständigen Achatfüllung noch solche mit geringem SiO_2-Gehalt und einem großen Hohlraum im Zentrum werden durch die Schmelztropfentheorie verständlich. Im ersten Fall müßte man bei der Erklärung zusätzlich zu weiteren Akkumulationsmechanismen greifen, im zweiten dagegen zu einem Mechanismus, der eine starke Abfuhr (!) von SiO_2 zur Folge hat. So wird das Problem der SiO_2-Akkumulation, das gerade den Anstoß zur Entwicklung der Schmelztropfentheorien gab (NACKEN 1948), zu einem innerhalb dieser Theorien besonders schwer lösbaren Problem.

2. FISCHER (1954: 371, 375) weist mit Recht darauf hin, daß eine Reihe von Mineralen, die in Achaten vorkommen, bei den zur Schmelztropfenbildung nötigen hohen Temperaturen nicht stabil sind. So wäre etwa bei Achaten, deren Bänderung der Morphologie von Calcitkristallen in der Mandel folgt (s. o.), bei entsprechenden Temperaturen Wollastonitbildung zu erwarten; Wollastonit wurde aber in Achaten bisher nicht festgestellt (FISCHER 1954: 371; vgl. WINKLER 1976: 128–133).

3. Gelegentlich finden sich in Achatmandeln jeweils abwechselnd mehrere Achat- und Amethyst-Lagen aufeinander folgend (BANK 1970: 220). Ältere Amethyste müssen hierbei dann der Bildungstemperatur jüngerer Achatzonen (etwa bei Annahme einer sukzessiven Kristallisation des Schmelztropfens von außen nach innen) ausgesetzt worden sein. Nun verschwindet aber die violette Färbung des Amethysts bei ca. 350° C; bei ca. 500° C bildet sich dann in der Regel eine gelbbraune Färbung ähnlich der des Citrins aus, eine Veränderung, die nicht rückgängig gemacht werden kann (LEHMANN & BAMBAUER 1973: 285; vgl. LEHMANN 1967). Treten also in Achatmandeln Amethystkristalle auf, die von gebändertem Chalcedon gefolgt werden, so läßt sich aus dieser Stabilitätsgrenze der Amethystfärbung auf eine maximale Bildungstemperatur des gebänderten Chalcedons schließen: Bei der Achatbildung wurden Temperaturen von 350° C – 500° C nicht erreicht. Schon LANGE (1868: 10, 11) und GOERG (1929: 10) haben daher mit Recht eine intramagmatische Achatbildung als unmöglich ausgeschlossen.

4. Schließlich hält auch der Achat selbst hohe Temperaturen offenbar nicht aus, ohne wesentliche Veränderungen zu erleiden: So konnte etwa EPPLER (1941: 6, 9) zeigen, daß durch Tempern von Achat (bis 400° C; schon bei 450° C zersprangen die Achate !) dessen relative Korrosionshärte (Beanspruchung im Sandstrahlgebläse) stark abnimmt, insbesondere aber die Anisotropie der relativen Korrosionshärte (Beanspruchung senkrecht bzw. parallel zur Phänofaser) weitgehend verschwindet.

   In diesem Zusammenhang ist auch von Interesse, daß die ‚Chalcedon-Synthesen' von WHITE & CORWIN (1961: 117) zwar bei 400° C entstanden sind, aber bei dieser Temperatur dann sehr bald auch rekristallisierten. Achate sollten demnach bei ihrer Bildung keinen Temperaturen dieser Größenordnung ausgesetzt gewesen sein.

5. Daß Achate sicher nicht aus einer ehemaligen SiO_2-reichen Schmelze entstanden sind, zeigt sich etwa an Proben, bei denen Magmatitbreccien durch Achat verkittet werden (Abb. 65). Auch konnten Fälle nachgewiesen werden, bei denen Mandelsteinbreccien durch Karbonate verkittet sind und erst innerhalb dieser Karbonate Achat – vom Magmatit isoliert – zur Abscheidung kam (Abb. 66 und 67). Eine intramagmatische Achatbildung wird allein durch diese Beobachtung schon vollkommen ausgeschlossen.

6. Die Schmelztropfentheorien der Achate erklären weder die Uruguay-Struktur (vgl. hierzu schon WALGER 1953: 72) noch die Moosachat-Struktur. Komplizierte Strukturbildungen, die durch das unmittelbare Zusammenvorkommen dieser Hauptstrukturen entstehen (Abb. 6, 7, 8), bleiben völlig unverständlich.

Abschließend möchte ich noch auf einige Detailaussagen zur Schmelztropfentheorie eingehen:

1. THOMAS & BLANKENBURG (1981) haben auf Grund von Einschlußuntersuchungen an Quarzkristallen aus Achatmandeln Bildungstemperaturen der Quarze im Bereich von 370° C bis 420° C erschlossen. Diese Aussage beruht auf Messungen der Homogenisierungstemperaturen der Einschlüsse, welche als die niedrigsten möglichen Bildungstemperaturen der umgebenden Quarzkristalle aufgefaßt werden.

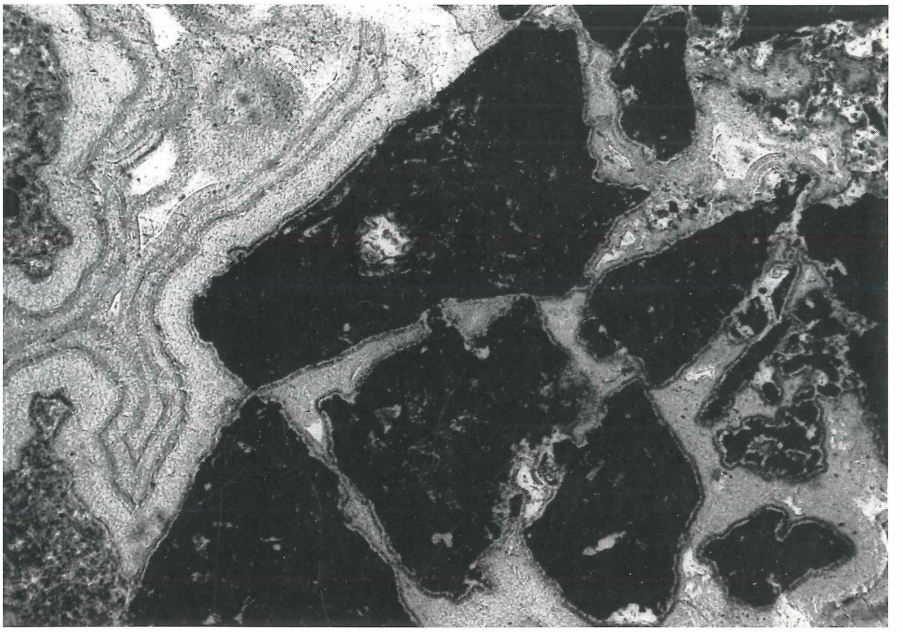


Abb. 65: Achat verkittet Magmatitbruchstücke (Fundpunkt 1). Dünnschliffaufnahme. Größe des Bildausschnitts: ca. 3,0 x 2,1 mm.

Allerdings beruht die Verwendung von Homogenisierungstemperaturen zur Bestimmung der Bildungstemperatur von Kristallen u. a. auf folgenden Voraussetzungen:

a) Die Einschlüsse werden als primär aufgefaßt.

b) Die Ausbildung von zwei Phasen im Einschluß beruht auf der Entmischung eines ehemals einphasigen Einschlusses durch Absinken der Temperatur (NACKEN 1921: 12; THOMAS 1979: 33).

Die Messung von Homogenisierungstemperaturen stellt damit keine voraussetzungslose Messung der Bildungstemperatur dar; vielmehr gehen hier zunächst gewichtige theoretische Vorgaben ein. In Anbetracht der Vielfalt der Prozesse, die beim gegenwärtigen Stand der Achatdiskussion als für die Achatgenese möglicherweise wesentlich angesehen werden müssen, lassen sich die Aussagen a) und b) aber wohl kaum als gesichert voraussetzen. Die Messung von hohen Homogenisierungstemperaturen berechtigt daher noch nicht zur Annahme einer Achatbildung bei entsprechend hohen Temperaturen.

2. Weiterhin stützen sich BLANKENBURG & BERGER (1981) bei der Beurteilung der Bildungstemperatur von Achaten auf ein eigenartiges „Geothermometer": RÖSLER et al. (1978) haben an zehn (!) Quarzproben röntgenographisch die mittlere Primärteilchengröße senkrecht zu den (112)- und (100)-Netzebenen bestimmt; gegen die Quotienten dieser beiden Werte tragen sie nun die Bildungstemperaturen der Quarze auf, die aber ebenso wie die dazugehörigen Fehlerbereiche nur geschätzt sind; die so erhaltenen zehn Punkte im Koordinatensystem werden dann durch eine (von vielen möglichen) Kurve verbunden; hierbei fällt einer der zehn Werte exakt auf einen Extremwert der

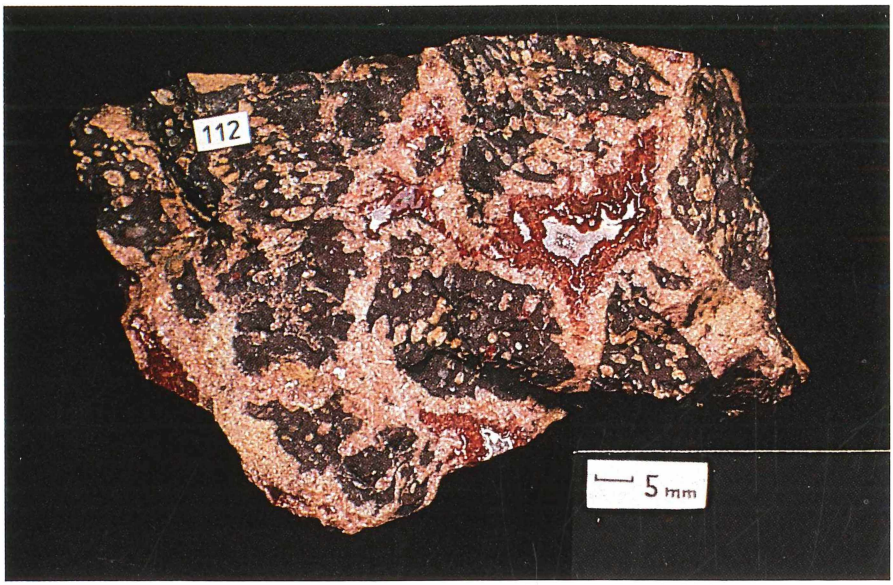


Abb. 66: Achat (Fundpunkt 1) in karbonatisch gebundener Vulkanitbreccie.

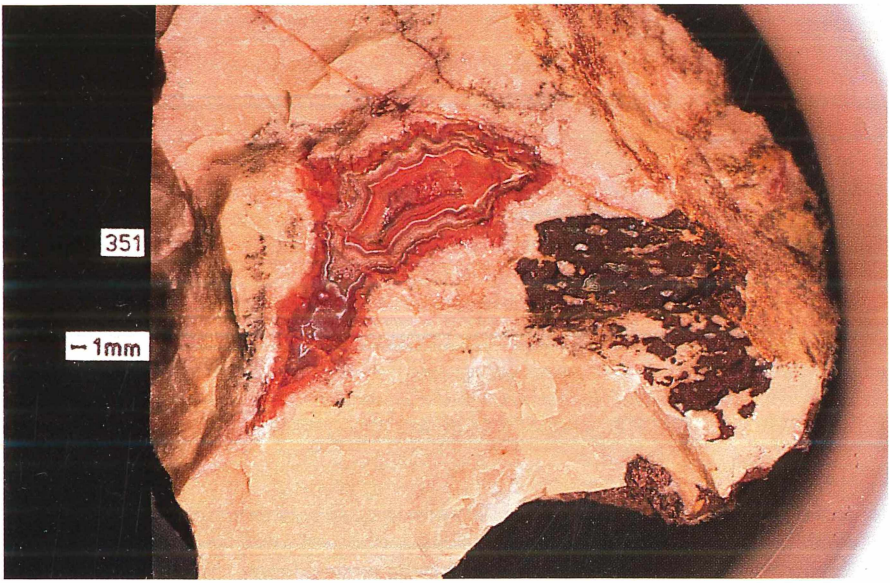


Abb. 67: Achat (Fundpunkt 1) im karbonatischen Bindemittel einer Vulkanitbreccie.

Kurve, ein anderer fällt aus der Kurve heraus. Obgleich in dem so erhaltenen Diagramm aber den Quotienten der Primärteilchengrößen jeweils zwei Temperaturwerte zugeordnet werden, sprechen BLANKENBURG & BERGER (1981) von einem „Geothermometer". Es muß wohl nicht eigens betont werden, daß eine unkritische Anwendung dieses, an Quarzkristallen gewonnenen, ohnehin zweifelhaften Diagramms auf kryptokristalline Quarzaggregate (Achate) nicht zulässig ist. Von einer Bestimmung der Bildungstemperaturen von Achaten kann also hier keine Rede sein.

3. Schließlich wird auch die Rolle, die THOMAS & BLANKENBURG (1981: 631) dem Pigment bei der Entstehung rhythmischer Bänderungen zuschreiben, weder durch unsere Untersuchungen bestätigt, noch bei THOMAS & BLANKENBURG wirklich belegt. Eisenpigmente im Achat beeinflussen die Phänofasern nicht systematisch in ihrer Ausbildung (Kap. III.2.7., S. 57 ff.). Daß die Rhythmik der Achate von der Verteilung der Pigmentkörner unabhängig ist, zeigt sich an der gleichartigen Ausbildung der Phänofasern eines ‚Bandes' an Stellen mit und ohne Pigmentkorn (z. B. Abb. 43); dieser Tatsache entsprechen auch die Abbildungen von THOMAS & BLANKENBURG (1981: 631, 632).

III.5. Sonstige Achattheorien

III.5.1. Der Ansatz von SUNAGAWA & OHTA

Nach den Vorstellungen von SUNAGAWA & OHTA (1976: 142, 143, 144) sind Achate Füllungen ehemaliger Gasblasen in Vulkaniten; sie entstehen als Absätze aus hydrothermalen Lösungen (SiO_2-Sole), die den Blasen durch kleine Kanäle zugeführt werden; ein Gel-Stadium wird bei der Entstehung von Achaten dagegen nicht durchlaufen. Aus jeweils einer einzigen zugeführten Lösungsmenge setzen sich in feststehender Sukzession zunächst Chalcedon mit gemeiner Bänderung, dann grobe Quarzkristalle und schließlich Uruguay-Bänder ab; innerhalb einer solchen Sukzession können allerdings die Stadien ‚grobe Quarze' und ‚Uruguay-Bänder' auch fehlen (SUNAGAWA & OHTA 1976: 131, 142, 143, 145). Diese Sukzessionen können sich durch Zufuhr neuer Lösung dann mehrfach wiederholen (grober äußerer Rhythmus). Die Rhythmik der gemeinen Achatbänderung entsteht dagegen durch einen rhythmischen SiO_2-Absatz aus einem einzigen Lösungsquantum; es ist hierbei wohl ein – nicht näher bestimmter – innerer Rhythmus gemeint. Die Uruguay-Struktur schließlich beruht auf einem gravitativen Absatz kleiner Quarzkristalle, die sich zuvor im Sol vollständig ausgebildet haben (SUNAGAWA & OHTA 1976: 142, 143, 145).

III.5.2. Diskussion

Der Kern des Ansatzes von SUNAGAWA & OHTA ist die Behauptung einer feststehenden, gelegentlich mehrfach wiederholten Sukzession „Chalcedon mit gemeiner Bänderung → grobe Quarze → Uruguay-Bänder" im Achat. Hierdurch können im Achat die Abfolgen „Chalcedon mit gemeiner Bänderung → grobe Quarze", „grobe Quarze → Uruguay-Bänder" und „Uruguay-Bänder → Chalcedon mit gemeiner Bänderung" auftauchen. Diese Aussage wird aber dadurch weitgehend ihres Inhalts entledigt, daß SUNAGAWA & OHTA das mögliche Fehlen der Stadien ‚grobe Quarze' und ‚Uruguay-Bänder' innerhalb der Sukzessionen zugestehen: Damit werden auch die Abfolgen „grobe Quarze → Chalcedon mit gemeiner Bänderung" und „Chalcedon mit gemeiner Bänderung →

Uruguay-Bänder" und somit insgesamt fünf der sechs überhaupt denkbaren Abfolgen möglich. Die Aussage der feststehenden Sukzession wird damit auf zwei bescheidenere Aussagen reduziert:

a) Als erster Absatz im Achat tritt stets Chalcedon mit gemeiner Bänderung auf.

b) Die Abfolge „Uruguay-Bänder → grobe Quarze" bleibt ausgeschlossen.

Über die Richtigkeit von Aussage a) möchte ich hier nicht entscheiden. Aussage b) allerdings ist sicher falsch; die Abfolge „Uruguay-Bänder → grobe Quarze" ist in Achaten nicht nur möglich, sie tritt sogar sehr häufig auf [28]; ein Beispiel hierzu gibt die Abbildung 58.

Auch die der Position von SUNAGAWA & OHTA zugrunde liegende allgemeinere Annahme, die morphologisch unterschiedenen SiO_2-Absätze in Achatmandeln (Chalcedon mit gemeiner Bänderung, Uruguay-Bänder, Zonen makrokristalliner Quarze) seien prinzipiell nur durch aufeinanderfolgende Absatzperioden verständlich, in denen ausschließlich eine der genannten morphologischen Typen gebildet wird, ist nicht haltbar. So zeigt etwa Abbildung 64 einen Achat, bei dem Uruguay-Bänderung und makroskopische Quarzkristalle offensichtlich gleichzeitig zur Ausbildung kamen: Horizontal gebänderte SiO_2-Absätze finden sich in Zwischenräumen zwischen den Quarzkristallen. Diese Erscheinung konnte auch an einigen anderen Achaten beobachtet werden. Die mögliche Gleichzeitigkeit des SiO_2-Absatzes in Zonen mit gemeiner Bänderung und solchen mit Uruguay-Bänderung wird durch die Abbildungen 51, 52, 53, 54, 55 und 56 belegt: Zonen mit gemeiner Bänderung und solche mit Uruguay-Bänderung sind in Konkurrenz zueinander ausgebildet. In diesem Zusammenhang ist auch eine weitere Beobachtung von Interesse: In einer Probe, bei der diese Konkurrenz auftritt (Abb. 51, 52), setzt sie sich am Übergang zur Quarzfüllung der Mandelmitte in veränderter Weise fort: Im Anschluß an den Chalcedon mit gemeiner Bänderung folgen Quarzkristalle, deren Größe schnell und kontinuierlich zur Mitte hin ansteigt; im Anschluß an die Uruguay-Bänder folgt dagegen eine Zone etwa gleichkörniger Kristalle, deren Größe die der Kriställchen in der Uruguay-Bänderung zwar deutlich übersteigt, die der Quarzkristalle im Anschluß an den Chalcedon mit gemeiner Bänderung aber nicht erreicht; die beiden Zonen sind wiederum in Konkurrenz zueinander ausgebildet, so daß sich die Konkurrenz zwischen dem Chalcedon mit gemeiner Bänderung und der Uruguay-Bänderung auch in der zentralen Quarzfüllung noch kurzzeitig fortsetzt (Abb. 51, 52).

Auch die These, Chalcedon käme im Achat unmittelbar aus der Lösung ohne Durchlaufen eines Gel-Stadiums zum Absatz, ist wohl nicht haltbar; die Ausbildung gebänderter Pigmentausscheidungen unabhängig von der Achatbänderung, wie sie in Abb. 46 und 47 nachgewiesen ist, ist im kristallinen Medium von Chalcedon so kaum vorstellbar.

Sicher falsch ist auch die Aussage, die Uruguay-Struktur beruhe auf einem gravitativen Absatz zuvor im Sol vollständig ausgebildeter Quarzkriställchen. Es zeigt sich vielmehr bei der mikroskopischen Untersuchung der Uruguay-Struktur, daß hier Rekristallisationserscheinungen die Regel sind: Quarzkristalle wachsen unter gegenseitiger Konkurrenz und verzahnen sich hierbei; auch Sphärolithe, die sich gegenseitig in ihrer Ausbildung einschränken, sind gelegentlich ausgebildet und nur als „Rekristallisationserscheinungen" in bereits vorhandenen horizontalen SiO_2-Absätzen verständlich (Abb. 68). Als eindeutige Rekristallisationserscheinungen treten zudem linsenförmige bis lagige Quarzzonen innerhalb der Uruguay-Bänder auf (Abb. 57, 58, 79).

Schließlich erklärt die Theorie von SUNAGAWA & OHTA auch nicht die Bildung der Moosachat-Strukturen.

[28] Erwähnenswert ist, daß SUNAGAWA & OHTA sich bei ihren Behauptungen auf die Untersuchung von nur drei Achaten stützen.

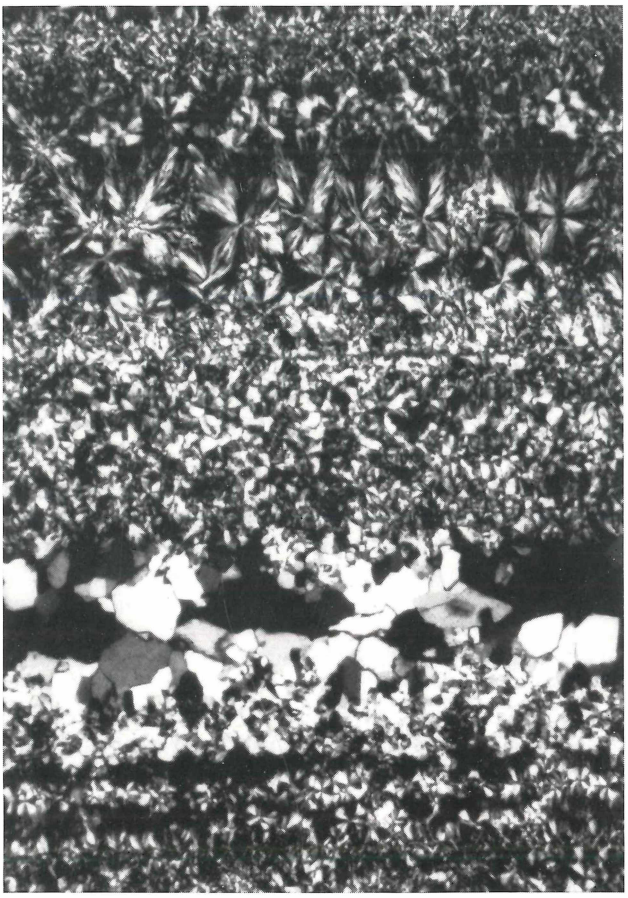


Abb. 68: Rekristallisationserscheinungen in Uruguay-Bändern eines Achats (o. F.). Chalcedon-Sphärolithe sind in Konkurrenz zueinander ausgebildet und Quarzkristalle ineinander verzahnt. Dünnschliffaufnahme; + N. Größe des Bildausschnitts: ca. 3,0 x 2,1 mm.

III.5.3. Theorie von HEINZ und LINCK

Nach der Theorie von LINCK & HEINZ (1930: 526, 527) sind Achate Hohlraumfüllungen. Sie entstehen im Zusammenhang mit Verwitterungsvorgängen im feuchtwarmen Klima. Die Rhythmik der Achate beruht auf einem äußeren, jahreszeitlichen Rhythmus: Kieselsäuresole bilden sich in der Trockenzeit und dringen auf kleinen Spalten, aber auch durch Diffusion durch das Gestein selbst in dessen Hohlräume ein. In nassen Jahreszeiten bilden sich dann Alkali/Erdalkalimetall-Karbonat/Sulfat-Lösungen oder auch einfach CO_2-reiche Lösungen; sie dringen auf den gleichen Wegen zu den Hohlräumen und führen zur Koagulation der dort vorhandenen SiO_2-Sole. Es setzen sich hierbei einerseits Gel-Lagen aufeinander ab, andererseits kann es zur Ausflockung von SiO_2 kommen, das sich dann in horizontalen Lagen absetzt (Uruguay-Struktur). LINCK und HEINZ sehen damit in den Grenzen zwischen einzelnen gemeinen Achatbändern bzw. Uruguay-Lagen größere zeitliche Unterbrechungen des SiO_2-Absatzes. Jeweils nach Absatz einer Gel-Lage beginnt ihre „Entglasung", die mit einem Wasserverlust unter Schrumpfung des Gels einsetzt.

