

**GEOCHEMISCHE UNTERSUCHUNGEN ZUM DIFFERENTIATIONS-
UND VERERZUNGSGRAD DER PEGMATITE
IN DER ÖSTLICHEN PEGMATITPROVINZ VON BRASILIEN:
DAS BEISPIEL DES PEGMATITDISTRIKTS VON ARAÇUAI (MINAS GERAIS)**

von

G. Morteani & C. Preinfalk

Lehrstuhl für Angewandte Mineralogie und Geochemie
Technische Universität München, Lichtenbergstr.4, D-85747 Garching, Deutschland

Vortrag vor der Österreichischen Mineralogischen Gesellschaft
gehalten von G. Morteani am 20. Jänner 1997 in Wien

Einleitung und Problemstellung

Brasilien ist weltweit bekannt für die Anzahl und Vielfalt seiner Pegmatite und wegen der zumindestens früher sehr hohen Qualität der daraus gewonnenen Halbedel- und Edelsteine wie Rosenquarz, Aquamarin, Morganit, vielfarbige Turmaline, Brasilianit und Kunzit.

Die größte brasilianische Pegmatitprovinz ist die östliche Pegmatitprovinz in den Staaten Minas Gerais und Südbahia. Sie wurde als solche von PAIVA (1946) und PUTZER (1976) definiert. Diese Provinz liefert nicht nur pegmatitgebundene Halbedel- und Edelsteine, sondern sie war auch bis vor 10 Jahren ein bedeutender Produzent von Columbo-Tantalitkonzentrat. Die zweite und kleinere, sog. nordöstliche Pegmatitprovinz ist auch als Provinz von Borborema bekannt und liegt in den Staaten Rio Grande do Norte, Paraíba und Ceará (PAIVA, 1946; PUTZER, 1976).

Pegmatitprovinzen zeichnen sich dadurch aus, daß es auf vergleichsweise kleinem Raum, in den sog. Pegmatitdistrikten, zu Anhäufungen von sehr unterschiedlich großen und auch verschieden vererzten Pegmatiten kommt. Die östliche Pegmatitprovinz Brasiliens ist ein klassisches Beispiel dafür. Der Explorationsgeologe steht bei der Prospektion vor dem Problem, aus der großen Anzahl von Pegmatiten eines Distriktes diejenigen ausfindig zu machen, deren nähere Untersuchung, trotz des damit verbundenen hohen Kostenaufwandes, Gewinn verspricht. Wie schon von GAUPP et al. (1984) betont, können zuverlässige geochemische Vererzungsindikatoren bei der Auswahl höffiger Pegmatite helfen. Die konventionellen Prospektionstechniken wie Bohren, Erstellung von Schürfgräben und das Auffahren von Explorationsstollen geben zwar eine gute Vorstellung über die Form und manchmal auch den Zonarbau der Pegmatite, aber sie ermöglichen im allgemeinen keine Aussage über den Vererzungsgrad wegen der extremen Grobkörnigkeit der Pegmatite und des nur sehr lokalen Auftretens von reichen Vererzungen in Taschen, den sogenannten „bolsoes“ innerhalb eines Pegmatits.

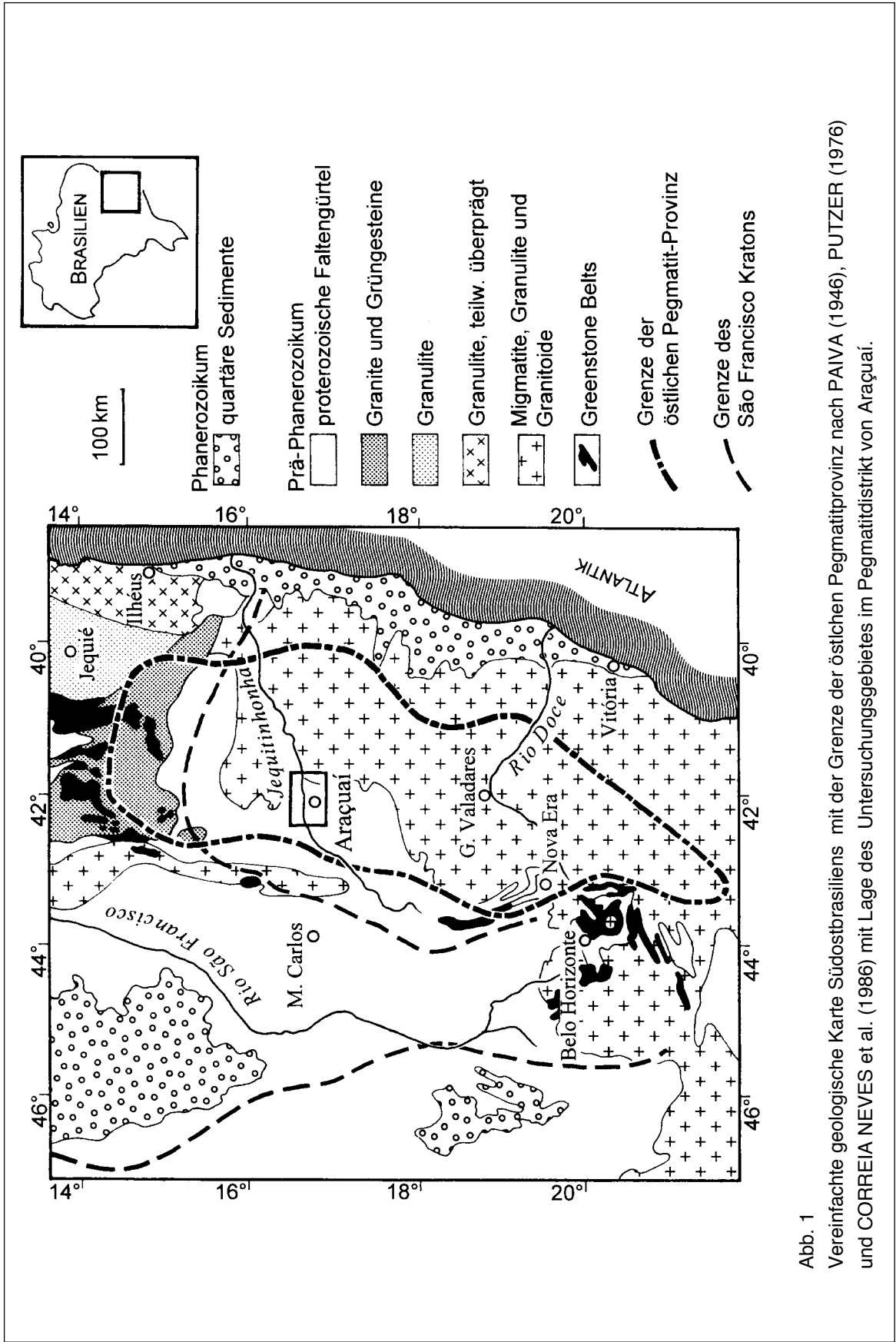
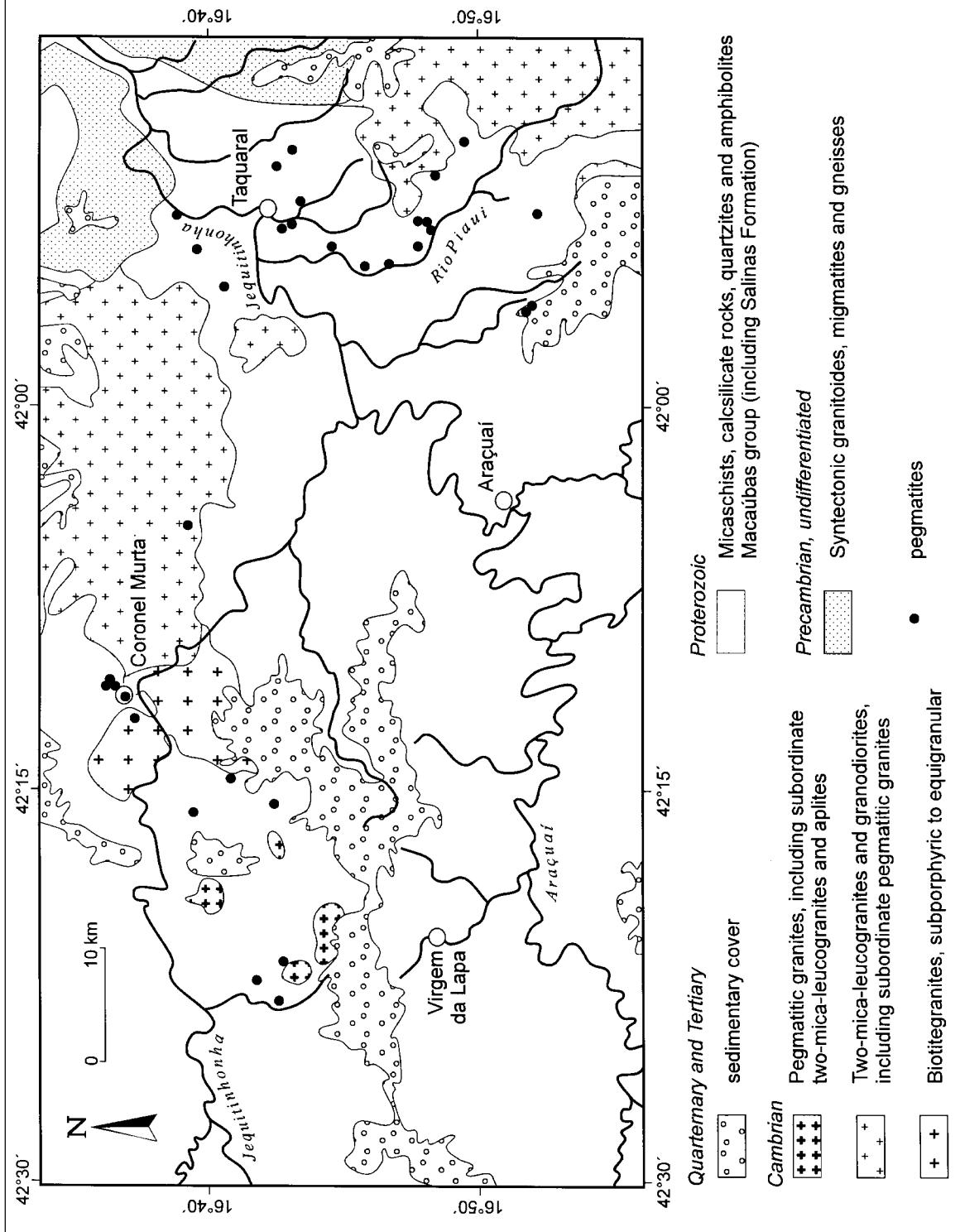


