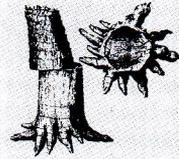


Zur Frage der Rhyolithkugelbildung

Frieder Jentsch, Chemnitz



Kurzfassung

Auf der Grundlage von mineralogischen und petrographischen Untersuchungen wird ein Modell der Rhyolithkugelbildung einschließlich deren Mineralisation vorgestellt. Es wird die Bildung eines fluidreichen Erdalkali-Alkali-Silikat-Mobilisats als gegeben angenommen, das eine Füllung sowohl von Entgasungsräumen in Rhyolithkugeln als auch von Absonderungsspalten im sogenannten Quarzporphyr bewirkt. Als Hauptwirkfaktoren für die Entstehung dieses Mobilisats werden Umbildungsprozesse femischer Minerale sowie die Wirkung von Fluida und Stoffverschiebungen während der Kristallisation der Schmelze bzw. des vulkanischen Glases gesehen.

Abstract

On the basis of mineralogical and petrographical studies a model of the origin of rhyolitic balls with mineralizations is presented. The separation of the fluida-rich alcalineearth-alkali-silica-output is given, which causes the filling both in the outgas-spaces and in separationssplits in the so-called quartz-porphyr. Main factors for the formation of this melting are transformations of femic minerals, the action of fluida and differentiations of substances during the crystallization of the melting or of glasses.

1 Einleitung

Seit mehr als 150 Jahren ziehen die Rhyolithkugeln - auch Porphyrkugeln, Schneekopfkugeln, Lithophysen, steinerne Nüsse, wilde Eier u.a.m. genannt - wegen ihrer eigentümlichen petrogenetischen Stellung das Interesse der Geologen auf sich. Wenn auch dieses spezielle Gebiet geowissenschaftlicher Bearbeitung scheinbar isoliert im Gesamtkomplex mineralogischer, petrologischer und lagerstättenkundlicher Untersuchungen steht, birgt es in sich doch einige beachtenswerte Aspekte zur Einschätzung magmatogener Vorgänge einschließlich der daran geknüpften Mineralisationen.

Die Rhyolithkugeln treten in rhyolithischen und rhyodazitischen Vulkaniten auf. Sie sind äußerlich durch ihre fremdeinschlussartige Natur innerhalb der Vulkanitmasse gekennzeichnet. Die Größe der Kugeln schwankt in Vorkommen des sächsischen Raumes zwischen wenigen Zentimetern, beispielsweise die "versteinerten Nüsse" im Erzgebirgischen Becken, und mehreren Metern wie die "wilden Eier" von Meißen-Garsebach. Oft weisen sie einen vielgestaltigen, aber im Regelfall gesetzmäßig gebauten Kern auf, in dem sich kryptokristalline oder phanero-kristalline SiO_2 -Substanz, Ca-Mg-Fe-Karbonate, Eisenoxide und selten Fluorit, Zeolithe und Sulfide gebildet haben können.

Die vorliegenden Ergebnisse wurden an Material des Quarzporphyr-Pechstein-Körpers, einem ignimbritischen Rhyodazit im Rotliegenden des Erzgebirge-Beckens zwischen Chemnitz und Zwickau abgeleitet. Dieser Gesteinskomplex ist in der Vergangenheit mehrfach untersucht worden, nicht zuletzt wegen der in ihm nicht selten auftretenden Kugelbildungen. Ihr Erscheinungsbild gleicht einer Vielzahl von Vorkommen in allen Teilen der Welt. Die bisherigen Ergebnisse petrographischer Untersuchungen ergaben schon eine Bildung der Rhyolithkugeln während der Erstarrung der Schmelze und die Mineralisation ihrer Kerne wurde bereits ursächlich mit diesem Prozess in Zusammenhang gebracht.

Der Bericht stellt eine Fortschreibung des Kenntnisstandes von zurückliegenden Untersuchungen vor und bezieht moderne Ergebnisse von thüringischen Rhyolithkugelvorkommen ein. Insbesondere wird die Frage nach der stofflichen Herkunft der Mineralisationen versucht zu beantworten.

2 Geschichte und Problemstellung

Detaillierte Bearbeitungen der Rhyolithkugeln mit teils sehr unterschiedlichen Genesedeutungen liegen seit der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts vor. So wurden sie gesehen:

- als Reste bzw. Xenolithe eines älteren Porphyrs in jüngerem Pechstein (GUTBIER 1843; GEINITZ 1858; BREITHAUPT 1849),
- als Produkte der Entgasung der Schmelze mit nachfolgender Infiltration durch kieselensäurehaltige Lösungen (BREITHAUPT 1849; v. RICHTHOFEN 1860),
- als Ergebnis eines "Cementationsprozesses" der Pechsteinmasse (JENZSCH 1858),
- als Wirkung der sphärolithischen Kristallisation unter Abgabe mineralisierender Dämpfe (IDDINGS 1888; PLATT 1915) oder
- als Wirkung eines aus der Schmelze abgeschiedenen, "nässeren" und SiO_2 -reicheren Magmas, das zugleich auch die Mineralisation bewirkte (GRIP 1935) oder gar
- als vulkanische BOMBEN (STECHE 1935).