III.5.4. Diskussion

Die Theorie von HEINZ und LINCK wird durch die bereits vorgebrachten Argumente gegen den äußeren Rhythmus als strukturbestimmenden Faktor hinreichend widerlegt; diese Argumente sollen hier nicht nochmals vorgetragen werden. Darüber hinaus sprechen folgende Gründe gegen die Theorie von HEINZ und LINCK:

1. Zunächst ist der SiO_2-Transport durch Diffusion eines Sols (!) wegen der geringen Diffusionsgeschwindigkeit von Kolloiden kaum möglich.
2. KNÖLL (1942: 297) weist mit Recht darauf hin, daß nicht einzusehen ist, warum der Prozeß der Koagulation des SiO_2-Sols erst im Blasenraum erfolgen, vorher aber verhindert werden soll.
3. Für die Entstehung von Achaten können Verwitterungsprozesse **im feuchtwarmen Klima** (!) schon deshalb nicht maßgebend sein, weil solche klimatischen Bedingungen etwa im Saar-Nahe-Gebiet während des Oberrotliegenden nicht vorhanden waren (ANACKER 1959b: 20; FALKE 1974) [29].
4. Schließlich ist wohl STORZ (1931: 141) zuzustimmen, wenn er Einkieselungen größerer Hohlräume im humiden Klima überhaupt für kaum möglich hält, weil das reichlich vorhandene Wasser eine SiO_2-Abfuhr zur Folge haben und eine stärkere SiO_2-Akkumulation verhindern muß.

III.5.5. Die Ansätze von SIM, SHAUB, HEROLD und WEISS & WEISS

Nach SIM (1973; 1979; 1982) sind Achate Blasenfüllungen in Magmatiten. Die Ausfüllung der Blasen beginnt bereits, wenn die Lava noch Temperaturen von 100° C – 300° C besitzt, mit Absätzen verschiedener Minerale und einer ersten Chalcedonschicht. Der wesentliche, gebänderte Teil der Achate bildet sich dagegen bei ca. 15° C – 20° C durch schichtweisen SiO_2-Absatz aus dem Grundwasser. In der Rhythmik der Achate spiegeln sich damit wesentlich Schwankungen des Grundwasserspiegels sowie der Grundwasserzusammensetzung wider.

Eine Diskussion dieses Ansatzes erübrigt sich durch die bereits vorgetragenen Argumente gegen Theorien, die einen schichtweisen SiO_2-Absatz aufgrund äußerer Rhythmen als wesentlichen strukturbestimmenden Faktor der Achatgenese annehmen.

SHAUB (1955: 117, 118; 1979a: 2350; 1979b: 2556, 2564) hält Achate in Magmatiten für ehemalige gelatinöse SiO_2-Massen, die sich im Magma durch Entmischung im flüssigen Zustand ausgebildet haben. Die SiO_2-Absätze mit gemeiner Achatbänderung sollen dann bei Temperaturen oberhalb, die mit Uruguay-Struktur bei Temperaturen unterhalb des kritischen Punkts der Lösung entstanden sein (SHAUB 1979a: 2354; 1979b: 2548, 2558). Unabhängig von dieser Achatbildung im magmatischen Bereich sollen Achate auch in Sedimenten entstehen können; die Angaben von SHAUB (1980b: 889, 890) sind aber hier so unbestimmt, daß eine Diskussion dieser Aussage nicht sinnvoll erscheint.

Eine Besprechung der Vorstellungen von SHAUB zur Achatbildung im Magma erübrigt sich durch die bereits vorgetragenen Argumente gegen die Schmelztropfentheorien, die sich hier wiederholen ließen. Auch die Frage nach der möglichen Bedeutung der kritischen Temperatur wurde bereits hinreichend behandelt.

[29] Der Schluß von ANACKER (1959b: 20), Verwitterungsprozesse im Oberrotliegenden seien deshalb als Faktor der Achatgenese ganz auszuschließen, geht allerdings zu weit.

HEROLD (1949: 7) vertritt die Auffassung, Achatmandeln seien ehemalige vulkanische Auswürflinge; die sie umgebenden Gesteine sind nicht Ergußgesteine sondern erhärtete Tuffe; HEROLD bezieht sich hier speziell auf die Vorkommen im Raum Idar-Oberstein.

Die HEROLD'sche Theorie wird von LEYSER (1948) befürwortet, FISCHER (1954: 369) dagegen weist sie mit Recht als unhaltbar zurück: Die HEROLD'sche Grundannahme, die achatführenden Gesteine im Saar-Nahe-Gebiet seien erhärtete Tuffe, ist sicher falsch. Auf eine nähere Darstellung und Diskussion dieser Theorie kann daher verzichtet werden.

Schließlich sei auf die Vermutung von WEISS & WEISS (1954b: 111) hingewiesen, die Phänofasern des Chalcedons in Hohlräumen von Basalten könnten Pseudomorphosen nach faserigem SiO_2 darstellen. Faseriges SiO_2 besteht aus verzerrten SiO_4-Tetraedern, die über jeweils zwei Sauerstoffatome miteinander verknüpft sind und so eindimensional unendliche Ketten bilden (WEISS & WEISS 1954a; 1954b: 104, 105). Diese faserige SiO_2-Modifikation entsteht bei der Reduktion von SiO_2 zu SiO und einer darauffolgenden Oxidation zu SiO_2 bei Temperaturen im Bereich von 1200° C – 1400° C (WEISS & WEISS 1954a; 1954b; FLÖRKE 1966/67: 187). Sie reagiert bereits mit geringen Mengen von Wasserdampf unter Erhaltung der makroskopischen Faserstruktur zu amorphem SiO_2 (WEISS & WEISS 1954a; 1954b: 95, 99). WEISS & WEISS (1954b: 111) halten es nun für möglich, daß Chalcedon in Basalthohlräumen aus faserigem SiO_2 entstanden sein könnte, das sich dort zuvor aus Silikaten über ein SiO-Zwischenstadium gebildet haben soll.

Bei der Beurteilung dieses Ansatzes ist zunächst FLÖRKE (1966/67: 187) zuzustimmen, wenn er die Bildung der faserigen SiO_2-Modifikation in Basalthohlräumen wegen der Anwesenheit von Wasser für unmöglich hält. Auch die für die Bildung von faserigem SiO_2 erforderlichen Temperaturen werden in Basalthohlräumen sicher nicht erreicht: Bei Temperaturen von 1200° C – 1400° C wäre eine völlige Aufschmelzung des Basalts zu erwarten. Auch weist die Morphologie von faserigem SiO_2 bzw. entsprechender amorpher SiO_2-Fasern keine Ähnlichkeit mit der des Chalcedons auf: Die SiO_2-Fasern bilden nicht Sphärolithe, sondern wirre bis verfilzte Aggregate (WEISS & WEISS 1954b; vgl. NEMETSCHEK & HOFMANN 1953); bei der Reaktion mit Wasser verbiegen sich die Fasern zudem in vielfältiger Weise (WEISS & WEISS 1954b: 109, 110; vgl. NEMETSCHEK & HOFMANN 1953). Zum Verständnis der Phänofasern des Chalcedons ist der Ansatz von WEISS & WEISS damit nicht geeignet.

IV. Grundzüge einer neuen Theorie der Achatgenese

In Anbetracht der Vielfalt der zur Frage der Achatbildung vorgebrachten kontroversen Theorien und Argumente wird gelegentlich die Auffassung vertreten (KRÄMER 1955: 199, 200; WEBSTER 1970: 183; BALL & BURNS 1975: 149), es sei bereits ein Fehler, **eine** Achattheorie finden zu wollen, weil Achate in der Natur im einen Fall nach der einen, im anderen gemäß einer anderen Theorie entstanden seien. Diese Möglichkeit, daß das gleiche Produkt „Achat" von Fall zu Fall auf völlig verschiedene Weisen entstanden sein könne, ist zwar sehr unwahrscheinlich, läßt sich aber nicht von vornherein und grundsätzlich ausschließen. Unsere Diskussion der bisherigen Achattheorien hat nun aber gezeigt, daß hierin sicher nicht die Lösung des Achatproblems liegen kann: Achate werden nicht von verschiedenen der bisherigen Theorien gleichermaßen gut erklärt, sondern von keiner der Theorien wirklich. Es erscheint daher angemessen, Grundzüge **einer** „neuen" Achattheorie herauszuarbeiten.

IV.1. Der petrologische Bereich der Achatgenese

Eine erste, wichtige Frage betrifft zunächst den petrologischen Bereich der Achatentstehung: Sind Achate Produkte von Prozessen im intramagmatischen, vulkanisch/postvulkanischen oder aber sedimentär-diagenetischen Bereich? Wie bereits oben (Kap. III.3.4., Kap. III.4.2.) gezeigt wurde, entfällt die Möglichkeit, Achate als intramagmatische oder als spezifisch vulkanisch/postvulkanische Bildungen anzusehen. Es handelt sich offenbar vielmehr um Mineralaggregate, die im P-T-Bereich von Sedimentation und Diagenese entstanden sind. Die Sauerstoffisotopenverhältnisse in Achaten weisen eindeutig auf die Richtigkeit dieser Auffassung hin (Kap. III.3.4.) [30]. Die Entstehung von Achaten ist nicht unmittelbar an die Prozesse bei der Entstehung der Vulkanite, in denen sie häufig vorkommen, geknüpft. Dies zeigt sich etwa an den in Abb. 66 und 67 wiedergegebenen Achaten von Waldhambach: In karbonatisch verkitteten Mandelsteinbreccien tritt Achat innerhalb der Karbonatzonen, d. h. vom Magmatit isoliert, auf. Die Bildung der Achate erfolgte damit lange nach Erkalten des Magmatits. Ist aber die Achatgenese tatsächlich nicht unmittelbar an Prozesse bei der Entstehung von Vulkaniten geknüpft, so sollte auch das Vorhandensein von Vulkaniten keine notwendige Bedingung der Achatbildung sein; Achate sollten auch in anderen Gesteinen anzutreffen sein. Dies ist nun tatsächlich der Fall: Achate lassen sich in den unterschiedlichsten Gesteinen beobachten; sie treten als Hohlraumfüllungen in verschiedenen Sedimentgesteinen (BEETZ 1923: 358, 366; CARVER 1980: 580; KAISER 1923: 140; KAISER 1926b: 295; KALKOWSKY 1901: 87, 105, 106; OBENAUER 1974; OBENAUER 1979; STORZ 1931: 142; STROM, UPCHURCH & ROSENZWEIG 1981; STÜRMER 1955), Plutoniten und Metamorphiten (z. B. Gneisen, Syeniten u. a., auch Apliten) (BEETZ 1923: 358, 362, 367, 368; KAISER 1923: 140; KAISER 1926b: 295; KALKOWSKY 1901: 94; NATHORST 1895; STORZ 1931: 142, 409) aber auch Pegmatiten (KAISER 1926a: 68) und Skarnen (TRÜSTEDT 1907: 123, 124) auf. Die Bildung von Achaten als Hohlraumfüllungen in Gesteinen von so unterschiedlicher Genese macht es wahrscheinlich, daß die Entstehung der Achate einen Vorgang im sedimentär-diagenetischen P-T-Bereich, den ja all diese Gesteine während oder nach ihrer eigenen Genese durchlaufen haben, darstellt. Schließlich weist auch das Vorkommen von Achaten in verkieselten Hölzern (ABBOTT 1887: 82, 83; GOERG 1929: 10;

[30] In diesem Zusammenhang sei auch darauf hingewiesen, daß KELLER (1979) aus Sauerstoffisotopenuntersuchungen an mexikanischen Quarzingeoden auf Bildungstemperaturen dieser Geoden um 50° C schließt.



Abb. 69: Achat mit Uruguay-Struktur in verkieseltem Holz (o. F.). Sammlung H. GAERTNER, Idar-Oberstein.

LIESEGANG 1914a: 190; LIESEGANG 1915b: 2, 16; STERZEL 1900: 33; WETZEL 1913: 34) die Achatgenese als einen Vorgang im sedimentär-diagenetischen P-T-Bereich aus [31] und läßt zugleich vermuten, daß die Entstehung von Achaten und die Verkieselung von Hölzern sehr verwandte Vorgänge sind. Die Abbildung 69 zeigt einen Achat mit Uruguay-Struktur in verkieseltem Holz.

Ebenso wie verkieselte Hölzer haben die Gesteine der Carneol-Schichten im Buntsandstein den P-T-Bereich von Sedimentation und Diagenese im Verlauf ihrer Geschichte sicher nie verlassen. In zwei sehr beachtenswerten Arbeiten hat nun OBENAUER (1974; 1979) Achatbildungen in solchen Carneolen beschrieben und insbesondere dort auch Achate mit Uruguay-Struktur entdeckt. Durch unsere eigenen Untersuchungen von Carneolen des Buntsandsteins konnten diese Entdeckungen OBENAUERs bestätigt werden: Abbildung 70 zeigt einen solchen Carneol mit Uruguay-Achat. Die Abbildungen 72 und

[31] Die Vorgänge in diesem P-T-Bereich umfassen natürlich auch Prozesse der Bodenbildung.



Abb. 70: Buntsandsteincarneol (Fundpunkt 6) mit Achatbildungen. 2 mm



Abb. 71: Buntsandsteincarneol (Fundpunkt 6) mit Achatbildungen.

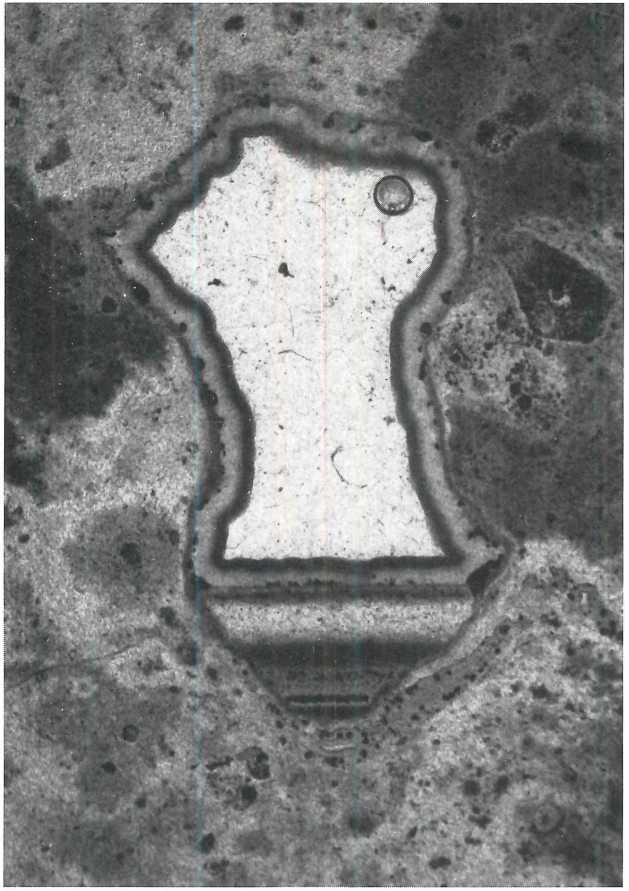


Abb. 72: Dünnschliffaufnahme des Uruguay-Achats aus Abb. 70. Größe des Bildausschnitts: ca. 3,0 x 2,1 mm.

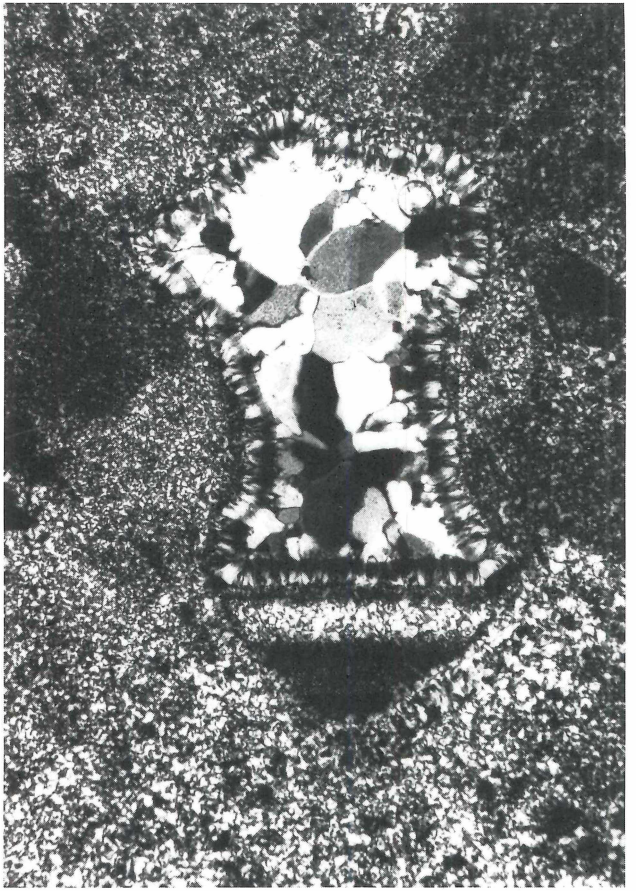


Abb. 73: Wie Abb. 72; + N.

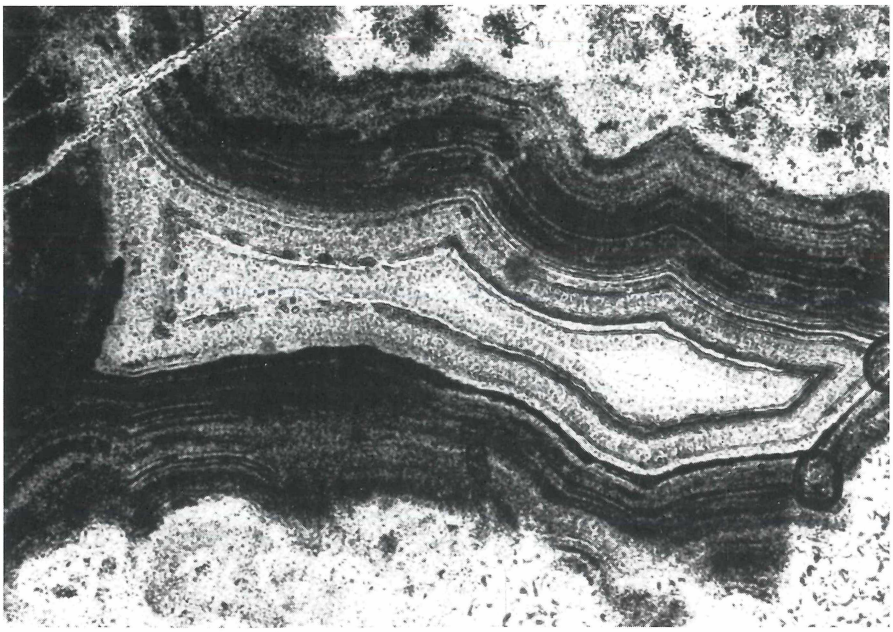


Abb. 74: Dünnschliffaufnahme eines Achats in Buntsandsteincarneol (Fundpunkt 7). Größe des Bildausschnitts: ca. 0,78 x 0,54 mm.

73 zeigen den gleichen Uruguay-Achat im Dünnschliff: Die sphärolithische Ausbildung der Zone mit gemeiner Bänderung und die körnige Ausbildung der Uruguay-Struktur sind zu erkennen. Abbildung 74 zeigt einen Achat im Buntsandsteincarneol von Limbach/Saarland (Fundpunkt 7) im Dünnschliff. Aus all diesen Fakten läßt sich schließen, daß die Achatgenese einen Vorgang im sedimentär-diagenetischen P-T-Bereich darstellt. Hierbei kommen von vornherein nur Prozesse in Frage, bei denen SiO_2 aus (echten oder kolloiden) wäßrigen Lösungen abgesetzt wird, wobei möglicherweise ein Gel-Stadium durchlaufen werden kann. Dabei spielt die kritische Temperatur von Wasser bzw. wäßrigen Lösungen keine wesentliche Rolle (Kap. III.3.4., S. 70 ff.). Das Vorkommen von Uruguay-Achaten in Buntsandsteincarneolen beweist diesen Sachverhalt erneut, was OBENAUER (1974: 114, 115) mit Recht betont. Insbesondere auch das häufige gemeinsame Vorkommen von Achaten mit und ohne Uruguay-Struktur in unmittelbarer Nachbarschaft in Handstücken von Buntsandsteincarneol (Fundpunkt 6), das ich bei meinen Untersuchungen beobachten konnte (OBENAUER 1974: 110, 111 stellt diesen Sachverhalt ebenfalls fest), zeigt, daß die Ausbildung der Uruguay-Struktur bzw. die der gemeinen Bänderung mit der kritischen Temperatur der achatbildenden Lösung in keinerlei kausalem Zusammenhang stehen kann. Abbildung 70 zeigt ein Beispiel hierzu: Im Abstand von ca. 1 mm treten Achatfüllungen mit und ohne Uruguay-Struktur auf; in der Füllung ohne Uruguay-Struktur konnte die gemeine Bänderung, die in Abb. 70 nicht zu erkennen ist, im Dünnschliff eindeutig nachgewiesen werden.

Achate bilden sich bei niedrigen Temperaturen. WHITE & CORWIN (1961: 117, 118) vermuten, die Entstehung von Achaten erfolge im Bereich von 100° C – 300° C. Hier erscheint mir zunächst die obere Grenze zu hoch angesetzt zu sein, denn die These von der Achatbildung im sedimentär-diagenetischen Bereich impliziert bereits eine Temperaturgrenze bei ca. 200° C. Die Untergrenze bei 100° C begründen WHITE & CORWIN

(1961: 118) mit der Aussage, eine Quarzzüchtung unterhalb 100° C sei bisher nicht gelungen. Diese Behauptung ist allerdings falsch. Bereits LEITMEIER (1909: 247) gelang die Bildung von Quarz durch Umwandlung von amorpher Kieselsäure in wäßriger Lösung bei 80° C. In neuerer Zeit haben HARDER & FLEHMIG (1967; 1970), HARDER & MENSCHEL (1967) und MACKENZIE & GEES (1971) Quarzkristalle auch bei Temperaturen zwischen 80° C und 3° C in wäßrigen Lösungen synthetisieren können. Ebenso gelang LEITMEIER (1909: 244–246) die Bildung von Chalcedon aus amorpher Kieselsäure in wäßriger Lösung bei 80° C. In diesem Zusammenhang sei auch auf die Beobachtungen DAUBRÉEs (1880: 146, 149) über Mineralneubildungen in Hohlräumen von römischen Ziegeln hingewiesen, mit denen Thermalquellen eingefaßt waren: Durch die lange Einwirkung von Thermalwässern mit einer mittleren Temperatur von höchstens 70° C bildete sich in den Hohlräumen der Ziegel u. a. Chalcedon. Es ist daher keineswegs zulässig, für die Chalcedonbildung in der Natur eine untere Temperaturgrenze von 100° C anzunehmen.

Auf Grund unserer bisherigen Betrachtungen läßt sich der T-Bereich der Achatbildung zunächst auf $> 0°$ C und $< 200°$ C eingrenzen, wobei sich aber vermuten läßt, daß die obere Grenze noch zu hoch angesetzt ist. Für eine allzu enge Eingrenzung des Temperaturbereichs der Achatgenese (25 – 30° C), wie sie PABIAN (1978: 17) vornimmt, liegt allerdings kein Anhaltspunkt vor.

IV.2. Äußere und innere Rhythmen

Unsere Untersuchungen haben ausführlich gezeigt (s. o.), daß äußere Rhythmen nicht als wesentliche strukturbildende Faktoren bei der Achatgenese angesehen werden können. Für die Achatgenese wesentlich sind vielmehr innere Rhythmen, über deren Charakter allerdings noch weitere Untersuchungen anzustellen sind. Diese Tatsache zeigte sich bei benachbarten Achatmandeln in Vulkaniten (s. o.) und ihre Richtigkeit bestätigt sich auch bei der Untersuchung der Achatbildungen im Buntsandsteincarneol: Auch hier treten vollkommen verschieden aufgebaute Hohlraumfüllungen in unmittelbarer Nachbarschaft auf. Abbildung 70 zeigt einen Achat mit und einen ohne Uruguay-Struktur sowie eine Quarzfüllung in unmittelbarer Nachbarschaft. Ähnliches zeigt auch Abbildung 71; hier ist insbesondere auch der unterschiedliche Aufbau unmittelbar benachbarter Uruguay-Achate zu erkennen. Die vollkommene Verschiedenheit der Hohlraumfüllungen im Carneol von Fundpunkt 6 geht auch aus den Untersuchungen von OBENAUER (1974: 113) hervor: Um festzustellen, ob ein bestimmtes Abscheidungsschema in den Achaten auftaucht, stellte er die Bänderfolge von 17 Achaten fest und erhielt so vergleichbare Profile. Diese zeigen nun nach unserer Ansicht nochmals eindeutig, daß eine „Stratigraphie" der Achate dieses Vorkommens unmöglich ist.

Äußere Rhythmen sind ganz allgemein kein wesentlicher Faktor bei der Entstehung von Achaten. Innere Rhythmen sind vielmehr wesentlich, ja entscheidend. Dieses Ergebnis schließt natürlich nicht aus, daß im einen oder anderen Fall einmal auch äußere Rhythmen einen Einfluß auf die Ausbildung von Achaten gehabt haben können, ohne aber dabei zum entscheidenden Faktor zu werden.