Abb. 1 Vereinfachte geologische Karte Südostbrasilien mit der Grenze der östlichen Pegmatitprovinz nach PAIVA (1946), PUTZER (1976) und CORREIA NEVES et al. (1986) mit Lage des Untersuchungsgebietes im Pegmatitdistrikt von Araçuaí.

Abb. 2

Geologische Kartenskizze des Pegmatitdistriktes von Araçuaí mit den untersuchten Pegmatiten nach PEDROSA SOARES (1995) und COSTA (1987).



Eine Schwermineralprospektion in Bachsedimenten, wie sie z.B. von TRUEMAN & CERNÝ (1982) für Nb, Ta und Sn in pegmatitreichen Gebieten vorgeschlagen wird, gibt auch im Falle einer Halbedel- und Edelsteinprospektion lediglich eine recht ungenaue Information, wenn, und dieser Fall liegt typischerweise auch in Brasilien vor, ganze Schwärme von sehr unterschiedlichen Pegmatiten an den Talflanken der Täler auftreten und dazu eine bis 100 m mächtige, z. T. mehrfach umgelagerte Lateritdecke mit ihrem Schwermineralgehalt ganz wesentlich die Zusammensetzung der Bachsedimente beeinflusst. Unter solchen Umständen ist es praktisch unmöglich, den Schwermineralgehalt der Flusssedimente einem einzelnen Pegmatitkörper zuzuordnen.

Bis heute liegen keine regionalen Untersuchungen über das Alter, die interne Entwicklung und den Differentiationsgrad der Sn-, Nb-, Ta- und halbedel- und edelsteinführenden Pegmatite der östlichen brasilianischen Pegmatitprovinz vor. Im folgenden wird der Zusammenhang zwischen Differentiationsgrad und Sn, Nb und Ta Vererzung am Beispiel der Pegmatite im Pegmatit-Distrikt von Araçuaí diskutiert.

Geologischer Rahmen

Die Abb. 1 zeigt eine vereinfachte geologische Karte von Südostbrasilien nach SCHOBENHAUS & ALMEIDA (1984) mit der Grenze der ostbrasilianischen Pegmatitprovinz nach PAIVA (1946), PUTZER (1976) und CORREIA NEVES et al. (1986). Man erkennt die zentrale Lage des Pegmatitdistriktes von Araçuaí innerhalb der ostbrasilianischen Pegmatitprovinz.

Der Pegmatitdistrikt von Araçuaí liegt außerhalb des San Francisco Kratons an der Grenze zwischen dem proterozoischen Falteingürtel von Araçuaí und einer bisher nicht im einzelnen gegliederten Abfolge von Migmatiten, Granuliten und Grüngesteinen archaischen bis oberproterozoischen Alters.

Das letzte große thermotektonische Ereignis in Brasilien war das „Brasiliano“, das mit dem Zeitraum von 700 bis 450 Ma (SCHOBENHAUS & ALMEIDA 1984) das Kambro-Ordovizium umfaßt. Die zwei bislang vorhandenen K/Ar-Altersbestimmungen an Muskoviten aus den Pegmatiten von Cachoeira und Maxixe im Gebiet von Araçuaí ergeben ein Brasiliano Alter von 467 ± 12 Ma (SIGA, 1986; SÁ, 1977).

Entsprechend den klassischen Arbeiten z. B. von BRÖGGER et al. (1922), HEINRICH (1953), BEUS et al. (1968), VARLAMOFF (1968, 1972), GORDIYENKO (1971, 1976), CERNÝ & TURNOCK (1971), CERNÝ (1975, 1982a, b, 1989, 1994), MÖLLER (1989) und LONDON (1990, 1992) ist eine räumliche und genetische Bindung der Seltenmetall-Pegmatite an die sogenannten Muttergranite zu erwarten. Dies sind extrem fraktionierte Leukogranite bis Quarzmonzonite vom s-Typ, die bereichsweise pegmatitisches Gefüge zeigen (CERNÝ & TRUEMAN, 1978; GAUPP et al., 1984). Mit zunehmendem Abstand der Pegmatite von Muttergranit nimmt die Fraktionierung und die Vererzung an Li, Nb, Ta, Sn und Cs zu (HEINRICH, 1953; SOLODOV, 1971; TRUEMAN & CERNÝ, 1982; CERNÝ, 1982a; GAUPP et al., 1984). Nach SCHOBENHAUS & ALMEIDA (1984) tritt in der Zeitspanne von Kambrium bis Ordovizium zwischen 556 und 450 Ma im „Brasiliano“ ein posttektonischer granitisch-granodioritischer Magmatismus auf. Die Pegmatitbildung erfolgte daher zeitgleich mit diesem posttektonischen brasilianischen granitisch-granodioritischen Magmatismus.