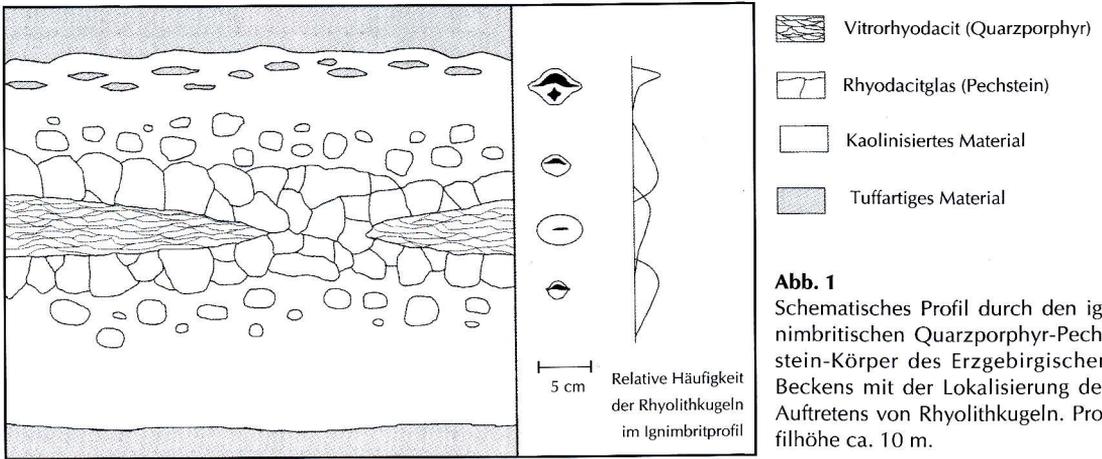
Die genetischen Diskussionen des letzten Vierteljahrhunderts waren mehrheitlich dadurch geprägt, ob die Rhyolithkugelbildung vordergründig einer Liqutation in der Schmelze zuzuschreiben ist oder ob Kristallisationsvorgängen, insbesondere der Sphärolithbildung bei der Erstarrung des Vulkanitkörpers mit gleichzeitiger Fluidafreisetzung der Vorrang gegeben werden kann. Besonders stand die Frage im Mittelpunkt, in welcher grundsätzlichen Beziehung die rhyolithische Kugelmasse zu dem mineralisierten Kern steht, der als gefüllter Entgasungshohlraum zu sehen ist. Das Problem war, eine Aussage darüber zu treffen, ob der meist kieselensäurereiche Kern die umgebende vulkanische Masse infiltrierte und damit deren Resistenz gegenüber der Verwitterung erhöhte oder das vulkanische Schmelzmaterial durch eigene Differentiation einen Entgasungshohlraum, der jetzt als Kern vorliegt, gefüllt hat.

Gegenwärtig hat man im wesentlichen Einigkeit darüber erzielt, dass die Bildung des Kerns ursächlich mit dem umgebenden vulkanischen Material in Verbindung gesehen werden kann, lediglich in Fragen der Wirkmechanismen sind noch einige Probleme zu klären. Belebt wurde die Diskussion durch geochemische Untersuchungen an Vulkanitquarzen von BLANKENBURG & BERGER (1981), BODEN et al. (1981), KLEMM & BLANKENBURG (1980) und THOMAS & BLANKENBURG (1981). Danach wurde die Bildung der Vulkanitachate, einschließlich der Achate und Quarze als Kern der Rhyolithkugeln, an GRIP (1935) anknüpfend, auf die Existenz von relativ H_2O -reichen SiO_2 -Schmelztropfen im Magma zurückgeführt (BLANKENBURG 1981). Hinweise auf eine hochthermale bzw. pneumatolytische Bildung der Achatsubstanz (THOMAS & BLANKENBURG 1981) stellten eine hydrothermale bzw. Füllung aus niedrigtemperierter wässriger Lösung in Frage. Dementsprechend rücken wieder mehr die Hypothesen der intramagmatischen Achatbildung (LEONHARD 1823; MOHS 1842; NACKEN 1948; SCHLOSSMACHER 1950) im speziellen Fall durch Kontamination (BREITHAUPT 1849; RAMDOHR 1921) in den Mittelpunkt der Diskussion.

Neuerdings hat HOLZHEY (1999) die Diskussion erneut aufgegriffen und anhand zahlreicher Beobachtungen und Untersuchungen eine detaillierte Genesebetrachtung vorgelegt, in der er die Bildung der SiO_2 -Mineralisation im wesentlichen durch niederthermale Umbildungen der Kalifeldspatsubstanz in nicht-ignimbritischen Rhyolithen unter Beteiligung meteorischer Wässer zurückführt.

3 Charakteristika der Petrogenese des Ignimbrits und dessen Mineralisationen

Der ignimbritische Rhyodacitkörper im Erzgebirge-Becken kann als ein Prototyp der Rhyolithkugelbildung angesehen werden. Er ist über eine Fläche von mehr als 200 km² bei einer durchschnittlichen Mächtigkeit von 10 bis 20 Metern nachgewiesen. Dach- und Bodenbereiche bestehen aus einem tuffartigen, schwach verfestigten und weitgehend zu Tonmineralen umgebildeten Material das im Inneren des Körpers von einem Rhyodacitglas (Pechstein) abgelöst wird. In den mittleren Bereichen des Ignimbritkörpers befinden sich linsenförmig eingeschalteter Vitrorhyodacit (Quarzporphyr), der sich gegenüber Pechstein durch eine weitgehend kristallisierte Grundmasse auszeichnet. Die Übergänge von glasiger und kristallisierter Grundmasse zwischen Pechstein und Quarzporphyr sind scharf; daraus resultiert die irrtümliche Annahme von zwei oder mehreren eigenständigen Vulkanitergüssen durch frühere Bearbeiter (u.a. SIEGERT 1897). Pechstein und Quarzporphyr unterscheiden sich trotz ihrer petrogenetischen Zusammengehörigkeit prägnant durch eine einerseits unregelmäßig polyedrische, fast klüftungsfreie, und andererseits durch eine scherbenartige klüftreiche Absonderung. Die Rhyolithkugeln sind an die oberen zwei Drittel im Gesamtprofil des Vulkanitkörpers gebunden. Sie treten also sowohl im Pechstein als auch im Quarzporphyr auf. Je nach der Position im Profil lassen sich unterschiedliche Formen und Größen (Abb. 1) feststellen (JENTSCH 1981).



Die Bildung von Rhyolithkugeln ist grundsätzlich an saure bis intermediäre Gesteinsschmelzen geknüpft, die einen rhyolithischen bis rhyodacitischen Chemismus aufweisen. Dabei neigen vorzugsweise diejenigen Schmelzen zur Kugelausbildung, die auf Grund ihrer physikochemischen Konstitution, insbesondere bei einer dem Eutektikum nahe liegenden Zusammensetzung (NASEDKIN 1975; VOLJANJUK 1988) zu glasigen oder feinkörnigen, „felsitischen“ Gesteinen i.S. von SAUER (1888) führen. Allgemein ist zu den Rhyolithkugeln zu vermerken, dass sie nicht an einen bestimmten Platznahmetyp vulkanischer Gesteine gebunden sind. Sie treten sowohl in Laven, in Ignimbriten als auch intrakrystalin in Gesteinsgängen auf. Unabhängig von der Platznahmetyp mussten die jeweiligen vulkanischen Schmelzen ein physikochemisch äquivalentes Stadium durchlaufen, in dem die Möglichkeit zur Bildung der Rhyolithkugeln gegeben war. Scharfkantige Hohlraumformen, die mehr an Rupturen als an Blasenbildungen erinnern, zeugen von einer hohen Viskosität des Schmelzmaterials, gewissermaßen einem quasifesten Zustand, auf den FRIEDMAN u.a. (1963) und NASEDKIN (1975) bereits hinwiesen. HOLZHEY (1999) ermittelte für die Zone des kugelführenden Quarzporphyrs des Älteren Oberhöfer Quarzporphyrs bei einer Solidus-Temperatur von $643 \pm 9^\circ\text{C}$ eine Viskosität von $\geq 10^{12} \text{ Pa} \cdot \text{s}$.