IV.3. Gemeine Bänderung, Uruguay-Struktur und „Infiltrationskanäle"

Unsere Untersuchungen haben die enge Korrelation von gemeiner Bänderung und Sphärolithstruktur nachgewiesen und gezeigt, daß die Entwicklung der Sphärolithe den für die Morphologie der gemeinen Bänderung maßgeblichen, strukturbestimmenden

Prozeß darstellt. Die Ursache der gemeinen Bänderung ist nicht im sukzessiven Absatz einzelner feinster SiO_2-Schichten an der jeweiligen Hohlraumwand, sondern in der Entwicklung der Sphärolithe selbst zu suchen. Dabei ist neben der gebänderten Internstruktur der Sphärolithe auch der Neuansatz von Sphärolithen für die Achat-Morphologie von Bedeutung (vgl. z. B. Abb. 17, 18). Darüber hinaus spielt wohl auch die Apposition einzelner Gel-Lagen eine gewisse Rolle: FISCHER (1954: 377, 380) hat diesen Sachverhalt durch die Beobachtung einzelner Schichten nachgewiesen, die teilweise von ihrer Unterlage losgelöst wurden. Einen solchen Fall konnte auch ich im Dünnschliff beobachten: Die Abbildungen 75 und 76 zeigen eine SiO_2-Haut, die sich von ihrer Unterlage losgelöst hat und danach zum Ausgangspunkt von jüngeren Sphärolithbildungen wurde.

Inwieweit aber (von inneren Rhythmen gesteuerte) Appositionsvorgänge bei der Entstehung der Sphärolithe selbst eine Rolle spielen, bleibt – wie die Diskussion der Sphärolithbildung selbst – einer späteren Untersuchung vorbehalten.

In einer Achatprobe wurde an mehreren Stellen die Ausbildung LIESEGANG'scher Ringe entdeckt (Abb. 46, 47). Dieser Befund ist nun nicht nur bei der Diskussion der LIESEGANG'schen Achattheorie (s. o.), sondern auch für das Verständnis der Achate selbst von Interesse: Die primäre Ausbildung LIESEGANG'scher Ringe diskordant zur gemeinen Achatbänderung zeigt, daß sich die entsprechenden Zonen im Achat ehemals im Zustand einer Gallerte befanden, in der die zur Entwicklung LIESEGANG'scher Ringe nötigen Diffusionsprozesse möglich waren. An Hand von Abb. 47 lassen sich hierzu nähere Einzelheiten angeben: Die Achatlage, in der die LIESEGANG'schen Ringe ausgebildet sind, bildete ursprünglich eine Gel-Zone von einheitlicher Konsistenz, die von den benachbarten Zonen deutlich verschieden war. Nur so ist zu verstehen, daß eine gleichmäßige Diffusion in dieser Zone möglich war, die aber die unmittelbar benachbarten Zonen (von deutlich abweichender Konsistenz) weitgehend unbeeinflußt ließ. Interessant ist, daß innerhalb der Zone mit LIESEGANG'schen Ringen nochmals eine feine gemeine Achatbänderung ausgebildet ist; insbesondere im oberen Bereich der Abbildung 47 kommt diese deutlich zum Vorschein. Hier könnte man nun vermuten, daß diese gemeine Bänderung erst nach Ausbildung der LIESEGANG'schen Ringe innerhalb der Gallerte entstanden ist; andernfalls wäre die gleichmäßige Ausbildung der LIESEGANG'schen Ringe nur schwer verständlich. Zur gleichen Vermutung kommt man an Hand von Abb. 46: Auch hier sind die LIESEGANG'schen Ringe innerhalb eines zunächst gleichförmigen Mediums entstanden, in dem sich vermutlich erst danach die die LIESEGANG'schen Ringe kreuzende gemeine Bänderung ausbildete. Es ist also denkbar, daß die Entwicklung der Sphärolithe und damit die der gemeinen Bänderung innerhalb eines gelatinösen Mediums stattfand.

Aus unseren Untersuchungen ergibt sich weiterhin (Kap. III.2.7., Kap. III.4.2.), daß die Pigmente im Achat keine entscheidende Rolle bei der Entstehung der gemeinen Bänderung gespielt haben können. Die gemeine Achatbänderung beruht vielmehr im wesentlichen auf inneren Rhythmen bei der Entstehung der Sphärolithe. Da im Rahmen dieser Arbeit die Sphärolithbildung selbst nicht behandelt wird, kann auch über den speziellen Charakter der inneren Rhythmen noch keine bestimmte Aussage getroffen werden. Um aber die Möglichkeit einer solchen inneren Rhythmik bei Sphärolithbildungen plausibel zu machen, sei auf die achatähnlichen Bänderbildungen bei der Zersetzung alter Gläser (GEILMANN 1956: 149), bei anderen Entglasungsvorgängen (ENDELL 1913: 141; vgl. LIESEGANG 1931c: Abb. 291) und hier insbesondere auf die Rhythmenbildung bei der Chalcedonsynthese aus Kieselglas (FRANKE 1951; WHITE & CORWIN 1961) hingewiesen; die Analogie, die zwischen dem Bau von Gläsern und Gelen besteht, läßt erwarten, daß ähnliche Strukturbildungen auch in Gelen möglich sein sollten.



Abb. 75: Dünnschliffaufnahme eines Achats (o. F.). Man erkennt die Ablösung einer ehemaligen SiO_2-Haut von ihrer Unterlage. Größe des Bildausschnitts: ca. 3,0 x 2,1 mm.

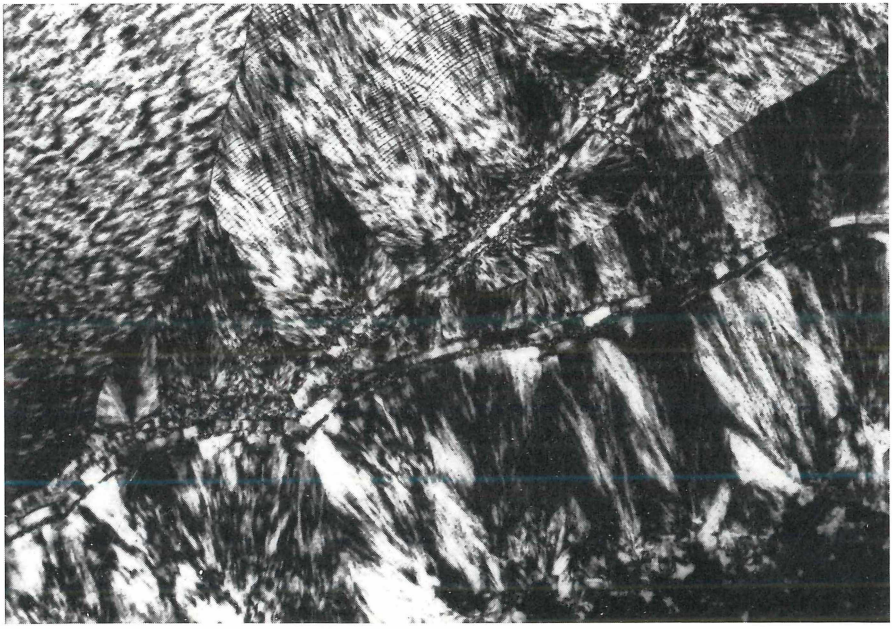


Abb. 76: Wie Abb. 75; + N.

Es wurde bereits gezeigt, daß Achate im sedimentär-diagenetischen P-T-Bereich entstehen, wobei nur echte oder kolloide Lösungen sowie Gele als Medium der Achatgenese in Frage kommen. Durch den Nachweis LIESEGANG'scher Ringe im Achat wurde zugleich gezeigt, daß Achatzonen mit gemeiner Bänderung ein Gel-Stadium durchlaufen haben können. Ich möchte daher die These **„Achate sind ehemalige kolloide Systeme"** aufstellen und im folgenden konkretisieren.

Betrachten wir zunächst die Uruguay-Struktur: Ihre horizontale Orientierung und gelegentlich ungleichmäßige Ausbildung weist sie eindeutig als eine Struktur aus, die durch den gravitativen Absatz von SiO_2-Partikelchen entstanden ist. Wie die im Dünnschliff sichtbaren mannigfaltigen Rekristallisationserscheinungen (Abb. 68) zeigen (vgl. Kap. III.5.2., S. 90 f.), lagen diese horizontalen Schichten ursprünglich in einem zumindest weitgehend amorphen Zustand vor. Als plausibelste Erklärung der Uruguay-Struktur bietet sich daher an, daß in einem Sol größere SiO_2-Partikelchen entstanden sind, zu Boden sanken und dort horizontale Lagen bildeten, die später rekristallisierten. Bei dieser Rekristallisation können u. a. auch Chalcedon-Sphärolithe entstehen, wie Abb. 68 zeigt [32]. Diese Tatsache könnte nun erneut Licht auf die Entstehung der gemeinen Bänderung werfen: Fänden sich etwa innerhalb horizontaler Lagen im Achat als Rekristallisationsprodukte Chalcedonsphärolithbildungen mit gemeiner Bänderung, so wäre die These, die gemeine Achatbänderung entstehe durch Sphärolithbildungen **in gelatinösen Medien** erneut bestätigt: Abbildung 77 zeigt ein morphologisches Detail eines Achats, bei dem sich innerhalb einer Uruguay-Struktur gemeine Bänderung ausgebildet hat. Es handelt sich bei diesen Sphärolithbildungen mit gemeiner Bänderung möglicherweise um Bildungen im gelatinösen Medium horizontaler Absätze. Als alternative Erklärung dieser komplexen Struktur kommt nur in Frage, daß abwechselnd einerseits horizontale Absätze aus dem Sol gebildet wurden und andererseits Sphärolithe von unten nach oben fortschreitend im Sol selbst ‚gewachsen' sind. Diese Möglichkeit erscheint aber hier etwas weniger wahrscheinlich. Untersucht man nämlich das gleiche Motiv im Dünnschliff (vgl. Abb. 78), so zeigt sich, daß einige Sphärolithe sich von der horizontalen Grenzfläche aus, auf der ihre Zentren liegen, nach unten und damit in eine zuvor bereits abgesetzte horizontale Schicht hinein fortsetzen. Eine weitere, besonders eindrucksvolle Sphärolithbildung innerhalb von Uruguay-Bändern zeigt die Abbildung 79.

Daß die Achatzonen mit gemeiner Bänderung in ihrer Entwicklung das Stadium eines gelatinösen Zustandes durchlaufen haben müssen, zeigt sich besonders deutlich an der Struktur der „Infiltrationskanäle" in solchen Zonen. Die „Infiltrationskanäle" stellen mit Sicherheit Deformationsstrukturen in ehemals gelatinösen Zonen dar. Der Gedanke, es handle sich um ursprüngliche Lücken bei einem sukzessiven SiO_2-Absatz, also um echte Zufuhrkanäle, läßt sich nicht halten: Wie die Abbildungen 9 und 62 zeigen, treten deutliche Deformationserscheinungen in der gemeinen Bänderung am Rande der „Infiltrationskanäle" auf; die gemeine Bänderung wird hier gewissermaßen angeschleppt und dünnt dadurch in charakteristischer Weise aus. Diese Deformation der gemeinen Bänderung betrifft interessanterweise auch die Phänofasern des Chalcedons. Abbildung 80 zeigt den Kontakt zwischen einem „Infiltrationskanal" und der angrenzenden gemeinen

[32] Es wird also die Auffassung von BRAITSCH (1957: 368) und WALGER (1954: 28) bestätigt, daß die Uruguay-Struktur durch horizontale SiO_2-Absätze aus Kieselsäuresolen zu verstehen ist. In diesem Zusammenhang sind auch zwei weitere Hinweise von Interesse: UTADA & MINATO (1970: 102) beobachteten die Ausbildung von horizontalen Opal-Lagen in sekundären Hohlräumen (ehemalige Pyroxen-Einsprenglinge) bei der Montmorillonitisierung von Andesiten. WHITE, BRANNOCK & MURATA (1956: 55) haben in Hohlräumen innerhalb von Kieselsinterabsätzen horizontale SiO_2-Lagen beobachtet. Diese späten Bildungen im Kieselsinter beruhen möglicherweise auf Vorgängen, die denen bei der Entstehung der Uruguay-Struktur in Achaten ähneln.

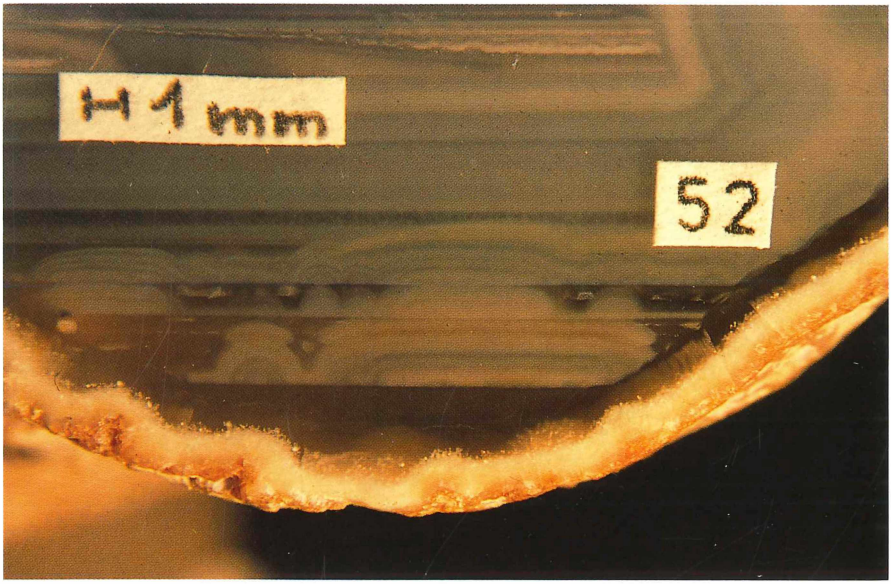


Abb. 77: Innerhalb der Uruguay-Bänder eines Achats (o. F.) treten Sphärolithbildungen (gemeine Bänderung) auf.

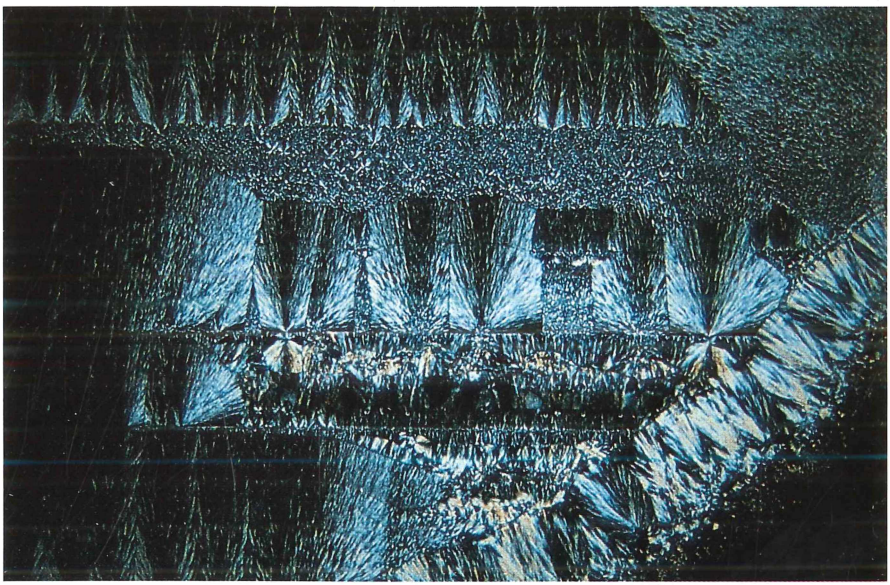


Abb. 78: Dünnschliffaufnahme (+ N). Ausschnitt aus dem Motiv von Abb. 77. Lange Bildkante: ca. 7 mm.

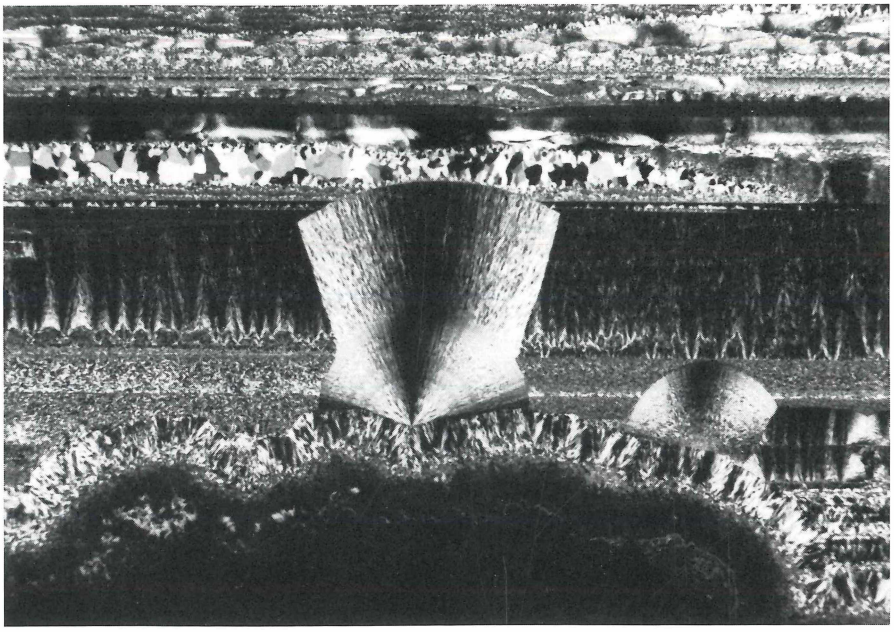


Abb. 79: Dünnschliffaufnahme (+ N) einer Achat-Partie (o. F.) mit Sphärolithbildung innerhalb von Uruguay-Bändern. Ausschnitt aus Abb. 57. Lange Bildkante: ca. 1,9 cm.

Bänderung: Die Phänofasern der gemeinen Bänderung verlaufen in gebogener Form; es besteht ein kontinuierlicher Übergang zwischen der Orientierung der Phänofasern der gemeinen Achatbänderung innerhalb und außerhalb der „Infiltrationskanäle". Die Korrelation zwischen dem Verlauf der Phänofasern und dem der gemeinen Bänderung bleibt also auch hier erhalten.

All diese morphologischen Eigenschaften des Achats zeigen eindeutig, daß die Zonen mit gemeiner Bänderung das Stadium eines gelatinösen Zustandes durchlaufen haben, der solche Deformationsvorgänge überhaupt erst ermöglicht. Bei der Annahme eines sukzessiven Absatzes von SiO_2 in unmittelbar kristalliner Form bleiben diese morphologischen Eigenschaften dagegen unverständlich. „Infiltrationskanäle" sind also keine wirklichen ehemaligen Zufuhrwege im Achat.

Eine ähnliche Interpretation der „Infiltrationskanäle" findet sich u. a. auch bei PABIAN (1978: 20) und WILD & BIEGEL (1948a: 36; 1948b: 270).

IV.4. Moosachat-Struktur und Membrantrümmer-Struktur

Sind Achate aus ehemaligen kolloiden Systemen entstanden, so bietet sich für die Entstehung der Moosachate eine Diskussion der Theorie von GERGENS und LIESEGANG (Kap. III.2.3., S. 45 f.) unmittelbar an. Sind Moosachat-Strukturen ehemalige Silikatgewächse? Es wurde bereits darauf hingewiesen, daß sowohl LIESEGANG's Theorie der Moosachat-Struktur als auch seine Deutung der Membrantrümmer-Struktur eigenständige Elemente seiner Achattheorie bilden, welche von der Widerlegung seiner Vorstellun-

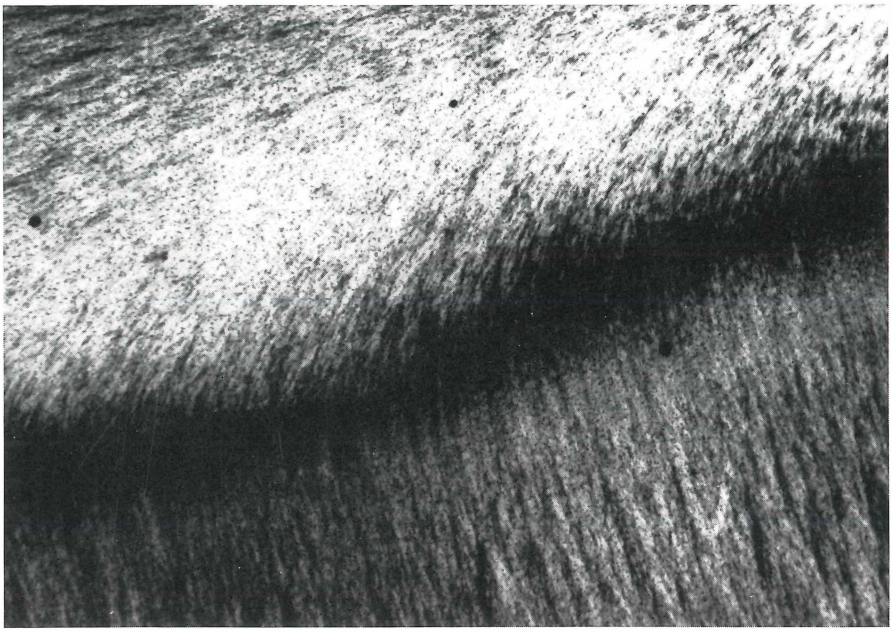


Abb. 80: „Verbogene" Phänofasern des Chalcedons am Rand eines „Infiltrationskanals" (o. F.). Dünnschliffaufnahme (+ N). Größe des Bildausschnitts: ca. 3,0 x 2,1 mm.

gen zur Entstehung der gemeinen Bänderung nicht betroffen sind. Sind Moosachat-Strukturen ehemalige Silikatgewächse, so sollten sie Eigenschaften besitzen, die sich aus dem Prozeß der Silikatgewächsentstehung ergeben: Moosachat-Strukturen sollten verzweigte und teilweise verwundene Gebilde sein und gelegentlich Verdickungen zeigen; die ehemalige Gel-Haut der Röhren sollte im Dünnschliff zu erkennen sein; insbesondere aber sollten sich die charakteristischen Durchbruchstrukturen in dieser ehemaligen Gel-Haut finden lassen, welche eine wichtige und für Silikatgewächse ganz typische Eigenschaft darstellen, die sich aus dem Bildungsmechanismus der Silikatgewächse ergibt. All diese morphologischen Eigenschaften lassen sich an Moosachat-Strukturen tatsächlich nachweisen: Abbildung 81 zeigt zunächst einen Achat mit Röhrenbildungen, die Silikatgewächsen, wie man sie im Reagenzglas herstellen kann, verblüffend ähnlich sehen. Die gemeine Bänderung folgt den Konturen dieser Moosachat-Strukturen; es läßt sich also schließen, daß diese Gebilde hier vor der Ausbildung der gemeinen Bänderung entstanden sein müssen. Ihre Entstehung in einem alkalisilikathaltigen SiO_2-Sol erscheint durchaus wahrscheinlich. Ebenso zeigen die Moosachat-Strukturen in diesem Achat eine bevorzugte Ausrichtung, ohne aber streng parallel zu verlaufen; diese Eigenschaft zeigen Silikatgewächse auch und zwar immer dann, wenn eine gewisse, nicht aber allzu große Differenz zwischen dem spezifischen Gewicht der Alkalisilikatlösung und der Metallsalzlösung besteht. Auch die verwundenen Moosachat-Strukturen in Abbildung 10 besitzen deutlich ausgeprägte Röhrenformen sowie einige typische rundliche, innen hohle Verdickungen. Hier zeigen die Röhren keine bevorzugte Orientierung; handelt es sich um ehemalige Silikatgewächse, so hatten alkalisilikathaltiges Sol und Metallsalzlösung in diesem Fall etwa das gleiche spezifische Gewicht. Auch hier entstand erst nach Ausbil-

dung der Moosachat-Strukturen ein SiO_2-Gel, das nun die Achatzone mit gemeiner Bänderung bildet; denn wiederum wird die Morphologie der gemeinen Bänderung vom Verlauf der Moosachat-Strukturen mitbestimmt.

Die Röhrenform von Moosachat-Strukturen ist auch im Dünnschliff zu erkennen: Abbildung 83 zeigt Röhrenform, ehemalige Gel-Haut und insbesondere auch eine deutlich ausgebildete Durchbruchstruktur, wie sie die Hypothese der Moosachatbildung durch Silikatgewächse vorhersagt und fordert. In Abbildung 84 und 85 ist das entscheidende Detail nochmals vergrößert wiedergegeben. Ein weiteres Beispiel, das die Ähnlichkeit typischer Moosachat-Strukturen mit Silikatgewächsen illustriert, geben die Abbildungen 86 und 87; hier liegt die ehemalige Gel-Haut als besonders feinkristalliner Saum vor.

Zusammenfassend läßt sich damit feststellen: Moosachat-Strukturen sind als ehemalige silikatgewächsähnliche Gebilde aufzufassen, die in einem alkalisilikathaltigen SiO_2-Sol zur Ausbildung kamen. Zwischen Moosachat-Strukturen und den Röhren der sog. ‚Röhrenachate' besteht dabei kein prinzipieller Unterschied. Damit ist der Moosachat-Theorie von GERGENS und LIESEGANG – jedenfalls im Grundsätzlichen – zuzustimmen (vgl. auch LEBEDEV 1967: 71–76). Die Theorie bedarf allerdings noch einer Ausarbeitung von Details.