Die Abb. 2 zeigt, daß im Pegmatitdistrikt von Araçuaí im wesentlichen das proterozoische Basement aufgeschlossen ist, in das die obengenannten kambro-ordovizischen Granite intrudiert sind (PEDROSA SOARES, 1995; COSTA, 1987). Aus der Verteilung der Pegmatite ist kein direkter Zusammenhang mit den aufgeschlossenen großen Granitkörpern zu erkennen, obwohl diese in einigen Teilen eine deutlich aplitgranitische bis pegmatitische Ausbildung haben und damit alle Kriterien für sogenannte „parental granites“ nach CERNÝ & TRUEMAN (1978) erfüllen.

Die Pegmatite sind in ein Gebiet intrudiert, das nach PEDROSA SOARES (1995) zuletzt eine amphibolitfazielle Metamorphose mit Granat-, Staurolith-, Sillimanit- und Disthen-führenden Paragenesen in Metapeliten erlebt hat. Da die Pegmatitintrusion und -erstarrung postmetamorph stattgefunden hat, sollte die Metamorphose der Nebengesteine keine Bedeutung haben. Von GINSBURG et al. (1979) wird aber darauf hingewiesen, daß zwischen dem Metamorphosegrad der Nebengesteine und der Art der Pegmatite ein Zusammenhang bestehen muß, da die wirtschaftlich interessanten Pegmatite vor allem in Gesteinsfolgen zu finden sind, die eine amphibolitfazielle Überprägung vom Barrow- oder Abukuma-Typ zeigen. Obwohl der Grund für diesen Zusammenhang offenbleibt, bestätigt er sich auch für das Gebiet von Araçuaí.

Zeigen Pegmatite eine Zonierung, so kann man von außen nach innen eine feinkörnige „aplitic border zone“, eine „wall zone“ mit z. T. auch sehr grober Verwachsung von Kalifeldspat und Quarz, eine „intermediate zone“ bestehend aus z. T. riesigen Kalifeldspäten und einen „quartz core“ unterscheiden (z.B. CERNÝ 1991a, b). Von großer Bedeutung ist das Auftreten von meist diskordant das Gefüge durchschlagenden Albitkörpern oder Albitisierungszonen. Sie bestehen aus plattigem Cleavelandit und/oder aus zuckerkörnigem Albit. Diesen Verdrängungskörpern kommt eine große wirtschaftliche Bedeutung zu, denn die Vererzung mit Nb-, Ta- und Sn-Mineralen, aber auch mit bunten Turmalinen und/oder Aquamarinen, ist in der Regel an diese Verdrängungskörper gebunden. Auf die bevorzugte Vererzung solcher Albitkörper haben u.a. schon ALEKSANDROV et al. (1980, 1985), LONDON (1990), CERNÝ (1994) und TRUMBULL (1995) hingewiesen. Zusammen mit den Albiten der Verdrängungskörper tritt typischerweise ein feinkörniger gelblicher Hellglimmer auf, der sich von den primären, weißgrauen Glimmern, wie sie vor allem für die „intermediate zone“ typisch sind, deutlich in der Zusammensetzung unterscheidet.

Die Pegmatite von Araçuaí treten in Form von konkordanten und diskordanten Körpern und Gängen auf, die sich jeweils mit einer scharfen Grenze vom Nebengestein absetzen. Sie zeigen meist einen Zonarbau, wobei sehr häufig die „aplitic border zone“ fehlt oder nur im Liegenden entwickelt ist. Die äußerste Zone ist die „wall zone“ mit einer Verwachsung von Kalifeldspat und Quarz mit Hellglimmern, sehr selten Biotit. Auf diese folgt die „intermediate zone“ mit z.T. bis zu 10 m langen Kalifeldspatkristallen sowie ein oder mehrere Quarzkerne. Häufig treten Albitisierungskörper auf, die überwiegend aus grobkörnigem Cleavelandit und gelblichen sekundären Hellglimmern bestehen, nur selten ist zuckerkörniger Albit zu finden. An diese Albitisierungskörper sind typischerweise auch in Araçuaí die Sn-, Ta-, Nb-Vererzungen sowie die bunten Turmaline und Aquamarine gebunden. Eine Ausnahme bilden die extrem Li-, d.h. spodumen-, amblygonit- und petalitreichen Pegmatite. Hier ist der interne Zonarbau sehr schwach entwickelt oder fehlt vollständig. Meist tritt nur am Rand der Pegmatite eine hellglimmerreiche Kalifeldspat- und Quarzzone auf, die in ihrer Ausbildung an eine typische „border zone“ erinnert.

Die Hauptmasse dieser ungewöhnlichen Pegmatite besteht aus einer bereichsweise straff orientierten Verwachsung von stengeligem hypidiomorphem Spodumen mit einer mittelkörnigen Kalifeldspat-Quarz-Matrix. Die Quarzkerne treten nur lokal auf und haben eine geringe Ausdehnung. Diese Abfolge kann sich in subhorizontal liegenden Pegmatitkörpern, wie z. B. im Pegmatit von Barreiro, mehrfach wiederholen.

In der vereinfachten geologischen Karte des Pegmatitgebietes von Araçuaí erkennt man, daß die besonders Li-reichen Pegmatite in dem Piauí Tal zu finden sind. In diesem Gebiet konzentrieren sich auch z. Zt. die Prospektion und der Abbau. Die Pegmatite von Barreiro I und II, Xuxa, Maxixe und Cachoeira werden wegen ihres ungewöhnlich hohen Spodumengehaltes z.Zt. intensiv abgebaut. Sie stellen die derzeit einzige wirtschaftlich genutzte Quelle für Li in Brasilien dar.

Abb. 3 zeigt ein Detail der Abbauwand des Pegmatites von Barreiro mit den 15 cm dicken und bis zu 1 m langen Spodumenkristallen.

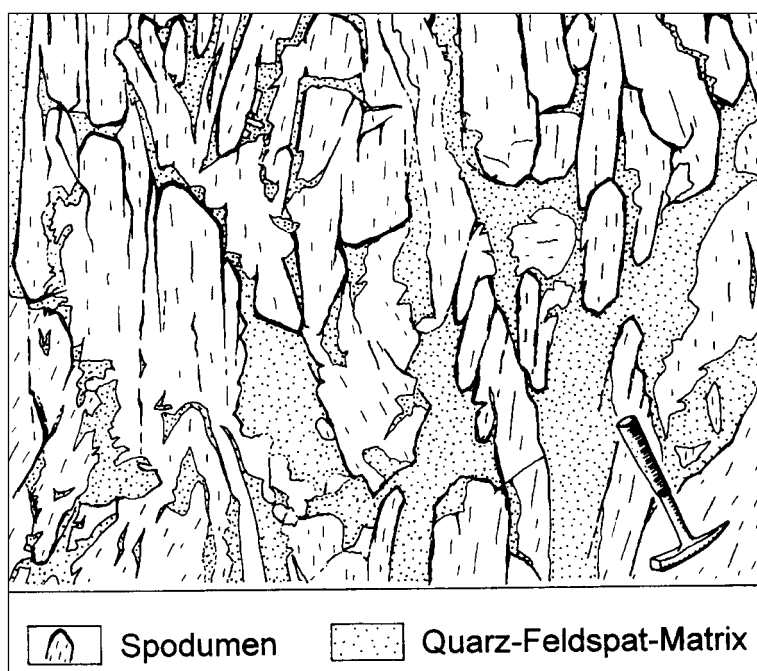


Abb. 3
Anschnitt der Abbauwand des Pegmatits von Barreiro I. Sie zeigt die 15 cm dicken und bis zu 1 m langen Spodumenkristalle. Die Zwischenmasse besteht aus Feldspat und Quarz.

