

## Zur Verwitterung vulkanischer Gesteine — ein Beitrag zur Halloysit-Genese

Von BERND SCHWAIGHOFER \*

Mit 24 Abbildungen und 5 Tabellen

### ZUSAMMENFASSUNG

Von drei Profilen über verwitterten pyroklastischen Gesteinen der Insel Tenerife wurden 5 Proben untersucht. Aus den Röntgendiffraktometeranalysen ergab sich bei sämtlichen Proben übereinstimmend bei den Mineralneubildungen ein Vorherrschen von Halloysit. Bei den Untersuchungen der im natürlichen Zustand belassenen Proben am Rasterelektronenmikroskop konnten innerhalb der Halloysitgruppe morphologische Unterschiede festgestellt werden: polsterförmige Aggregate, Geflechte aus stark verzweigten Stengeln mit charakteristischen regelmäßigen Einschnürungen, Ketten aus kugelförmigen Partikeln, einzelne Stengel und Röhren aus stark reliefierten Verwitterungskrusten.

### SUMMARY

Samples of three profiles on weathered pyroclastic rocks from Tenerife (Canary Islands) were studied. Mineralogical analyses made by X-ray diffraction show halloysite as the predominant neof ormation in all samples. Using scanning electron microscopy for investigations of samples in natural unaltered state, conspicuous morphological differences in the halloysite-group were found: pillow-like clusters, meshes of branched stalks, chains of globular particles, individual tubes and stalks from weathering crusts showing a strong relief.

### CONSLUSIONES

De tres cortes hechos en rocas alteradas piroclásticas de la isla Tenerife se estudiaren cinco pruebas. En todas las pruebas, los análisis de rayos-X mostraron que halloysita. Era el factor dominante en las nuevas formaciones mineralógicas. Del estudio de las observaciones en estado natural hechas en al microscopio electrónico de retículo, se puede determinar en el grupo de las halloysitas una serie de diferencias morfológicas: agregados de forma

---

\*) Anshrift des Verfassers: Dr. BERND SCHWAIGHOFER, Institut für Bodenforschung und Baugeologie, Hochschule für Bodenkultur, Gregor-Mendel-Straße 33, A-1180 Wien.

acolchada, entre lazados de tallos muy ramificados con nudos característicamente regulares, cadenas de partículas esféricas tallos individuales y tubos de cortezas alteradas en relieve.

### Inhalt

1. Einleitung
2. Untersuchungsmaterial
3. Mineralogische Analyse
4. Arbeiten zur Halloysitstruktur
5. Frühere Untersuchungen zur Morphologie und Genese
6. Untersuchungsmethode
7. Beobachtungen am Rasterelektronenmikroskop
8. Ergebnisse und Interpretation
9. Literatur

### EINLEITUNG

Noch immer sind bei der Zerstörung und Neubildung von Mineralen im Laufe der Verwitterung zahlreiche Fragen offen. Die Ursache dafür liegt hauptsächlich darin, daß hier sehr viele entscheidende Bildungsbedingungen zusammenkommen und es in den meisten Fällen unmöglich ist, alle diese Kriterien wirklich exakt zu erfassen. Ausgangsgestein, Klima, Vegetation, Relief, Alter, Grundwasserverhältnisse sind nur die wichtigsten Faktoren, durch deren Zusammenwirken einerseits die Primärminerale zerstört und andererseits Sekundärminerale gebildet werden.

Um diese Verwitterungsvorgänge untersuchen zu können, ist es notwendig, wenigstens einige Variationsmöglichkeiten der oben angeführten Entstehungsbedingungen auszuschalten. In bezug auf das Ausgangsgestein, die klimatischen Verhältnisse und zum Teil auch auf das Alter gelingt das bei den vulkanischen Gesteinen der Kanarischen Inseln. Aus diesem Grund wurden basische Vulkanite von Tenerife als Untersuchungsmaterial für die vorliegende Studie gewählt. Auf dieser Insel findet man mehrere scharf voneinander getrennte Klimazonen, so daß es möglich ist, die Verwitterung des gleichen Ausgangsgesteins in verschiedenen Klimaten zu untersuchen, bzw. auch die Wirkung eines Klimas auf unterschiedliche Ausgangsgesteine. Dazu kommt noch, daß sich auch hinsichtlich des Alters der vulkanischen Gesteine bzw. der Eruptionsphasen einige Aussagen machen lassen. Die jüngsten historischen Ergüsse sind natürlich alle genau datiert, aber auch über die quartären Ausbrüche werden schon in der nächsten Zeit genaue Altersbestimmungen (nach der K-Ar-Methode an Sanidinkristallen) veröffentlicht werden. Nach einer mündlichen Mitteilung von G. FERRARA (Pisa) liegen diese Werte zwischen 300.000 und 1,5 Mill. Jahren.

### Untersuchungsmaterial

Für die vorliegende Studie wurden Proben aus drei verschiedenen Verwitterungsprofilen untersucht. Dabei wurde die Auswahl nach folgenden Gesichtspunkten getroffen: Feststellung von morphologischen Unterschieden

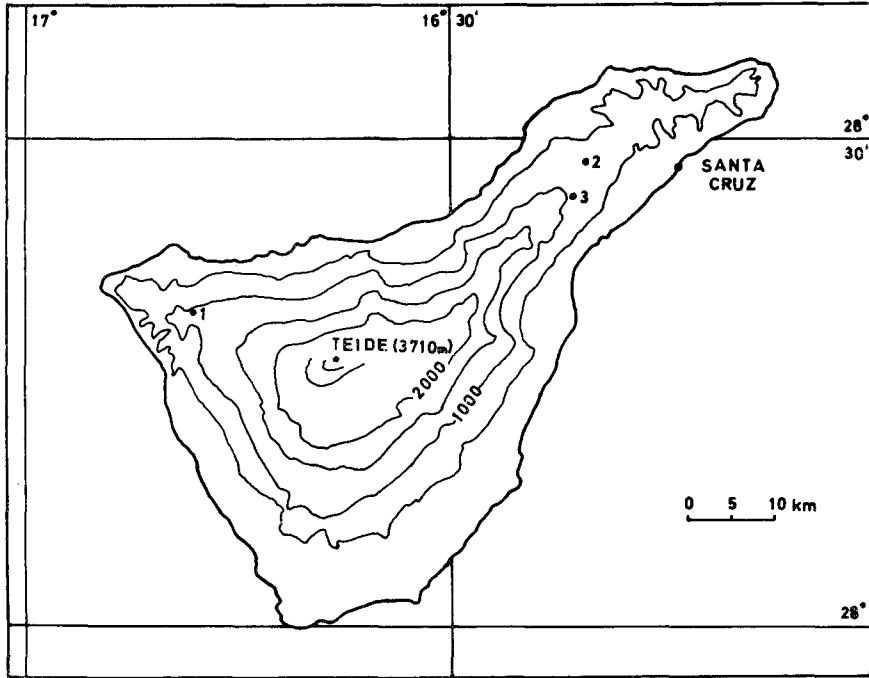


Abb. 1: Strukturkarte von Tenerife; Position der Profile 1—3.

innerhalb der Halloysitgruppe, Beobachtungen von Entwicklungsreihen bei den einzelnen Halloysittypen.

Profil 1 (Probe 1/h, 1/m).

Profil 1 liegt im W von Tenerife direkt S des kleinen Dorfes Erjos an der Verbindungsstraße von Icod an der Nordküste nach Santiago del Teide am Abfall zur Westküste. In 1000 bis 1100 m Seehöhe befinden sich hier große Abbaugruben, aus denen fruchtbares Bodenmaterial abtransportiert wird, um in anderen Teilen der Insel die Bodenfruchtbarkeit zu erhöhen. Im Zuge dieses Abbaues wurde auch das Verwitterungsprofil freigelegt, aus dem die beiden Proben 1/h und 1/m stammen. In der geologischen Karte 1:50.000 sind an dieser Stelle Tonablagerungen direkt an der Grenze zwischen Ergüssen der alten „Serie basaltica antiqua“ und pyroklastischen Gesteinen der „Serie basaltica III“ eingetragen. Von keiner der beiden Serien gibt es bisher Altersdatierungen. Einer Arbeit von FERRARA und SCHWAIGHOFER, die in Kürze über absolute Altersbestimmungen von Gesteinen aus Tenerife berichtet wird, vorausgreifend, darf schon hier erwähnt werden, daß der Horizont, der über der Probe 1/m liegt, ein Alter von 1,25 Mill. Jahren aufweist.