Zur Genese der Membrantrümmer-Struktur kann eine ähnlich eindeutige Aussage z. Zt. leider noch nicht getroffen werden. Immerhin weist aber die z. T. sehr starke Krümmung der Membrantrümmer (Abb. 60 und 61) darauf hin, daß diese wohl kaum einfach als abgeplatzte feste Hohlraumauskleidungen anzusehen sind; die LIESEGANG-sche Erklärung der Membrantrümmer-Struktur erscheint bisher zumindest diskutabel.

IV.5. Ergebnis

Fassen wir zunächst zusammen: Achate sind Hohlraumfüllungen in Gesteinen, die im sedimentär-diagenetischen P-T-Bereich, d. h. oberhalb 0° C und unterhalb 200° C entstanden sind. Achate entstehen aus kolloiden Systemen. Bei ihrer Bildung spielen innere Rhythmen eine entscheidende Rolle. Achatzonen mit gemeiner Bänderung haben in aller Regel ein Gel-Stadium durchlaufen [33]; der entscheidende strukturbestimmende Prozeß bei der Entstehung der gemeinen Bänderung ist die Ausbildung von Sphärolithen. Ob in seltenen Fällen einmal Chalcedon-Sphärolithe direkt ins Sol (ohne Gel-Stadium) hinein „wachsen" können, kann aber noch nicht entschieden werden. Die Struktur der „Infiltrationskanäle" bildet sich durch Deformationsprozesse in gelatinösen Medien. Uruguay-Struktur und Moosachat-Struktur dagegen entwickeln sich in SiO_2-Solen im entstehenden Achat: Uruguay-Bänder sind horizontale Absätze von aus dem Sol ausgeflockten SiO_2-Partikelchen; Moosachat-Strukturen stellen silikatgewächsähnliche Gebilde dar, die in alkalisilikathaltigen SiO_2-Solen zur Ausbildung kamen.

Diese Vorstellungen zur Achatgenese lassen sich nun zum einen weiter erhärten, zum anderen nochmals konkretisieren und erweitern: Sind Achate ehemalige kolloide Systeme, so könnten sie weitere typische Eigenschaften kolloider Systeme aufweisen. Bei ihrer Untersuchung im Labor scheinen Kolloide zunächst ‚nicht reproduzierbare Systeme' zu sein (vgl. BUZÁGH 1936: 71–73; vgl. MATIJEVIĆ 1974: 122). Besonders

[33] Damit wird die These von PENSE (1966: 139) (vgl. auch WHITE & CORWIN 1961: 118), Chalcedon entstehe aus gelartigen oder glasartigen SiO_2-Massen, bestätigt und konkretisiert.

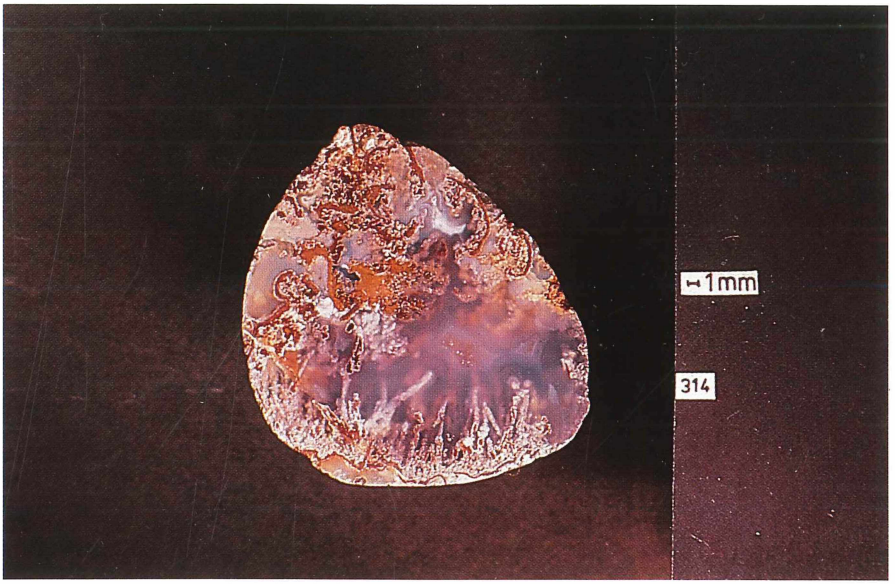


Abb. 81: Achat (o. F.) mit Moosachat-Struktur.

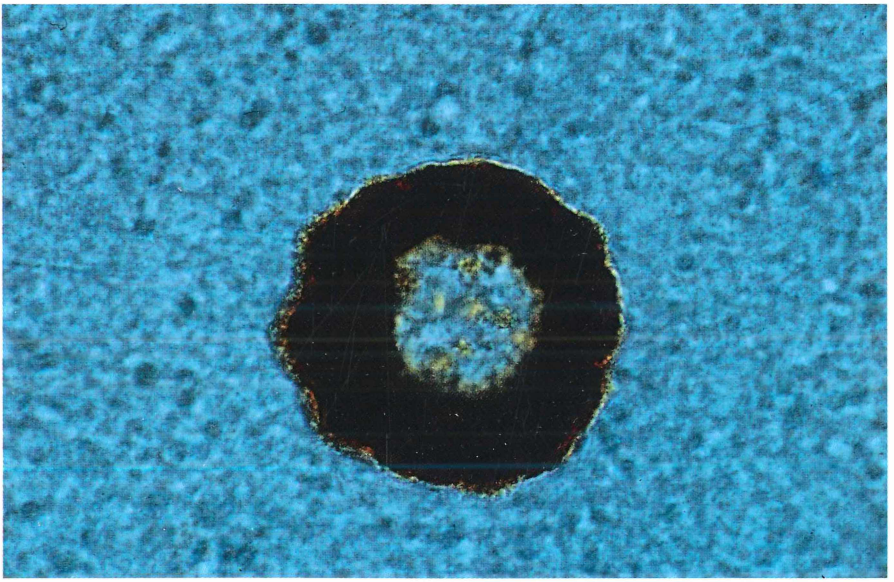


Abb. 82: Dünnschliffaufnahme eines ringförmigen Fe-Pigmentkorns im Achat (Fundpunkt 2). Außendurchmesser des Rings: ca. 80 μm.

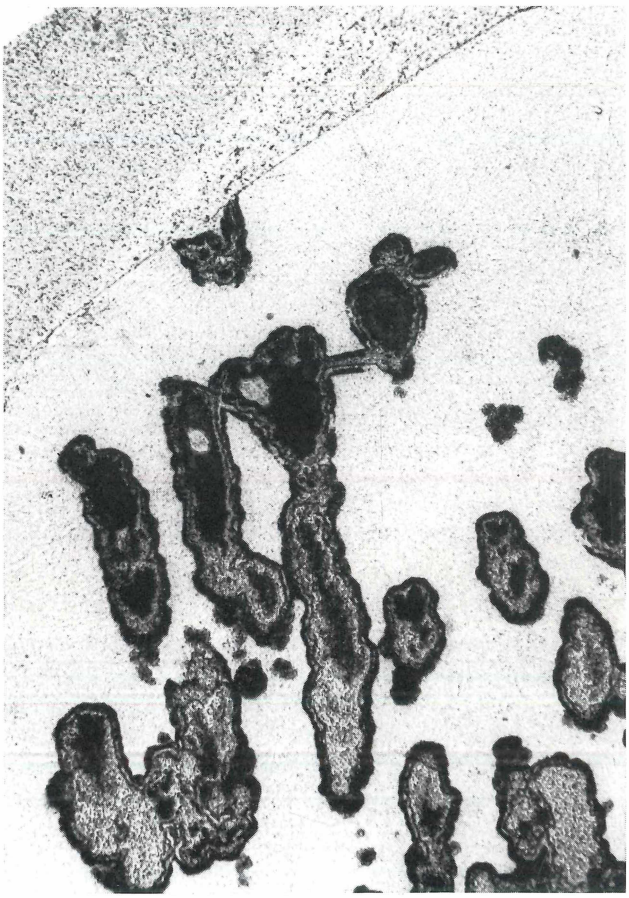


Abb. 83: Dünnschliffaufnahme eines Moosachats (o. F.). Größe des Bildausschnitts: ca. 3,0 x 2,1 mm.

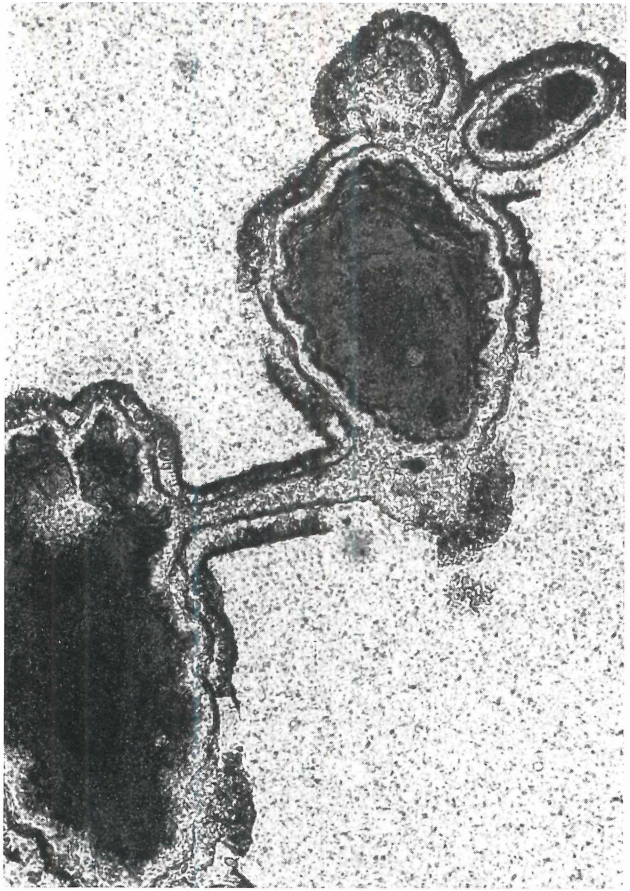


Abb. 84: Detailaufnahme der Durchbruchstruktur in Abb. 83. Größe des Bildausschnitts: ca. 0,78 x 0,54 mm.



Abb. 85: Wie Abb. 84; + N.

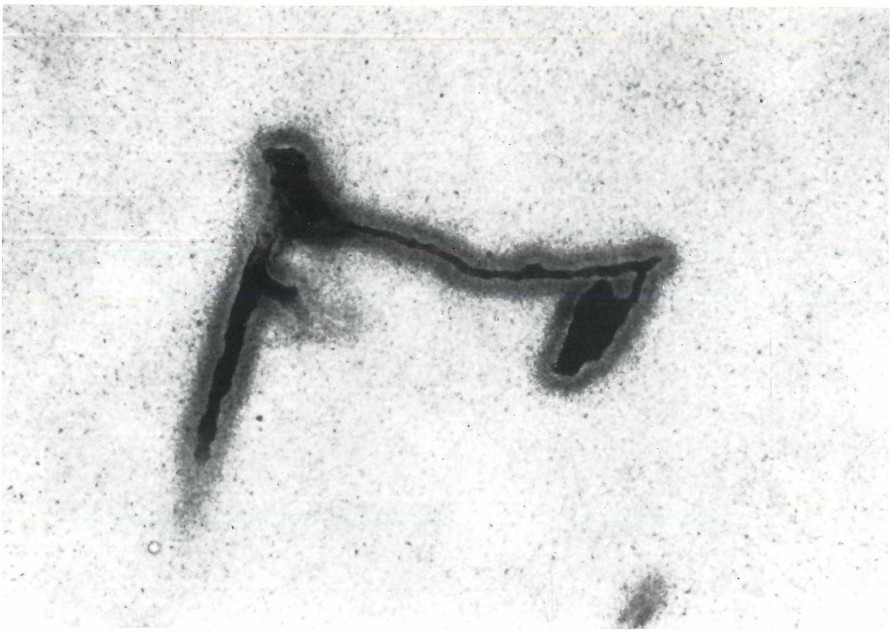


Abb. 86: Dünnschliffaufnahme eines Moosachats (o. F.). Größe des Bildausschnitts: ca. 0,78 x 0,54 mm.

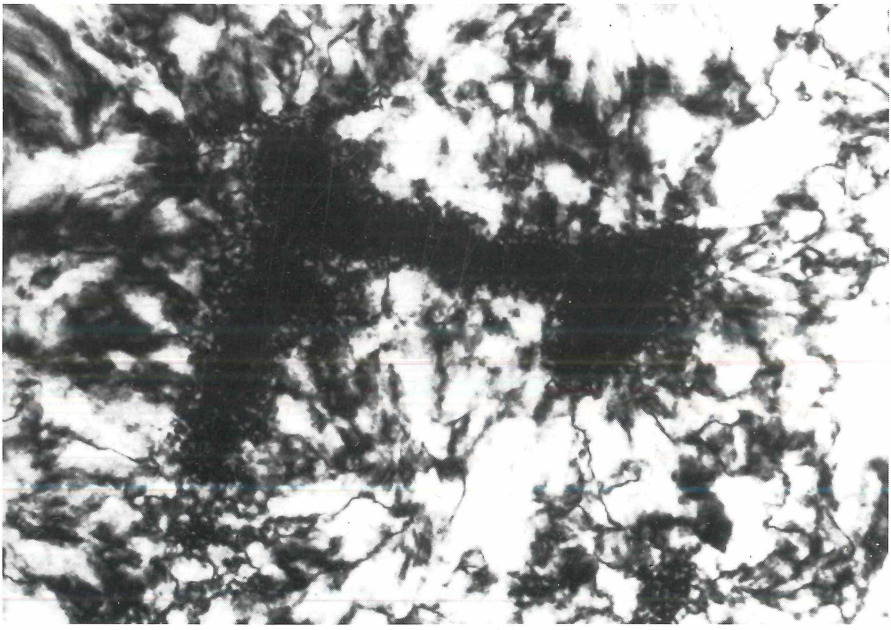


Abb. 87: Wie Abb. 86; + N.

plastisch beschreibt dies BUZÁGH (1936: 72): Es kommt vor, daß man „bei Kolloiden unter ‚anscheinend' gleichen Versuchsbedingungen zu verschiedenen Ergebnissen gelangt, während doch alle Eigenschaften von gleichtemperierten Kochsalzlösungen zum Beispiel gleich sind . . . Demgegenüber erkennt der Kolloidchemiker bei der Untersuchung seiner Systeme mittels der üblichen Methodik auf Schritt und Tritt Individualitäten. Jedes Sol und jedes Kolloidsystem erscheint als einmaliges Individuum; individuell sind seine sämtlichen Eigenschaften und seine Veränderungen, individuell ist sein ganzes Leben". Auf die Problematik der Reproduzierbarkeit selbst kann hier nicht eingegangen werden. Wichtig für die Frage der Achatgenese ist die bloße Tatsache der Variabilität im Verhalten sehr ähnlicher Kolloide: Wurde oben ausführlich die Unmöglichkeit einer Stratigraphie der Achate eines Vorkommens dargelegt, so muß nun darauf hingewiesen werden, daß diese Eigenart von Achatvorkommen bei einer Achatbildung aus ehemaligen kolloiden Systemen besonders leicht verständlich wäre; der kolloide Zustand des sich bildenden Achats könnte einer der Gründe für die Variabilität der Achatbildungen sein.

Achate zeigen aber auch in sich eine große Vielfalt in der Form der SiO_2-Absätze. Einige Strukturbildungen in Achaten sind nur durch einen gleichzeitigen Absatz von SiO_2 in verschiedener Form verständlich: Die Abbildungen 51 und 52 zeigen Zonen mit Uruguay-Struktur und solche mit gemeiner Bänderung, die in Konkurrenz zueinander ausgebildet sind, eine Konkurrenz, die sich auch noch in der zentralen Quarzzone dieses Achats fortsetzt (Kap. III.5.2.). Abbildung 64 zeigt einen Achat, bei dem horizontale Absätze (Uruguay-Struktur) und grobe Quarzkristalle gleichzeitig entstanden sein müssen (Kap. III.5.2.). Für eine solche Variabilität der SiO_2-Absätze findet sich nun wiederum gerade in kolloiden Systemen eine Erklärungsmöglichkeit: Kolloide Systeme können polydispers (Gegensatz: isodispers) sein, d. h. die Kolloidpartikelchen in einem Sol können (im Gegensatz zu echten Lösungen) sehr unterschiedliche Größen besitzen. Durch die Vielfalt der Polymerisationsmöglichkeiten ist von vornherein zu erwarten, daß ein SiO_2-Sol polydispers sein wird; hinzu kommt noch die Möglichkeit, daß durch unterschiedlich starke Koagulation im kleinen Maßstab kolloide Partikel unterschiedlicher Größe entstehen. In einem solchen polydispersen System ist es dann möglich, daß die größten Partikel schließlich ausflocken und horizontale SiO_2-Absätze bilden, während zugleich Quarzkristalle (vermutlich durch monomere Kieselsäure) im Sol wachsen können. Der Achat in Abbildung 64 dürfte so zu erklären sein. Die Konkurrenz von Achatzonen mit gemeiner Bänderung und solchen mit Uruguay-Struktur (Abb. 51 und 52) könnte auf ähnliche Weise verständlich werden: Während sich aus dem Sol horizontale Absätze bilden, vergrößert sich die Gel-Zone (spätere Achatzone mit gemeiner Bänderung) auf Kosten des Sols. Hier deutet sich nun bereits an, daß bei der Entstehung der gemeinen Bänderung auch (!) Appositionsvorgänge eine Rolle spielen (dies ist allerdings nicht zu verwechseln mit sukzessiven Absätzen auf Grund äußerer Rhythmen !!). Dies bestätigt sich bei der Untersuchung des in Abb. 2 wiedergegebenen Achats: Beobachtungen im Dünnschliff (Abb. 50) lassen den Schluß zu, daß Zonen, die jetzt Phänofasern aufweisen, und (jetzt körnige) Uruguay-Bänder abwechselnd aus dem Sol gebildet worden sein müssen. Die Annahme einer Achatbildung aus polydispersen SiO_2-Solen läßt ja die Möglichkeiten offen, daß je nach Größenverteilung der SiO_2-Partikel im Sol im einen Fall Gel-Absätze und horizontale Absätze von SiO_2-Partikeln gleichzeitig, im anderen Fall nacheinander entstehen. Ebenso können große Quarzkristalle alleine oder zusammen mit anderen SiO_2-Absätzen (z. B. Uruguay-Lagen) gebildet werden etc.

Die Ausbildung von Phänofasern in den ehemals gelatinösen Zonen erfolgt aber wohl erst nach Absatz des Gels: Die Orientierung der Phänofasern ist in unterschiedlich alten Gel-Lagen gleich, wie man in Abbildung 50 sieht; insbesondere die Konkurrenzlinien zwischen verschiedenen Sphärolithzügen sind hier für verschieden alte Gel-Zonen die gleichen.

Die These von der **Achatbildung aus polydispersen kolloiden Systemen** erlaubt es also, eine Vielfalt von Achatstrukturen zu erklären: So ist nach unserer Theorie die komplexe Achatstruktur in Abbildung 9, S. 16 folgendermaßen zu deuten: Das zunächst vorhandene gelatinöse Medium des sich bildenden Achats wurde deformiert (die genauen Gründe dieser charakteristischen Deformationen sind noch zu klären). Die so entstandene „Infiltrationskanal"-Struktur war mit einem SiO_2-Sol erfüllt, aus dem sich nun eine jüngere Achatbildung mit Uruguay-Struktur entwickelte. SiO_2-Gel und SiO_2-Sol treten im entstehenden Achat zusammen auf. Die Abbildungen 6, 7 und 8, S. 14 f. zeigen ebenfalls sehr komplexe Achatbildungen: In einem alkalisilikathaltigen SiO_2-Sol entstanden zunächst Moosachat-Strukturen als silikatgewächsähnliche Strukturen. Durch SiO_2-Ausflockung und Gel-Bildung entstanden dann Uruguay-Struktur und Zonen mit gemeiner Bänderung. Eine andere Erklärung solch komplexer Achatbildungen scheint nicht möglich. Achate entstehen aus polydispersen kolloiden Systemen.

Unsere Vorstellungen zur Achatgenese lassen sich nun aber nochmals konkretisieren: Die bisherigen Untersuchungen haben ergeben, daß viele der makroskopischen Strukturen des Achats entstehen, wenn der sich bildende Achat sich noch im kolloiden Zustand befindet. Diese Strukturen werden aber weitgehend zerstört, sobald in einem solchen System die Dampfdruckkurve überschritten wird. Nimmt man nun für das kolloide System des sich bildenden Achats als erste Näherung das System H_2O zum Maßstab, so läßt sich folgern, daß die Achatgenese im P-T-Bereich $H_2O_{flüssig}$ (bestenfalls einschließlich der Dampfdruckkurve) stattgefunden haben muß. Der bisher erschlossene P-T-Bereich der Achatgenese (sedimentär-diagenetischer P-T-Bereich) wird damit (allerdings nur geringfügig) weiter eingegrenzt. Eine stärkere Eingrenzung der möglichen Drücke bei der Entstehung von Achaten ist dagegen z. Zt. noch nicht mit Sicherheit möglich. Zu vermuten ist aber, daß Achate bei eher niedrigen Drücken, d. h. in nicht zu großen Tiefen, entstehen. Einen Hinweis hierauf bildet etwa das Vorkommen von Achatgeröllen in den Wadern-Schichten im Hangenden des „Grenzlagers" der Pfalz (REIS 1916/17a: 19; ANACKER 1959b: 21); stammen die Achate aus den Magmatiten des „Grenzlagers", so können sie nur in sehr geringer Tiefe entstanden sein. Einen weiteren Hinweis in dieser Richtung liefert eine Beobachtung von E. KAISER: In einer Achatdruse im Gneis konnte er noch nicht erhärtetes, schleimiges Kieselsäuregel feststellen, in einer anderen Druse ein bereits erstarrtes Kieselsäuregel (KAISER 1923: 141, 142; 1926b: 296; BEETZ 1923: 378); die Beurteilung der Bedeutung dieses Fundes ist aber natürlich insofern problematisch, als die kausale Beziehung zwischen beobachtetem Gel und Achatgenese hier kaum nachzuweisen ist. Die Entscheidung darüber, ob PABIAN (1978: 27) mit der Vermutung Recht hat, Achate seien Produkte von Verwitterung und Bodenbildung, bleibt der weiteren Forschung vorbehalten.

Zum Problem der SiO_2-Akkumulation schließlich kann bisher folgendes festgestellt werden: Der SiO_2-Transport zu den Hohlräumen im Gestein ist nicht durch freie Lösungsbewegungen zu verstehen. Der Gedanke, bei der Achatgenese würde jeweils eine Lösung als ganzes (d. h. gelöstes SiO_2 **und** Lösungsmittel) dem Hohlraum zu- und wieder von ihm weggeführt, ist abzulehnen. Dies würde zum einen bei der geringen SiO_2-Löslichkeit im relevanten P-T-Bereich außerordentlich große Lösungsbewegungen und -mengen erfordern; zum anderen ist ein solcher Mechanismus nur durch äußere Rhythmen denkbar, geeignete äußere Rhythmen aber sind extrem unwahrscheinlich (s. o.). Die für einen solchen Lösungstransport nötigen offenen Kanäle im Gestein sind zudem in der Regel gar nicht vorhanden. Vielmehr müssen Diffusionsprozesse im Gestein als beim SiO_2-Transport entscheidend angesehen werden. Daß darüber hinaus in Einzelfällen Spalten und Klüfte diesen Transport erleichtern können, muß nicht eigens betont werden. Da aber kolloide SiO_2-Partikel nur sehr geringe Diffusionsgeschwindigkeiten besit-

zen, muß die Diffusion niedrig polymerer, hauptsächlich aber monomerer Kieselsäure als entscheidender Prozeß beim SiO_2-Transport angesehen werden. Die These, Achate seien ehemalige kolloide Systeme und speziell (Zonen mit gemeiner Bänderung) auch ehemalige Gele, macht die Annahme einer ständigen SiO_2-Zufuhr während der Achatgenese erforderlich. Denn selbstverständlich reicht der SiO_2-Gehalt eines Kieselgels bei weitem nicht zur Bildung von Chalcedon gleichen Volumens aus. Da aber einige Strukturen im ehemaligen Gel bis heute im Achat ‚konserviert' worden sind („Infiltrationskanal"-Struktur, echte LIESEGANG'sche Ringe . . .), ist eine stärkere Schrumpfung des Gels im Laufe der Achatgenese auszuschließen. Es bleibt nur die Möglichkeit, daß dem entstehenden Achat ständig SiO_2 (durch Diffusion) zugeführt wird; dies gilt insbesondere auch für die Zeit der Kristallisation des Achats. Eine ständige SiO_2-Zufuhr im Verlauf der Achatentstehung muß übrigens im Rahmen jeder möglichen Achattheorie angenommen werden. Die Lösung des Problems der SiO_2-Akkumulation durch Annahme einer einmaligen Hohlraumfüllung ist weder möglich noch sinnvoll. Sie ist nicht möglich, weil für nahezu vollständig mit Achat erfüllte Mandeln der SiO_2-Gehalt bzw. die Dichte keiner der überhaupt denkbaren Füllungen (Lösung, Sol, Gel, Glas) hinreichend groß ist. Sie ist nicht sinnvoll, weil auch die große Variabilität im Füllungsgrad der Mandeln erklärt werden muß (vgl. Kap. III.4.2.). Allerdings ist zu betonen, daß durch unsere Annahme einer ständigen SiO_2-Zufuhr während der Achatgenese nun nicht wieder äußere Rhythmen – gewissermaßen durch die Hintertür – eingeführt werden; diese Zufuhr ist als solche **nicht** die Ursache der Rhythmenbildung in Achaten. Daß aber eine ständige SiO_2-Zufuhr bei der Chalcedonbildung im sedimentär-diagenetischen P-T-Bereich so möglich ist, daß anfänglich vorhandene, feinste Strukturen erhalten bleiben, zeigt die Verkieselung von Hölzern; auch diese ist nur durch ständige SiO_2-Zufuhr im sedimentär-diagenetischen P-T-Bereich zu verstehen, wobei feinste Details der Holzstruktur erhalten bleiben können. Die These von der starken Verwandtschaft zwischen Achatgenese und Verkieselung von Hölzern (s. o.) bewährt sich unter diesem Aspekt erneut. Es wurde bereits darauf hingewiesen, daß Differenzen im Aufbau benachbarter Achate (und benachbarter Blasenfüllungen allgemein) zumindest teilweise durch die Achatgenese aus polydispersen kolloiden Systemen zu verstehen ist. Eine zweite Ursache für diese Variabilität aber liegt in der Art des Stofftransports bei der Achatgenese: Bei Diffusionsvorgängen im Gestein selbst können lokale Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung am ehesten erhalten bleiben. Ein Stofftransport durch freie Lösungsbewegung dagegen ist mit der Tatsache des unterschiedlichen Aufbaus benachbarter Achate kaum kompatibel. Die SiO_2-Akkumulation bei der Entstehung der Achate erfolgt hauptsächlich auf dem Wege der Diffusion monomerer Kieselsäure. Die Klärung von Details zu Akkumulationsmechanismus und SiO_2-Herkunft bleibt späteren Studien vorbehalten. Der alte Streit um die Notwendigkeit von echten Zufuhrkanälen im Achat läßt sich damit folgendermaßen lösen: Sind Achate ehemalige kolloide Systeme und erfolgt der SiO_2-Transport zu den Hohlräumen im Gestein auf dem Wege der Diffusion, so sind offene Transportwege weder innerhalb noch außerhalb des entstehenden Achats zur Achatbildung notwendig. Sowohl im Gestein selbst als auch in der gelatinösen Masse des entstehenden Achats muß die Diffusion monomerer Kieselsäure möglich gewesen sein. Natürlich schließt dies nicht aus, daß im einen oder anderen Fall einmal offene Wege vorhanden gewesen sein können. Bei der Entstehung von Achaten sind solche Wege aber nicht von wesentlicher Bedeutung.