Mit dieser Konstitution eng im Zusammenhang steht die Möglichkeit, Fluida einzufrieren und eine glasige Grundmasse auszubilden. Bei Laven und Gesteinsgängen besteht durchaus die Möglichkeit, dass Außendruck und Viskosität ein Entweichen der in der Schmelze gelösten Gase verhindern. Bei Ignimbriten, die einen den geflossenen Typen durchaus ähnlichen petrographischen Habitus aufweisen können, ist dieser hochviskose, quasifeste Zustand ein Stadium während des Absatzes der Gas-Schmelze-Suspension. Gemäß dem Temperaturgefälle bei der Abkühlung des Ignimbritkörpers erstarren zuerst die Dach- und Basispartien, die ihrerseits als Dämmschicht für entweichende Fluida wirken können. Insgesamt zeigen die Ignimbrite im Vertikalprofil die ihnen typischen Verschweißungszonen (ROSS & SMITH 1961; ZEIL & PICHLER 1967), in denen in mittel bis stärker verschweißten Partien Rhyolithkugeln ausgebildet sein können (FREMD 1972).

Der ignimbritische Quarzporphyr-Pechsteinkörper im Erzgebirge-Becken hat entsprechend der Verschweißungszonalität Dach- und Basisbereich aschentuffähnlich ausgebildet. Aus der eingeschlossenen und sich weiter verdichtenden

Schmelze-Gas-Suspension bildeten sich nun vulkanisches Glas als mäßig verschweißte Gesteinsart (Pechstein) und deutlich kristallisierte Bereiche als stark verschweißte Gesteinsvarietät (Quarzporphyr). Die Verschweißung der Schmelzpartikel führte schließlich zu einer weitgehenden Homogenisierung der Grundmasse und damit zu dem Zustand, der geflossenen Laven sehr nahe kommt. Damit ergaben sich auch günstige Voraussetzungen für die Rhyolithkugelbildung. Mit der Entgasung und Kristallisation der Schmelze war eine Erhöhung der Dichte und Volumenverringering der betreffenden vulkanischen Masse verbunden, wodurch es einerseits zur Bildung der Entgasungsräume in den Rhyolithkugeln kam, andererseits entstand im

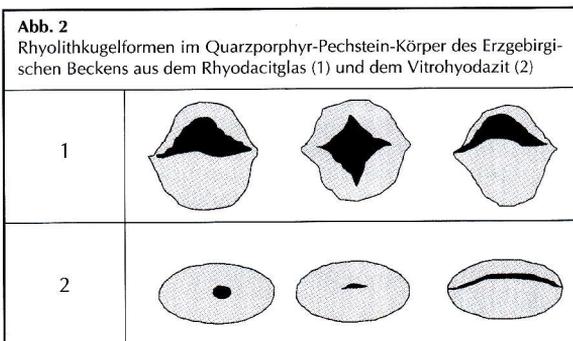




Abb. 3 Pigmentierung an den Grenzflächen der ignimbritischen Glasfetzen im Pechstein durch femische und Opakminerale, 1:500, ein Polarisor.



Abb. 4 Sphärolithische Kristallisation der Lavafetzen im Quarzporphyr durch fasrige Kalifeldspat-Quarz-Aggregate, 1:50, ein Polarisor.

Quarzporphyr eine senkrecht angelegte und weitklaffende Absonderungsklüftung. Sowohl die Entgasungsräume als auch die Absonderungsklüfte wurden meistens mineralisiert. Die Rhyolithkugeln im Pechstein stellen also kleine Bereiche in der Vulkanitmasse dar, in denen ebenso wie im Quarzporphyr der Entgasungs- und Kristallisationsvorgang ablief.

Über die Besonderheiten der Formenentwicklung von Rhyolithkugeln einschließlich deren Hohlraumbildung wurde bereits berichtet (JENTSCH 1981). Demnach bestimmte das bei Ignimbriten typische Pseudofließgefüge wesentlich die Gestalt der Kugel und die der Entgasungsräume (Abb. 2). Von den Kontaktflächen zwischen den einzelnen Schmelzteileichen (shards), die durch eine stärkere Pigmentierung markiert sind, ging in der Regel die sphärolithische Kristallisation der Schmelze bei gleichzeitiger Entgasung aus und es kam zur Anlage von Rhyolithkugeln. Diese Flächen waren auch prädestiniert für Stoffmigration, die schließlich für die Mineralisation der verschiedenen Entgasungsformen wie Kugeln und Absonderungsklüfte Bedeutung erlangten (Abb. 3, 4).