Bei beiden Proben aus diesem Aufschluß handelt es sich um intensiv verwitterte pyroklastische Gesteine.

1/h bildet einen Übergangshorizont von pyroklastischem Ausgangsmaterial zu einem überlagernden hydromorphen gelben Horizont. 1/m tritt als Füllmaterial in Rissen und Spalten eines Paläobodens über pyroklastischem Ausgangsmaterial auf.

#### Profil 2 (Probe 2/h).

Profil 2 liegt in 700 m Seehöhe auf der Mña Tabaiba — ein Schlacken-vulkan aus der „Serie basaltica III“. Dieser Vulkan liegt innerhalb der ausgedehnten Tonablagerungen der Hochebene von La Laguna unmittelbar S des Flughafens Los Rodeos. Im Detail handelt es sich dabei um zwei Schlackenvulkane: einen jüngeren, der den äußeren Kraterstand bildet, aus dem die Probe 2/h stammt, und einen älteren, dessen Eruptionszentrum etwas exzentrisch nach W verschoben liegt.

Die Probe 2/h stammt aus einem Horizont, der erste Ansätze zur Bodenbildung über einem phonolithischen Tuff zeigt. Nach einer mündlichen Mitteilung von FERRARA kommt diesem Tuffhorizont ein Alter von 675.000 Jahren zu.

#### Profil 3 (Proben 2/e, 2/g).

Profil 3 befindet sich S der kleinen Ortschaft La Esperanza in 900 m Seehöhe an der Cumbre de Pedro Gil, die von La Laguna entlang des die Insel beherrschenden, SW-NE streichenden Höhenrückens in die Caldera de Cañadas führt. Nach der geologischen Karte 1:50.000 liegt auch dieses Profil in der „Serie basaltica III“. Die Probe 2/e stammt aus einem gelblichweißen Horizont, der ebenfalls aus einem Phonolithtuff entstanden ist. 2/g wurde dem unmittelbar darüber liegenden braunen Horizont entnommen, der nach oben in Rotlehm übergeht. Darüber folgt noch einmal ein heller Sanidin-führender Horizont, dessen Alter von FERRARA mit 1,53 Millionen Jahren angegeben wird.

### Mineralogische Analyse

Da es das Ziel der vorliegenden Untersuchung war, die bei der Verwitterung der Primärminerale entstehenden Neubildungen festzustellen, mußte — bedingt durch die geringe Korngröße — die Röntgendiffraktometrie die wichtigste Untersuchungsmethode darstellen.

Ein Ergebnis, das für sämtliche untersuchte Proben gilt, kann hier gleich vorweggenommen werden: als häufigste Neubildung tritt stets Halloysit auf, allerdings nicht immer in der gleichen Form. Unterschiede gibt es hinsichtlich der Dominanz zwischen 10 Å- und 7 Å-Halloysit.

Die Bestimmung des Mineralbestandes erfolgte innerhalb einer Probe getrennt für verschiedene Fraktionen. Für eine erste Übersichtsaufnahme wurde die Gesamtprobe gerieben und in gepulverter Form analysiert. Die Fraktionen  $< 20 \mu$ ,  $< 2 \mu$ ,  $< 1 \mu$  und  $< 0,2 \mu$  wurden nach der Sedimenta-

tions- bzw. Zentrifugenmethode getrennt und aus einer Suspension auf ein Diaphragmablättchen im Vakuum aufsedimentiert. Im einzelnen ergab sich dabei folgender Mineralbestand für die verschiedenen Proben (der durch die RDA\* erhaltene Mineralbestand ist semiquantitativ in tabellarischer Form wiedergegeben):

Probe 1/h:

Tabelle I

Probe	Übersichtsaufnahme	Fraktion < 20 $\mu$	Fraktion < 2 $\mu$	Fraktion < 1 $\mu$	Fraktion < 0,2 $\mu$
1/h					

○ 10 Å — Halloysit  
 ● 7 Å — Halloysit  
 ◆ Sanidin  
 □ Magnetit

△ Hämatit  
 ▽ Goethit  
 ■ Saponit  
 ◆ Quarz

n. b. nicht bestimmt,  
 halbe Symbole zeigen Auf-  
 treten in Spuren an

Schon aus der Übersichtsaufnahme ergibt sich ein Vorherrschen von Halloysit, wobei beide Formen — also 10 Å- und 7 Å-Halloysit — etwa gleichstark vertreten sind.

Weiters Sanidin, Magnetit, Goethit und in Spuren ein Mg-reicher Montmorillonit, der Saponit.

Auch bei der 20 $\mu$ -Fraktion dominieren Sanidin und Halloysit. Hier überwiegt allerdings der 7 Å-Halloysit. Daneben treten auch wieder Magnetit und Goethit auf, während sich der Saponit in dieser Fraktion nicht findet.

Das auffallendste Ergebnis bei der RDA der 2 $\mu$ -Fraktion ist, daß eigentlich erst ab dieser Korngröße die neugebildeten Minerale eindeutig dominieren, und zwar ist es nur der 7 Å-Halloysit. Untergeordnet treten der 10 Å-Halloysit, Saponit, Goethit und Sanidin auf.

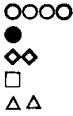


Bei der 1 $\mu$ -Fraktion wird diese Dominanz noch deutlicher und auch der Saponit tritt stärker in Erscheinung; in Spuren sind noch Goethit, Hämatit und der 10 Å-Halloysit zu erkennen.

Selbst in der 0,2 $\mu$ -Fraktion ist der 7 Å-Halloysit noch eindeutig mit der RDA zu erfassen, sonst allerdings nur mehr ein offenbar noch schlecht auskristallisierter Mg-Montmorillonit (stark zurücktretend).

\*) Die Röntgendiffraktometeranalysen wurden an einem Philips-Gerät bei folgenden Aufnahmebedingungen durchgeführt: Strahlung Cu K $\alpha$ , 40 kV, 20 mA; Winkelgeschwindigkeit 1/2° pro min. Vom Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung in Österreich wurden die Arbeiten finanziell unterstützt.

Probe 1/m:

Tabelle II

Probe	Übersichtsaufnahme	Fraktion < 20 $\mu$	Fraktion < 2 $\mu$	Fraktion < 1 $\mu$	Fraktion < 0,2 $\mu$
1/m				n. b.	n. b.






In der Übersichtsaufnahme herrscht eindeutig der 10 Å-Halloysit vor, daneben finden sich Magnetit, Hämatit, Sanidin und in Spuren 7 Å-Halloysit.

Die 20 $\mu$ -Fraktion zeigt im wesentlichen das gleiche Bild, nur treten hier Sanidin und der 7 Å-Halloysit etwas stärker in den Vordergrund.

Dagegen ist in der 2 $\mu$ -Fraktion der Sanidin schon völlig verschwunden und es finden sich nur mehr Mineralneubildungen (außer Magnetit in geringen Spuren), wobei der 10 Å-Halloysit etwas den 7 Å-Halloysit überwiegt.

Probe 2/h.

Tabelle III

Probe	Übersichtsaufnahme	Fraktion < 20 $\mu$	Fraktion < 2 $\mu$	Fraktion < 1 $\mu$	Fraktion < 0,2 $\mu$
2/h					

Aus der RDA der Übersichtsaufnahme zeigt sich ein starkes Vorherrschen von Quarz. Da es aber auf der ganzen Insel keine quarzführenden Gesteine gibt, kann sich dieses Mineral hier nur auf sekundärer Lagerstätte befinden, das heißt, es muß durch äolischen Transport vom afrikanischen Festland hierher verfrachtet worden sein (CALDAS und SCHWAIGHOFER 1973).

Sonst finden sich nur Sanidin und 10 Å-Halloysit, wobei dieser etwas stärker in Erscheinung tritt als der Feldspat.

In der 20 $\mu$ -Fraktion ist die Mineralverteilung anders. Hier dominiert Sanidin, gefolgt von Quarz, 10 Å-Halloysit und 7 Å-Halloysit.

Erst ab der 2 $\mu$ -Fraktion treten nun die Mineralneubildungen in den Vordergrund, und zwar in Form des 10 Å-Halloysits. Mengenmäßig gleich treten dann Sanidin und Quarz auf, etwas untergeordnet findet sich auch 7 Å-Halloysit.

Die  $1\mu$ -Fraktion schließlich wird nur mehr von Sekundärmineralen beherrscht, wobei  $10\text{ \AA}$ -Halloysit den  $7\text{ \AA}$ -Halloysit überwiegt. Nur mehr schwache Anzeichen für kristalline Formen finden sich in der  $0,2\mu$ -Fraktion, und auch hier mehr  $10\text{ \AA}$ -Halloysit als  $7\text{ \AA}$ -Halloysit.