Wir kommen damit abschließend zu folgendem Resultat: **Achate sind Hohlraumfüllungen in Gesteinen, die im sedimentär-diagenetischen P-T-Bereich, d. h. oberhalb 0° C und unterhalb 200° C entstanden sind. Achate entstehen aus polydispersen kolloiden Systemen, wobei die Dampfdruckkurve dieser Systeme nicht überschritten wird. Bei ihrer Bildung spielen innere Rhythmen eine entscheidende Rolle. Achat-**

zonen mit gemeiner Bänderung haben in der Regel ein Gel-Stadium durchlaufen. Der entscheidende strukturbestimmende Prozeß bei der Entstehung der gemeinen Bänderung ist die Ausbildung von Sphärolithen. Die Struktur der „Infiltrationskanäle" bildet sich durch Deformationsprozesse in gelatinösen Medien. Uruguay-Struktur und Moosachat-Struktur entwickeln sich in SiO_2-Solen im entstehenden Achat: Uruguay-Bänder sind rekristallisierte horizontale Absätze von aus dem Sol ausgeflockten SiO_2-Partikelchen, Moosachat-Strukturen stellen silikatgewächsähnliche Gebilde dar, die in alkalisilikathaltigen SiO_2-Solen zur Ausbildung kamen [34]). Die bei der Achatgenese wesentlichen Prozesse des Stofftransports sind Diffusionsprozesse, offene Zufuhrwege zu den Hohlräumen sind nicht notwendig. Die Kieselsäure wird hauptsächlich in monomerer Form transportiert. Im Verlauf der Achatentstehung, insbesondere aber während der Kristallisation von SiO_2 im entstehenden Achat wird diesem ständig SiO_2 zugeführt. Achatentstehung und Verkieselung von Hölzern sind verwandte Prozesse.

Achate könnten damit als „Gelite" bezeichnet werden; STORZ (1928b: 232) hatte diesen Begriff für ehemals kolloide Sedimentbildungen vorgeschlagen; „Gelite" stehen als Sedimentbildungen aus kolloiddispersen Partikeln zwischen den Sedimentbildungen aus grobdispersen (Psephite, Psammite, Pelite) und molekulardispersen (chemische Sedimente) Partikeln. Dagegen erscheint die Charakterisierung von Achaten als „Meta-Kolloide" wegen der bevorzugten Verwendung von „Meta-" bei der Benennung von Metamorphiten weniger geeignet. WHERRY (1914: 112, 113) hatte diese Bezeichnung („meta-colloid") für ursprünglich kolloide, nun aber kristallin gewordene Substanzen vorgeschlagen.

V. Anhang: Zur elektronenmikroskopischen Morphologie der Achate

Unsere Untersuchungen haben gezeigt, daß der Grund der Entstehung der gemeinen Achatbänderung in der Entwicklung der Sphärolithe im entstehenden Achat zu suchen ist. Zur Klärung der Genese der Sphärolithe im Achat ist zunächst der innere Aufbau dieser Sphärolithe und damit die Natur der Phänofasern des Chalcedons zu untersuchen. Zu diesem Zweck habe ich eine Reihe von Achaten im Rasterelektronenmikroskop untersucht. Abbildung 88 zeigt zunächst einen Chalcedonsphärolithen im Polarisationsmikroskop; die Abbildungen 89 und 90 geben Details aus diesem Sphärolithen in größerem Maßstab wieder. Bereits bei dieser lichtmikroskopischen Betrachtung zeigt sich, daß die Phänofasern des Chalcedons nicht durch scharfe Korngrenzen voneinander geschieden sind. Betrachtet man nun eine geeignete Bruchfläche des gleichen Achats im Rasterelektronenmikroskop (REM), so erscheint der sphärolithische Bau des Chalcedons durch eine radialstrahlige Struktur der Bruchoberfläche (Abb. 91); die Orientierung der Phänofasern ist daher bei sorgfältiger Präparation (gezielte Herstellung geeigneter Bruchflächen) im REM leicht zu bestimmen. Die Abbildungen 91 bis 98 zeigen nun das gleiche Motiv bei zunehmender Vergrößerung. Wie bereits bei lichtmikroskopischer Betrachtung sind auch unter dem Elektronenmikroskop keine scharfen Korngrenzen zwischen Phänofasern zu erkennen. Dagegen treten bei den stärksten Vergrößerungen innerhalb der Phänofasern Subpartikel (meist $< 1\ \mu m$) deutlich hervor. Damit kann hinsichtlich der

[34]) Durch diese genetischen Aussagen könnten nun auch exaktere Definitionen der makroskopischen Hauptstrukturen, als sie in Kap. II. gegeben werden konnten, versucht werden. Da unsere Untersuchungen zur Frage der Achatgenese aber fortgesetzt werden, sollen diese Definitionen einer späteren Arbeit vorbehalten bleiben.

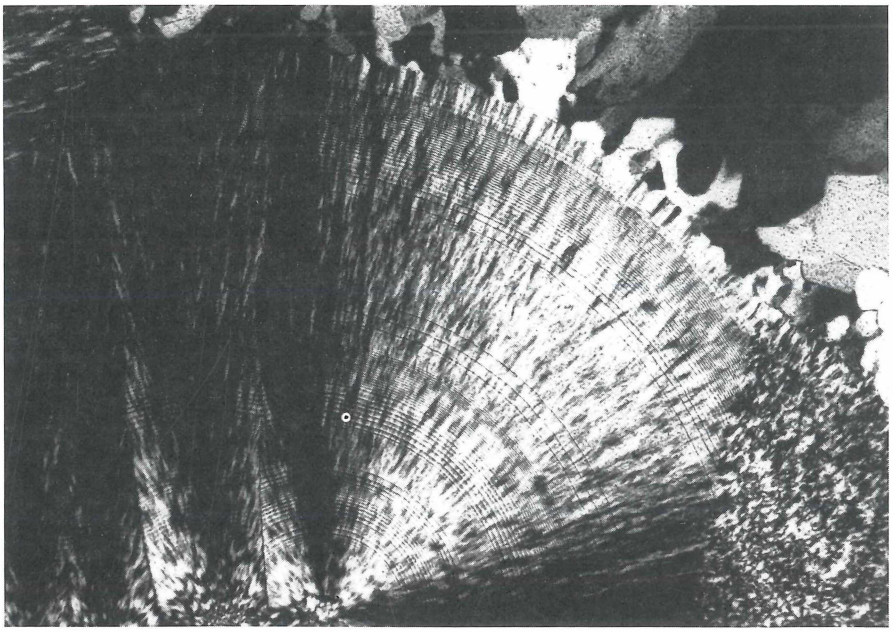


Abb. 88: Dünnschliffaufnahme (+ N) eines Chalcedon-Sphäroliths. Größe des Bildausschnitts: ca. 3,0 x 2,1 mm.

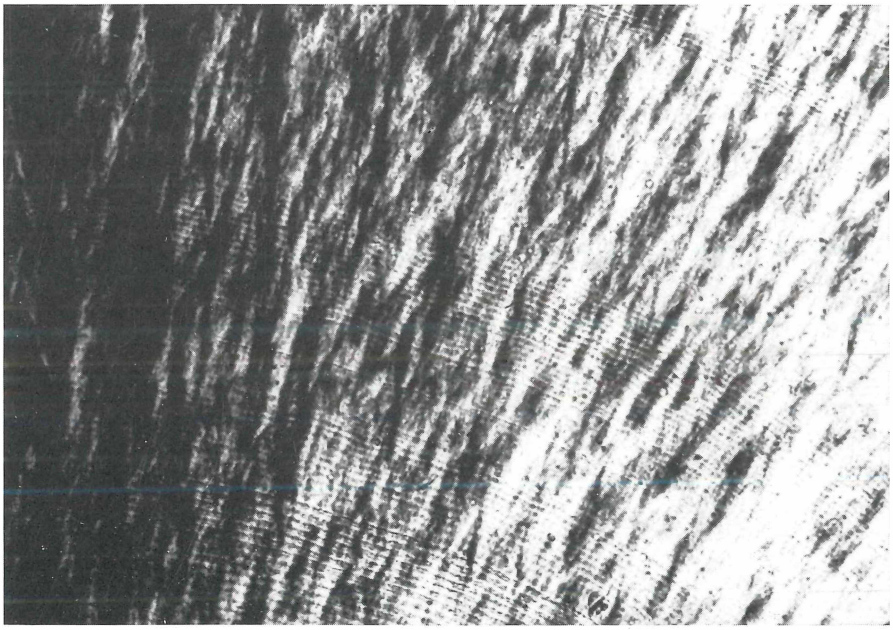


Abb. 89: Ausschnitt aus Abb. 88. Größe des Bildausschnitts: ca. 0,78 x 0,54 mm.

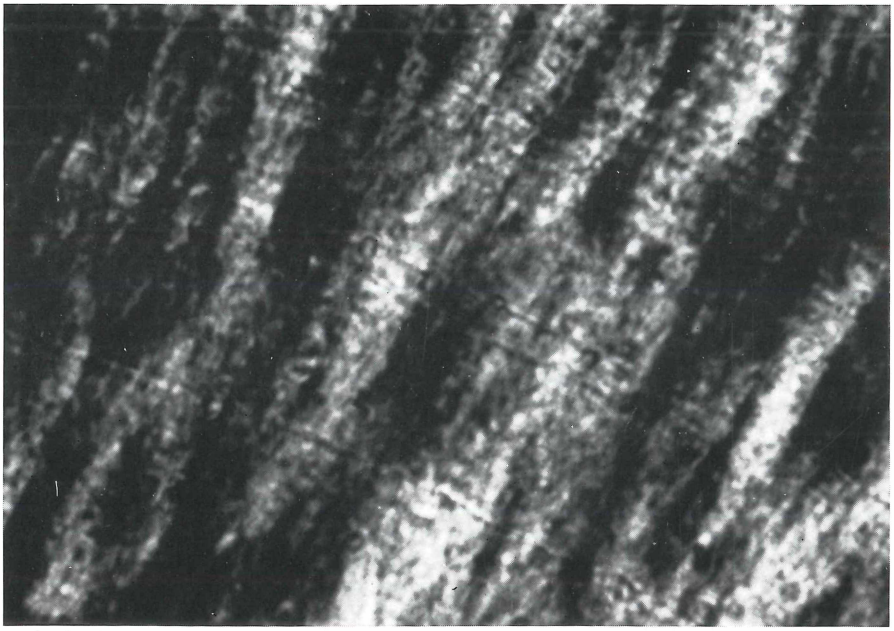


Abb. 90: Ausschnitt aus Abb. 89. Größe des Bildausschnitts: ca. 0,20 x 0,14 mm.

sublichtmikroskopischen Morphologie des Chalcedons die Grundthese von PENSE (1966: 68) bestätigt werden: Die Phänofasern des Chalcedons sind keine ‚echten Fasern' (homogener Aufbau), sondern bestehen aus elektronenmikroskopisch nachweisbaren Subpartikeln. Die Charakterisierung dieser im Polarisationsmikroskop sichtbaren Chalcedonfasern als bloße „**Phäno**fasern" erweist sich so als exakt treffend. Falsch ist dagegen die Auffassung, es handle sich bei den lichtmikroskopisch sichtbaren Chalcedonfasern um „selbständige Kristallindividuen" (BAUER & SCHLOSSMACHER 1932: 678) oder „Nädelchen" (ALTHAUS 1979: 26) [35]. Zu entsprechenden Resultaten (Existenz von Subpartikeln in den Phänofasern) kommen auch BADIA & FROHLICH (1975: 86), SUNAGAWA & OHTA (1976: 139) und PLYUSNINA & SERGEEVA (1981: 41).

Wie erscheint nun aber die z. T. überaus feine gemeine Bänderung der Achate im Elektronenmikroskop? Der Versuch von FRONDEL (1978: 23), auf diese Frage durch rasterelektronenmikroskopische und transmissionselektronenmikroskopische Untersuchungen eine Antwort zu finden, blieb ergebnislos. Da unsere Untersuchungen erneut den Nachweis der (bekannten) unmittelbaren Korrelation von Sphärolithen (und damit Phänofasern) und gemeiner Bänderung erbracht haben, wäre zu erwarten, daß die feinste Bänderung des Achats ihren Grund in der Ausbildung der Subpartikel der Phänofasern hat. Dies ist nun tatsächlich der Fall, wie wir erstmals auf rasterelektronenmikroskopischem Wege zeigen konnten: Abbildung 99 gibt zunächst die untersuchte Feinbänderung

[35] Diese Internstruktur macht nun zugleich verständlich, wieso die Existenz „gebogener" Phänofasern (Abb. 80) überhaupt möglich sein kann; wären die Phänofasern des Chalcedons echte Fasern, d. h. einzelne Quarzkristallindividuen, so müßte die Existenz von stark gebogenen Fasern wohl unverständlich bleiben.

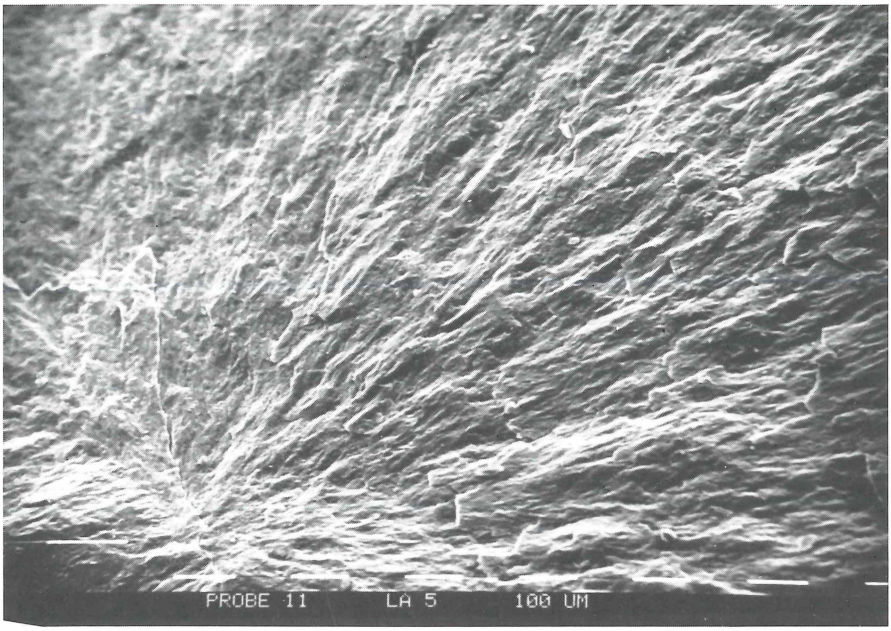


Abb. 91: REM-Aufnahme der Bruchfläche durch einen Chalcedon-Sphärolithen. 1 Skt. = 100 μm.

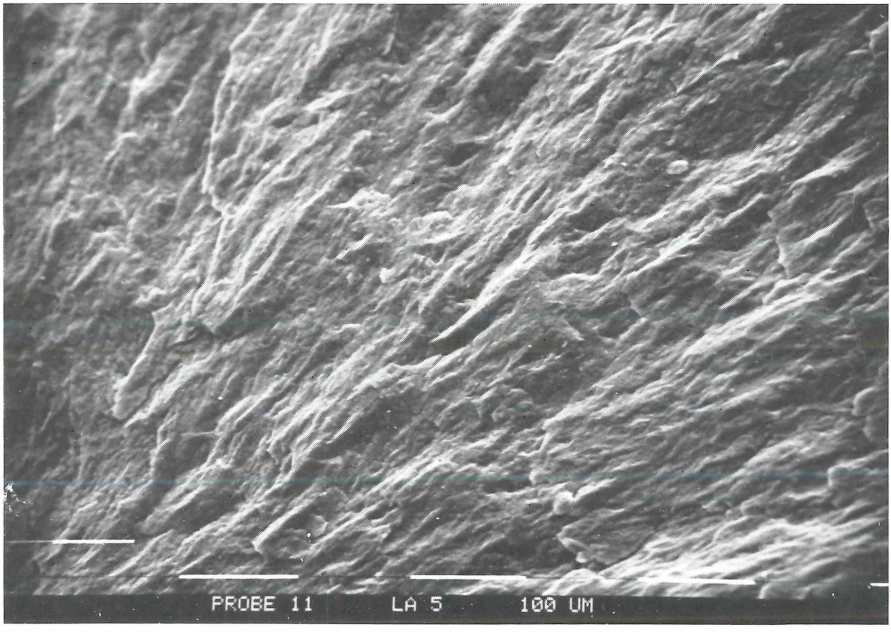


Abb. 92: Ausschnitt aus Abb. 91. 1 Skt. = 100 μm.

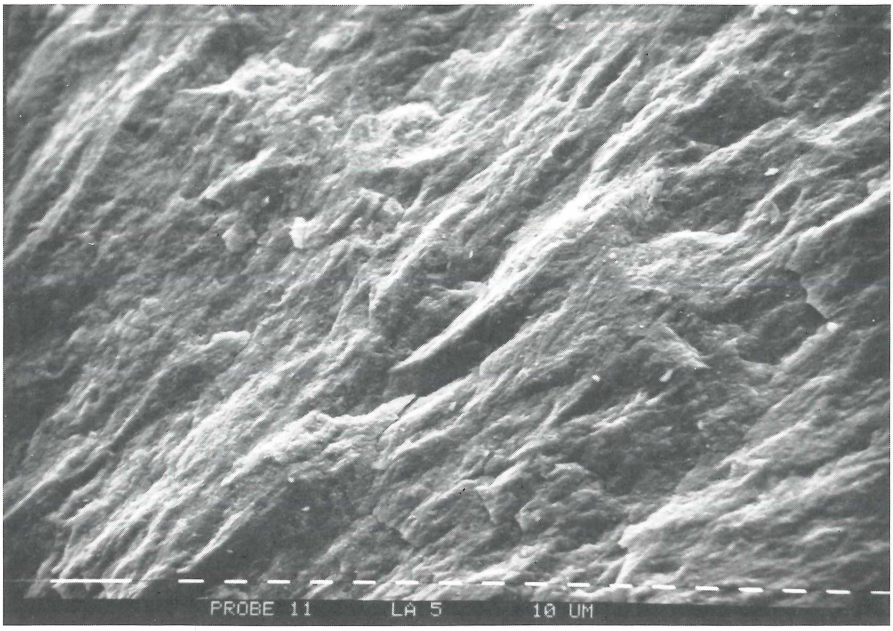


Abb. 93: Ausschnitt aus Abb. 92. 1 Skt. = 10 μm.

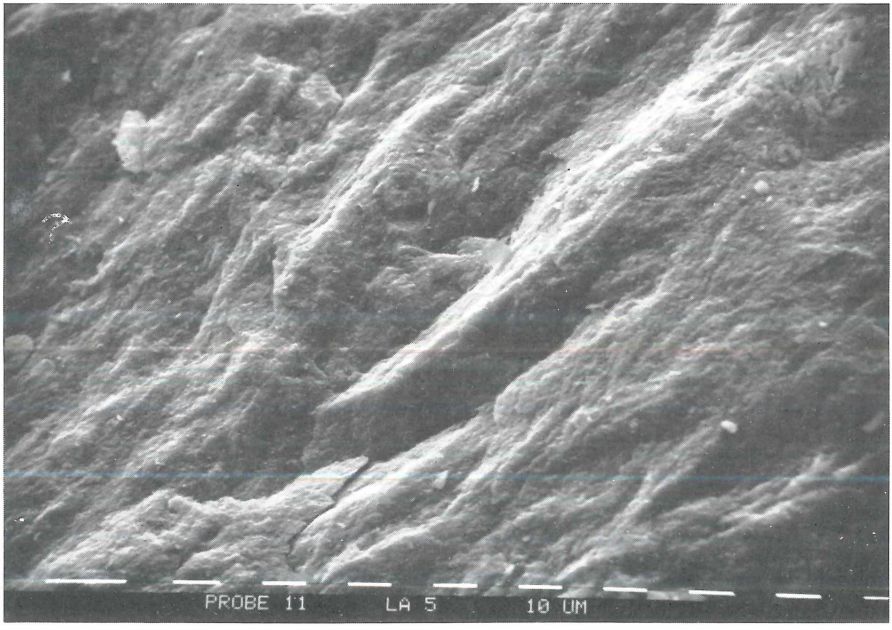


Abb. 94: Ausschnitt aus Abb. 93. 1 Skt. = 10 μm.

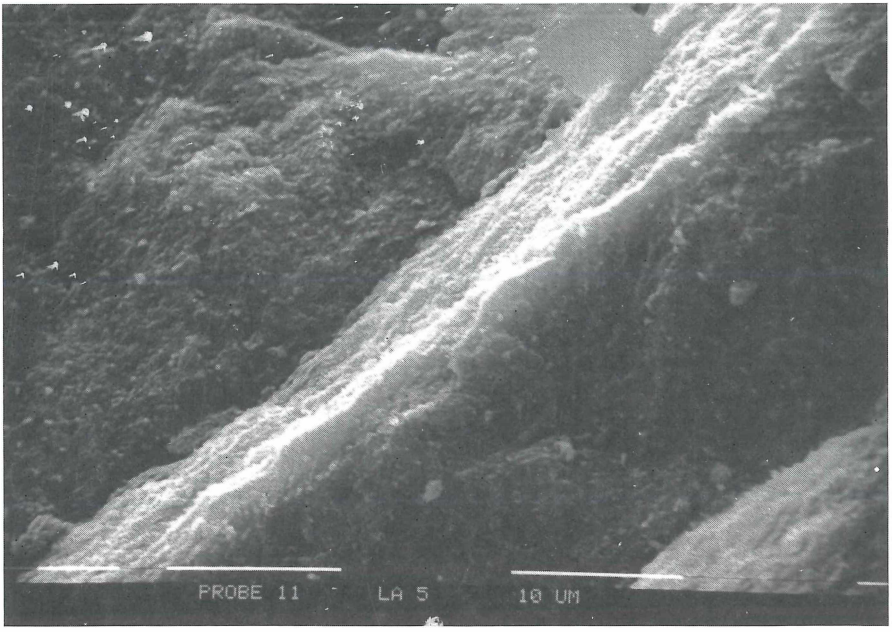


Abb. 95: Ausschnitt aus Abb. 94. 1 Skt. = 10 μm.