Der Pegmatit von Maxixe wurde bis 1991 auf Petalit und Amblygonit abgebaut und ist seit 1996 wieder in Betrieb. Der Pegmatit von Urubu ist ebenfalls seit 1996 wieder in Abbau, u.a. auf Polucit. Der Pegmatit von Fumal wurde bis in die 70er Jahre hinein wegen seiner Sn-Führung abgebaut, wurde aber aufgegeben, als die großen Sn-Lagerstätten von Rondonia und insbesondere die von Pitinga in Brasilien in Abbau gingen.

Im gesamten Gebiet von Araçuaí sind keine Anzeichen einer metamorphen Überprägung der Pegmatite zu erkennen, sehr häufig tritt jedoch eine intensive subhorizontale Deformation auf. Diese unter niedrigen Temperaturen abgelaufene Verformung hat wirtschaftliche Konsequenzen. Sie bewirkte eine manchmal bis zur technischen Unverwertbarkeit führende Zerkleinerung der eingewachsenen Edelsteinkristalle.

Das meiste derzeit verschliffene Edelsteinmaterial kommt daher aus sogenannten Olhos (Augen), d.h. kleinen Bruchstücken größerer Kristalle, die mühsam per Hand aus dem Haufwerk gesammelt werden. Schöne Kristalle sind nur dann erhalten, wenn sie als freistehende Kristalle oder Kristallgruppen in Drusen von der Deformation verschont geblieben sind.

Geochemie

Fraktionierungsindikatoren

Die Konzentrationen der Alkali-elemente Li, Rb und Cs in Kalifeldspäten und Hellglimmern können als Indikatoren für den Differentiationsgrad von Pegmatitkörpern herangezogen werden (vgl. z.B. BEUS, 1966; CERNÝ et al., 1981; GORDIYENKO, 1970, 1971, 1976; TATARINOV & SHMAKIN, 1976; GERASIMOVSKIY & ZALASHKOVA, 1976; GAUPP et al., 1984). Diese Indikatoren werden jedoch durch eine große Anzahl von Parametern beeinflusst, welche in den relativ kleinen Pegmatitkörpern zeitlich und räumlich stark variieren können.

So sind die Gehalte an Li, Rb und Cs in den Feldspäten und den Glimmern eine Funktion von Druck, Temperatur und der Zusammensetzung der pegmatitbildenden Schmelzen und Lösungen. Die Geschwindigkeit der Kristallisation, der Gleichgewichtseinstellung und damit der koexistierenden Minerale spielen ebenfalls eine große Rolle (MANUYLOVA et al., 1966; BESSWICK, 1973; SMITH, 1974; ALEKSANDROV et al., 1980, 1985; GAUPP et al., 1984).

Der Differentiationsgrad eines Pegmatites ist aus dem K/Rb zu Cs Diagramm für Kalifeldspat und Hellglimmer abzuschätzen. Cs substituiert im Kalifeldspat- und Muskovitgitter K. Der Cs-Gehalt der Hellglimmer und Kalifeldspäte eignet sich sehr gut als Differentiationsindikator, da Cs wegen des großen Unterschiedes im Ionenradius zu Kalium erst spät eingebaut wird ($Cs^+ = 1.67 \text{ \AA}$, $K^+ = 1.33 \text{ \AA}$).

Späte Hellglimmer und Kalifeldspäte haben daher deutlich höhere Cs-Gehalte als frühgebildete. Die Fraktionierung des Rb ist wegen der größeren Ähnlichkeit des Ionenradius von K und Rb weniger deutlich ($Rb^+ = 1.47 \text{ \AA}$, $K^+ = 1.33 \text{ \AA}$).

In Abb. 4a und Abb. 4b ist als Beispiel das Verhältnis K/Rb gegen Cs für Kalifeldspat für die verschiedenen Pegmatite des Araçuaí Distriktes aufgetragen. Man erkennt, daß mit Zunahme des Cs Gehaltes das Verhältnis K/Rb allgemein abnimmt, was auf eine Zunahme des Rb Gehaltes in den Kalifeldspäten zurückzuführen ist.

In Abb. 4b wird unterschieden zwischen den Pegmatiten des Araçuaí Distriktes, die mit i) Pollucit und ii) Li-Mineralen, wie Spodumen, vererzt sind und jenen, die iii) keine solche Vererzung zeigen. Man erkennt, daß die beiden schon in Abb. 4a erkennbaren, parallelen Trends einerseits die Li-vererzten, andererseits die nicht Li-vererzten Pegmatite vertreten. Es scheint also, daß die Kalifeldspäte in den Li vererzten Pegmatiten generell Cs-ärmer sind im Vergleich zu den Kalifeldspäten aus den nicht Li-vererzten Pegmatiten. Da in einigen dieser Li-Pegmatite auch Pollucit als eigene Cs-Phase auftritt, könnte es zu einer Verarmung an Cs in der fluiden Phase gekommen sein, aus der die Feldspäte kristallisierten. RINALDI et al. (1972) und MARTIN (1982) konnten analog zeigen, daß kogenetisch mit Pollucit gebildete Hellglimmer sehr niedrige Cs-Gehalte haben.

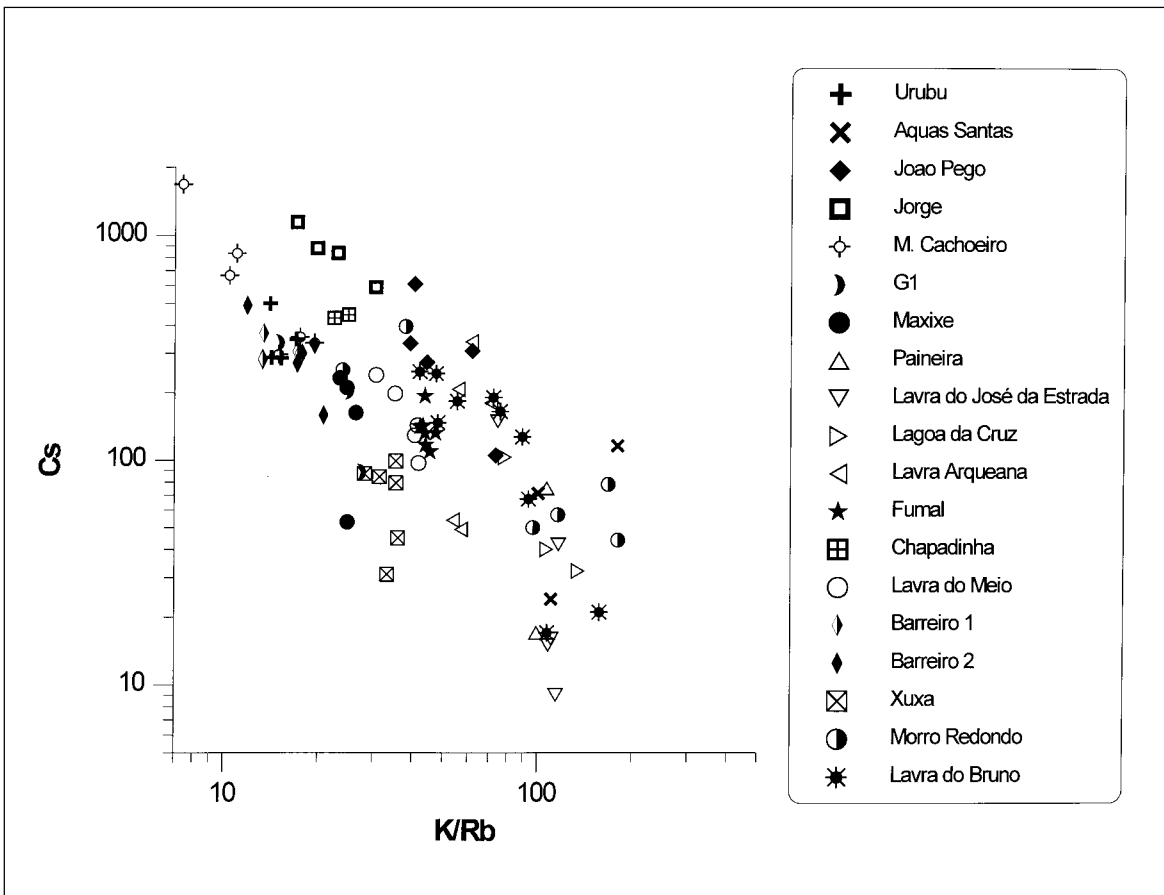


Abb. 4a

K/Rb gegen Cs für Kalifeldspat nach einzelnen Lokalitäten für den Araçuaí Distrikt.