Insgesamt treten die Rhyolithkugeln in unterschiedlichen Größen auf. Die Varianz reicht von wenigen Millimetern bis zu mehreren Metern im Durchmesser. In einem definierten Gesteinsbereich eines Vulkanitkörpers dagegen sind die Größen ziemlich konstant. Die Begründung ist darin suchen, dass die Bildung der Rhyolithkugeln nur bis zu einem Gleichgewichtszustand verlief, in dem solche Einflussfaktoren wie Innendruck in der Schmelze, Viskosität, Kristallisationsverhalten der Komponenten eingingen. Die nicht einheitlich verlaufende Kristallisation der vulkanischen Schmelze bewirkte weiterhin Mineralum- und -neubildungen, die Veränderungen im Mineralbestand bewirkten. Einerseits liegt beim Pechstein eine glasige Gesteinsvarietät mit Frühausscheidungen in Form von basischen Mikrolithen und Phänokristen vor, andererseits ist beim Quarzporphyr Grundmasse weitgehend kristallisiert, bestehend aus fasrigen Kalifeldspat-Quarz-Aggregaten. Die femischen Ketten- und Bandsilikate wurden quantitativ umgebildet. Das betraf Mikrolithe, Phänokristen wie auch Xenokristalle. Aus Hypersthenaggregaten entstanden Pseudomorphosen, die sich aus einem Gemisch von SiO_2 -Modifikationen, Chlorit, Magnetit und Apatit aufbauten (Abb 5, 6). Eine Ursache für diese Phasenänderungen ist darin zu suchen, dass zum Zeitpunkt der Ejektion und Platznahme der ignimbritischen Masse kein physikochemisches Gleichgewicht zwischen den schmelzflüssigen und kristallinen Anteilen vorlag, das sich aber nun durch Mineralum- und -neubildungen in Abhängigkeit von den wechselnden pT/x -Bedingungen immer neu einzustellen versuchte. So zeigt der Pechstein in seiner Glasmasse neben leukokraten Bestandteilen auch noch den Mineralbestand von intermediären bis basischen Frühausscheidungen in Form von Phänokristen und Xenokristallen von Hypersthen und calciumbetontem Plagioklas (Andesin). Im Quarzporphyr dagegen sind, abgesehen von dem in beiden Gesteinsvarietäten auftretenden Biotit, nur noch die leukokraten Komponenten wie Quarz, Kalifeldspat und natriumbetonter Plagioklas (Oligoklas) erhalten. Sind der Grundmasse des Pechsteins hauptsächlich femische Mikrolithe anzutreffen, findet sich in der Grundmasse des Quarzporphyrs ein sphärolithisches Kalifeldspat-Quarz-Gemisch. Die ursprünglich vorhandenen femischen Anteile wurden also "verdaut". Diese Feststellung bildet eine Grundlage zu weiteren Betrachtungen über Stofffreisetzungen, die ursächlich mit der Mineralisation in diesen Gesteinen, speziell auch in den Rhyolithkugeln in Zusammenhang gebracht werden können.

Unter Beteiligung von allgegenwärtigem Wasser und Kohlendioxid lassen sich in vereinfachter Form und unter Beachtung, dass in natura keine ausgewogenen stöchiometrischen Verhältnisse vorliegen, folgende Vorgänge modellieren:

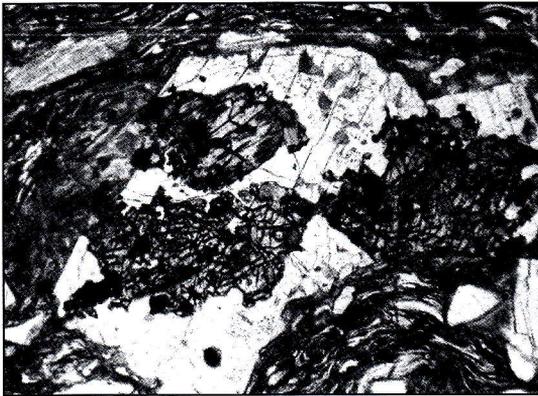


Abb. 5 In Pechstein schwimmende gabbroide Xenokristalle von frischem Hypersthen (hohes Relief) verwachsen mit bereits teilweise resorbiertem Andesin (hell), 1:50, ein Polarisator.



Abb. 6 Xenokristall von Andesin (hell) mit Hypersthen (kammartig ausgefaset) verwachsen, 1:50, ein Polarisator.



Im Prozess beteiligtes Natrium wurde zur Vereinfachung der Vorgänge in die Darstellung nicht einbezogen. Für den im Pechstein vorkommenden Andesin steht deshalb Anorthit, denn freiwerdendes Natrium wurde nur in geringem Maße in neu entstandenen Mineralphasen eingebunden. Kalium dagegen wurde in Neubildungen von fasrigem Kalifeldspat im Zuge der Grundmassekristallisation fixiert.

In der sich verdichtenden vulkanischen Masse wurden also durch die sich umbildenden femischen Bestandteile und die Resorption von frühageschiedenem Andesin neben Alkalien auch Erdalkalien, Eisen und Kieselsäure mobilisiert. Der Vorgang dürfte zwischen 600 und 700° C, also bei einer bereits hohen Viskosität des ignimbritischen Materials abgelaufen sein, weil die entsprechenden Pseudomorphosen der umgebildeten Minerale noch durch die Spannungsverhältnisse in der erstarrenden vulkanischen Masse, durch eine „Kataklyse in situ“ (JENTSCH 1981), mechanisch deformiert wurden. Wegen der bereits abgesenkten Temperatur schied für die folgenden Mineralbildungen aus den unverfestigten Mobilisaten eine erneute magmatische Kristallisationsfolge aus. Die Stabilität der Karbonate war zwar zunächst noch nicht gegeben, dagegen hat die Kieselsäure mannigfaltige Möglichkeiten, mit einer Palette von SiO₂-Mineralen und deren Varietäten aufzuwarten. Die Karbonate wie auch andere noch mobile Stoffkomponenten ordneten sich nun in den Ablauf der nachfolgenden Kristallisation ein. Durch unterschiedliche Stoff-, Temperatur-, und Druckverhältnisse in den sich mineralisierenden Räumen konnte sich eine Vielfalt von Mineralgesellschaften, natürlich eingegrenzt durch das jeweilige Stoffangebot, entwickeln. Zudem sammelten sich die Mobilisate, kontaminierten oder vermengten sich mit anderen Lösungen, deren Herkunft unter Umständen meteorisch abgeleitet werden kann. Im Detail ergibt sich für die Mineralisation folgender Sachverhalt:

Die Paragenese des Kerns der untersuchten Rhyolithkugeln, also die Füllung des Blasenhohlraumes ist relativ einfach aufgebaut. Es findet sich nur eine beschränkte Anzahl von Mineralen, wobei den Vorrang die verschiedenen SiO₂-Modifikationen bzw. deren Varietäten haben. Ca-Mg-Fe-Karbonate treten des öfteren auf, und untergeordnet lassen sich auch Zeolithe (Heulandit) sowie Fe-Oxide (Hämatit) nachweisen, selten treten Sulfide (Pyrit) und Fluorit auf. Entsprechend ihrer Quantität sind die Oxide des Siliziums, Calciums, Magnesiums, Eisens und des Kohlenstoffs am Aufbau der Kerne beteiligt. Dieser Befund ist weitgehend deckungsgleich mit den Mineralisationen in den Spaltenausfüllungen, namentlich in den Absonderungsspalten. Nicht näher betrachtet werden sollen an dieser Stelle in Kugeln und Spalten auftretende jaspisartige Hornsteine, deren Entstehung eine Beteiligung von meteorischem Wasser vermuten lässt (Abb. 7). Von den Mineralen und den Modifikationen des SiO₂ konnten in der grundsätzlichen Reihenfolge der Abscheidung unter dem Polarisationsmikroskop pseudomorph in β-Quarz umgebildeter Tridymit, Cristobalit und primär gebildeter β-