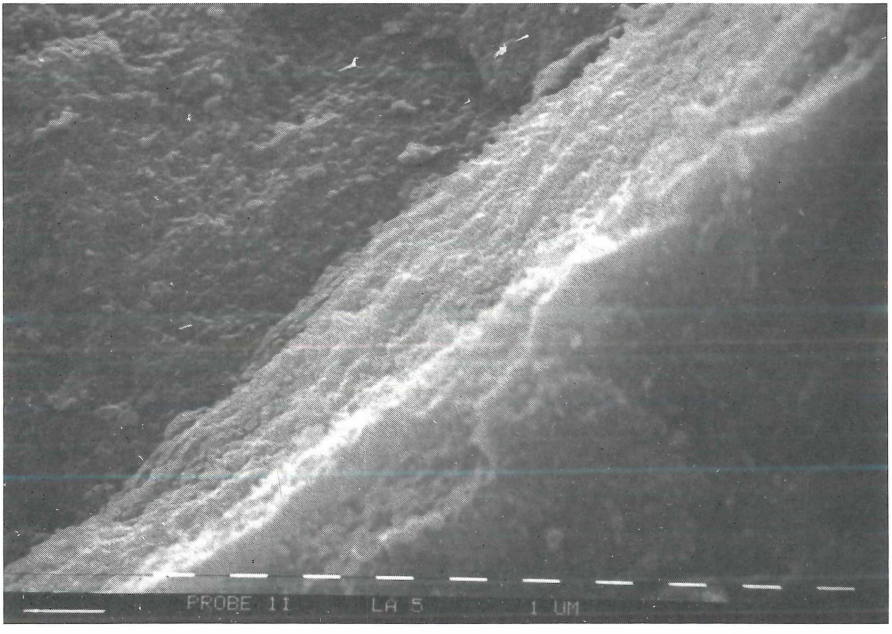


Abb. 96: Ausschnitt aus Abb. 95. 1 Skt. = 1 μm.

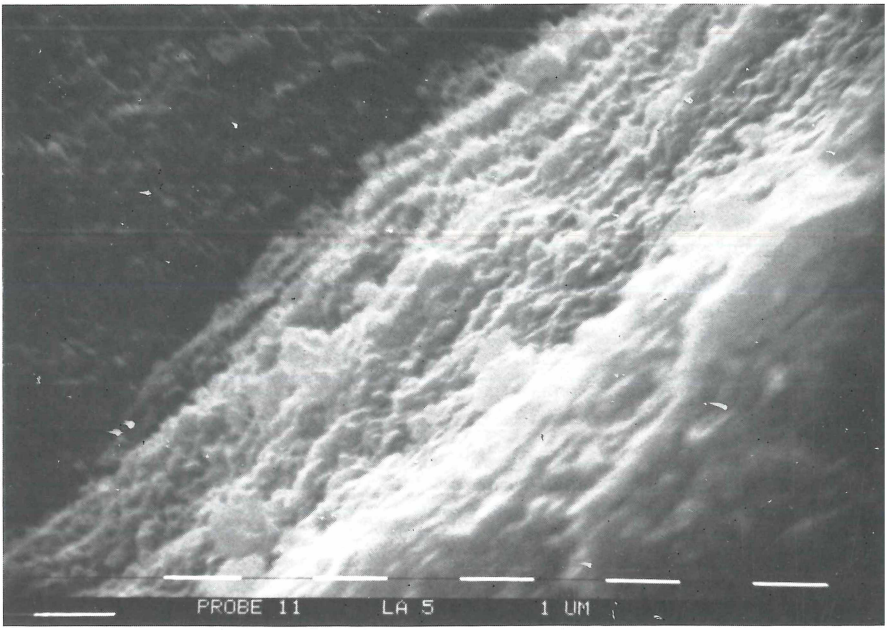


Abb. 97: Ausschnitt aus Abb. 96. 1 Skt. = 1 μm.

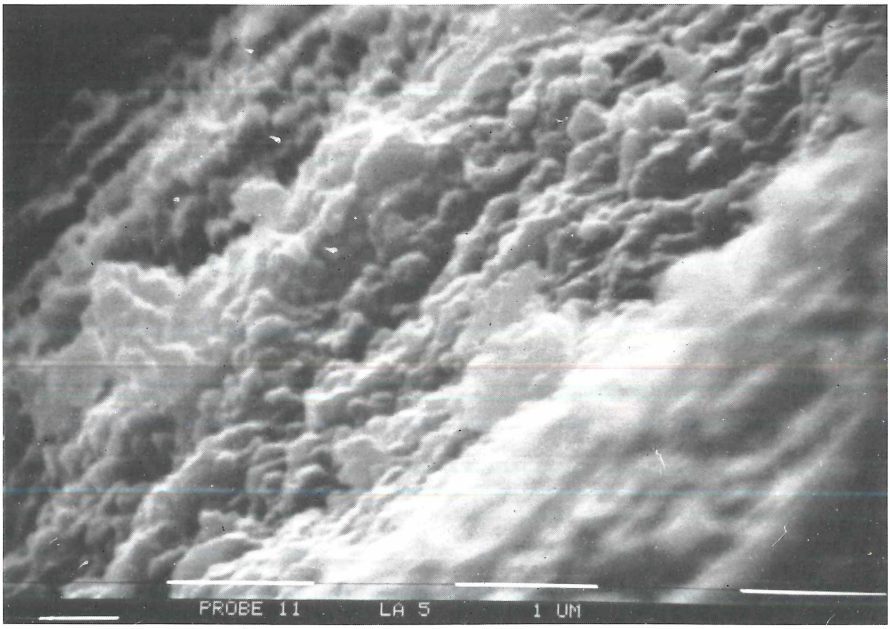


Abb. 98: Ausschnitt aus Abb. 97. 1 Skt. = 1 μm.

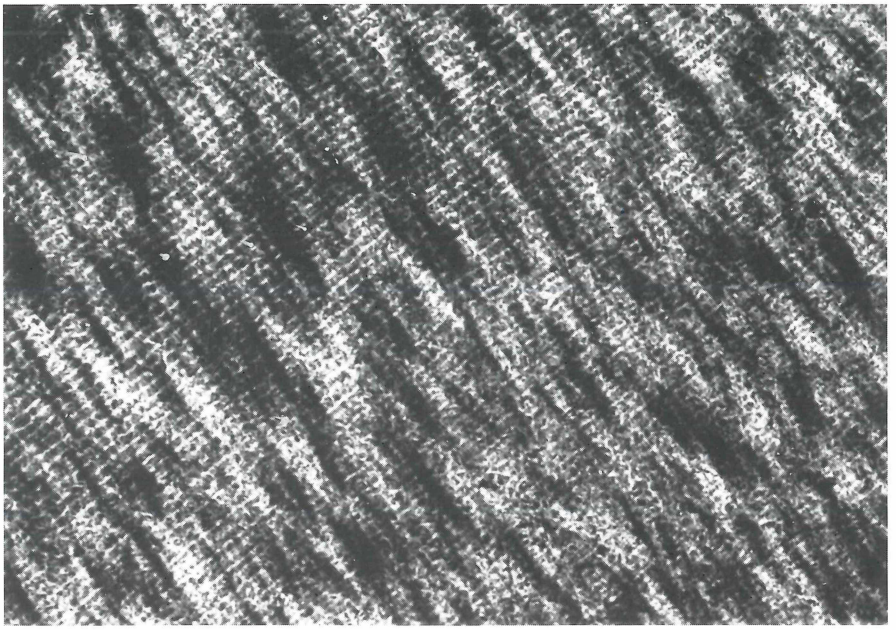


Abb. 99: Dünnschliffaufnahme (+ N) eines Achats (Fundpunkt 2) mit feiner Bänderung. Größe des Bildausschnitts: ca. 0,78 x 0,54 mm.

im Polarisationsmikroskop wieder. Diese Bänderung ist auch im Rasterelektronenmikroskop deutlich zu erkennen: Es treten abwechselnd Zonen mit kleineren Subpartikeln und kleineren Hohlräumen (d. h. Poren zwischen den Subpartikeln) und Zonen mit größeren Subpartikeln und größeren Hohlräumen auf; die Ausbildung der Subpartikel des Chalcedons ändert sich also periodisch, wodurch die Bänderung entsteht. Die Abbildungen 100 bis 103 zeigen diesen Sachverhalt sehr deutlich; sie geben das gleiche Motiv bei verschiedenen Vergrößerungen wieder. Dasselbe gilt für die Abbildungen 104 bis 107, die ein anderes Motiv der gleichen Probe bei verschiedenen Vergrößerungen zeigen [36]. Die optisch sichtbare Feinbänderung des Chalcedons beruht damit wohl auf periodischen Dichteschwankungen im Achat, die durch einen periodischen Wechsel der Größe von Subpartikeln und Porenräumen verursacht werden.

Daß schließlich die Bänderbildung von der Verteilung von Fe-Pigmenten unabhängig ist, konnte im REM erneut bestätigt werden: Abbildung 108 zeigt einen Achat mit einer Feinbänderung, die etwa parallel zur langen Bildkante verläuft; sie ist insbesondere durch die schmalen porenreichen Zonen zu erkennen. In der Mitte der Aufnahme sind nun zwei

[36] Zu einem entsprechenden Resultat kommen SUNAGAWA & OHTA (1976: 134) auf transmissionselektronenmikroskopischem Weg (Abdruckverfahren): Benachbarte Bänder sind aus Partikeln unterschiedlicher Größe aufgebaut und weisen eine unterschiedliche Porosität auf.
Dieser Sachverhalt zeigt sich in der von SUNAGAWA & OHTA (1976: Fig. 3) vorgelegten Aufnahme aber weniger deutlich als in unseren REM-Photos. Zudem kann nun durch unseren rasterelektronenmikroskopischen Befund die Möglichkeit von Artefaktbildungen – die beim Abdruckverfahren nie ganz auszuschließen ist – ausgeschlossen werden.

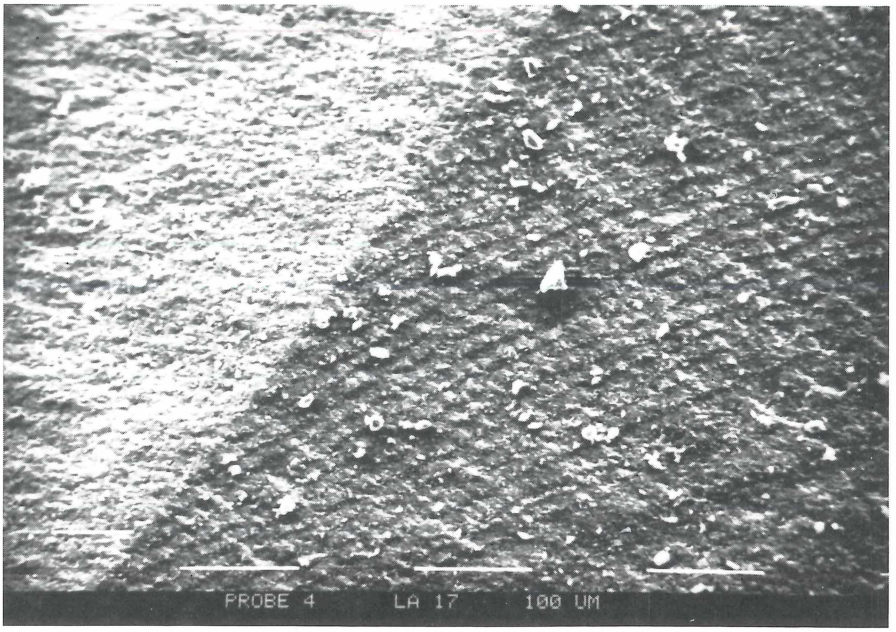


Abb. 100: REM-Aufnahme einer Bruchfläche des gleichen Achats wie in Abb. 99. 1 Skt. = 100 μm.

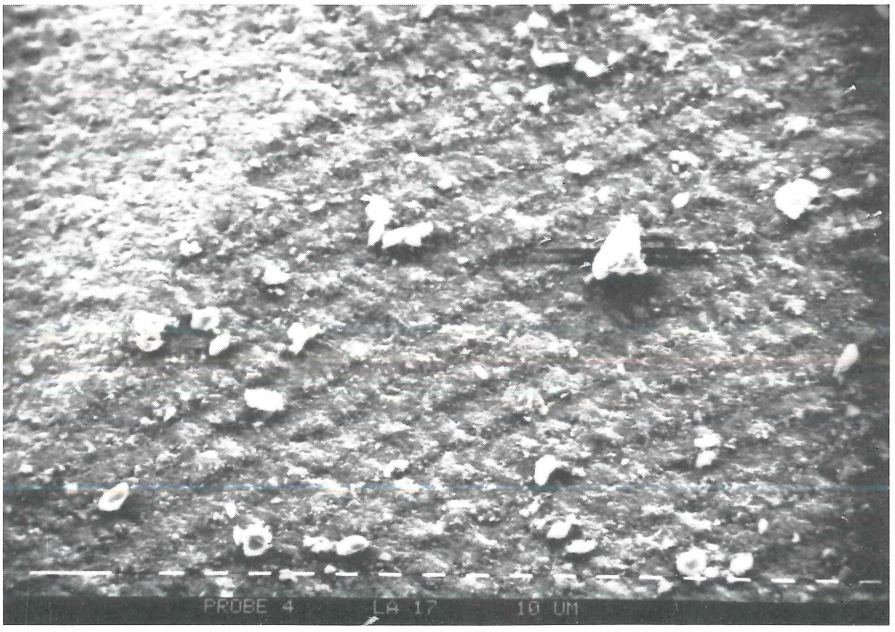


Abb. 101: Ausschnitt aus Abb. 100. 1 Skt. = 10 μm.



Abb. 102: Ausschnitt aus Abb. 101. 1 Skt. = 10 μm.

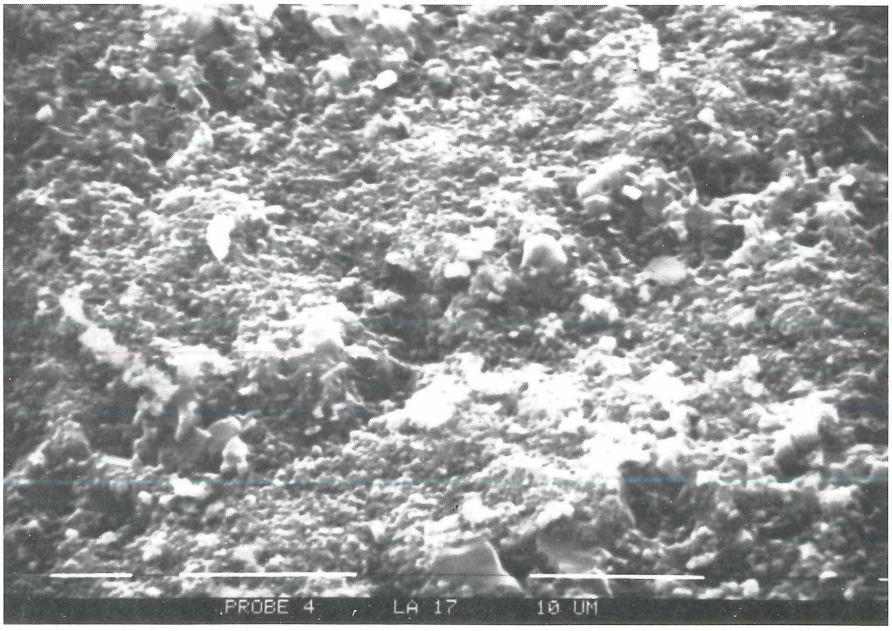


Abb. 103: Ausschnitt aus Abb. 102. 1 Skt. = 10 μm.

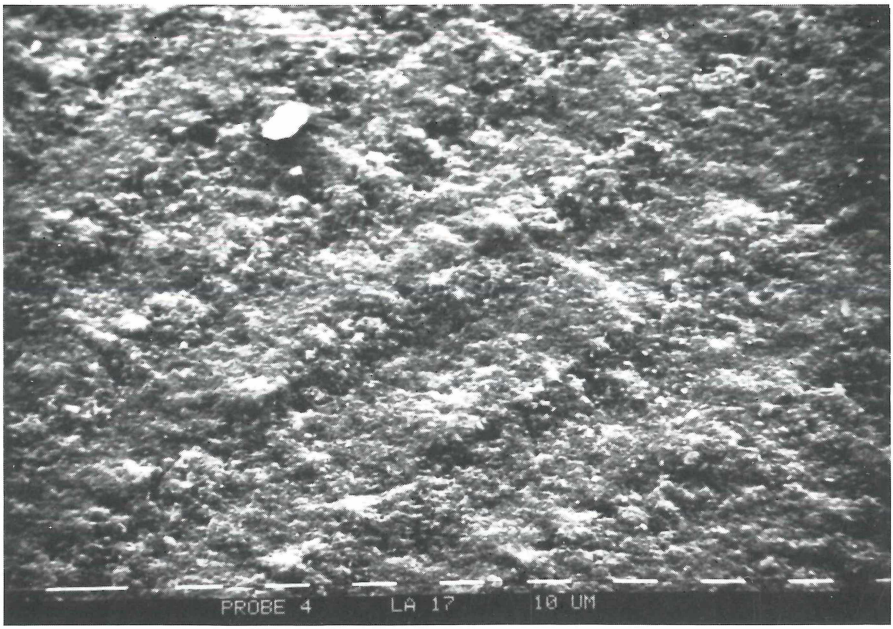


Abb. 104: REM-Aufnahme einer Bruchfläche des gleichen Achats wie in Abb. 99. 1 Skt. = 10 μm.

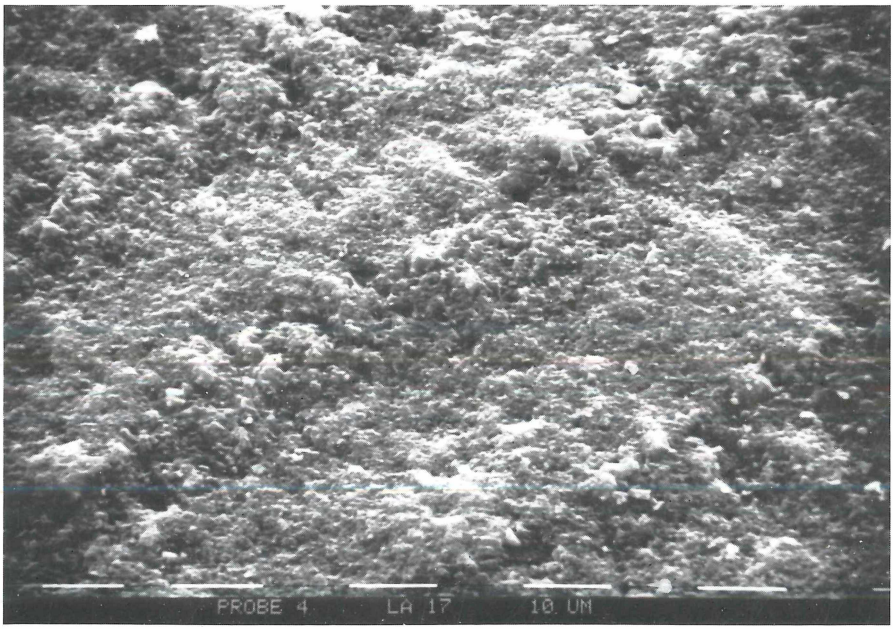


Abb. 105: Ausschnitt aus Abb. 104. 1 Skt. = 10 μm.

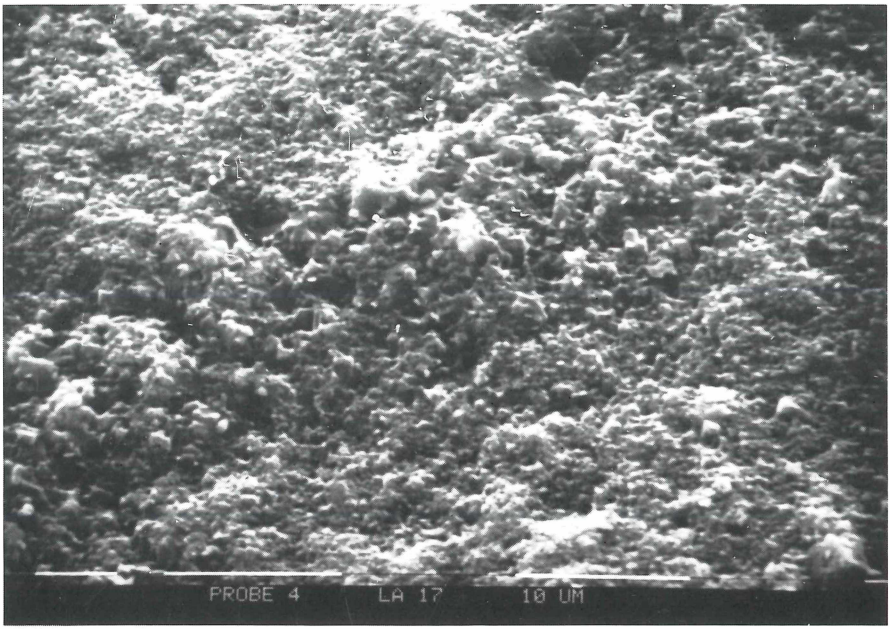


Abb. 106: Ausschnitt aus Abb. 105. 1 Skt. = 10 μm.

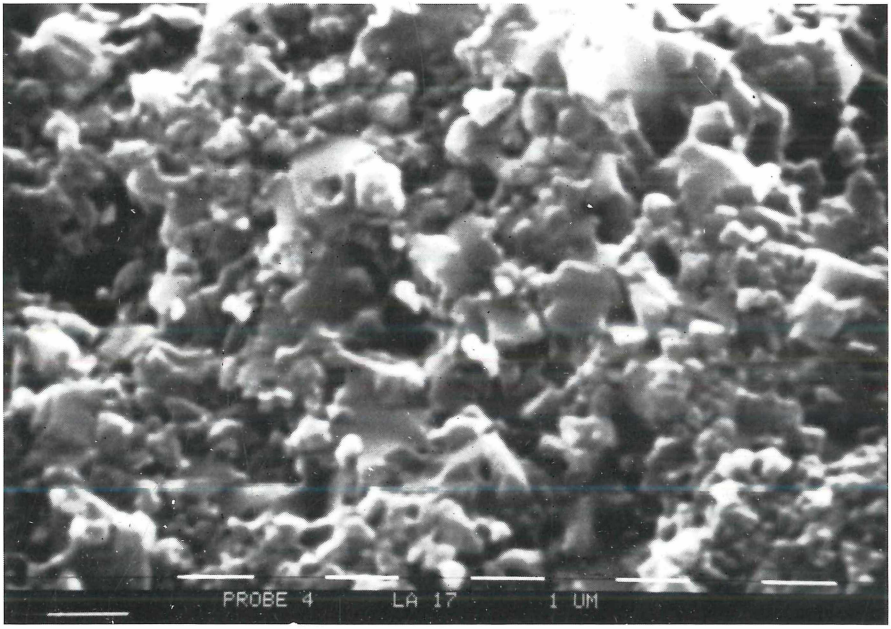


Abb. 107: Ausschnitt aus Abb. 106. 1 Skt. = 1 μm.

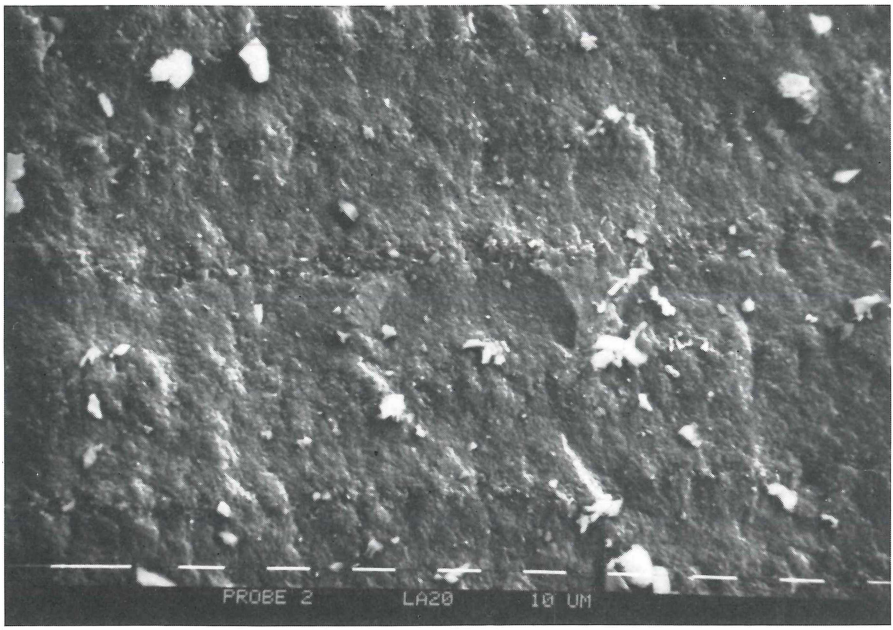


Abb. 108: REM-Aufnahme einer Achatpartie (Fundpunkt 2) mit Pigmentkorn. 1 Skt. = 10 μm.