Probe 3/e:

Tabelle IV

Probe	Übersichtsaufnahme	Fraktion < $20\mu$	Fraktion < $2\mu$	Fraktion < $1\mu$	Fraktion < $0,2\mu$
3/e					

Die Übersichtsaufnahme läßt ein starkes Vorherrschen der neugebildeten Minerale, und zwar vor allem des  $10\text{ \AA}$ -Halloysits, erkennen; daneben treten noch Sanidin und Magnetit auf. Schon in der  $20\mu$ -Fraktion finden sich überhaupt nur mehr Sekundärminerale, und auch hier wieder vor allem der  $10\text{ \AA}$ -Halloysit. Die  $2\mu$ -Fraktion zeigt in unveränderter Form das gleiche Bild. Dagegen tritt in der  $1\mu$ -Fraktion der  $7\text{ \AA}$ -Halloysit mengenmäßig gleich stark wie der  $10\text{ \AA}$ -Halloysit auf und außerdem weist die Form seines Peaks darauf hin, daß er hier in besser kristallisierter Ausbildung vorkommt. Auch in der Fraktion  $0,2\mu$  lassen sich noch Anzeichen für eine Kristallisation von  $10\text{ \AA}$ - und  $7\text{ \AA}$ -Halloysit erkennen.

Probe 3/g:

Tabelle V

Probe	Übersichtsaufnahme	Fraktion < $20\mu$	Fraktion < $2\mu$	Fraktion < $1\mu$	Fraktion < $0,2\mu$
3/g				n. b.	n. b.

Die Übersichtsaufnahme zeigt ein starkes Vorherrschen von  $10\text{ \AA}$ -Halloysit, dann folgt Magnetit und in geringen Mengen Hämatit und  $7\text{ \AA}$ -Halloysit.

Wenig verändert ist das Bild in der  $20\mu$ -Fraktion, nur ist der Magnetit hier verschwunden und der  $7\text{ \AA}$ -Halloysit tritt etwas stärker in Erscheinung.

Schon in der  $2\mu$ -Fraktion treten bei dieser Probe die kristallinen Formen stark in den Hintergrund; nur der  $10\text{ \AA}$ -Halloysit ist noch feststellbar.

### Arbeiten zur Halloysit-Struktur

Von seiner ersten Beschreibung durch BERTHIER (1826) bis 1934 galt Halloysit als amorphe Substanz, die von MELLOR (1908) z. B. als im Detail ungleichmäßig geformte Körnchen mit unregelmäßiger Oberfläche und schwammiger Struktur beschrieben wurde. Erst röntgenanalytische Untersuchungen durch HOFMANN et al. (1934) ergaben die kristalline Struktur des Halloysits.

Schon vorher (1930) hatte PAULING theoretische Überlegungen über den inneren Aufbau des Halloysits angestellt. Als Mineral aus der Kaolingrouppe besteht auch der Halloysit aus 1:1-Struktureinheiten, wobei aber durch eine geringe Differenz zwischen der Si-O-Schicht und der etwas kleineren Al-OH-Schicht (Gibbsit-Schicht) Unterschiede in den  $a_0$ - und  $b_0$ -Dimensionen der Einheitszelle auftreten. PAULING stellte nun die Theorie auf, daß durch dieses nicht genaue Zusammenpassen der beiden Schichten eine schwache Krümmung in der 001-Ebene entstehen kann. Beim Kaolinit ist die Distanz zwischen den benachbarten 1:1-Einheiten so klein, daß die Tendenz zur Krümmung durch den Streckungseffekt verhindert wird, den die O-Ionen in der Si-O-Schicht auf die gegenüberliegenden OH-Ionen der Gibbsitschicht ausüben. Halloysit hat das gleiche  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ -Verhältnis wie Kaolinit, aber sein Wassergehalt ist höher; die voll hydratisierte Form  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  enthält 2 Wasserschichten zwischen benachbarten Kaolinitsschichten, so daß sich als Einheit ein 10 Å-Paket ergibt (WEAVER and POLLARD 1973). Dadurch wird nun die Distanz zwischen den gegenüberliegenden O- und OH-Ionen wesentlich größer als beim Kaolinit. Der Streckungseffekt ist somit gering und der Unterschied in den Gitterdimensionen zwischen Si-O-Schicht und der Gibbsit-Schicht bewirkt die Krümmung, die zu den röhrenförmigen Kristallen führt (PAULING 1930). Messungen des inneren Durchmessers der Röhren ergaben die gleichen Werte, die man bei Berechnungen aufgrund struktureller Überlegungen erhielt.

MEHMEL (1935) zeigte auf, daß es auch innerhalb der Halloysitgruppe strukturelle Unterschiede gibt. Er differenzierte zwischen Halloysit und seinem Abbauprodukt Metahalloysit, der zwar im Chemismus dem Kaolinit gleicht, in der Struktur aber von diesem durch eine andere Symmetrie unterschieden werden kann.

Als ALEXANDER et al. 1943 eine Arbeit über die Beziehungen zwischen den Tonmineralen Halloysit und Endellit veröffentlichten, verursachten sie damit eine solche Verwirrung in der Halloysitnomenklatur, daß schließlich einzelne Publikationen sich nur mit der Namensgebung innerhalb dieser Mineralgruppe beschäftigten.

So wies McEWAN 1946 darauf hin, daß sechs Bezeichnungen (Halloysit-Metalloysit, hydratisierter Halloysit-Halloysit, Endellit-Halloysit) verwendet werden, um zwei Glieder aus einer Serie zu benennen, innerhalb der es eben in bezug auf den Wassergehalt verschiedene Variationsmöglich-



keiten gibt. Er schlug vor, wieder auf den Namen zurückzugreifen, nämlich Halloysit, den als erster BERTHIER 1826 verwendete, als er ein Mineral analysierte, das Omalius d'HALLOY in Angleur, Liege, Belgien, gefunden hatte. Für spezielle Formen führte MCEWAN in Anlehnung an die Nomenklatur der Montmorillonitgruppe Bezeichnungen ein wie „Hydratisierter Halloysit“, „Glycerol-Halloysit“, etc.

Im Gegensatz dazu werden in der vorliegenden Arbeit die Bezeichnungen 10 Å-Halloysit bzw. 7 Å-Halloysit verwendet, weil damit exakt ausgedrückt werden kann, was bei der Bestimmung dieser Minerale mittels Röntgendiffraktometrie wirklich gefunden wird, ohne daß die Benennung mit genetischen Deutungen vorbelastet ist. Außerdem hat sich bei der Untersuchung der verschiedenen Verwitterungsprofile wieder bestätigt, daß auch beide Minerale natürlich vorkommen können.

BRINDLEY and ROBINSON (1948) beschäftigten sich ebenfalls mit den strukturellen Unterschieden zwischen Halloysit und Metahalloysit sowie mit den Einflüssen von Feuchtigkeit, Temperatur und Druck bei der Umwandlung von Halloysit in die dehydrierte Form.

Dabei stellte sich heraus, daß, wenn das natürliche Probenmaterial in eine Atmosphäre mit abnehmender Feuchtigkeit gebracht wird, nicht nur der Halloysit in Metahalloysit umgewandelt wird, sondern auch beide eine zunehmende Schrumpfung zeigen, die in den Basalreflexen bei der Röntgendiffraktometrie zum Ausdruck kommt. Bei den Untersuchungen bezüglich des Temperatureinflusses fanden BRINDLEY and ROBINSON keine Anzeichen dafür, daß bei Temperaturzunahme aus Halloysit Kaolinit entstünde. Dagegen konnte eine teilweise Umwandlung von Halloysit in Metahalloysit bei Druckerhöhung (bis auf maximal 27.000 kg/cm<sup>2</sup>) beobachtet werden, so daß möglicherweise unter geologischen Bedingungen der Druck allein für eine solche Umwandlung ausreicht.

Hinsichtlich der Form der Halloysitkristalle konnten erst die elektronenmikroskopischen Untersuchungen (seit 1941) genaue Angaben bringen, und dabei zeigte sich, daß der Halloysit überhaupt keine Übereinstimmung mit dem ihm chemisch so nahe verwandten Kaolinit hat. SHAW and HUMBERT beschrieben bereits 1941 die typische stäbchenförmige Gestalt. Detaillierte Untersuchungen (BATES et al. 1950) zeigten, daß es sich dabei um hohle Röhrchen handelt, die sehr oft in der Längsachse aufgesplittert sind. Die Wände der Röhrchen bestehen aus gekrümmten (001) Schichten. Bei der Dehydration zum Metahalloysit soll es zum Aufrollen dieser Röhrchen kommen.