Abb. 7

Rhyolithkugel mit grünem Hornstein, wahrscheinlich unter Einfluss von meteorischem Wasser mineralisiert

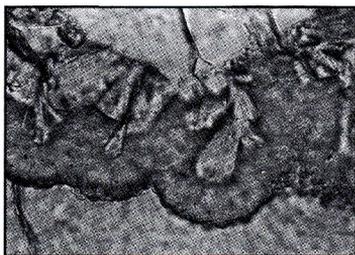
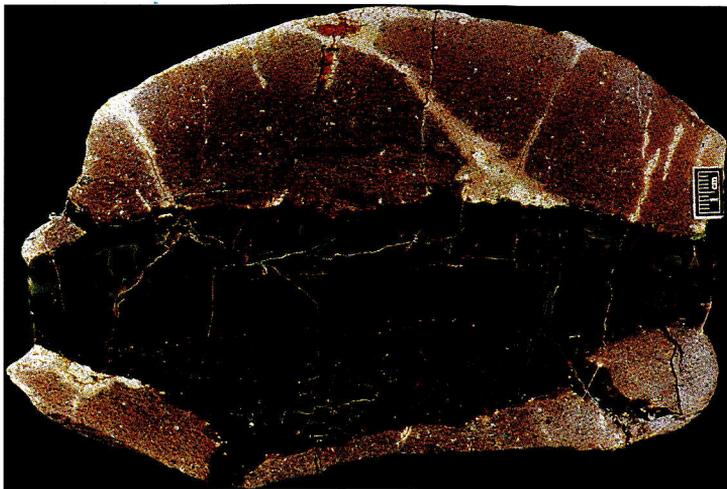


Abb. 8 Tridymit (deltoidförmig, hell), pseudomorph in Quarz umgebildet, auf Quarzporphyr der Rhyolithkugel aufsitzend und von kollomorphem Cristobalit (mittelgrau) umschlossen, nachfolgend Quarzin, 1:180, ohne Polarisator.



Abb. 9 Rundliche, wenig verzweigte Calcitkörner (ausgebrochene Stücke schwarz) aus Rhyolithkugeln, von Quarzin umkrustet, 1:50, gekreuzte Polarisatoren.

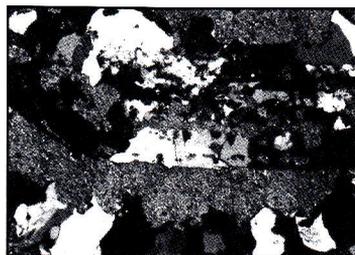
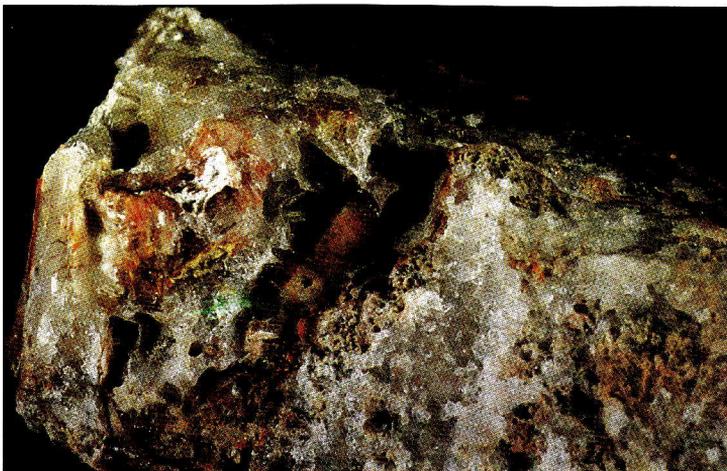
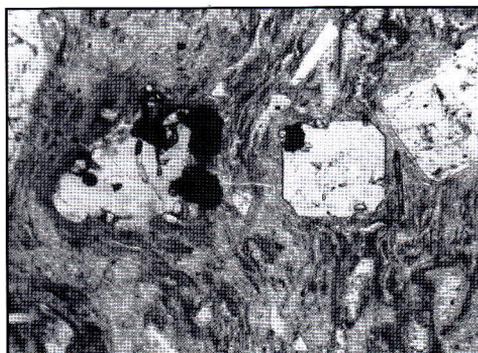
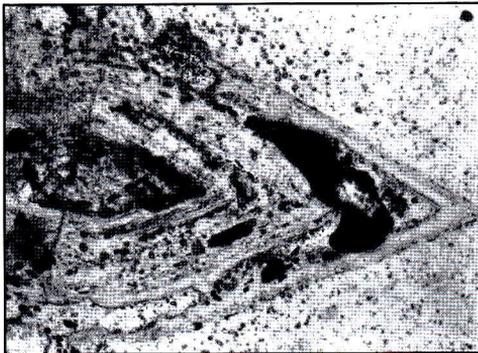
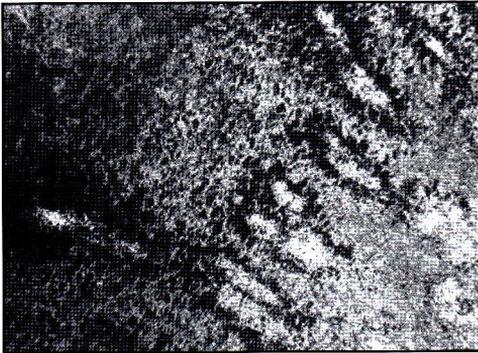


Abb. 10 Reliktischer Calcit (gleichmäßig grau), durch Quarz orientiert verdrängt, ähnlich der Lagenstruktur bzw. an ein eutektisches Gefüge erinnernd, 1:50, gekreuzte Polarisatoren.

Abb. 11

Quarz, pseudomorph nach spießigem Aragonit (rot), umgeben von Umhüllungspseudomorphosen von Quarz nach Calcit, spießiger Aragonit, Breite des Stückes 8 cm.





Quarz beobachtet werden (Abb. 4).

Tridymit, nach einer eingehenden Habitusanalyse bestimmt, bildet unmittelbar auf die vulkanische Matrix aufsetzend, pseudo-hexagonale Täfelchen mit einem Durchmesser von etwa 0,2 mm, teilweise mit typischen Durchdringungszwillingen (Abb. 8). Cristobalite erscheint als optisch isotrope, kolloidale Abscheidung, den Tridymit umschließend. Gelegentlich tritt in der Cristobalitsubstanz eine fasrige Struktur auf, die als Umbildung zu Loussatit gedeutet wurde. Insgesamt sind Tridymit und Cristobalite nur vereinzelt aufgetreten.