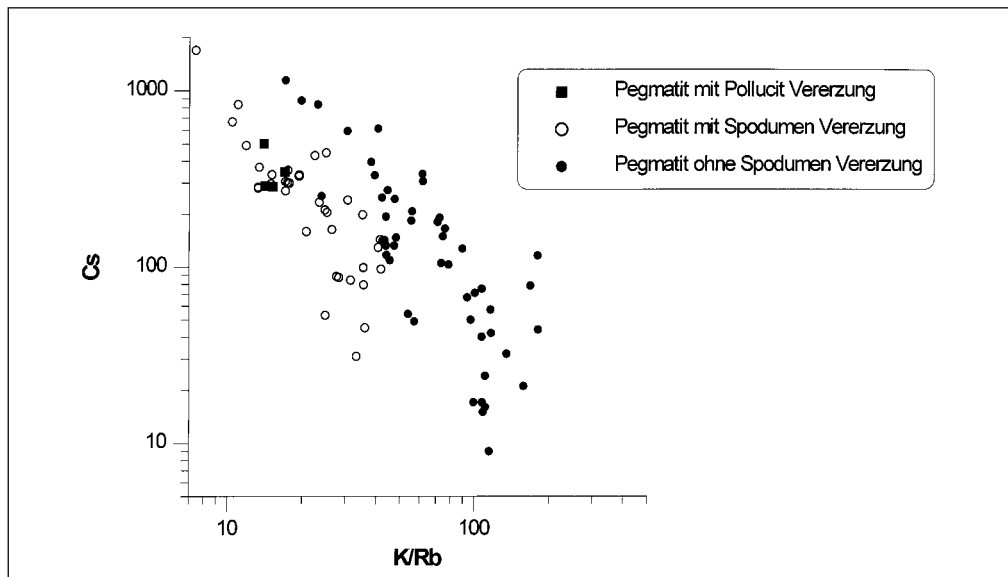


Abb. 4b

K/Rb gegen Cs für Kalifeldspat zusammengestellt nach Pegmatiten mit Pollucit-Vererzung, mit und ohne Spodumenvererzung für den Araçuaí Distrikt.

Vererzungsindikatoren

Der Fraktionierungsgrad, wie er z.B. im Diagramm K/Rb gegen Cs (s. Abb. 4) zum Ausdruck kommt, ist kein ausreichender Hinweis auf eine Nb-, Ta-, Sn-Vererzung. Es empfiehlt sich die zusätzliche Verwendung von Indikator diagrammen, die einen Fraktionierungsindikator mit dem entsprechenden Wertelement verknüpfen. Bei der Diskussion der Differentiationstrends und der Wertmetallgehalte ist zu bemerken, daß diese Trends für ganze Pegmatitdistrikte beobachtet werden können, aber oft auch eine sehr deutliche Differentiation innerhalb eines Pegmatitkörpers auftritt, die in Extremfällen in ihrem Ausmaß dem des ganzen Distrikts nahekommmt.

Die Bedeutung der internen Differentiation eines Pegmatites wird aus dem Cs gegen Nb Diagramm für Hellglimmer aus dem Pegmatit Lavra do Bruno (Araçuaí Distrikt) deutlich (Abb. 5). Man erkennt, daß die Hellglimmer um drei Größenordnungen in dem Cs und um eine Größenordnung im Nb Gehalt schwanken und daß der Nb Gehalt mit steigendem Cs Gehalt in den Hellglimmern abnimmt.

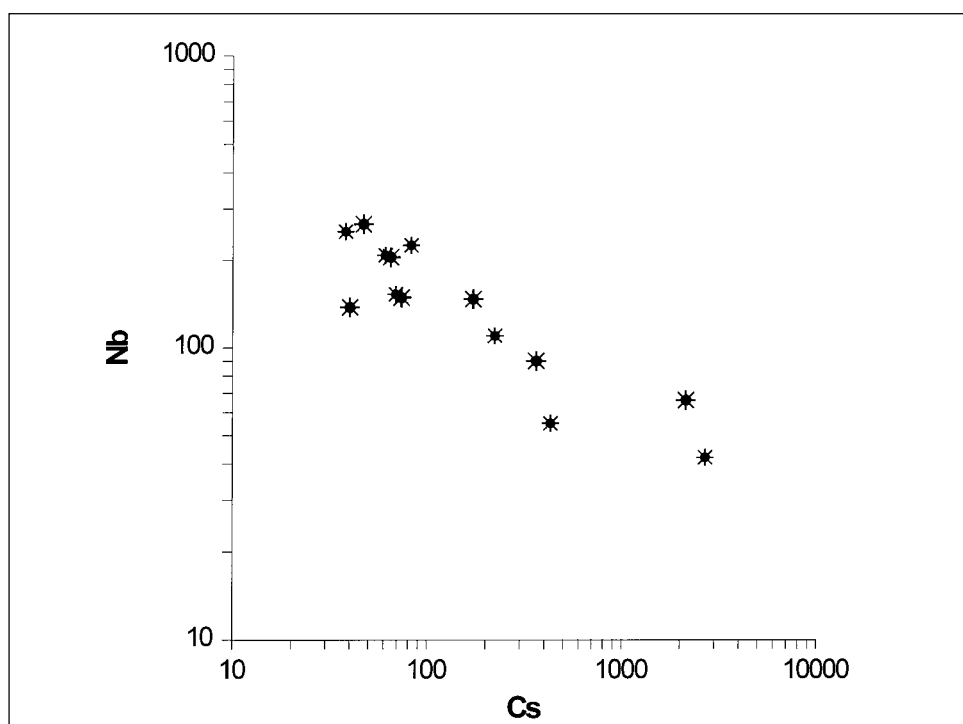


Abb. 5
Cs gegen Nb Diagramm für Hellglimmer aus dem Pegmatit Lavra do Bruno.

Dagegen zeigt das Cs gegen Ta Diagramm, daß die Gehalte an Cs und Ta sich gleichläufig verhalten (Abb. 6).

Damit zeigt der Vergleich der Cs gegen Nb (Abb. 5) und Cs gegen Ta (Abb. 6) Diagramme, daß sich Ta und Nb in Bezug auf den Cs-Gehalt gegenläufig verhalten. Aus dieser Beobachtung ist wahrscheinlich, daß mit zunehmender Differentiation innerhalb eines Pegmatits, wie sie durch ansteigende Cs-Gehalte in den Hellglimmern angezeigt wird, auch eine Verschiebung der Vererzung von Columbinit-betont hin zu mehr Tantalit-betont erfolgen sollte, wie es z.B. GRICE et al. (1972) für Ta/Nb-Mineralen des Tanco Pegmatits beobachtet haben.