### Frühere Untersuchungen zur Morphologie und Genese

Die ersten Arbeiten mit elektronenmikroskopischen Abbildungen von neugebildeten Tonmineralen aus verwitterten vulkanischen Gesteinen stammen aus Japan. AOMINE und YOSHINAGA (1955) beschrieben sehr dünne,

haarförmige Teilchen einerseits und kleine kugelige Formen andererseits, von denen sie vermuteten, daß es sich um Allophan handelt. SUDO und TAKAHASHI (1956) und SUDO (1959) untersuchten diese Formen im Detail und kamen zur Ansicht, daß es sich bei den kugelförmigen Teilchen um einen morphologischen Übergang im Kristallisationsprozeß des Allophans zum hydrierten Halloysit handelt.

Ein Weg, der ebenfalls schon frühzeitig bei Untersuchungen bezüglich der Neu- oder Umbildung von Mineralen besprochen wurde, ist die künstliche Verwitterung.

Eine etwas modifizierte Methode wandte TURKEVICH (1959) an, indem er elektronenmikroskopisch Sole von Silizium und Aluminium untersuchte. Für die Halloysit-Genese von Bedeutung ist dabei die Tatsache, daß frische Al- oder Si-Sole kugelförmige Teilchen zeigten, gealterte dagegen Stäbchen. TURKEVICH konnte mehrere Stufen der Entwicklung aus einem Al-Oxyd-Monohydrat unterscheiden. Als erstes Produkt fand er kleine Körnchen von Al-Hydroxyd. Diese Körnchen treten zusammen und bilden flexible Ketten, die in der Längsachse weiterwachsen. Schon in diesem Zusammenhang darf auf die Abb. 15—19 verwiesen werden, die in einem folgenden Abschnitt noch genau besprochen werden.

AOMINE und WADA beschrieben 1962 die Bildung von hydriertem Halloysit aus verwitterten vulkanischen Aschen und Bimsstein. Auch sie brachten elektronenmikroskopische Abbildungen von dünnen haarähnlichen Formen und von kugeligen Teilchen, die sie beide als Allophan bezeichneten. Sie vermuteten, daß sich die Bildung von hydriertem Halloysit in 5 Schritten vollziehe: 1. Teilweise Hydratation von vulkanischem Glas oder Feldspat, wobei es zur Umwandlung der O-Bindung zur OH-Bindung kommt; gleichzeitig werden Si und einige Metall-Kationen gelöst. 2. Wiederherstellung der Ordnung aus dem verbliebenen Al und Si zusammen mit den O- und OH-Ionen und H<sub>2</sub>O in situ; dabei bilden sich getrennte Formen oder Pseudomorphosen nach den ursprünglichen Mineralen; die Zusammensetzung des resultierenden Si-Al-Systems ist von den jeweils herrschenden chemischen Bedingungen abhängig. 3. Bildung einer Gibbsit-Struktur mit adsorbierten SiO<sub>4</sub>-Tetraedern. 4. Ersatz der OH-Gruppen durch O infolge Hinzutreten weiterer SiO<sub>4</sub>-Tetraeder oder durch Kondensation, wobei es zur Dehydroxylation kommt. 5. Wiederherstellung der Ordnung der SiO<sub>4</sub>-Tetraeder.

YOSHINAGA et al. brachten 1968 in einer Arbeit über Bodenallophan mit geordneter Struktur elektronenmikroskopische Abbildungen von länglichen, fadenförmigen Formen (vgl. Abb. 9—14) und bezeichnete sie, beziehend auf die Arbeit von YOSHINAGA und AOMINE 1962 als Imogolit. Allerdings wiesen sie selbst darauf hin, daß dieser Name als Bezeichnung für eine eigene Mineralart schon abgelehnt wurde (FLEISCHER 1963). Die länglichen Fäden bildeten sich an der Oberfläche eines getrockneten Gelhäutchens, das aus einer Bimsstein-Probe stammt.

Sehr ähnliche Formen zeigen die Abbildungen von PARHAM (1969a), der die künstliche Verwitterung verschiedener Feldspäte und die dabei entstehenden Neubildungen beschrieb. Ein Vergleich mit natürlich verwitterten Feldspäten aus Hongkong (heiße humide Sommer, etwas kühlere trockene Winter, durchschnittlicher Jahresniederschlag 210 cm) ergab gute Übereinstimmung. Dabei fanden sich als erste Ansatzpunkte für Mineralneubildungen kleine Höcker auf Kanten und Spaltflächen. Diese wachsen bei zunehmender Verwitterung weiter und vereinigen sich schließlich zu dünnen flammenförmigen Blättchen, die an der Basis zusammengewachsen sind. Schließlich können sich diese Blättchen auch zusammenrollen und bilden dann steil zur Feldspatoberfläche stehende Röhrchen, von denen PARHAM vermutet, daß es sich um Halloysit handelt, während die Höcker und flammenförmigen Blättchen noch Allophan sein sollen (PARHAM 1969b).

TRICHET (1969) untersuchte die Neubildungen, die durch künstliche Verwitterung verschiedener vulkanischer Gläser entstanden sind. Dabei fand er im noch unverwitterten Glas kugelige Formen, von denen er annimmt, daß es sich um Vorläufer von Allophan handelt. Dagegen zeigten verwitterte Gläser mit der Zusammensetzung des Albits gut entwickelte Halloysit-Röhrchen.

Auf die genetischen Unterschiede zwischen kugeligem und röhrenförmigem Halloysit gehen MINATO und UTADA (1969) ein. Sie vertreten die Ansicht, daß der runde Halloysit-Typ unter niedrigeren Druck- und Temperatur-Bedingungen entstanden sein dürfte als der längliche. Morphologische Unterschiede zwischen verschiedenen Halloysit-Typen beschrieben DIAMOND und BLOOR 1970. Sie untersuchten Proben aus einer Halloysit-Lagerstätte in Bedford, Indiana, und fanden dabei kugelige Büschel, die aus zahlreichen stab- und röhrenförmigen Halloysiten aufgebaut sind. Diese gehen radial von einem gemeinsamen Zentrum aus, haben einen Durchmesser von ca. 3000 Å und sind einige  $\mu$  lang. Im Gegensatz dazu zeigten getrocknete Proben auch andere Formen. Neben Büscheln mit unveränderten Halloysit-Röhrchen finden sich hier auch solche, die offenbar aus dünnen Blättchen bestehen. DIAMOND und BLOOR nehmen an, daß diese Blättchen verschiedene Stadien des Entrollens der früheren röhrenförmigen Teilchen darstellen (vergleiche Abb. 5—8). Die Büschel selbst sollen direkt durch Kristallisation aus der Lösung entstanden sein.

Auf die Genese der kugelförmigen Halloysite gehen ASKENASY et al. (1973) in einer Arbeit über Böden in Guatemala ein. Die abgebildeten Formen bestehen aus ungefähr konzentrischen Lagen mit einigen Hohlräumen zwischen den Schichten. Elektronenmikroskopische Abbildungen, die genau die gleiche Internstruktur zeigen, finden sich auch bei MINATO und UTADA (1969), SIEFFERMANN und MILLOT (1967) und CALDAS und SCHWAIGHOFER (1974). Nach ASKENASY et al. bestehen diese kugeligen Formen abwechselnd aus kristallinen (Halloysit) und amorphen (Allophan) Komponenten. Dabei könnte die äußere kristalline Schicht die innere amorphe vor einer raschen Umwandlung schützen. Auf diese Art könnte es dazu kommen, daß

Allophan auch noch in Böden auftritt, in denen sonst Minerale einer bereits fortgeschrittenen Verwitterungsstufe vorherrschen. Hinsichtlich der Genese vermuten ASKENASY et al., daß die kugelförmigen Halloysite am ehesten in Bläschen und Hohlräumen von vulkanischen Gläsern entstanden sind, wobei die kugelige Form entsprechend dem einengenden Druck aus dem Glas zustande gekommen sein soll.