Der β -Quarz tritt generell in drei Ausbildungsformen auf. Zunächst erscheint er als körnig texturierter Quarz mit Implikationsgefüge. Die einzelnen Körner sind unorientiert und stark undulös. Weiterhin liegt er als fasrige Quarzsubstanz vor, die nach der optischen Orientierung als Quarzin bestimmt wurde, und schließlich als phanokristalliner Quarz.

Die Identifizierung der Karbonatminerale war problematisch, da einerseits ihre geringe Korngröße keine Differentialdiagnose zuließ, andererseits Pseudomorphosen von Quarz nach Karbonaten für die Auswertung zur Verfügung standen. Kriterien für die Bestimmung waren Habitus und Tracht der Individuen sowie, wenn ermittelbar, kristalloptische Eigenschaften.

Calcit tritt in den Blasenfüllungen der Rhyolithkugeln am häufigsten und am vielgestaltigsten auf. Meistens sind es unregelmäßige, gerundete oder auch wenig verzwilligte Einkristalle (Abb. 9). Selten treten Verdrängungsstrukturen von Quarz nach Calcit auf, die lagenförmig angeordnet sind und an eutektische Gefüge erinnern (Abb. 10). Der Calcit wird meist von körnigem oder fasrigem Quarz (Quarzin) umkrustet.

12
13
14
15

Abb. 12 Perlschnurartige Aufreihung von spindelartiger, höher lichtbrechender Karbonatsubstanz (ankeritischer Dolomit) längs der Kristallisationsrichtung in ehemals kolloidalem Calcit, 1:120, ein Polarisator.

Abb. 13 Pseudomorphose von Quarz nach Karbonat (Dolomit). Im Zentrum des ehemaligen Kristalls ein Karbonatrest erhalten, stark mit Opalmineralen (Hämatit) pigmentiert, 1:200, ein Polarisator.

Abb. 14 Apatit und Quarzin als Füllung in kleinem Entgasungshohlraum des Quarzporphyrs, 1:500, ein Polarisator.

Abb. 15 In Quarzminerale, Apatit und Magnetit umgebildete Hypersthene, links xenomorph, rechts idiomorph).

Entsprechend dem Mineralbestand in den Spalten des Ignimbritkörpers wurden spießige, mit Hämatit umkrustete Pseudomorphosen als ehemaliger Aragonit angesprochen (Abb. 11). Im Schliff erscheinen sie als spitzdachähnliche, durch Hämatit markierte Hohlkörper oder als mit Quarzin ausgefüllte Aggregate. Eine Verwechslung mit Schnitten durch Rhomboeder trigonaler Karbonate ist möglich, aber im synoptischen Vergleich der Individuen aus den Spaltenfüllungen ist diese Annahme durchaus berechtigt. Innerhalb von Calcitkristallen konnten gerundete Partikel eines höherbrechenden Karbonats festgestellt werden, die deutlich dunkler erschienen und als ankeritischer Dolomit angesprochen wurden (Abb. 12). Die Partikel sind in Kristallisationsrichtung des Calcits perlschnurartig aufgereiht, und senkrecht dazu orientiert. Dabei wird das Bild einer ehemals kollomorphen Abscheidung der Karbonate vermittelt, in der sich der Dolomit entmischt hat. Es ist durchaus möglich, dass sich hinter der Mannigfaltigkeit der in den Kugeln auftretenden Pseudomorphosen ehemals unterschiedlich zusammengesetzte Ca-Mg-Fe-Karbonate verbergen. Stark hämatitschüssige Pseudomorphosen weisen ebenfalls darauf hin (Abb. 13). Neben diesen Mineralen der Blasenfüllungen treten als Begleitminerale verschiedene Eisenoxide und selten Pyrit auf. Als Besonderheit ist zu vermerken, dass in millimetergroßen Blasen im Quarzporphyr auch Apatit, ähnlich wie in den Pseudomorphosen noch Hypersthen beobachtet werden konnte (Abb. 14). Unter dem Vorbehalt, dass keine Sukzession im Sinne einer klassischen Abfolge durchgängig nachzuvollziehen ist, lässt sich von höher- bis zu niedrigtemperierten Mineralbildungen folgende Reihenfolge festlegen:

- | | |
|-------------------------------------|-------------------------------|
| 1. Tridymit/Cristobalit/Apatit | 4. Calcit, Dolomit, Ankerit |
| 2. körniger Quarz/Quarzin/Chalcedon | 5. Quarzin/Chalcedon |
| 3. Aragonit | 6. phanero-kristalliner Quarz |

4 Ansätze zur Genesebewertung

Die Beteiligung von Cristobalit, Tridymit und Apatit an der Füllung der Entgasungshohlräume ist ein wesentlicher Aspekt zur Stützung der Vorstellung von BLANKENBURG, dass der Mineralisationsbeginn nicht klassisch hydrothermal, sondern höher temperiert angesetzt werden kann. Der Fund von Wabenquarz in Rhyolithkugeln ist in diesem Zusammenhang nennenswert (THOMAS & BLANKENBURG 1981). Entsprechend dem mikroskopischen Befund wird die Bildung



Abb. 16 Flexurartige Verbiegung halbverfestigter Chalcedonmasse mit Einarbeitung von Quarzporphyr (hell), Breite des Stückes 9 cm.

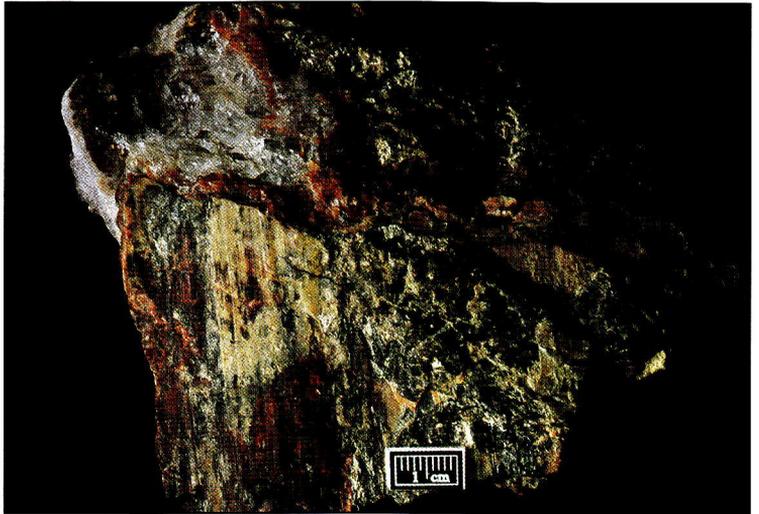


Abb. 17 Harnischstriemung auf Hornstein (Jaspis)