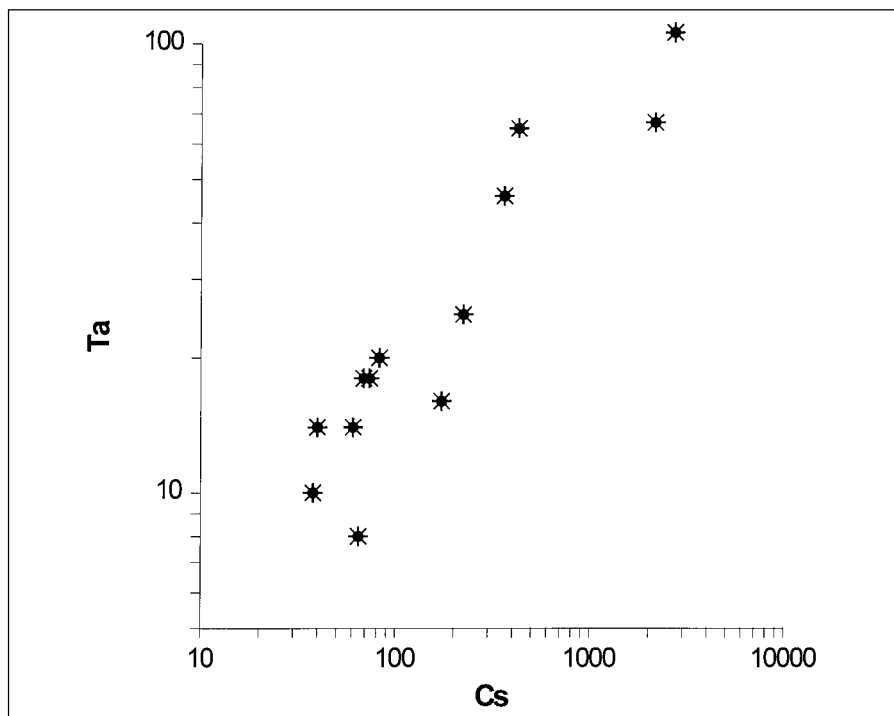


Abb. 6
Cs gegen Ta Diagramm für Hellglimmer aus dem Pegmatit Lavra do Bruno.

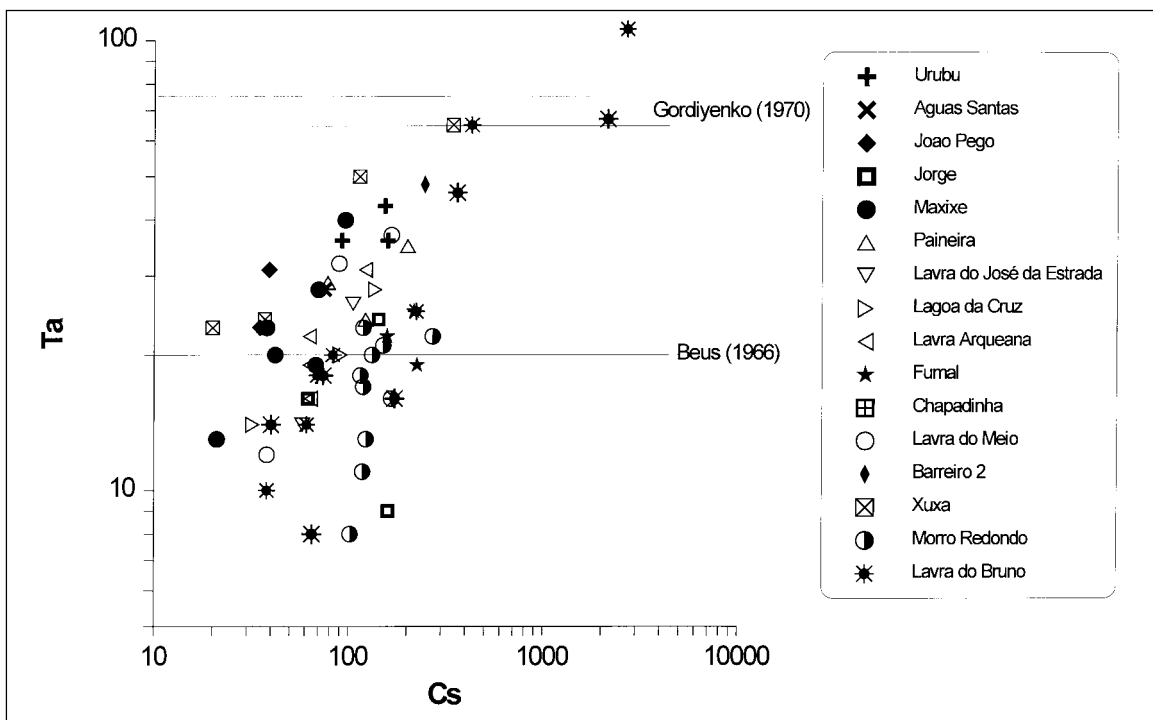


Abb. 7
Ta gegen Cs-Diagramm für Hellglimmer aus den Pegmatiten des Araçuaí-Distriktes. Eingezeichnet sind auch die Grenzen der beginnenden Ta-Verzerrung nach BEUS (1966) und GORDIYENKO (1970).

Der Zusammenhang, der zwischen dem Differentiationsverlauf innerhalb eines einzelnen Pegmatits und dem Ta-Gehalt der Hellglimmer besteht, kann auch bei ganzen Pegmatitdistrikten nachgewiesen werden. Die Abb. 7 zeigt das Cs- gegen Ta-Diagramm für die Hellglimmer der Pegmatite des gesamten Distriktes von Araçuaí. Man erkennt die Zunahme der Ta-Gehalte mit zunehmenden Cs-Gehalten.

Bedenkt man die sehr unterschiedlichen Preise für Ta und Nb, so ist eine industrielle Prospektion nur in bezug auf hochdifferenzierte und damit Ta reichere Pegmatite oder Pegmatitbereiche attraktiv. 1996 war der Preis für Nb-Metall zwischen 30 - 50 US \$/lb, wobei der für Ta-Pulver mit 100 – 180 US \$/lb dreimal so hoch lag (CUNNIGHAM, 1996).

Als Differentiationsindikator wird häufig auch das K/Cs-Verhältnis vorgeschlagen (GAUPP et al., 1984). Die Abb. 8 zeigt das Diagramm K/Cs gegen Ta der Hellglimmer des Pegmatits Lavra do Bruno. Dieses Diagramm weist natürlich – wegen der weitgehend konstanten K-Gehalte in den Hellglimmern – die selbe gute Korrelation wie das Cs- zu Ta-Diagramm auf. Mit steigender Fraktionierung, d. h. mit abnehmendem K/Cs-Verhältnis nimmt der Ta-Gehalt zu.