### Untersuchungsmethode

Für die elektronenoptischen Untersuchungen stand das Cambridge „Stereoscan“ S 4 Rasterelektronenmikroskop\* zur Verfügung. Die für die Aufnahmen verwendete Beschleunigungsspannung betrug 20 bzw. 30 KV. Wichtigstes Ziel dieser Untersuchungen war es, die Beobachtungen an völlig unveränderten Naturobjekten durchzuführen. Dazu wurden die in Plastiksäckchen verschlossenen Proben in kleine Teilchen von ca. 4 mm Durchmesser zerbrochen und mit Leitsilber auf die Probenteller aufgeklebt. Dabei wurde darauf geachtet, daß die natürlichen Bruchflächen möglichst parallel oder unter  $45^\circ$  zum Probenteller standen. Die Bedampfung erfolgte mittels einer Mikro BA-3 von BALZERS, wobei Kohle und Gold unter ständigem Drehen und unter verschiedenen Kippwinkeln aufgedampft wurden.

Wo es möglich war, wurden qualitative chemische Analysen mittels des EDAX 707 (Energy Dispersive Analyzer of X-rays), einem energiedispersiven Röntgenspektrometer durchgeführt. Die Datenauswertung erfolgte nach dem System EDIT (EDAX-Data Improvement Technique). Beim EDAX-System werden elementspezifische Röntgenstrahlen von einem Silizium-Detektor aufgefangen und in elektrische Impulse umgesetzt. Die in der Probe enthaltenen Elemente werden durch einen Analysator auf einem Bildschirm elektronisch zur Darstellung gebracht.

Da die Untersuchung an unveränderten Proben durchgeführt wurde, befanden sich die einzelnen Minerale in ihrem natürlichen Verband. Dadurch war es auch unmöglich, die Minerale unter einem definierten Kippwinkel dem Elektronenstrahl auszusetzen. Aus diesem Grund konnten zwar qualitativ die vorhandenen Elemente bestimmt werden, über ihre mengenmäßige Verteilung in den einzelnen Mineralen konnten aber keine Aussagen getroffen werden.

### Ergebnis und Interpretation

1/h.

Die in den Abbildungen 2 bis 8 dargestellten Formen zeigen eine so vollkommene Übereinstimmung mit dem Halloysit und Metahalloysit von Bedford, Indiana (DIAMOND und BLOOR, 1970), daß angenommen werden

\*) Die Aufnahmen am Rasterelektronenmikroskop wurden von Herrn WOLFGANG WABRA, Institut für Bodenforschung und Baugeologie, Hochschule für Bodenkultur in Wien, in dankenswerter Weise durchgeführt und vom Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung in Österreich finanziell unterstützt.

kann, daß es sich um idente Minerale handelt. Auch bezüglich der Größenordnung (Durchmesser der Halloysit-Aggregate etwa  $10\ \mu$ ) ergeben sich die gleichen Werte. Wie aus der Röntgendiffraktometer-Untersuchung hervorgeht (siehe Tabelle I), besteht die Probe 1/h — soweit es die Mineralneubildungen betrifft — aus 7 Å- und 10 Å-Halloysit. Besonders aus Abbildung 7 geht deutlich hervor, daß die polsterartigen Noppen überwiegend aus gebogenen und geknickten Formen und nur untergeordnet aus geradegestreckten Stäbchen oder Röhren bestehen. Im Anschluß an die Abbildungen von DIAMOND und BLOOR, die nasse und ofengetrocknete Proben untersuchten, ergibt sich daraus, daß es sich bei den verbogenen Kristallen um den 7 Å-Halloysit (die entwässerte Form) und bei den geraden Röhren um den 10 Å-Halloysit handeln muß. Ob es sich allerdings bei den getrockneten Proben tatsächlich um Blättchen in verschiedenen Stadien des Entrollens handelt, muß nach den Abbildungen 7 und 8 in Frage gestellt werden. Eher scheint die Annahme berechtigt, daß hier waben- oder zellenartige Formen vorliegen. Besonders aus Abbildung 7 gewinnt man den Eindruck, als ob die geraden Stäbchen oder Röhren erst als Fortsätze aus den Wänden der Waben oder Zellen herauswüchsen. Gestützt wird diese Ansicht durch die Abbildungen von PARHAM (1969a), auf denen ebenfalls gezeigt wird, daß im Zuge der Verwitterung (von Kalifeldspäten) Halloysitröhren aus unregelmäßigen, flammenförmigen Blättchen aufwachsen.

1/m.

Wie die Abbildungen 9 bis 19 zeigen, liegen in dieser Probe zwei stark voneinander verschiedene Formen von Neubildungen vor: einerseits dünne, in regelmäßigen Abständen abgeschnürte und verästelte Stengel, andererseits verzweigte Kugelketten. Formen dieser Art sind bisher in der Literatur weder beschrieben noch abgebildet worden. Für die Einzelteile sowohl der wurzelähnlichen Stengel als auch der Kugelketten lassen sich dagegen leicht Literaturhinweise finden — es handelt sich um die beiden bekannten Formen von Halloysit: Röhrchen und Kugeln.

Für die Entstehung der kugeligen Halloysite finden sich Hinweise bei TURKEVICH (1959), der in frischen Al- und Si-Solen kugelförmige Teilchen nachweisen konnte, die rasch zu flexiblen Ketten zusammengetreten sind. Eine nach dem EDAX-Verfahren durchgeführte Analyse ergab auch in unseren Kugeln eine Si-Al-Vormacht, doch traten daneben auch Fe, Ti und K auf. Allerdings lassen sich diese Elemente leicht dadurch erklären, daß sie aus den im Boden zirkulierenden Verwitterungslösungen als  $\pm$  dünne Krusten um die kugelförmigen Partikel ausgeschieden wurden.

In gealterten Al-Kolloidsystemen dagegen fand TURKEVICH (1959) stäbchenförmige Teilchen. Auch bei YOSHINAGA et al. (1968) finden sich Abbildungen, die ähnliche Formen zeigen wie unsere Bilder 9 bis 14. Dabei soll es sich um Übergangsformen von Allophan zu Halloysit handeln. Tatsächlich zeigt ja z. B. die Abbildung 12, daß sich stengelige Formen direkt

aus einer stark reliefierten Kruste entwickeln. Für Krusten dieser Art wird immer wieder die Bezeichnung Allophan verwendet. Bei zahlreichen diesbezüglichen Untersuchungen hat sich jedoch herausgestellt, daß die verschiedenen „Allophane“ ein so weites  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ -Verhältnis aufweisen, daß ich mich lieber der Meinung von DIXON (mündliche Mitteilung) anschließen möchte und hier keine eigene Bezeichnung („Allophan“) verwenden, sondern nur von einem Übergangsstadium aus dem amorphen Zustand in den kristallinen (Halloysit) sprechen möchte. Kennzeichnend für die Stengel auf Abbildung 12 ist auch, daß sie noch nicht die charakteristischen Einschnürungen zeigen, offenbar also auch aus diesem Grund ein Frühstadium darstellen. Besonders auf den Abbildungen 11 und 13 sind dagegen deutlich die in regelmäßigen Abständen auftretenden Einschnürungen zu erkennen. Hier zeichnen sich Schwächestellen der Stengel ab und es ist zu vermuten, daß auch schon geringfügige Deformationen genügen, damit die Stengel an diesen vorgezeichneten Stellen zerbrechen. Darin dürfte auch die Ursache liegen, daß in sämtlichen Arbeiten, in denen Halloysite mittels des Durchstrahl-Elektronenmikroskops abgebildet wurden, immer nur  $\pm$  kurze Röhrchen zu sehen waren. Bei der Präparation der Proben für Untersuchungen am Durchstrahl-Elektronenmikroskop müssen die dünnstengeligen Formen natürlich zu Bruche gehen.

### 2/h.

Die Abbildungen 20, 21 und 22 sind nur im Zusammenhang mit der Bildfolge 9 bis 14 zu erklären. Über einem Sanidinkristall ist als erste Verwitterungsbildung eine unterschiedlich dicke und zum Teil bereits wieder abgeplatzte Kruste entstanden. Aus der mit zahlreichen Noppen (Ansatzpunkte für weitere Halloysitröhren?) versehenen Oberfläche entwickeln sich einzelne dünne, stark verbogene Stengel. Der Einblick in eine Bruchstelle dieser Stengel (Abb. 21) legt die Vermutung nahe, daß es sich um Hohlformen handelt. Auch die beginnende Einschnürung an einzelnen Stellen deutet darauf hin, daß hier ein Anfangsstadium der in den Abbildungen 9 bis 14 dargestellten, schon weiter ausgebildeten Formen vorliegt. Eine EDAX-Analyse ergab Al und Si.