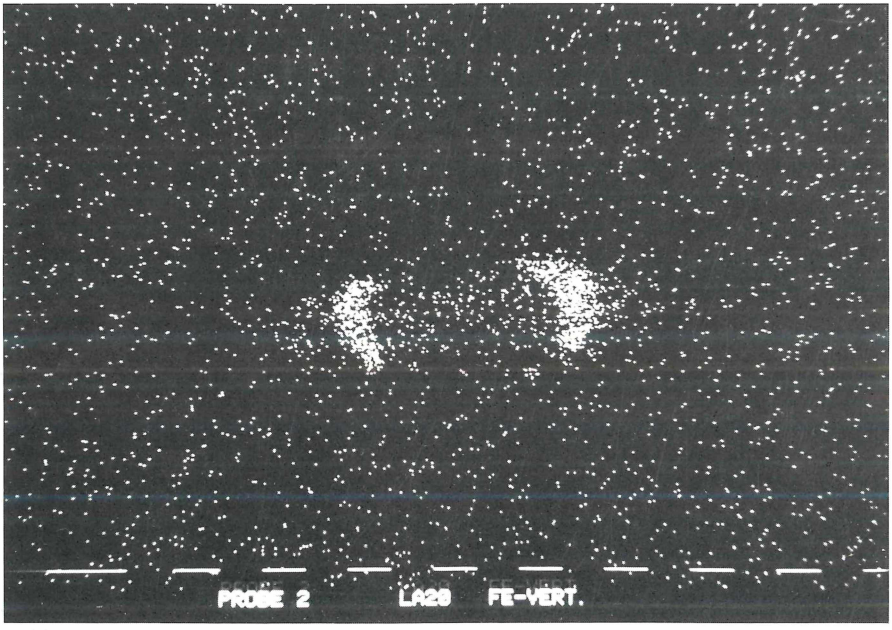


Abb. 109: Fe-Verteilung zu Abb. 108.

spiegelbildlich gegeneinander gekehrte halbmond- bis sichelförmige Zonen zu erkennen. Untersucht man die Fe-Verteilung in dieser Probe (Abb. 109), so erweisen sich diese sichelförmigen Zonen als Bereiche stärkster Fe-Anreicherung. Die Fe-Verteilung entspricht nicht dem Verlauf der Bänderung. Das Eisen ist vielmehr in einem Pigmentkorn konzentriert. In unserem Fall liegt sogar ein besonders interessant geformtes Pigmentkorn vor. Das Pigmentkorn besitzt die Form eines Ringes, der dem Verlauf der Feinbänderung entsprechend im Achat eingebettet ist. Solche ringförmigen Fe-Pigmentkörner wurden in einem Dünnschliff der gleichen Probe mehrmals beobachtet; Abb. 82 (S. 107) gibt ein Beispiel hierzu. Die Abbildung 108 zeigt nun gerade eine Bruchfläche durch die Mitte eines solchen Rings: Als Schnittfigur entstehen so die beiden sichelförmigen Zonen hoher Fe-Konzentration.

VI. Danksagung

Zuerst und vor allem danke ich sehr herzlich Herrn Prof. Dr. J. Pense für die einfühlsame, vertrauensvolle Betreuung meiner Arbeit. Herrn Dr. A. Banerjee danke ich herzlich für die freundliche Mitbetreuung der Arbeit. Herrn A. Becker und Herrn J. Hrabanek bin ich für die Herstellung zahlreicher guter Dünnschliffe sehr dankbar. Für ihre vielseitige, ermutigende Unterstützung danke ich der Studienstiftung des deutschen Volkes, deren großzügige Förderung meine Arbeit sehr erleichtert hat; besonders meinem Vertrauensdozenten, Herrn Prof. Dr. J. Blänsdorf, möchte ich hier herzlich danken. Für seine freundliche Hilfe, u. a. durch einige mir überlassene Achate, danke ich Herrn H. Gaertner. Für technische Hilfen bei meiner Arbeit am Elektronenmikroskop bin ich Herrn A. Queisser zu Dank verpflichtet, der sich speziell um die technisch gute Qualität meiner REM-Aufnahmen bemühte. Herrn R. Luft danke ich für die freundliche Übersetzung einiger tschechischer Textauszüge. Herrn Dr. N. Arndt danke ich sehr herzlich für die Durchsicht des Abstracts. Besonders herzlich danke ich schließlich Frau I. Milch, die mir beim Tippen des Manuskripts eine große Unterstützung war. Zu besonderem Dank verpflichtet bin ich endlich auch Herrn Dr. K. R. G. Stapf, dessen Initiative und Engagement den Druck dieser Arbeit erst ermöglicht haben.

VII. Literaturverzeichnis

ABBASSIAN, A.-A. (1979): Beitrag zur Petrographie und Geochemie der Effusiva und der Bärweiler Intrusion in der Nahe-Mulde (Saar-Nahe-Becken, SW-Deutschland). – Mitt. POLLICHIA, **67**: 68 – 134.

ABBOTT, W. J. L. (1887): The formation of agates. – Proc. Geologists' Assoc., **10**: 80 – 93.

ALTHAUS, E. (1979): Achat, Aufbau und Entstehung. – Lapis, **4** (12): 26 – 29.

ANACKER, H. (1959a): Vorkommen und Entstehung der Achate im oberen Nahegebiet, Teil I. – Z. deutsch. Ges. Edelsteinkde., **27**: 12 – 24.

– (1959b): Vorkommen und Entstehen der Achate im oberen Nahetal, Teil II. – Z. deutsch. Ges. Edelsteinkde., **28**: 19 – 24.

ARNDT, H.; REIS, O. M. & SCHWAGER, A. (1918/19): Übersicht der Mineralien und Gesteine der Rheinpfalz. – Geogn. Jh., **31/32**: 119 – 262.

BADIA, D. & FROHLICH, F. (1975): Identification de la calcédoine par son spectre infrarouge. – C. R. hebdomadaires séances Acad. Sci., Série D, **281**: 85 – 88.

BALL, R. A. (1974): Discussion on agate. – Australian Gemmologist, **12** (2): 55.

BALL, R. A. & BURNS, R. L. (1975): Agate. Part I: a review – genesis and structure. – Australian Gemmologist, **12** (5): 143 – 150.

BANK, H. (1970): Zur Geologie von Rio Grande do Sul / Brasilien und seiner Amethyst- und Achatvorkommen. – Abh. hess. L.-Amt Bodenforsch., **56**: 214 – 227.

BAUER, M. (1896): Edelsteinkunde. – Leipzig.

BAUER, M. & SCHLOSSMACHER, K. (1932): Edelsteinkunde. – 3. Aufl., Leipzig.

BEETZ, W. (1923): Über den Ursprung der Achatgerölle und der Gerölle anderer Quarzmineralien in den Diamantseifen an der Küste Südwestafrikas. – N. Jb. Miner. Geol. Paläont. Beil.-Bd., **47**: 347 – 380.

BERNAUER, F. (1924): Die Kolloidchemie als Hilfswissenschaft der Mineralogie und Lagerstättenlehre und ihre Anwendung auf die metasomatischen Blei-Zink-Lagerstätten. – Berlin.

– (1927): Über Zickzackbänderung (Runzelbänderung) und verwandte Polarisationserscheinungen an Kristallen und Kristallaggregaten. – N. Jb. Miner. Geol. Paläont. Beil.-Bd. Abt. A, **55**: 92 – 143.

BHATNAGAR, S. S. & MATHUR, K. K. (1922): Studien über Bandstrukturen. Die Synthese gebänderter Steine. – Kolloid-Z., **30**: 368 – 371.

BHATNAGAR, S. S., PRASAD, M. & OHRI, D. D. (1925): Der „Bhatnagar-Mathur-Effekt" des Wassers auf besonders getrocknete und gepreßte Kieselsäuregele. I. Teil. – Kolloid-Z., **37**: 97 – 101.

BLANKENBURG, H.-J. (1981): Zur Paragenese in Vulkanitachatmandeln bzw. -kugeln. – Freiberger Forsch.-H., Reihe C, **364**: 99 – 112.

BLANKENBURG, H.-J. & BERGER, H. (1981): Kristallitgrößenuntersuchungen an Vulkanitachaten. – Chem. Erde, **40**: 139 – 145.

BLANKENBURG, H.-J. & SCHRÖN, W. (1982): Zum Spurenelementchemismus der Vulkanitachate. – Chem. Erde, **41**: 121 – 135.

BLANKENBURG, H.-J.; PILOT, J. & WERNER, C.-D. (1982): Erste Ergebnisse der Sauerstoffisotopenuntersuchungen an Vulkanitachaten und ihre genetische Interpretation. – Chem. Erde, **41**: 213 – 217.

BLANKENBURG, H.-J.; SCHRÖN, W.; STARKE, R. & KLEMM, W. (1983): Beziehungen zwischen Achat, Jaspis und der Gesteinsmatrix in sauren Vulkaniten. – Chem. Erde, **42**: 157 – 172.

BÖGGILD, O. B. (1913): Die stalaktitischen Mineralien von Ivigtut. – Z. Kristallogr. Miner., **51**: 614 – 623.

BOWMAN, H. L. (1902): Referat zu „HEDDLE, M. F. (1900): Trans. Geol. Soc. Glasgow, **11** (2): 153 – 173". – Z. Kristallogr. Miner., **36**: 93.

BRAITSCH, O. (1957): Über die natürlichen Faser- und Aggregationstypen beim SiO_2, ihre Verwachsungsformen, Richtungsstatistik und Doppelbrechung. – Heidelberger Beitr. Miner. Petrogr., **5**: 331 – 372.

BRAUNS, R. (1906): Über Eisenkiesel von Warstein i. W. – N. Jb. Miner. Geol. Paläont. Beil.-Bd., **21**: 447 – 467.

– (1911): Eine Bemerkung zu der Mitteilung von O. Mügge über einen Eisenkiesel von Suttrop bei Warstein. – Cbl. Miner. Geol. Paläont., Jg. 1911: 465 – 466.

BROCKMEIER, H. (1927): Die Entstehung der Achate. – Cbl. Miner. Geol. Paläont. Abt. A, Jg. 1927: 164 – 170.

BROWN, R. W. (1956): Plantlike features in Thunder-Eggs and geodes. – Annu. Rep. Board of Regents Smithsonian Institution, Jg. 1956: 329 – 339.

BUZÁGH, A. von (1936): Grundlagen der Kolloidik. – In: STEINKOPFF, J. (Hrsg.) (1975): Konzepte der Kolloidchemie: 65 – 74, Darmstadt.

CARVER, R. E. (1980): Petrology of Paleocene-Eocene and Miocene opaline sediments, South Eastern Atlantic Coastal Plain. – J. Sediment. Petrol., **50**: 569 – 582.

CORRENS, C. W. & NAGELSCHMIDT, G. (1933): Über Faserbau und optische Eigenschaften von Chalzedon. – Z. Kristallogr., **85**: 199 – 213.

COX, K. G.; BELL, J. D. & PANKHURST, R. J. (1979): The interpretation of igneous rocks. – London.

CRAMER, E. (1892): Über die Flüchtigkeit der Kieselsäure. – Z. angew. Chem., Jg. 1892: 484 – 486.

DAUBRÉE, A. (1880): Synthetische Studien zur Experimental-Geologie. – Braunschweig: Vieweg.

DINGER, K. & JEBSEN-MARWEDEL, H. (1958): Kieselsäure SiO_2 als Mineral, Roh- und Werkstoff. – Sprechsaal für Keramik, Glas, Email, **91**: 134 – 147.

EDELMANN, K. (1968): Lehrbuch der Kolloidchemie. Bd. I. – 2. Aufl. Berlin.

EISSELE, K. (1966): Zur Gliederung des nordschwarzwälder Buntsandsteins. – Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver., N. F. **48**: 143 – 158.

EITEL, W. (1925): Physikalisch-chemische Mineralogie und Petrologie. Die Fortschritte in den letzten zehn Jahren. – Dresden und Leipzig.

– (1954): The physical chemistry of the silicates. – Chicago.

ENDELL, K. (1913): Über Diffusionserscheinungen in Silikatschmelzen bei höheren Temperaturen. – N. Jb. Miner. Geol. Paläont., Jg. 1913 II: 129 – 154.

EPPLER, W. F. (1941): Über die relative Korrosionshärte des Achates und einiger anderer Mineralien. – Zbl. Miner. Geol. Paläont. Abt. A, Jg. 1941: 1 – 10.

ERDMANN, E. (1899): Om ädelstenar och andra mineraliska ämnen använda till smycken och prydnadsföremål m. m. . – Geologiska Fören. Stockholm Förhandl., **21**: 416 – 508.

FALKE, H. (1974): Das Rotliegende des Saar-Nahe-Gebietes. – Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver., N. F. **56**: 21 – 34.

FISCHER, W. (1951): Das Problem der Achatbildung. – Fortschr. Miner., **29/30**: 399 – 400.

– (1954): Zum Problem der Achatgenese. – N. Jb. Miner. Abh., **86**: 367 – 392.

– (1956): Von der Entstehung der Achate. – Aufschluß, Sonderheft **3**: 40 – 43.

– (1961): Ein Uruguay-Achat mit Quarz-Pseudomorphosen nach Calcit. – Aufschluß, **12**: 249 – 252.

– (1970): Von der Entstehung der Achate. – Aufschluß, Sonderheft **19**: 49 – 52.

FISCHER, W. & SCHLIEPHAKE, R. W. (1971): Beobachtungen an Achaten. – Aufschluß, **22**: 226 – 234.

FLÖRKE, O. W. (1962): Untersuchungen an amorphem und mikrokristallinem SiO_2. – Chem. Erde, **22**: 91 – 110.

– (1966/67): Die Modifikationen von SiO_2. – Fortschr. Miner., **44**: 181 – 230.

– (1972): Transport and deposition of SiO_2 with H_2O under supercritical conditions. – Kristall und Techn., **7**: 159 – 166.

– (1976): Hydrothermal transport and deposition of silica. – Conference on scale management in geothermal energy development, University of California, San Diego Campus, August 2 – 4, 1976. Manuscript, 7 S.

FLÖRKE, O. W.; JONES, J. B. & SEGNIT, E. R. (1973): The genesis of hyalite. – N. Jb. Miner. Mh., Jg. 1973: 82 – 89.

FLÖRKE, O. W.; KÖHLER-HERBERTZ, B.; LANGER, K. & TÖNGES, I. (1982): Water in microcrystalline quartz of volcanic origin: Agates. – Contr. Mineral. Petrol., **80**: 324 – 333.

FLÖRKE, O. W.; GRAETSCH, H. & MIEHE, G. (1983): Crystalstructure and microstructure of chalcedony. – Fortschr. Miner., **61**, Beih. 1: 62 – 63.

FOLK, R. L. & WEAVER, C. E. (1952): A study of the texture and composition of chert. – American J. Sci., **250**: 498 – 510.

FRANKE, I. (1951): Action des solutions alcalines sur le quartz et sur la silice fondue sous pression de vapeur saturée. – Bull. Soc. Franç. Minér. Cristallogr., **74**: 207 – 213.

FRENZEL, G. & ATTIA, M. (1969/70): Das Grundgebirge und Rotliegende im südöstlichen Kaiserbach-Tal (Südpfalz). – N. Jb. Geol. Paläont. Abh., **134**: 17 – 56.

FREYBERG, B. von (1927): Observaciones geológicas en la región de las ágatas de la Serra Geral (Rio Grande do Sul, Brasil). – Boletín Acad. Nacional de Ciencias de la República Argentina, **30**: 129 – 170.

FRONDEL, C. (1962): The system of mineralogy. Vol. III: Silica minerals. – New York, London.

– (1978): Characters of quartz fibers. – Amer. Mineralogist, **63**: 17 – 27.

GEILMANN, W. (1956): Beiträge zur Kenntnis alter Gläser. IV. Die Zersetzung der Gläser im Boden. – Glastechn. Ber., **29**: 145 – 168.

GERGENS, P. J. (1858): Über die Konferven-artigen Bildungen in manchen Chalzedon-Kugeln. – N. Jb. Miner. Geogn. Geol. Petrefaktenkde., Jg. 1858: 801 – 807.

GIBBONS, A. M. (1978): Liesegang rings and agate banding. – Colorado-Wyoming Acad. Sci., J., **10**: 60 – 61.

GOERG, R. (1929): Der Achat. – Aus der Heimat. Naturwissenschaftliche Monatsschrift, **42**: 5 – 13.

– (1930): Der Moosachat. – Aus der Heimat. Naturwissenschaftliche Monatsschrift, **43**: 142 – 146.

GOODCHILD, J. G. (1899): On the genesis of some scottish minerals. – Proc. Royal Phys. Soc. Edinburgh, **14**: 181 – 220.

GRAY, N. H.; STEINEN, R. P. & ANDERSON, J. B. (1978): Banded chalcedony in the mesozoic basalts of Connecticut. – Geol. Soc. America, Abstracts with Programs, **10** (2): 45.

GÜMBEL, C. W. (1880): Ueber die mit einer Flüssigkeit erfüllten Chalcedonmandeln (Enhydros) von Uruguay. – Sitz.-Ber. königl. bayer. Akad. Wiss., math.-phys. Cl., **10**: 241 – 254.

HÄFNER, F. (1978): Die basischen Vulkanite des Oberrotliegenden zwischen Alzey und Odernheim (Saar-Nahe-Gebiet). Ein Beitrag zu ihrer Geologie, Petrographie und Geochemie. – Mitt. POLLICHIA, **66**: 25 – 89.

HAIDINGER, W. (1848): Über die Metamorphose der Gebirgsarten. – Ber. über die Mittheilungen von Freunden der Naturwissenschaften in Wien, **4**: 103 – 134.

– (1850): Nöggerath. Achatmandeln. – Ber. über die Mittheilungen von Freunden der Naturwissenschaften in Wien, **6**: 62 – 65, 118 – 119.

HARDER, H. & MENSCHEL, G. (1967): Quarzbildungen am Meeresboden. – Naturwissenschaften, **54**: 561.

HARDER, H. & FLEHMIG, W. (1967): Bildung von Quarz aus verdünnten Lösungen bei niedrigen Temperaturen. – Naturwissenschaften, **54**: 140.

– (1970): Quarzsynthese bei tiefen Temperaturen. – Geochim. Cosmochim. Acta, **34**: 295 – 305.

HARDY, D. C.; MONROE, E. A.; RANDALL, C. E. & SASS, D. B. (1976): Electron optical study of silica minerals. – Geol. Soc. America, Abstracts with Programs, **8**: 189 – 190.

HARRISON, R. K. (1975): Jasperoid and chalcedonic concretions in anhydrite, Sandwich Mine, St. Bees, Cumbria. – Bull. Geol. Surv. Great Britain, **52**: 55 – 60.

HATSCHEK, E. (1912): Reaktionen im Kieselsäure-Gel. – Kolloid-Z., **10**: 77 – 79.

HEDDLE, M. F. (1900): On the structure of agates. – Trans. Geol. Soc. Glasgow, **11** (2): 153 – 173.

– (1901): The mineralogy of Scotland. Vol. I. – Edinburgh.

HEDGES, E. S. (1932): Liesegang rings and other periodic structures. – London.

HEIN, H. (1908): Untersuchung über faserige Kieselsäuren und deren Verhältnis zu Opal und Quarz. – N. Jb. Miner. Geol. Paläont. Beil.-Bd., **25**: 182 – 231.

HEINZ, H. (1930): Die Entstehung der Achate, ihre Verwitterung und ihre künstliche Färbung. – Chem. Erde, **4**: 501 – 525.

HEROLD, J. (1949): Über die Ursachen der Achatbildung. – Monzingen.

HIMMELBAUER, A. (1913): Die Bedeutung der Kolloidchemie für die Mineralogie. (Spezieller Teil). – Fortschr. Miner. Kristallogr. Petrogr., **3**: 32 – 62.

HINTZE, C. (1915): Handbuch der Mineralogie. Bd. 1 Abt. 2. – Leipzig.

HOEFS, J. (1973): Stable isotope geochemistry. – Berlin, Heidelberg, New York.

HOFFMANN, S. (1942): Untersuchungen über den Opalgehalt der Achate. – N. Jb. Miner. Geol. Paläont. Abh. Beil.-Bd. Abt. A, **77**: 238 – 276.

HOLGATE, N. (1954): The role of liquid immiscibility in igneous petrogenesis. – J. Geol., **62**: 439 – 480.

– (1956): The role of liquid immiscibility in igneous petrogenesis: a reply. – J. Geol., **64**: 89 – 93.

HÖLLER, H. (1962): Untersuchungen an den Hohlraumauskleidungen des Weitendorfer Basalts. – Anz. Österreich. Akad. Wiss., math.-naturwiss. Kl., **99**: 145 – 148.

HOSS, H. (1959): Nachtrag zu den Untersuchungen über die Petrographie kulmischer Kieselschiefer. – Beitr. Miner. Petrogr., **6**: 248 – 260.

HUFF, L. C. (1940): Artificial helictites and gypsum flowers. – J. Geol., **48**: 641 – 659.

I'ANSON, J. & PANKHURST, E. A. (1882): On some artificial forms of silica, illustrative of the structure of agates, chalcedonies, & c. . – Miner. Mag., Jg. 1882: 34 – 40.

IRVINE, T. N. (1974/75): The silica immiscibility effect in magmas. – Carnegie Institution of Washington, Year Book, **74**: 484 – 492.

– (1975/76): Metastable liquid immiscibility and MgO-FeO-SiO_2 fractionation patterns in the system Mg_2SiO_4-Fe_2SiO_4-$CaAl_2Si_2O_8$-$KAlSi_3O_8$-SiO_2. – Annu. Rep. of the Director, Geophysical Laboratory, Carnegie Institution of Washington, Jg. 1975/76: 597 – 611.

JABŁCZYŃSKI, K. (1923a): Pierścienie Lieseganga. – Roczniki Chemji, **3**: 228 – 235.

– (1923b): La formation rythmique des précipités. Les anneaux de Liesegang. – Bull. Soc. chim. France, **33**: 1592 – 1602.

– (1926): Über Liesegang-Ringe. – Kolloid-Z., **40**: 22 – 28.

JABŁCZYŃSKI, K. & KOBRYNER, S. (1926): La formation rythmique des précipités. Les anneaux de Liesegang. – Bull. Soc. chim. France, **39**: 383 – 388.

JESSOP, P. (1931): Agate, and the cherts of Derbyshire. – Proc. Geologists' Assoc., **42**: 29 – 43.

JOHANNES, W. & WINKLER, H. G. F. (1965): Transport von Feldspäten und Quarz im Temperaturgefälle. – Beitr. Miner. Petrogr., **11**: 250 – 271.

KABELAC, F. (1955): Beiträge zur Kenntnis und Entstehung des unteren Weißjuras am Ostrand des südlichen Oberrheingrabens. – Ber. naturforsch. Ges. Freiburg i. Br., **45**: 5 – 58.

KAIBARA, H. (1964): A study of the micro-texture of cherts. – Mem. College of Science, Univ. Kyoto, Ser. B, **30** (4): 59 – 73.

KAISER, E. (1923): Kaolinisierung und Verkieselung als Verwitterungsvorgänge in der Namibwüste Südwestafrikas. – Z. Kristallogr., **58**: 125 – 146.

– (1926a): Die Diamantenwüste Südwest-Afrikas. Bd. I. – Berlin.

– (1926b): Die Diamantenwüste Südwest-Afrikas. Bd. II. – Berlin.

KALKOWSKY, E. (1901): Die Verkieselung der Gesteine in der nördlichen Kalahari. – Abh. naturwiss. Ges. ISIS Dresden, Jg. 1901: 55 – 107.

KAŠPAR, J. (1944): Příspěvek k poznání vzniku achátů a jaspisů. – Věda Přírodní, měsičnik pro šíření a pěstování věd přírodnich, **23**: 97 – 104.

KELLER, P. C. (1979): Quartz geodes from near the Sierra Gallego Area Chihuahua, Mexico. – Mineral. Rec., **10** (4): 207 – 212.

KENNGOTT, G. A. (1851): Über die Achatmandeln in den Melaphyren, namentlich über die von Theiss in Tirol. – Naturwiss. Abh. gesammelt und durch Subscription herausgeg. von W. Haidinger, **4** (II. Abtheilung): 71 – 104.

KIND, H.-D. (1957): Achate im Quarzporphyr. – Aufschluß, **8**: 128 – 134.

KNÖLL, H. (1942): Zur Anwendung der Liesegangschen Achattheorien. – Kolloid-Z., **101**: 296 – 300.

KNOPF, A. (1913): Review: Liesegang's Geologische Diffusionen. – Econ. Geol., **8**: 803 – 806.

KRÄMER, H. (1955): Die Theorien der Achatbildung. – Aufschluß, **6**: 197 – 200.

KRAUSKOPF, K. B. (1956): Dissolution and precipitation of silica at low temperatures. – Geochim. Cosmochim. Acta, **10**: 1 – 26.

– (1959): The Geochemistry of silica in sedimentary environments. – In: IRELAND, H. A. (ed): Silica in sediments. – Soc. Econ. Paleont. Mineralogists, Spec. Publ. No. 7: 4 –19, Tulsa/Okla.

– (1979): Introduction to Geochemistry. – 2. Aufl., Tokyo.