eines migrierfähigen Erdalkali-Alkali-Silikat-Mobilisats angenommen, das auf Grund der Umbildung von femischen Mineralen und basischem Plagioklas unter Beteiligung von Fluida entsteht. Der Kristallisationsbeginn dieses Mobilisats wird wegen dem Auftreten von Apatit im pneumatolytischen Bereich angesetzt. Da die Mineralumbildungen in den Rhyolithkugeln und im Quarzporphyr umschlossen von Pechstein erfolgten, ist die Annahme naheliegend, dass die Vorgänge in einem thermodynamisch weitgehend geschlossenen System abliefen. Die vorstehenden Mineralreaktionen setzten bei einer Temperatur von etwa 900° C ein, wenn man berücksichtigt, dass im System $\text{SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ die Assoziation Quarz-Tridymit bei Temperaturen von 850° bis 900° C bei niedrigen Drücken entsteht (OSTROVSKIJ 1959). Die ignimbritische Masse hatte bei diesen Mineralreaktionen bereits einen quasifesten Zustand erreicht, denn die sich umbildenden Pyroxene behielten weitgehend ihre ursprüngliche Gestalt, wenngleich der fortschreitende Verfestigungs- und Verschweißungsprozess eine weitere Verdichtung des Vulkanits bewirkte und resistente Phänokristen und Xenokristalle gewissermaßen in einer Kataklyse in situ mechanisch zerstört wurden (Abb. 15).

Die Umbildung des Hypersthens als Verwitterungsergebnis des Gesteinskomplexes zu sehen, in dem rhomboedrische Karbonate, Eisenhydroxide bzw. Hämatit und freies SiO_2 gebildet wurden (u.a. TRÖGER 1967), ist fraglich, denn im gegenüber der Verwitterung weniger resistenten Pechstein liegen die Pyroxene meist vollkommen frisch vor, dagegen im resistenteren Quarzporphyr ist kein Hypersthen nachzuweisen.

Das Gefüge der an den Füllungen der Entgasungshohlräume beteiligten Minerale spricht nicht für eine streng sukzessive Ausscheidung im Sinne einer Abfolge, wie sie bei Gangbildungen oft nachzuvollziehen ist. Vielmehr kommen hier intern ablaufende Umbildungsprozesse in dem sich absetzenden Erdalkali-Alkali-Silikat-Mobilisat in Betracht. Diese Auffassung über die Existenz eines solchen Mobilisats wird im Besonderen durch folgende Merkmale untersetzt:

- Durchgängig aufgebaute Sukzessionen nach Art einer hydrothermalen Abfolge fehlen meistens, sehr vielgestaltige Formen,
- Implikationsgefüge des Quarzes tritt auf,
- Quarz und Karbonate bilden ein Lagengefüge,
- Karbonate wurden ursprünglich kolloform als rundliche Körner abgeschieden, die von SiO_2 -Varietäten umkrustet vorliegen,
- In kolloform abgeschiedenem Calzit treten entmischungsartig dolomitische Karbonate auf,
- Neu gebildeter Apatit findet sich in Pseudomorphosen nach Orthopyroxen.

Man kann davon ausgehen, dass Vorgänge hierbei ablaufen, die mit der Platznahme des Ignimbrits im vulkanischen Milieu beginnen und ihren Abschluss im niedrigthermalen Bereich finden. Sie können also zwischen magmatisch und postmagmatisch eingeordnet werden. In gewisser Weise kann an die Hydrogen-Metasomatose im Sinne von HOLZHEY angeknüpft werden, wenngleich ein weiter gespanntes Temperaturintervall für Mineralneu- und Umbildungen gesehen wird und die Stoffherkunft eine Präzisierung erfährt. Dies entspricht auch der Natur der Sache, da im Verlauf der stetigen Temperatursenkung im Vulkanitkörper keine abrupten Unterbrechungen des Ablaufes zu erwarten sind. Neue stoffliche Qualitäten entstehen in erster Linie dadurch, dass sich ständig neue stoffliche Gleichgewichte einstellen und Entwicklungsstapen markieren. Auf drei genetische Aspekte soll abschließend in diesem Zusammenhang aufmerksam gemacht werden:

- Erstens sind die Karbonate in den Rhyolithkugeln zu einem großen Teil in Quarz pseudomorph umgebildet. Das betrifft speziell Aggregate, die u.d.M. spitzwinklige, spießartige Begrenzungen aufweisen. In Analogie zu den Spaltenfüllungen handelt es sich um ehemaligen Aragonit, der im Zuge der fortschreitenden Abkühlung zunehmend instabil und durch SiO_2 verdrängt wurde. In der Regel sind darauf aufsitzend Perimorphosen nach Calcit zu beobachten, die auf eine Umkristallisation bei der Verdrängung der Karbonatsubstanz hinweisen. Der vorher zur Abscheidung gelangte Aragonit ist nach Untersuchungen von MAC DONALD (1956) im Vergleich zum Calcit bei höheren Temperaturen (200 bis 600° C) und Drücken (6 bis 30 kbar) stabil.
- Zweitens dürfte in dem Erdalkali-Alkali-Silikat-Mobilisat durch die „Verdauung“ des Hypersthens eine Mg-Konzentration zu erwarten sein. Die fortgeschrittene Temperatur-Erniedrigung in dem Stoffsystem erlaubt aber keine Bildung von Mg-haltigen Silikaten wie Amphibolen, Biotit u.a. mehr. Statt dessen erscheint das Mg in karbonatischer Bindung bzw. in Chloriten gebunden.
- Drittens muss die Mineralabscheidung in den Absonderungsspalten unmittelbar nach der Platznahme erfolgt sein, denn fast ausschließlich finden sich in diesen Hohlräumen die entsprechenden Bildungen. Die zeitlich später entstandene, parallel dem Fließgefüge angelegte, horizontale Absonderungsklüftung wurde durch die Mineralisation nicht mehr erfasst. Ausnahmen bilden Brekzienbereiche, deren Entstehung auf Bewegungen durch innere Spannungen im Ignimbritkörper im Zuge der Erstarrung und Kristallisation zurückzuführen sind. Belege für diesen Vorgang liegen in Form von Reibungsbrekzien an der Grenze zwischen Quarzporphyr und Pechstein vor, in denen nachvollzogen werden kann, dass sich die noch plastische SiO_2 -Substanz flexurartig verbogen hat (Abb. 17) und zum Teil Harnisch-Streifung entstand (Abb. 16).