### 3/e.

Aus der Krustenoberfläche ist ein einzelnes Halloysitröhrchen aufgewachsen. Eindeutig handelt es sich um eine kreisrunde Form, was in Widerspruch steht zu den Angaben von CHUKROV und ZVYAGIN (1966), bzw. DIAMOND und BLOOR (1970), die polygonale Querschnitte beschrieben.

### 3/g.

Auch hier ist aus einer mit zahlreichen Noppen versehenen Kruste ein einzelner Halloysitstengel mit steilem Winkel aufgewachsen. Der Halloysit selbst scheint bereits wieder verkrustet zu sein und zeigt auch hier

wieder Ansätze zu den regelmäßigen Einschnürungen. Daneben finden sich noch wesentlich kleinere Formen, so daß anzunehmen ist, daß die Entstehungsbedingungen für die Halloysite aus der Kruste auch auf engstem Gebiet sehr rasch wechseln können.

### Literatur

- ALEXANDER, L. T., FAUST, G. T., HENDRICKS, S. B., INSLEY, H., and MC MURDIE, H. F., 1943: Relationship of the clay minerals halloysite and endelite. — *Amer. Mineral.* 28, 1—18.
- AOMINE, S., and WADA, K., 1962: Differential weathering of volcanic ash and pumice, resulting in formation of hydrated halloysite. — *Amer. Mineral.* 47, 1024—1048.
- AOMINE, S., and YOSHINAGA, N., 1955: Clay minerals of some well drained volcanic ash soils in Japan. — *Soil Sci* 79, 349—358.
- ASKENASY, P. E., DIXON, J. B., and MCKEE, T. R., 1973: Spheroidal halloysite in a Guatemalan Soil. — *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 37, 799—803.
- BATES, T. F., HILDEBRAND, F. A., and SWINEFORD, A., 1950: Morphology and structure of endellite and halloysite. — *Amer. Mineral.* 35, 463—484.
- BERTHIER, P., 1826: Analyse de l'halloysite. *Ann. Chim. Phys.*, 32, 332—335.
- BRINDLEY, G. W., and ROBINSON, K., 1948: X-ray studies of halloysite and metahalloysite. *Mineral. Mag.* 28, 393—428.
- CALDAS, E. F., und SCHWAIGHOFER, B., 1974: Mineralumwandlung im Zuge der Genese der Kanarischen Andosole (Tenerife). *Sitz. Ber. Österr. Akad. d. Wiss., Math.-nat. Kl.*
- CHUKHROV, F. V., and ZVYAGIN, B. B., 1966: Hallosyte, a crystallochemically and mineralogically distinct species. *Proc. Intern. Clay Conf.* 1966, Jerusalem, Vol. 1, 11—25.
- DIAMOND, S., and BLOOR, G. W., 1970: Globular cluster microstructure of endelite (hydrated halloysite) from Bedford, Indiana. *Clays and Clay Minerals* 18, 309—312.
- FLEISCHER, M., 1963: New mineral names. *Amer. Mineral.* 48, 434.
- HOFMANN, U., ENDELL, K., und WILM, D., 1934: Über die Struktur von Halloysit und Metahalloysit. *Z. Kristallogr.* 90, 35—43.
- MC EWAN, D. M. C., 1947: Nomenclature of the halloysite minerals. *Miner. Mag.* 28, 36—44.
- MEHMEL, M.: 1935: Über die Struktur von Halloysit und Metahalloysit. *Z. Kristallogr.* 90, 35—43.
- MELLOR, J. W., 1908: A note on the nomenclature of clays. *Trans. Eng. Cer. Soc.* 8, 23—30.
- MINATO, H., and UTADA, M., 1969: Mode of occurrence and mineralogy of halloysite from Iki, Japan. *Proc. Intern. Clay Conf.* 1969, Tokyo, Vol. 1, 393—416.
- PARHAM, W. E., 1969a: Formation of halloysite from feldspar: low temperature, artificial weathering versus natural weathering. *Clays and Clay Minerals* 17, 13—22.
- PARHAM, W. E., 1969b: Halloysite-rich tropical weathering products of Hongkong. *Proc. Intern. Clay Conf.* 1969, Tokyo, Vol. 1, 403—416.
- PAULING, L., 1930: Structure of micas and related minerals. *Proc. nat. Acad. Sci. Wash.* 16, 123—129.
- SHAW, B. T., and HUMBERT, R. P., 1941: Electron micrographs of clay minerals. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 6, 146—149.
- SIEFFERMANN, G., and MILLOT, G., 1969: Equatorial and tropical weathering of recent basalts from Cameroon: allophanes, halloysite, metahalloysite, kaolinite and gibbsite. *Proc. Intern. Clay Conf.* 1969, Tokyo, Vol. 1, 417—430.
- SUDO, T., 1959: Mineralogical study on clays of Japan. Maruzen, Tokyo.
- SUDO, T., and TAKAHASHI, H., 1956: Shapes of halloysitic particles in Japanese clays. *Proc. Fourth Natl. Conf. Clays and Clay Minerals, NAS-NRC* 456, 67—79.
- TRICHET, J., 1969: Study of the structure of volcanic glass and its relation to the alteration of vitreous rocks.

TURKEVICH, J., 1959: The world of fine particles. *Amer. Scientist* 47, 1, 97—119.

WEAVER, C. E., and POLLARD, L. D., 1973: The chemistry of clay minerals. Elsevier Scientific Publishing Company; Amsterdam, London, New York.

YOSHINAGA, N., YATSUMOTO, H., and IBE, K., 1968: An electron microscopic study of soil allophane with an ordered structure. *Amer. Mineral.* 53, 319—323.

Bei der Schriftleitung eingelangt am 17. Jänner 1974.



**Beobachtungen am Rasterelektronenmikroskop**

Probe 1/h.

Die Abbildungen 2 bis 8 zeigen eine kontinuierliche Vergrößerungsreihe einer charakteristischen Stelle der Probe.

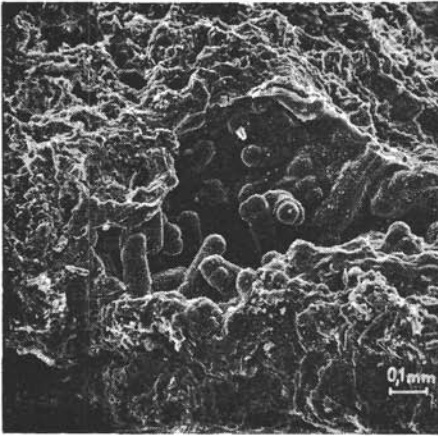


Abb. 2

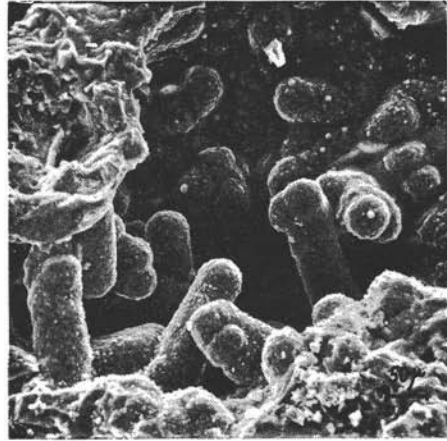


Abb. 3

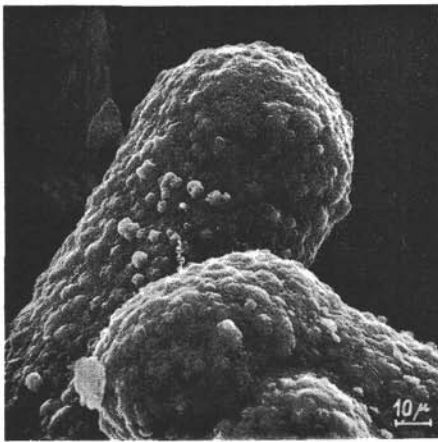


Abb. 4

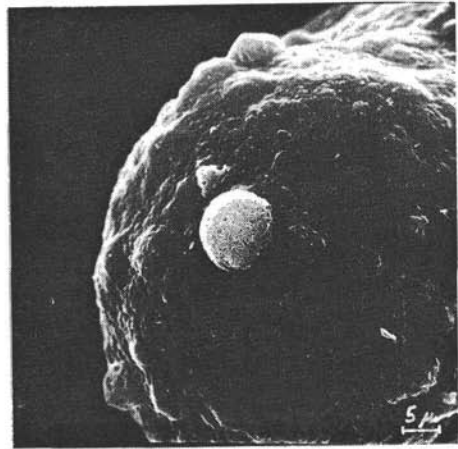


Abb. 5

Abb. 2: Elektronenmikroskopische Vergrößerung 100; in einem aufgebrochenen Hohlraum sind zahlreiche dickstengelige, fingerförmige Fortsätze zu erkennen.

