

FLUIDE PHASEN UND PLATIN-MINERALISATION IM BUSHVELD KOMPLEX, SODAFRIKA

von

C.G. Ballhaus +)

Vortrag vor der Österreichischen Mineralogischen Gesellschaft

am 14. Oktober 1985

Das Merensky Reef im Bushveld Komplex, Südafrika, wird allgemein als ein klassisches Beispiel für hochtemperierte magmatische Sulfid- und Platinmineralisation in geschichteten gabbroiden Intrusionen angesehen. Es herrscht weithin Obereinstimmung, daß die Metallanreicherungen im Reef auf frühe Sulfid-Entmischung und nachfolgende Absaigerung zurückzuführen sind (Campbell et al., 1983; Barnes und Naldrett, 1985). Im Zuge einer petrographischen Neubearbeitung mit Schwerpunkt auf den Verwachsungsverhältnissen der Sulfide mit Silikaten wurden Hinweise auf eine späte in-situ Sulfidentmischung gefunden, die frühere Hypothesen zur Entstehung des Merensky Reef und seiner Mineralisation in Frage stellen.

Die Sulfidphasen des Merensky Reef (Magnetkies, Pentlandit, Kupferkies, gelegentlich auch Pyrit und Sulfarsenide) sind ausschließlich beschränkt auf die Interkumulus-Positionen des basalen pyroxenitischen Orthokumulates. Fast alle Sulfid-Aggregate sind in charakteristischer Weise mit sehr chlorreichem Phlogopit und Biotit, Aktinolith, Chlorit, Talk und gelegentlich Quarz und Calcit verwachsen. Innerhalb dieser Assoziation gibt es eine deutliche Altersabfolge: Biotit und Phlogopit sind idiomorph gegen Sulfide und werden als primäre Phasen gedeutet; alle anderen sind sekundäre deuterische Alterationsphasen, hervorgegangen aus Orthopyroxen und Plagioklas. Sekundäre Umbildungsphasen umgeben alle Sulfide in Form diffuser Alterationssäume. In Abwesenheit von Sulfiden sind primäre und sekundäre Hydrosilikate im Merensky Reef selten und der Erhaltungszustand von Pyroxen und Plagioklas gut.

Quarz, eine akzessorische spätmagmatische Phase immer gebunden an Glimmer, enthält eine komplexe Abfolge von Flüssigkeitseinschlüssen des Systems $H_2O-NaCl-CO_2-CH_4$, die bisher nicht bekannt war aus dem Merensky Reef. Nach optischen, texturrellen und mikrothermometrischen Gesichtspunkten lassen sich die Flüssigkeitseinschlüsse in folgende Gruppen gliedern (Ballhaus und Stumpf, 1986):

1. $H_2O-NaCl-CO_2$ Einschlüsse; sehr variable Zusammensetzung von fast reinen NaCl Einschlüssen mit weniger als 10 Volumen Prozent H_2O und Spuren von Kohlendioxid über CO_2 Einschlüsse mit bis zu 20 Vo.% $H_2O-NaCl$ mit einem Halit-Tochterkristall, bis zu wasserreichen Einschlüssen mit etwa 5 bis 35 % NaCl-equiv.
2. Komplexe Einschlüsse mit bis zu 7 verschiedenen festen Phasen und hohem Gehalten an zweiwertigen Kationen; die festen Phasen beinhalten sowohl Tochterkristalle als auch "accidental solids" (Roedder, 1984), die im festen Zustand eingeschlossen wurden ("heterogeneous trapping", Weisbrod, 1981).
3. Reine Methan-Einschlüsse ohne nachweisbare Gehalte an CO_2 oder anderen Komponenten.