KURIEN, K. V; VAIDYAN, V. K. & ITTYACHEN, M. A. (1983): Periodic precipitation of barium molybdate in silica gel. – Crystal Res. Technol., **18**: 889 – 894.

LANGE, G. (1868): Die Halbedelsteine aus der Familie der Quarze und die Geschichte der Achatindustrie. – Kreuznach.

LEBEDEV, L. M. (1967): Metacolloids in endogenic deposits. – New York.

LEHMANN, G. (1967): Farbzentren des Eisens als Ursache der Farbe von Amethyst. – Z. Naturforsch., **22a**: 2080 – 2085.

LEHMANN, G. & BAMBAUER, H. U. (1973): Quarzkristalle und ihre Farben. – Angew. Chem., **85**: 281 – 289.

LEITMEIER, H. (1909): Der Basalt von Weitendorf in Steiermark und die Mineralien seiner Hohlräume. – N. Jb. Miner. Geol. Paläont. Beil.-Bd., **27**: 219 – 260.

LEONHARD, K. C. von (1823): Charakteristik der Felsarten. Erste Abtheilung. – Heidelberg.

LEYSER, R. (1948): Das Achatvorkommen im oberen Nahegebiet. – Achat, **1**: 78 – 80.

LIESEGANG, R. E. (1906): Geschichtete Strukturen. – Z. anorg. Chem., **48**: 364 – 366.

– (1910a): Formung von Gelen durch Kristalle. – Kolloid-Z., **7**: 96 – 98.

– (1910b): Die Entstehung der Achate. – Cbl. Miner. Geol. Paläont., Jg. 1910: 593 – 597.

– (1911a): Achat-Probleme. – Cbl. Miner. Geol. Paläont., Jg. 1911: 497 – 507.

– (1911b): Das Verhalten der Kanten und Ecken bei einigen Diffusionsversuchen. – Kolloid-Z., **9**: 296 – 298.

– (1911c): Die Gestalt einiger Silikatniederschläge. – Kolloid.-Z., **9**: 298 – 300.

– (1911d): Zur Übersättigungstheorie einiger scheinbar rhythmischer Reaktionen. – Z. phys. Chem., **75**: 371 – 373.

– (1911/12): Die Entwicklungsgeschichte der Achate. – Aus der Natur, **7**: 561 – 566.

– (1912a): Ein Membrantrümmer-Achat. – Cbl. Miner. Geol. Paläont., Jg. 1912: 65 – 67.

– (1912b): Nachahmung von Lebensvorgängen. III. Formkatalysatoren. – Arch. für Entwicklungsmechanik der Organismen, **33**: 328 – 338.

– (1912c): Wachsende Kieselsäuregele. – Kolloid-Z., **10**: 273 – 275.

– (1913a): Geologische Diffusionen. – Dresden und Leipzig.

– (1913b): Über schalig-disperse Systeme. – Kolloid-Z., **12**: 74 – 77 + 269 – 273.

– (1913c): Beiträge zur Geochemie. – Geol. Rdsch., **4**: 404 – 408.

– (1913d): Kieselsäure-Niederschläge aus Wasserglas. – Silikat-Z., **1**: 125 – 129.

– (1914a): Die Achate. – In: DOELTER, C. (Hrsg.): Handbuch der Mineralchemie. Bd. II. Erste Hälfte: 186 – 190, Dresden und Leipzig.

– (1914b): Der ehemalige Zustand der Kieselsäure in den Melaphyr-Mandelräumen. – Silikat-Z., **2**: 167 – 173.

– (1914c): Pseudostalaktiten und Verwandtes. – Geol. Rdsch., **5**: 241 – 246.

– (1914d): Über einige Schrumpfungsvorgänge. – Kolloid-Z., **15**: 18 – 23.

– (1914e): Pseudoklase. – N. Jb. Miner. Geol. Paläont. Beil.-Bd., **39**: 268 – 276.

– (1915a): Referat zu „LIESEGANG, R. E. (1914): Geol. Rdsch., **5**: 241 – 246". – Kolloid-Z., **16**: 60.

– (1915b): Die Achate. – Dresden und Leipzig.

– (1915c): Verteilungsformen des Koffein-Natrium salicylicum. – Kolloid-Z., **16**: 13 – 16.

– (1918): Referat zu „NACKEN, R. (1917): Über die hydrothermale Entstehung der Achatmandeln im Gestein. – Naturwissenschaften, **5**: 269 – 274 + 292 – 296". – Kolloid-Z., **22**: 109.

– (1919): Über horizontal gebänderte Achate. – Cbl. Miner. Geol. Paläont., Jg. 1919: 184 – 188.

– (1920): Durchsinterung. – Cbl. Miner. Geol. Paläont., Jg. 1920: 369 – 371.

– (1921): Rhythmenbildung in der Natur. – Ber. senckenberg. naturforsch. Ges., **51**: 59 – 67.

– (1922): Referat zu „LIESEGANG, R. E. (1919): Cbl. Miner. Geol. Paläont., Jg. 1919: 184 – 188". – Kolloid-Z., **31**: 154 – 155.

– (1924): Chemische Reaktionen in Gallerten. – 2. Aufl., Dresden und Leipzig.

– (1926): Diffusion in jellies. – In: ALEXANDER, J. (ed.): Colloid chemistry. Vol. I. Theory and methods: 783 – 789, New York.

– (1930a): Silikat-Gewächse. – Natur u. Museum, **60**: 106 – 110.

– (1930b): Formbildende Vorgänge bei der Entwässerung von Kieselsäurepräparaten. – Sprechsaal für Keramik, Glas und verwandte Industrien, **63**: 871 – 872.

– (1931a): Achat-Theorien. – Chem. Erde, **6**: 143 – 152.

– (1931b): Colloid chemistry and geology. – In: ALEXANDER, J. (ed.): Colloid chemistry, theoretical and applied. Vol. III: 251 – 260, New York.

– (1931c): Kolloidchemie des Glases. – Dresden und Leipzig.

– (1931d): Referat zu „LIESEGANG, R. E. (1931): Chem. Erde, **6**: 143 – 152". – Kolloid-Z., **54**: 99.

– (1941): Zur Problematik der sogenannten Uri-Lloyd-Schichtung und ihrer möglichen Bedeutung für Meereskunde, Geologie und Meteorologie. – Naturwissenschaften, **29**: 395 – 396.

– (1943): Chemische Interferenzen. – Natur u. Volk, **73**: 143 – 149.

– (1946): Dendriten. – Natur u. Volk, **75/76**: 46 – 53.

LINCK, G. & HEINZ, H. (1930): Ergebnisse der Arbeit des Herrn H. Heinz über die Achate. – Chem. Erde, **4**: 526 – 528.

LLOYD, J. U. (1916): Pharmazeutische Studien. – Kolloidchem. Beih., **8**: 174 – 250.

LUNGE, G. & MILLBERG, C. (1897): Über das Verhalten der verschiedenen Arten von Kieselsäure zu kaustischen und kohlensauren Alkalien. – Z. angew. Chem., Jg. 1897: 393 – 398 + 425 – 431.

MACKENZIE, F. T. & GEES, R. (1971): Quartz: Synthesis at earth-surface conditions. – Science, **173**: 533 – 535.

MARC, R. (1913): Über die Bedeutung der Kolloidchemie für die Mineralogie. (Allgemeiner Teil). – Fortschr. Miner. Kristallogr. Petrogr., **3**: 11 – 31.

– (1916): Referat zu „LIESEGANG, R. E. (1915): Die Achate. –". – Z. Elektrochem., **22**: 119.

MATIJEVIĆ, E. (1974): Kolloide: Die Welt der vernachlässigten Dimensionen. – In: STEINKOPFF, J. (Hrsg.) (1975): Konzepte der Kolloidchemie: 116 – 129, Darmstadt.

MIDGLEY, H. G. (1951): Chalcedony and flint. – Geol. Mag., **88**: 179 – 184.

MOHS, F. (1842): Die ersten Begriffe der Mineralogie und Geognosie für junge praktische Bergleute der k. k. österreichischen Staaten. Zweiter Theil. Geognosie . – Wien.

MONROE, E. A. (1964): Electron optical observations of fine-grained silica minerals. – Amer. Mineralogist, **49**: 339 – 347.

MORSE, S. A. (1980): Basalts and phase diagrams. – New York, Heidelberg, Berlin.

MOSEBACH, R. (1952): Zur Kenntnis und petrologischen Bedeutung des Systems SiO_2-H_2O. – Geologie, **1**: 415 – 435.

MÜLLER, G. (1972): Zur Genese der Achatbildungen im Raum Freisen. – Bergbau in Pfalz, Saarland und Lothringen; Mineralogie 4: 33 – 42.

NACKEN, R. (1917): Über die hydrothermale Entstehung der Achatmandeln im Gestein. – Naturwissenschaften, **5**: 269 – 274 + 292 – 296.

– (1921): Welche Folgerungen ergeben sich aus dem Auftreten von Flüssigkeitseinschlüssen in Mineralien ?. – Cbl. Miner. Geol. Paläont., Jg. 1921: 12 – 20 + 35 – 43.

– (1948): Über die Nachbildung von Chalcedon-Mandeln. – Natur u. Volk, **78**: 2 – 8.

– (1950): Die hydrothermale Mineralsynthese als Grundlage zur Züchtung von Quarzkristallen. – Chemiker-Ztg., **74**: 745 – 749.

NASHAR, B. & DAVIES, M. (1960): Secondary minerals of the Tertiary basalts, Barrington, New South Wales. – Mineral. Mag., **32**: 480 – 491.

NATHORST, A. G. (1895): Agat såsom sprickfyllnad i Varbergsgraniten. – Geol. Fören. Stockholm Förhandl., **17**: 543 – 544.

NEMETSCHEK, T. & HOFMANN, U. (1953): Feine Fasern aus Kieselsäure. – Z. Naturforsch., **8b**: 410 – 412.

NIGGLI, P. (1920): Die leichtflüchtigen Bestandteile im Magma. – Leipzig.

NOEGGERATH, J. (1849): Sendschreiben an den k. k. wirklichen Bergrath und Professor, Herrn Wilhelm Haidinger in Wien, über die Achat-Mandeln in den Melaphyren. – Verh. naturhist. Ver. preuss. Rheinlande und Westphalens, **6**: 243 – 260.

– (1850a): Über die Achat-Mandeln in den Melaphyren, Sendschreiben an den k. k. wirklichen Bergrath und Professor Herrn Wilhelm Haidinger in Wien. – Naturwiss. Abh., gesammelt und durch Subscription herausgeg. von W. Haidinger, **3** (I. Abtheilung): 93 – 104.

– (1850b): Über die Achat-Mandeln in den Melaphyren. Zweites Sendschreiben an den k. k. wirklichen Bergrath und Professor Wilhelm Haidinger in Wien. – Naturwiss. Abh., gesammelt und durch Subscription herausgeg. von W. Haidinger, **3** (I. Abtheilung): 147 – 162.

– (1858): Stalaktiten in Chalcedon, sog. Chalcedonthierchen. – Verh. naturhist. Ver. preuss. Rheinlande und Westphalens. – Sitz.-Ber. niederrhein. Ges. Natur- u. Heilkde., **15**: VII – VIII.

OBENAUER, K. (1974): Über Achate vom Uruguay-Typ im Oberen Buntsandstein des Nordschwarzwaldes. – Aufschluß, **25**: 110 – 116.

– (1979): Über den Aufbau des Buntsandstein-Carneols und seiner Achatdrusen. – Aufschluß, **30**: 113 – 119.

OEHLER, J. H. (1976): Hydrothermal crystallization of silica gel. – Geol. Soc. America Bull., **87**: 1143 – 1152.

OLDERSHAW, A. E. (1968): Electron-microscopic examination of Namurian bedded cherts, North Wales (Great Britain). – Sedimentology, **10**: 255 – 272.

ORTLAM, D. (1966): Fossile Böden und ihre Verwendung zur Gliederung des höheren Buntsandsteins im nördlichen Schwarzwald und südlichen Odenwald. – Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver., N. F. **48**: 69 – 78.

OSTWALD, Wo. (1944): Die Welt der vernachlässigten Dimensionen. – 12. Aufl., Dresden und Leipzig.

PABIAN, R. K. (1978): Inclusions in agate and their origins and significance. – Gems and Gemology, **16**: 16 – 28.

– (1980): Lake Superior agates – characteristic structures and inclusions. – Lapidary J., **34**: 1284 – 1299.

PELTO, C. R. (1956): A study of chalcedony. – Amer. J. Sci., **254**: 32 – 50.

PENSE, J. (1956/57): Achate unter dem Elektronenmikroskop. – Z. deutsch. Ges. Edelsteinkde., **18**: 7 – 10.

– (1959): Zum elektronenmikroskopischen Faserbau des Achats. – Z. deutsch. Ges. Edelsteinkde., **27**: 3 – 5.

– (1961/62): Elektronenmikroskopische Untersuchungen zur Fasertextur des Achates. – Z. deutsch. Ges. Edelsteinkde., **38**: 12 – 20.

– (1963): Zur sublichtmikroskopischen Morphologie des Chalcedons. – Fortschr. Miner., **41**: 166.

– (1966): Zur sublichtmikroskopischen Morphologie des kryptokristallinen Siliciumdioxids. – Habilitationsschrift. Mainz.

PETZOLD, A. & HINZ, W. (1979): Silikatchemie. – Stuttgart.

PILIPENKO, P. P. (1934): Zur Frage der Achatengenesis (russ. mit dt. Zusammenf.). – Bull. Soc. Naturalistes de Moscou, Sect. géol., **12**: 279 – 299.

PLYUSNINA, I. I. (1978): Study of structural disorder of chalcedonies by infrared spectroscopy. – Sov. Phys. Dokl., **23**: 363 – 365.

– (1979): Infrared study of cryptocrystalline formations of silica. I. Chalcedonies. – Arch. Mineral., **35**: 19 – 31.

PLYUSNINA, I. I. & SERGEEVA, N. E. (1981): A study of the disordering of quartz and chalcedony by the methods of infrared spectroscopy and electron microscopy. – Moscow Univ. Geol. Bull., **36** (1): 37 – 42.

RAMAN, C. V. & JAYARAMAN, A. (1953): The structure and optical behaviour of iridescent agate. – Proc. Indian Acad. Sci., Sect. A, **38**: 199 – 206.

REIS, O. M. (1916/17a): Über Blasenentstehung in Gesteinen und über Achatbildung. (Mit einem Anhang: Über Baryt in Achatmandeln, über Kalzitachat und Enhydros). – Geogn. Jh., **29/30**: 7 – 44.

– (1916/17b): Einzelheiten über Bau und Entstehung von Enhydros, Kalzitachat und Achat. I. Teil. – Geogn. Jh., **29/30**: 81 – 298.

– (1918/19): Einzelheiten über Bau und Entstehung von Enhydros, Kalzitachat und Achat. II. Teil. – Geogn. Jh., **31/32**: 1 – 92.

– (1923): Das oberrotliegende Grenzlager im Haardtgebirge, seine Stellung und seine Einschlüsse. – Geogn. Jh., **36**: 75 – 102.

REIS, O. M. & HEIM, F. (1924): Über Kieselsäureseptarien und -Geoden (Lithophysen) in Verbindung mit Eruptivgesteinen. – Jb. preuß. geol. L.-Anst., **45**: 451 – 488.

REUSCH, E. (1864): Über den Agat. – Ann. Phys. Chem., **123**: 94 – 114.

ROEDDER, E. (1979): Silicate liquid immiscibility in magmas. – In: YODER, H. S. (ed.): The evolution of the igneous rocks: 15 – 57, Princeton.

RÖSLER, H. J.; BLANKENBURG, H.-J.; REIF, A. & BERGER, H. (1978): Über die Möglichkeit der strukturellen Charakterisierung von Quarzen verschiedener Genese mit Hilfe der röntgenographischen Profilanalyse. – Z. geol. Wiss., **6**: 719 – 725.

SCHLOSSMACHER, K. (1950): Die Entstehung der Achate. – Schmuck und edles Gerät, Jg. 1950: 23 – 26 + 55 – 57.

– (1960a): Die Entstehung der Achate. – Z. deutsch. Ges. Edelsteinkde., **32**. 16 – 20.

– (1960b): Die Entstehung der Achate, Teil II. – Z. deutsch. Ges. Edelsteinkde., **33**: 11 – 16.

SHAUB, B. M. (1955): Notes on the origin of some agates and their bearing on a stylolite seam in petrified wood. – Amer. J. Sci., **253**: 117 – 120.

– (1979a): Genesis of thundereggs, geodes and agates of igneous origin. – Lapidary J., **32**: 2340 – 2354.

– (1979b): Genesis of thundereggs, geodes and agates of igneous origin – Part II. – Lapidary J., **32**: 2548 – 2566.

– (1980a): Genesis of agates, geodes, septaria and other concretions of sedimentary origin – Part I. – Lapidary J., **34**: 650 – 659 + 670 – 679.

– (1980b): Genesis of agates, geodes, septaria and other concretions of sedimentary origin – Part II. – Lapidary J., **34**: 860 – 864 + 886 – 896.

SIM, S. (1973): Some thoughts about agate formations of Scotland. – Lapidary J., July 1973: 620 – 623.

– (1979): Further thoughts on agate formation. – Lapidary J., **33**: 1128 –1130.

– (1982): Agate anatomy. – Lapidary J., **36**: 1430 – 1431.

SINKANKAS, J. (1966): What do we really know about the formation of agate and chalcedony. – In: LEIPER, H. (ed.): The agates of North America: 6 – 10, San Diego.

STERN, K. H. (1954): The Liesegang Phenomenon. – Chem. Rev., **54**: 79 – 99.

STERZEL, J. T. (1900): Gruppe verkieselter Araucariten-Stämme aus dem versteinerten Rotliegend-Walde von Chemnitz-Hilbersdorf. – Ber. naturwiss. Ges. Chemnitz, **14**: 14 – 36.

STORZ, M. (1926): Zur Petrogenesis der sekundären Kieselgesteine in der südlichen Namib. – In: KAISER, E.: Die Diamantenwüste Südwest-Afrikas. Bd. II: 254 – 282, Berlin.

– (1928a): Die sekundäre authigene Kieselsäure in ihrer petrogenetisch-geologischen Bedeutung. I. Teil: Verwitterung und authigene Kieselsäure führende Gesteine. – Monographien zur Geologie und Palaeontologie, herausgeg. von W. SOERGEL, Serie II, Heft 4, Berlin.

– (1928b): Über neuartige Gesteine und neuartige rhythmische Vorgänge in Gesteinen. Rhythmisches Umstehen. – Kolloid-Z., **45**: 231 – 238.

– (1931): Die sekundäre authigene Kieselsäure in ihrer petrogenetisch-geologischen Bedeutung. II. Teil: Die Einwirkung der sekundären authigenen Kieselsäure auf vorhandene Gesteine (Einkieselung und Verkieselung). – Monographien zur Geologie und Palaeontologie, herausgeg. von W. SOERGEL, Serie II, Heft 5, Berlin.

STROM, R. N.; UPCHURCH, S. B. & ROSENZWEIG, A. (1981): Paragenesis of "boxwork geodes", Tampa Bay, Florida. – Sediment. Geol., **30**: 275 – 289.

STÜRMER, W. (1955): Achat-Bildungen in Main-Geröllen. – Natur u. Volk, **85**: 155 – 158.

SUNAGAWA, I. & OHTA, E. (1976): Mechanism of formation of chalcedony. – Sci. Rep., Tohoku Univ., 3. ser., **13**: 131 – 146.

TAIT, A. (1977): The agates of the Midland Valley of Scotland. – J. Gemmology, **15**: 382 – 392.

TAMMANN, G. & GRONOW, H. E. von (1931): Über die spontane Kristallisation unterkühlter Schmelzen und übersättigter Lösungen. – Z. anorg. allgem. Chem., **200**: 57 – 73.

TAYLOR, H. P. (1979): Oxygen and hydrogen isotope relationships in hydrothermal mineral deposits. – In: BARNES, H. L. (ed.): Geochemistry of hydrothermal ore deposits. – 2. Aufl.: 236 – 277, New York.

THOMAS, R. (1979): Untersuchungen von Einschlüssen zur thermodynamischen und physikochemischen Charakteristik lagerstättenbildender Lösungen und Prozesse im magmatischen und postmagmatischen Bereich. – Diss., Bergakademie Freiberg.

THOMAS, R. & BLANKENBURG, H.-J. (1981): Erste Ergebnisse über Einschlußuntersuchungen an Quarzen aus Achatmandeln und -kugeln basischer und saurer Vulkanite. – Z. geol. Wiss., **9**: 625 – 633.

TOMKEIEFF, S. I. (1942): The tertiary lavas of Rum. – Geol. Mag., **79**: 1 – 13.

TÖNGES, I.; FLÖRKE, O. W. & LANGER, K. (1977): Wasser in Chalcedon. – Fortschr. Miner., **55**, Beih. 1: 139 – 140.

TRÜSTEDT, O. (1907): Die Erzlagerstätten von Pitkäranta am Ladoga-See. – Fennia, **25** (4): 1 – 333.

UTADA, M. & MINATO, H. (1970): A genetical relation between the montmorillonitization and the formation of opal druse in Neogene Andesite from Koriyama, Kagoshima Prefecture. – Nendo Kagaku, **10**: 102 – 109.

WAHLSTROM, E. E. (1941): Hydrothermal deposits in the Specimen Mountain volcanics, Rocky Mountain National Park, Colorado. – Amer. Mineralogist, **26**: 551 – 561.

WALGER, E. (1953): Ein Beitrag zur geologischen Spezialkartierung des Blattes Alzey (Rhh.). – Dipl.-Arb., Darmstadt.

– (1954): Das Vorkommen von Uruguay-Achaten bei Flonheim in Rheinhessen, seine tektonische Auswertung und seine Bedeutung für die Frage nach der Achatbildung. – Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver., N. F. **36**: 20 – 31.

– (1958): Über die postmagmatischen Umwandlungserscheinungen an den Melaphyren des Pfälzer Berglandes. – Diss., Freiburg i. Br.

– (1961): Zur Entstehung des Calcitachats. – Fortschr. Miner., **39**: 360.

– (1963): Mandelstein-Geschiebe von der holsteinischen Ostseeküste mit Achatmandeln des „Uruguay-Typs". – Meyniana, **13**: 97 – 107.

– (1964): Über die Entstehung des „Calcit-Achats". – Notizbl. hess. L.-Amt Bodenforsch., **92**: 216 – 222.

WARTENBERG, H. von (1913): Über die Reduktion der Kieselsäure. – Z. anorg. Chem., **79**: 71 – 87.

WASHBURN, E. W. & NAVIAS, L. (1922): The relation of chalcedony to the other forms of silica. – Proc. nat. Acad. Sci., **8**: 1 – 15.

WEBSTER, R. (1970): Gems. – 2. Aufl., London.

WEIGELT, J. (1921): Das Steinkohlenvorkommen von Ilfeld am Südharz. – Jb. des Halleschen Verbandes für die Erforschung der mitteldeutschen Bodenschätze und ihrer Verwertung, **3**, Lieferung 3: 40 – 73.

WEISS, Al. & WEISS, Ar. (1954a): Über eine neue Siliziumdioxyd-Modifikation mit Faserstruktur und Kettenmolekeln. – Naturwissenschaften, **41**: 12.

– (1954b): Zur Kenntnis der faserigen Siliciumdioxyd-Modifikation. – Z. anorg. allgem. Chem., **276**: 95 – 112.

WETZEL, W. (1913): Über ein Kieselholzgeschiebe mit Teredonen aus den Holtenauer Kanal-Aufschlüssen. – Jber. niedersächs. geol. Ver., **6**: 20 – 59.

WHERRY, E. T. (1914): Variations in the compositions of minerals. – J. Washington Acad. Sci., **4**: 111 – 114.

WHITE, D. E.; BRANNOCK, W. W. & MURATA, K. J. (1956): Silica in hot-spring waters. – Geochim. Cosmochim. Acta, **10**: 27 – 59.

WHITE, J. F.; SHAW, E. R. & CORWIN, J. F. (1958): A chalcedony-like variety of germania. – Amer. Mineralogist, **43**: 580 – 584.

WHITE, J. F. & CORWIN, J. F. (1959): Synthetic chalcedony. – Bull. Geol. Soc. America, **70**: 1696 – 1697.

– (1961): Synthesis and origin of chalcedony. – Amer. Mineralogist, **46**: 112 – 119.

WILD, G. O. & BIEGEL, H. (1948a): Achat. – Achat, **1**: 34 – 36.

– (1948b): Some facts about agates. – The Mineralogist, Jg. 1948: 267 – 276.

WINKLER, H. G. F. (1976): Petrogenesis of metamorphic rocks. – 4. Aufl., New York, Heidelberg, Berlin.

ZSIGMONDY, R. (1927): Kolloidchemie. Bd. 2. – 5. Aufl., Leipzig.

(Bei der Schriftleitung eingegangen am 25. 5. 1984)

Anschrift des Verfassers:

Dipl.-Min. Michael LANDMESSER, Institut für Geowissenschaften (Lehreinheit Mineralogie und Edelsteinforschung) der Johannes Gutenberg-Universität, Saarstraße 21, D-6500 Mainz