Abb. 3: E. V. 200; die stengeligen Neubildungen sind offenbar stark verkrustet, so daß das Mineral selbst nicht bestimmbar ist. Länge der einzelnen Stengel 0,2 mm.

Abb. 4: E. V. 1000; die Kruste der Neubildungen ist nicht homogen; sie ist stark genoppt, wobei sich einzelne Aufwölbungen besonders deutlich von der unregelmäßig geformten Krustenfläche abheben.

Abb. 5: E. V. 2100; Detail aus der verkrusteten Oberfläche, die polsterförmigen Erhebungen zeigen eine wirre Internstruktur.

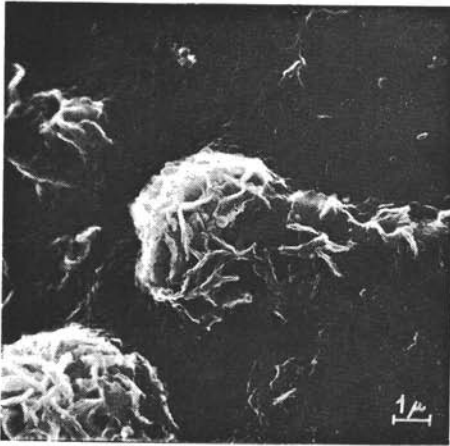


Abb. 6

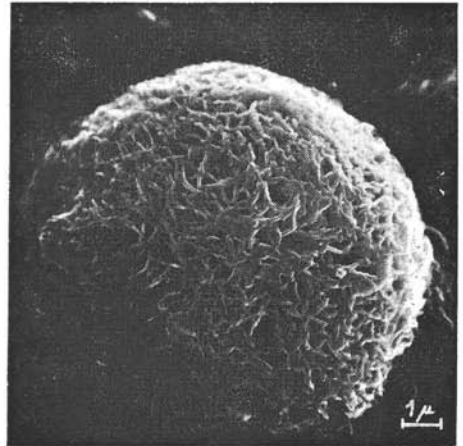


Abb. 7

Probe 1/m:

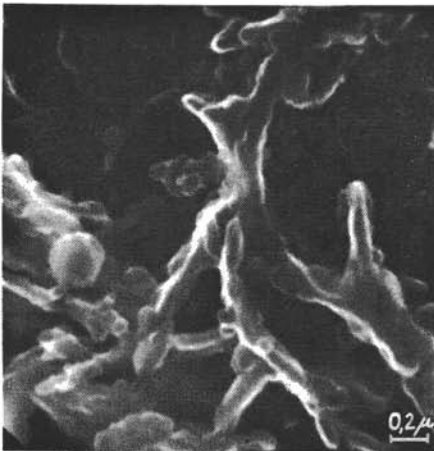


Abb. 8

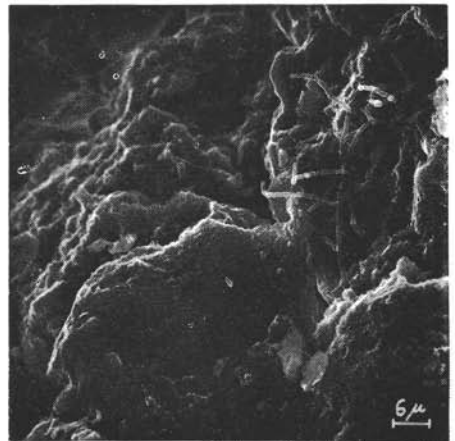


Abb. 9

Abb. 6: E. V. 10.500; die Aufwölbungen haben hier einen Durchmesser von etwa  $4\ \mu$ ; sie bestehen offenbar aus einer Menge von unregelmäßig geformten, meist stark verbogenen oder geknickten Leisten oder Blättchen.

Abb. 7: E. V. 10.550; die einzelnen Polster können auch größere Durchmesser erreichen — hier etwa  $10\ \mu$ . Im Detail erkennt man hier neben den geknickten Formen auch gestreckte Stäbchen oder Röhren.

Abb. 8: E. V. 52.500; die Hochauflösungsaufnahme zeigt deutlich die intensive Verbiegung bis Knickung der einzelnen blättchenartigen Formen.

Abb. 9: E. V. 1600; über verkrusteten Bodenaggregaten finden sich dünnstengelige wurzelartige Geflechte.

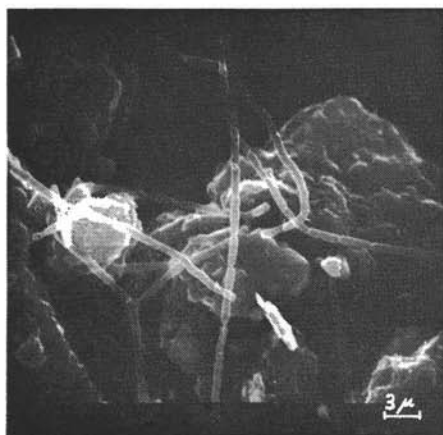


Abb. 10

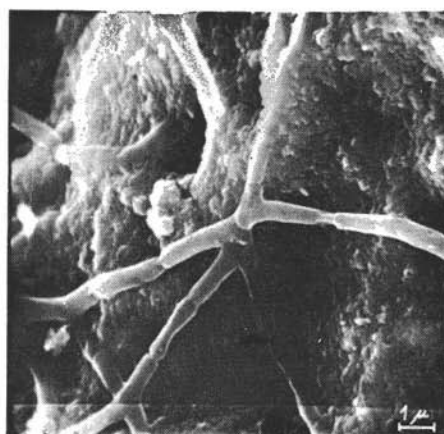


Abb. 11

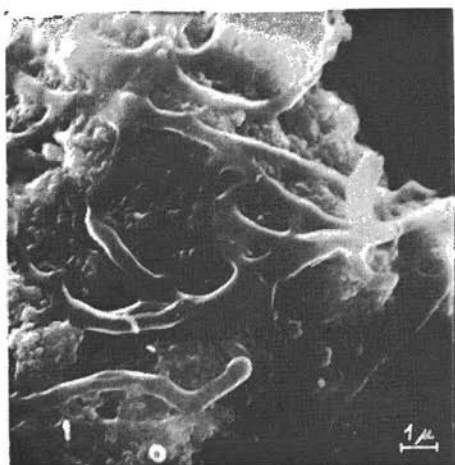


Abb. 12

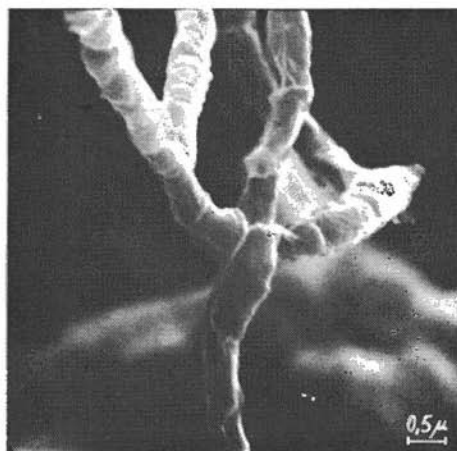


Abb. 13

Abb. 10: E. V. 3500; die Stengel zeigen in regelmäßigen Abständen auffallende Einschnürungen.

Abb. 11: E. V. 9600; von einer Zentralstelle breiten sich die immer wieder eingeschnürten Stengel über die stark reliefierte Kruste aus.

Abb. 12: E. V. 9200; direkt aus der unregelmäßig geformten Kruste wachsen stengelige, stark verzastelte Formen.

Abb. 13: E. V. 18.200; deutlich sind an der verzweigten Form die Einschnürungen zu erkennen; zwischen den wurstähnlich abgepreßten Teilen finden sich dünnstengelige Verbindungsstücke.