+) Anschrift des Verfassers:
Dipl.Geol. C.G. Ballhaus
Institut für Mineralogie und Petrologie
Montanuniversität, A-8700 Leoben

Die Klassifikation der Flüssigkeitseinschlüsse und ihre Altersbeziehungen untereinander erfolgte nach textuellen und mikrothermometrischen Kriterien. Während wasserreiche und methanreiche Einschlüsse an verheilte Risse im Quarz gebunden sind, neigen hoch saline Einschlüsse, CO₂-reiche Einschlüsse mit hohen Gehalten an NaCl, und solche mit "accidental solids" zu isoliertem Auftreten. Isolierte Einschlüsse werden als primär gedeutet. Die Koexistenz des Wirtsminerals Quarz mit Biotit erlaubt eine Fixierung der maximalen Einschlußtemperatur primärer Einschlüsse bei etwa 720 ± 20° C (Hewitt und Wones, 1984), die chemische Variabilität der H₂O-NaCl-CO₂ Einschlüsse läßt den Schluß zu, daß das System zum Zeitpunkt der Quarz-Kristallisation nur noch beschränkt mischbar war. Die Solvus-Zusammensetzungen, die die Mischbarkeit des Systems charakterisieren, sind NaCl-H₂O-CO₂ mit etwa 30 Vol.% H₂O und weniger als 5 Vol.% CO₂, sowie CO₂-reiche Einschlüsse mit etwa 20 Vol.% H₂O und einem relativ großen NaCl Tochterkristall. Die volumetrischen Abschätzungen dieser Grenzzusammensetzungen stehen im Einklang mit thermodynamisch errechneten Mischlücken des Systems H₂O-NaCl-CO₂ (Bowers und Helgeson, 1983).

Die enge räumliche Koexistenz von Interkumulus-Sulfiden und Platinoiden mit Biotit-Quarz, sekundären Hydrosilikaten und hochsalinen Flüssigkeitseinschlüssen legt genetische Zusammenhänge nahe, die mit herkömmlichen Modellen zur Sulfid-entmischung in geschichteten Intrusionen nicht erklärbar wären.

Nach Shima und Naldrett (1975) liegt Schwefel in mafischen Magmen gelöst vor in der Form



wobei das Gleichgewicht kontrolliert wird vom Sauerstoff-Partialdruck, der Schwefelfugazität und dem Eisengehalt der Schmelze. Bisher ist wenig bekannt, ob und in welcher Weise andere volatile Verbindungen wie H₂O in dieses Gleichgewicht eingreifen. Nach Burnham (1979) und Holloway (1981) könnte bei niedrigen Sauerstoff-Fugazitäten und in der Gegenwart von gelöstem Wasser H₂S eine wichtige Schwefel-Verbindung auch in hochtemperierten magmatischen Milieus darstellen. H₂S wäre zu Hydrolyse-Reaktionen mit der Schmelze befähigt, etwa in der folgenden Form:



Die Löslichkeit von H₂S in der Schmelze ist gegenüber der von Wasser jedoch deutlich geringer und könnte abhängig sein vom Gesamtgehalt gelöster volatiler Verbindungen. Wenn Schwefelsättigung erreicht wird, entmischt H₂S, und eine Sulfid-schmelze könnte sich analog folgender Reaktion bilden:



Wasser, das bei dieser Reaktion frei wird, wird mit der Schmelze homogenisiert, da die Löslichkeit von H₂O gegenüber der von H₂S erheblich höher ist. Der Austausch von H₂S und H₂O innerhalb der Schmelzstruktur könnte solange kontinuierlich ablaufen, wie die Silikatschmelze an Wasser untersättigt ist. Eine fluide Phase ist zu diesem Zeitpunkt dominiert von H₂S.

Wenn bei fortschreitender Reaktion die Sättigungsgrenze der Schmelze an H₂O erreicht ist, kann eine separate fluide Phase entmischen, die aufgrund der Verteilungskoeffizienten reich an Chlor und möglicherweise auch Edelmetall-Chlor-Komplexen ist. Wenn Abkühlung es zuläßt, werden Hydrosilikate kristallisieren, insbesondere dort, wo ein hohes Angebot an Schwefel besteht. Dieses Konzept könnte die so häufige, bisher nicht verstandene Assoziation von Hydrosilikaten und deutischer Alteration mit Sulfidmineralien im Merensky Reef erklären.

Das Modell erfordert in-situ Kristallisation der Sulfide, um die textuellen Besonderheiten zu würdigen. Nach Vermaak und Hendriks (1976) beträgt der Durchschnittsgehalt des Reefs an Sulfidmineralien jedoch etwa 2,5 Volumenprozent, ein

Gehalt, der nach experimentellen Untersuchungen eine sehr frühe Entmischung der Sulfidschmelze erfordern würde (Buchanan und Nolan, 1979). Sehr wahrscheinlich war das Reef im frühen Kumulusstadium untersättigt an Schwefel, was das Fehlen magmatischer Sulfidtröpfchen im Kumulus-Orthopyroxen erklärt. Ein Großteil des Schwefels muß im Laufe der Kristallisationsgeschichte durch Diffusion und/oder Kumulat-Kompaktion zugeführt worden sein. Davon zeugen disseminierte und in diskordanten "pipes" vorliegende Sulfide in den anorthositischen Sequenzen stratigraphisch direkt unterhalb des Merensky Reefs.