Literatur

- BLANKENBURG, H.J. (1981): Zur Paragenese in Vulkanitachatmandeln bzw. -kugeln. - Freiburger Forsch.-H., **C 364**: 99-112.
- BLANKENBURG, H.J. & BERGER, H. (1981): Kristallgrößenuntersuchungen an Vulkanitachaten. - Chem. Erde, **40**: 139-145.
- BLANKENBURG, H.J. & SCHRÖN, W. (1882): Zum Spurenelementchemismus der Vulkanitachate. - Chem. Erde, **41**: 121-135.
- BODEN, G.; BLANKENBURG, H.J. & EICHLER, B. (1981): Untersuchungen zur Lumineszenz an einigen kryptokristallinen Quarz-varietäten. - Chem. Erde, **40**: 72-82.
- BREITHAUPT, A. (1849): Die Paragenesis der Mineralien. Freiberg (Engelhardt).
- CLARK, S.P. JR. (1957): A note on calcite-aragonite equilibrium. - Am. Mineral., **42**: 564.
- FREMD, G.M. (1972): Orogener Vulkanismus des Süd-Dshungarsker und 'Ost-Sichote-Alinsker Gürtels. 471 S.; Tomsk. (russ.)
- FRIEDMAN, I.; LONG, W. & SMITH, R.L. (1963): Viscosity and water content of rhyolite glass. - J. Geophys. Res., **68**/24.
- GEINITZ, H.B. (1858): Einige Bemerkungen zu der Abhandlung des Herrn Dr. JENZSCH "über die Verbreitung des Melaphyrs und des Sanidin-Quarzporphyrs in der Gegend von Zwickau. - Z. Dtsch. Geol. Ges., **A 10**: 272-276.
- GRIP, E. (1935): Die Arvidsjaurporphyre. - Eine achaische Effusivgesteinsreihe im nördlichen Schweden. - Bull. Geol. Inst. Univ. Upsala, **25**/3: 135-220.
- GUTBIER, A. v. (1834): Geognostische Beschreibung des Zwickauer Schwarzkohlenebarges. Zwickau.
- HOLZHEY, G. (1999): Mikrokristalline SiO₂-Mineralisationen in rhyolithischen Rotliegendevulkaniten des Thüringer Waldes (Deutschland) und ihre Genese. - Chem. Erde, **59**: 183-205.
- IDDINGS, J.P. (1888): Nature and origin of lithophysae. - Amer. J. Sci., **1888**: 43.
- JAMIESON, C.J. (1953): Phase equilibrium in the system calcite-aragonite. - J. Chem. Phys., **21**: 1385
- JENTSCH, F. (1981): Zur Minerogenie glasiger Subsequenzvulkanite im sächsischen Raum. - Freib. Forsch.-H., **C 361**: 66 S.
- JENZSCH, G.J.S. (1858): Verbreitung des Melaphyrs und Sanidinquarzporphyrs bei Zwickau. - Z. Dtsch. Geol. Ges., **A 10**: 31-79.
- KLEMM, W. & BLANKENBURG, H.J. (1980): Zum Fluorgehalt im Quarz. - Z. angew. Geol., **16**: 1823.
- LEONHARD, K.C. v. (1823): Charakteristik der Felsarten, 1. Abt. Heidelberg (Engelmann).
- MAC DONALD, G.J.F. (1956): Experimental determination of equilibrium relations at elevated temperatures and pressures. - Am. Mineral., **41**: 744.
- MOHS, F. (1842): Die ersten Begriffe der Mineralogie und Geognosie. 11. Teil; Wien (Gerold-Verlag).
- NACKEN, R. (1950): Die hydrothermie Mineralsynthese als Grundlage zur Züchtung von Quarzkristallen. - Chem. Zeitg., **74**: 745-749.
- NASEDKIN, V.V. (1975): Petrogenese saurer Vulkanite. - Moskva (Izd. Nauka) (russ.).
- OSTROVSKIJ, I.A.; MISCHINA, G.P. & POVILAJTIS, V.M. (1959): PT-Projektion des Systems Kieselsäure-Wasser. - Dokl. AN SSSR, **126**/3. (russ.)
- PLATT, H. (1915): Das Randgebiet des Thüringer Waldes bei Benshausen. - Jb. d. Preuß. geol. Landesanstalt, **11**: 175-225.
- RAMDOHR, P. (1919): Über die Blaue Kuppe bei Eschwege und benachbarte Basaltvorkommen. - Jb. d. Preuß. geol. Landesanstalt, **40**: 284-355.
- RICHTHOFEN, F. v. (1860): Studien aus den Ungarisch-Siebenbürgischen Trachyt-Gebirgen - Jb. Geol. R. A., Jg. **1860**.
- ROSS, C.S. & SMITH, R.L. (1961): Ash-flow tuffs: their origin, geologic relations and identifications. - U.S. Geol. Surv. Prof. Pap., **366**.
- SAUER, A. (1883): Über die genetischen Beziehungen zwischen Pechstein und Porphyr des Meißner Gebietes. - Z. Dtsch. Geol. Ges., **1883**: 601-606.
- SCHLOSSMACHER, K. (1950): Die Entstehung der Achate. - Schmuck und edles Gerät. S. 23-60; Idar-Oberstein.
- SIEGERT, T. (1877): Erläuterung zur Geologischen Specialkarte, Blatt 95 (Chemnitz); Leipzig.
- STECHE, E. (1931): Die Porphyrbomben von Chemnitz und seiner Umgebung. - Ber. Naturwiss. Ges. Chemnitz, **23**: 29-34.
- 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; Berlin.
- TRÖGER, W.E. (1967): Optische Bestimmung der gesteinsbildenden Minerale. - Teil II, S. 379; Stuttgart.
- VOLJANJUK, N.J. (1979): Vulkanische Gläser von Muchor Tala und die an ihnen gebundenen Kugelbildungen. - Jzd. Nedra; Moskva. (russ.)
- ZEIL, W. & PICHLER, H. (1967): Die känozoische Rhyolith-Formation im mittleren Abschnitt der Anden. - Geol. Rdsch., **57**: 379.