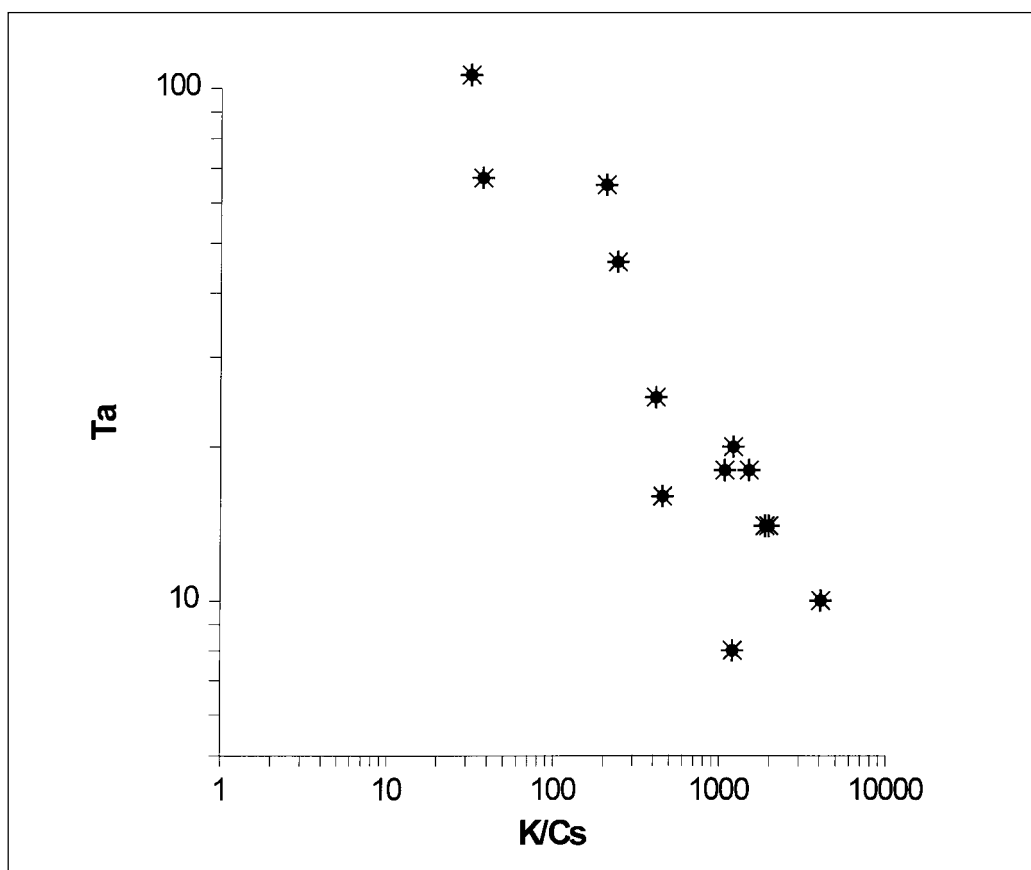


Abb. 8
K/Cs- gegen Ta-Diagramm für den Pegmatit Lavra do Bruno.

Erzgehaltsbestimmung

Die wirtschaftlich wichtige Frage nach der Erkennung des Beginns einer Vererzung mit Seltenmetallen aus dem Differentiationsgrad, wie er durch die chemische Zusammensetzung der Glimmer und der Alkalifeldspäte angezeigt wird, ist immer noch schwer zu beantworten. Nach GORDIYENKO (1970) bzw. BEUS (1966) beginnt die eigenständige Ta- (und Nb-) Vererzung mit Ta-Gehalten von ca. 70 bzw. 20 ppm Ta in den Hellglimmern. Wie aus Abb. 7 zu ersehen ist, liegt ein Teil der Pegmatite des Araçuaí Distriktes zumindest über der von BEUS (1966) angegebenen Grenze von 20 ppm, d. h. eine beginnende Ta Vererzung kann erwartet werden. Es war bisher allerdings nicht möglich, diesen Zusammenhang am Beispiel der Pegmatite von Araçuaí nachzuprüfen. Das Hauptproblem ist dabei die Definition der beginnenden Ta-Vererzung. Sind einige Tantalitkörnchen schon der Beginn einer Vererzung oder ist erst ein bestimmter Durchschnittsgehalt (cut off grade) im Haufwerk der Beginn einer Vererzung?

Angaben zu Produktion und Gehalten in der laufenden Förderung sind schwer zu erhalten, denn weder die Haufwerkmenge noch die Produktion werden bei den untersuchten Pegmatiten in der Regel ermittelt. Bei der Halbedel- und Edelsteinförderung ist das Problem der Ermittlung des Vererzungsgrades anhand der geochemischen Indikatoren noch schwieriger. Die Menge des gefördert Materials durch Garimpeirotätigkeit ist nie erfaßt worden, und bei den größeren Unternehmen ebenfalls nur sehr ungenau bekannt.

Ergebnis

Die bisherigen Untersuchungen zeigen, daß die Pegmatite des Araçuaí-Distriktes eine Klassifikation nach den klassischen Differentiations- und Vererzungsindikatoren erlauben. Diese stellen damit eine zuverlässige Prospektionshilfe dar, auch wenn ein Zusammenhang zwischen Vererzungsindikatoren und den Erzgehalten im Sinne von BEUS (1966) und GORDIYENKO (1970) aus Mangel an quantitativen Daten zur Prospektion nicht ermittelt werden konnte.

Danksagung: Die Untersuchungen sind Teil des von der Volkswagenstiftung unterstützten Forschungsprojektes: „Untersuchungen zur magmatischen und metamorphen Entwicklung sowie zum Vererzungspotential der Pegmatite der östlichen Pegmatitprovinz Brasiliens“, das als Partner in Brasilien die Professoren A. Horn und J.M. Correia Neves des „Departamento de Geociências der Universidade Federal de Minas Gerais“ in Belo Horizonte hat.

Wir danken Herrn A. Kunz und Dr. G. Huber von der Fa. Bayer in Rio de Janeiro für die Begleitung im Gelände und viele Diskussionen. Danken möchten wir auch der Fa. Arqueana (Araçuaí) für die Erlaubnis zum Besuch ihrer Gruben im Piauí-Tal.

Literature

- ALEKSANDROV, I.V., KOCHNOVA, L.N., LARICHEVA, O.O. & POMYTKINA, V.A. (1980): An experimental investigation of the conditions of rubidium accumulation in potassium feldspar. - *Geochem. Int.*, 17, 5, 132-139.
- ALEKSANDROV, I.V., KRASOV, A.M. & KOCHNOVA, L.N. (1985): The effects of potassium, sodium and fluorine on rock-forming mineral assemblages and the formation of tantaloniobate mineralization in rare-metal granite pegmatites. - *Geochem. Int.*, 22, 8, 85-94.
- BESWICK, A.E. (1973): An experimental study of alkali metal distributions in feldspars and micas. - *Geochim. Cosmochim. Acta*, 37, 183-208.
- BEUS, A.A. (1966): Distribution of tantalum and niobium in muscovites from granitic pegmatites. - *Geokhimiya*, 10, 1216-1220 (russ.).
- BEUS, A.A., BERENGILOVA, V.V., GRABOVSKAYA, L.I., KOCHMASOV, G.G., LEONT'YEVA, L.A. & SITNIN, A.A. (1968): Geochemical exploration for endogenic deposits of rare elements. - Nedra Moscow; eng. transl., Geol. Survey of Canada, Library, Ottawa, 263 pp.
- BRÖGGER, W.C., VOGT, T. & SCHETELIG, J. (1922): Die Mineralien der südnorwegischen Granitpegmatitgänge. - II. *Vidensk. Selsk. Skrifte, Math. naturv. Kl.*, 151 pp.
- CERNÝ, P. (1975): Alkali variations in pegmatitic beryl and their petrogenetic implications. - *N. Jb. Mineral. Abh.*, 123, 198-212.
- CERNÝ, P. (1982a): Anatomy and classification of granitic pegmatites. - In: CERNÝ, P. (ed): *Granitic pegmatites in science and industry*, MAC short course handbook 8, 1-39.
- CERNÝ, P. (1982b): Petrogenesis of granitic pegmatites. - In: CERNÝ, P. (ed): *Granitic pegmatites in science and industry*, MAC short course handbook 8, 405-461.
- CERNÝ, P. (1989): Characteristics of pegmatite deposits of tantalum. In: MÖLLER, P., CERNÝ, P. & SAUPÈ, F. (eds): *Lanthanides, tantalum and niobium*. - *Proceed. of a workshop*, Berlin, November 1986, Springer, New York, 195-239.
- CERNÝ, P. (1991a): Rare-element granitic pegmatites. Part I: Anatomy and internal evolution of pegmatite deposits. - *Geoscience Canada*, 18, 2, 49-67.
- CERNÝ, P. (1991b): Rare-element granitic pegmatites. Part II: Regional to global environments and petrogenesis. - *Geoscience Canada*, 18, 2, 68-81.
- CERNÝ, P. (1994): Evolution of feldspars in granitic pegmatites. In: Parson, I. (ed.): *Feldspars and their reactions*. - *Kluwer Acad. Publ.*, Dordrecht, 501-540.
- CERNÝ, P. & TRUEMAN, D.L. (1978): The distribution and petrogenesis of lithium pegmatites in the western Archean of Canada. - *Energy*, 3, 365-377.
- CERNÝ, P. & TURNOCK, A.C. (1971): Pegmatites in southeastern Manitoba. - *Geol. Ass. Can., Spec. Paper*, 9, 119-127.
- CERNÝ, P., TRUEMAN, D.L., ZIEHLKE, D.V., GOAD, B.E. & PAUL, B.J. (1981): The Cat Lake - Winnipeg River and the Wekusko Lake Pegmatite Fields, Manitoba. - *Manitoba Dep. of Energy and Mines, Min. Res. Div., Economic Geology Report ER 80-1*, 216 pp.
- CORREIA-NEVES, J.M., PEDROSA SOARES, A.C. & MARCIANO, V.R. (1986): A provincia pegmatítica oriental do Brasil a luz dos conhecimentos atuais. - *Revista Brasileira de Geociências*, 16, 1, 106-118.
- COSTA, A.G. (1987): Petrologie und geochemische Untersuchungen des Gneis-Migmatit-Gebietes von Itinga, Jequitinhonha-Tal, Nordöstliches Minas Gerais, Brasilien. - *Diss. TU Clausthal*, 287 pp.
- CUNNINGHAM, L.D. (1996): Mineral commodity summaries. - *US Geol. Surv.*, 48-49, 168-169.