Dem Nachweis Cl-reicher fluider Phasen im Interkumulus-Stadium des Merensky Reefs könnte eine große Bedeutung für das Verteilungsschema der Edelmetalle im Reef zukommen: Mehr als 70 Volumenprozent aller Platingruppen-Mineralien sind am direkten Kontakt Sulfid/Silikat konzentriert, und ein nur geringfügiger Anteil kommt als extrem feinkörnige Einschlüsse im Sulfid vor. Für dieses unausgewogene Verteilungsschema gab es auf der Grundlage bestehender Mineralisationskonzepte bisher keine plausible Erklärung. Möglicherweise ging ein Großteil der Edelmetall-Cl-Komplexe ein, anstatt in die Sulfidschmelze zu fraktionieren. Durch Kondensationsreaktionen des Fluids brachen die Komplexbindungen auf, und die Platingruppen-elemente werden bevorzugt an den Peripherien von Sulfidkörnern oder -tropfen gefällt.

Literatur

- BALLHAUS, C.G. und STUMPFL, E.F. (1986): Sulfide und platinum mineralization in the Merensky Reef: Evidence from hydrous silicates and fluid inclusions. Zur Veröff. eingereicht bei Contrib. Mineral. Petrol.
- BARNES, S.J. und NALDRETT, A.J. (1985): Geochemistry of the J-M (Howland) Reef of the Stillwater Complex, Minneapolis Adit, Area. I. Sulfide chemistry and sulfide-olivine equilibrium. Econ. Geol. 80, 627-645.
- BOWERS, T.S. und HELGESON, H.C. (1983): Calculation of the thermodynamic and geochemical consequences of nonideal mixing in the system H₂O-CO₂-NaCl on phase relations in geologic systems: Equation of state for H₂O-CO₂-NaCl fluids at high pressures and temperatures. Geochim. Cosmochim. Acta 47, 1247-1275.
- BUCHANAN, D.L. und NOLAN, J. (1979): Solubility of sulfur and sulfide immiscibility in synthetic tholeiitic melts and their relevance to Bushveld-Complex rocks. Canad. Miner. 17, 483-494.
- BURNHAM, C.W. (1979): The importance of volatile constituents. In: The Evolution of the Igneous Rocks: Fiftieth Anniversary Perspectives (Yoder, H.S., ed.). Princeton University Press.
- CAMPBELL, I.H., NALDRETT, A.J. und BARNES, S.J. (1983): A model for the origin of the platinum-rich sulfide horizons in the Bushveld and Stillwater Complexes. J. Petrol. 24, 133-165.
- HEWITT, D.A. und WONES, D.R. (1984): Experimental phase relations of the micas. In: Micas (Bailey S.W., ed.). Reviews in Mineralogy, vol. 13, Mineral. Soc. Amer., Virginia.
- HOLLOWAY, J.R. (1981): Volatile interactions in magmas. In: Thermodynamics of minerals and melts (Newton, Navrotsky & Wood, eds.). Advances in Physical Geochemistry, Vol. 1, Springer, N.Y.

- ROEDDER, E. (1984): Fluid inclusions. Reviews in Mineralogy, Vol. 12, Mineral. Soc. Amer., Blacksburg.
- SHIMA, H. und NALDRETT, A.J. (1975): Solubility of sulfur in an ultramafic melt and the relevance of the system Fe-S-O. Econ. Geol. 70, 960-967.
- VERMAAK, C.F. und HENDRIKS, L.P. (1976): A review of the mineralogy of the Merensky Reef, with specific reference to new data on the precious metal mineralogy. Econ. Geol. 71, 1244-1269.
- WEISBROD, A. (1981): Fluid inclusions in shallow intrusives. In: Short Course in Fluid Inclusions: Applications to Petrology (Hollister & Crawford, eds.). Mineral. Assoc. Canada, Calgary.