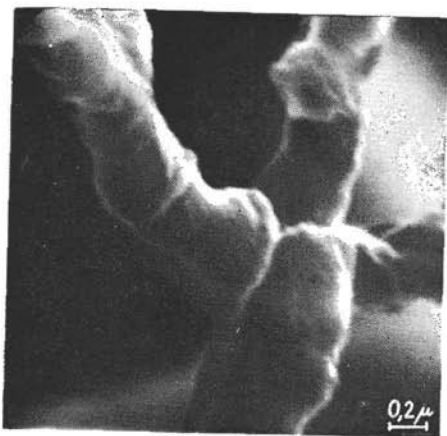


Abb. 14



Abb. 15

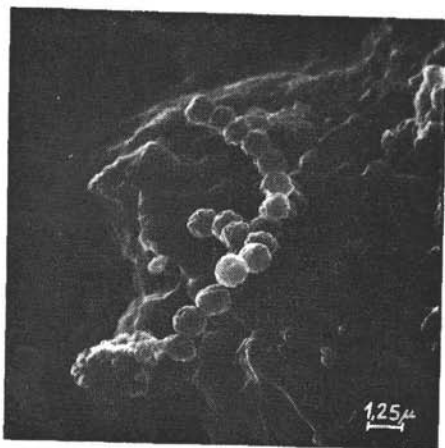


Abb. 16

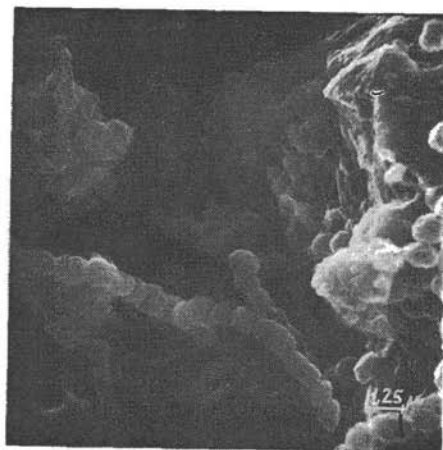


Abb. 17

Abb. 14: E. V. 46.000; die Hocharlösaufnahme zeigt im Detail das Zentrum der auseinanderwachsenden Stengel, wobei der Eindruck einer gelenkartigen Verbindung entsteht; die Länge der einzelnen abgeschnürten Teile beträgt  $1,5 \mu$ .

Abb. 15: E. V. 4000; über verkrusteten Bodenaggregaten liegen haufenweise kugelförmige Partikel, die offenbar zu kettenartigen Formen zusammengewachsen sind.

Abb. 16: E. V. 8000; einzelne Kugelkette über der stark reliefierten Kruste; auch bei den Ketten kommt es zu Verästelungen.

Abb. 17: E. V. 8000; neben den Kugelketten finden sich hier auch die stengeligen Formen mit den Einschnürungen (links unten und Bildmitte).

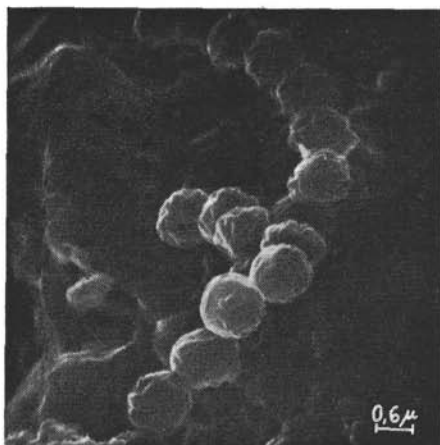


Abb. 18  
Probe 1/h:

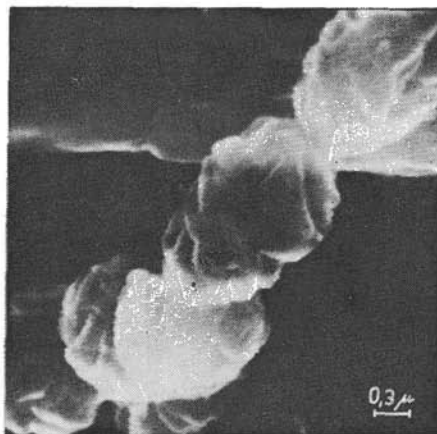


Abb. 19

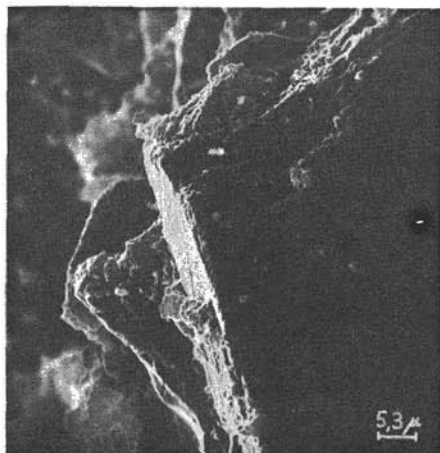


Abb. 20

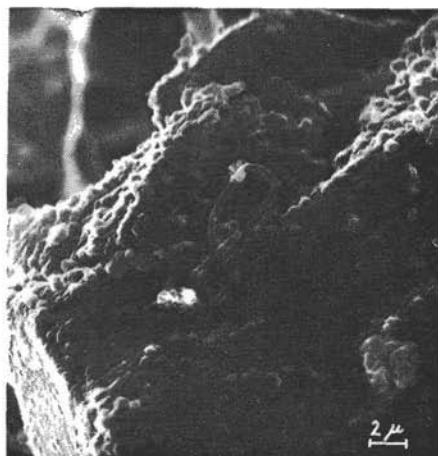


Abb. 21

Abb. 18: E. V. 16.000; Detail aus einer verästelten Kugelkette; der Durchmesser der einzelnen Kugeln beträgt etwa  $1\ \mu$ .

Abb. 19: E. V. 40.000; bedingt durch die hohe Auflösung sind hier die kugeligen Formen etwas verzerrt; trotzdem ist zu erkennen, daß die einzelnen Partikel keine glatte Oberfläche besitzen, sondern ein starkes Relief aufweisen, das offenbar von unregelmäßigen Rissen und Aufblätterungen hervorgerufen wird; hinter der Kugelkette wieder eine der abgeschnürten stengeligen Formen.

Abb. 20: E. V. 1900; Sanidinkristall mit stellenweise intensiver Verwitterungskruste.

Abb. 21: E. V. 4750; die Verwitterungskruste ist sehr inhomogen und zeigt kugelige und noppenartige Formen, z. T. dürfte sie vom Kristall abgeplatzt sein; direkt aus der Kruste wachsen einzelne stark verbogene Stengel.

Probe 3/e:



Abb. 22

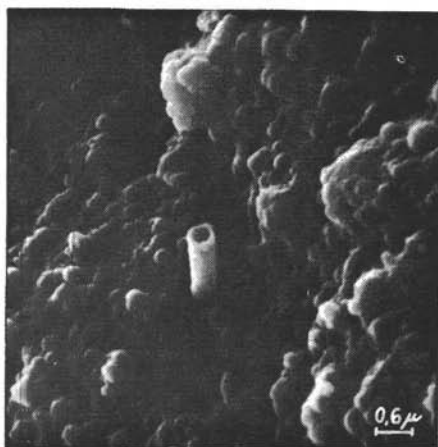


Abb. 23

Probe 3/g:

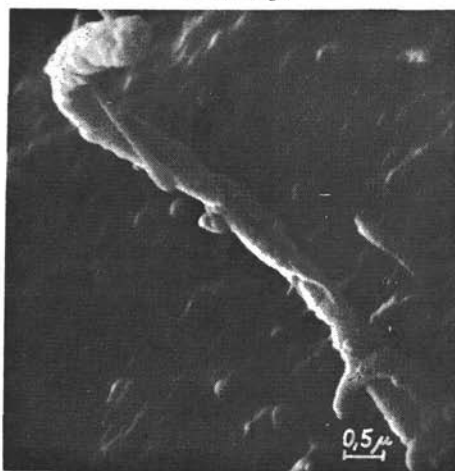


Abb. 24

Abb. 22: E. V. 19.000; die Stengel entwickeln sich mit dünnen Ansätzen aus der Kruste heraus, sind schlingenförmig verbogen und z. T. scharf geknickt; an einigen Stellen macht sich eine beginnende Einschnürung bemerkbar.

Abb. 23: E. V. 17.000; aus einer stark genoppten Kruste ist mit steilem Winkel ein hohles Röhrrchen aufgewachsen, die Länge ist infolge der Verzerrung nicht zu bestimmen, aber der Durchmesser beträgt etwa  $0,3 \mu$ , deutlich ist zu erkennen, daß es sich um eine kreisrunde Hohlform handelt.

Abb. 24: E. V. 20.000;  $\pm$  senkrecht zur Krustenfläche hat sich eine hakenförmig gebogene, dünnstengelige Form entwickelt, deren Durchmesser etwa  $0,5 \mu$  beträgt; daneben treten auch einzelne wesentlich kleinere Stengel auf.