- GAUPP, R., MÖLLER, P. & MORTEANI, G. (1984): Tantal-Pegmatite; Geologische, petrologische und geochemische Untersuchungen. - Monograph Series on Mineral Deposits, Borntraeger, Berlin, 124 pp.
- GERASIMOVSKIY, V.V. & ZALASHKOVA, N.Y. (1976): Geochemical features of potash feldspars from rare-metal granites. - *Geokhimiya*, 4, 520-526.
- GINSBURG, A.I., TIMOFEYEV, I.N. & FELDMANN, L.G. (1979): Principles of geology of the granitic pegmatites. - Nedra Moscow, 296 pp. (russ.).
- GORDIYENKO, V.V. (1970): Mineralogy, geochemistry and genesis of the spodumene pegmatites. - Nedra Leningrad, 237 pp. (russ.).
- GORDIYENKO, V.V. (1971): Concentration of Li, Rb and Cs in potash feldspar and muscovite as criteria for assessing the rare metal mineralization in granite pegmatites. - *Int. Geol. Review*, 13, 134-142.
- GORDIYENKO, V.V. (1976): Diagrams for prediction and evaluation of rare-metal mineralization in granitic pegmatite from variations in composition of potassic feldspars. - *Dokl. Akad. Nauk. SSSR*, 228, 149-151.
- GRICE, J.D., CERNÝ, P. & FERGUSON, R.B. (1972): The Tanco pegmatite at Vernic Lake, Manitoba. - II. Wodginite, tantalite, pseudo-ixiolite and related minerals. - *Can. Mineral.*, 11, 609-642.
- HEINRICH, E.W. (1953): Zoning in pegmatite districts. - *Am. Min.*, 38, 68-87.
- LONDON, D. (1990): Internal differentiation of rare-element pegmatites: A synthesis of recent research. - In: STEIN, H.J. & HANNAH, J.L. (eds): *Ore-bearing granite systems; petrogenesis and mineralizing processes*. - *Geol. Soc. Am., Spec. Paper*, 246, 35-50.
- LONDON, D. (1992): The application of experimental petrology to the genesis and crystallization of granitic pegmatites. - *Can. Mineral.*, 30, 499-540.
- MANUYLOVA, M.M., PETROV, L.L., RYBAKOVA, M.M., SOKOLOV, Y.M. & SHMAKIN, B.M. (1966): Distribution patterns of alkali elements and beryllium in minerals of pegmatites of the north Baykal pegmatite belt. - *Geochem. Int.*, 1966: 309-321.
- MARTIN, R.F. (1982): Quartz and the feldspars. - In: CERNÝ, P. (ed): *Granitic pegmatites in science and industry*, MAC short course handbook, 8, 41-62.
- MÖLLER, P. (1989): REE(Y), Nb, and Ta enrichment in pegmatites and carbonatite-alkalic rock complexes. - In: MÖLLER, P., CERNÝ, P., SAUPÈ, F. (eds): *Lanthanides, Tantalum and Niobium*. - *Proceedings of a workshop*, Berlin November 1986, Springer, New York, 103-144.
- PAIVA, G. DE (1946): *Províncias pegmatíticas do Brasil*. - Ministério da Agricultura Brasil, Boletim N. 78, Rio de Janeiro.
- PEDROSA SOARES, A.C. (1995): *Potencial aurífero do Vale do Araçuaí, MG: História da exploração, geologia e controle tectono-metamórfico*. - Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Tese de Doutorado No. 7, Brasília, 177p.
- PUTZER, H. (1976): *Metallogenetische Provinzen in Südamerika*. - E. Schweizerbart, Stuttgart, 316 pp.
- RINALDI, R., CERNÝ, P. & FERGUSON, R.B. (1972): The Tanco pegmatite at Vernic Lake, Manitoba. VI. Lithium-Rubidium-Cesium-micas. - *Can. Mineral.*, 11, 690-707.
- SÁ, J.H.S. da (1977): *Pegmatitos litínicos da região de Itinga-Araçuaí, Minas Gerais*. - Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, Tese de Doutorado, 112pp.
- SIGA, O. JR. (1986): *A evolução geocronológica da porção nordeste de Minas Gerais, com base em interpretações geocronológicas*. - Diss. de Mestrado, IG/USP, São Paulo, pp. 140.
- SMITH, J.V. (1974): *Feldspar minerals, Vol. 2, chemical and textural properties*. - Springer, New York, 690 pp.
- SCHOBENHAUS, C. & ALMEIDA, D.C. (1984): *A evolução da plataforma sul-americana no Brasil e suas principais concentrações minerais*. - In: SCHOBENHAUS, C., ALMEIDA, D.C., DERZE, G.R. & ASMUS, H.E. (eds.): *Geologia do Brasil*. - DNPM, Brasília, 9-56.

- SOLODOV, N.A. (1971): Scientific principles of prospective evaluation of rare-element pegmatites. - Publ. House Nauka Moscow, 591 pp. (russ.).
- TATARINOV, A.V. & SHMAKIN, B.M. (1976): East Siberian miarolitic pegmatites: average composition, trace element distributions, and geochemical differentiation. - *Geokhimiya*, 2, 272-282.
- TRUEMAN, D.L. & CERNÝ, P. (1982): Exploration for rare-element granitic pegmatites. - MAC short course handbook, 8, 463-493.
- TRUMBULL, R.B. (1995): Tin mineralization in the Archean Sincenci rare element pegmatite field, Kaapvaal craton, Swaziland. - *Econ. Geol.*, 90, 648-657.
- VARLAMOFF, N. (1968): Die Beryll- und Lithiumpegmatite Ruandas, des Kongo und Madagaskars. - *Erzmetall*, 21, 261-269.
- VARLAMOFF, N. (1972): Central and West African rare-metal granitic pegmatites, related aplites, quartz veins and mineral deposits. - *Mineral. Deposita*, 7, 202-216.