

**EIN HERKUNFTSNACHWEIS FÜR NIOB-TANTALERZE
AM BEISPIEL AFRIKANISCHER SELTEN-ELEMENT-PEGMATITE**

von

**Frank Melcher¹, Torsten Graupner¹, Maria Sitnikova¹,
Friedhelm Henjes-Kunst¹, Thomas Oberthür¹, Hans-Eike Gäbler¹, Andreas Bahr¹,
Axel Gerdes², Helene Brätz³ & Gerd Rantitsch⁴**

¹Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
Stilleweg 2, D-30655 Hannover, Deutschland

²Institut für Geowissenschaften, Petrologie und Geochemie
Universität Frankfurt, Altenhöferallee 1, D-60438 Frankfurt am Main, Deutschland

³GeoZentrum Nordbayern
Universität Erlangen-Nürnberg, Schlossgarten 5, D-95054 Erlangen, Deutschland

⁴Department für Angewandte Geowissenschaften und Geophysik
Montanuniversität Leoben, Peter-Tunner-Straße 5, A-8700 Leoben, Österreich

Kurzfassung

Etwa seit dem Jahr 2000 hat sich der afrikanische Kontinent zu einem Hauptexporteur von „Coltan“ (heterogenes Konzentrat, Niob-Tantalierz) entwickelt. Vor allem in der Demokratischen Republik Kongo wird ein Zusammenhang von Rohstoffexporten (Zinn, Tantal, Wolfram, Gold, Diamanten) und fortgesetzten bewaffneten Konflikten vermutet. Tantalierz werden derzeit in vielen Ländern Afrikas im artisanalen Bergbau aus Selten-Element-Pegmatiten und deren Verwitterungsprodukten (Seifen) gewonnen.

Im Auftrag des Bundesministeriums für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) der Bundesrepublik Deutschland prüft die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) derzeit, ob die Herkunft von Coltanerzen mit Hilfe von Laborverfahren eindeutig durch eine „Coltan-Signatur“ belegt werden kann. Hierzu werden Referenzproben bekannter Lokalitäten mit verschiedenen Verfahren analysiert, und in Pilotstudien ausgewählte Abbaugebiete in Afrika detailliert untersucht. Die gesamte, in Coltankonzentraten gespeicherte mineralogische, chemische und geochronologische Information wird zur Unterscheidung von Erzprovinzen und Lagerstätten besonders im zentral- und ostafrikanischen Raum genutzt.

Der erste Schritt der „Coltan-Signatur“ ist die Bestimmung des Mineralbildungsalters (U-Pb Isotopdatierung), das eine Einteilung in eine von fünf afrikanischen „Altersprovinzen“ ermöglicht. Zweiter Schritt ist die Bestimmung der mineralogischen Parameter, wie Mineralbestand, Korngrößenverteilung, und Verwachsungen. Coltankonzentrate bestehen in der Regel aus Mineralen der Columbitgruppe mit unterschiedlichen Beimengungen, deren Zusammensetzungen und Verwachsungsgrad fallweise bereits diagnostisch für ein Herkunftsgebiet sind.

Abschließend werden die Konzentrationen der Haupt- und Nebenelemente in einer repräsentativen Population von Einzelkörnern bestimmt. Columbit-Gruppen-Minerale enthalten Neben- und Spurenelemente, z.B. Seltene-Erdelemente, die potenziell für einen Herkunftsnachweis geeignet sind. Die Bewertung aller gemessenen Parameter kann durch mathematische Verfahren objektiviert und validiert werden.

Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass durch die Altersbestimmung verschiedene Coltanprovinzen unterschieden werden können. Lokale Unterschiede in der Mineralogie und Haupt- und Spurenelementzusammensetzung der Haupterzphasen ermöglichen die Abgrenzung einzelner Herkunftsgebiete innerhalb einer Altersprovinz.

Abstract

Since about the year 2000, the African continent has developed into a major exporter of “coltan” – heterogeneous concentrates of niobium-tantalum ore. A probable link between raw material exports (i.e. tin, tantalum, tungsten, gold and diamonds) and continuing violent conflicts, especially in the Democratic Republic of the Congo, is widely discussed. In many African countries, tantalum ore is mined from rare-element pegmatites and their weathering products (placers) by mainly artisanal, small-scale mining operations.

On behalf of the German Federal Ministry for Economic Cooperation and Development (BMZ), the Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR) commenced a pilot project on the analytical fingerprint of coltan ores. Reference samples from known locations are being studied using a variety of methods, followed by regional pilot studies in selected mining areas in Africa. The combined mineralogical, geochemical and geochronological information is used to discriminate between ore provinces, even down to the deposit scale, especially in east and central Africa.

In a first step, determination of mineral formation ages using the U-Pb isotope system traces the origin of a concentrate to one out of five “age provinces” known from African tantalum-bearing pegmatites. In a second step, mineralogical parameters such as modal mineralogy, grain size distribution and intergrowth relationships are determined. Coltan is a mixture of a large number of minerals, commonly dominated by columbite-tantalite group minerals. In cases, their compositions and textural relations are considered diagnostic proofs of origin. In a final step, the concentrations of major and trace elements are measured in a representative number of columbite-tantalite grains from a given sample. Some elements, e.g. the rare earth elements, are suitable for fingerprinting. Mathematical methods are applied to classify samples objectively and to validate the results.

So far, our data show that gross discrimination of “coltan provinces” is possible using age determination. Mineralogical and geochemical attributes of coltan concentrates and columbite-tantalite group minerals further allow distinction of single deposits within certain age provinces.

EINLEITUNG

In den verschiedensten Sparten werden analytische Methoden für Herkunftsnachweise erfolgreich angewandt – bisher allerdings noch nicht zur Überprüfung der Herkunft und Handelswege mineralischer/metallischer Rohstoffe. In jüngster Zeit bemühen sich Forschergruppen weltweit, analytische Herkunftsnachweise für mineralische Rohstoffe zu entwickeln. So hat die russische Firma Norilsk Nickel ein System zur Identifikation von platinhaltigen Erzen und Zwischenprodukten entwickelt (PERELYGIN et al., 2008). Weitere analytische Nachweise werden derzeit von südafrikanischen Gruppen für Diamanten und Gold, und von Belgien für Kobalt-Kupfererze entwickelt. Das „Canada Centre for Mineral and Energy Technology (CANMET)“ prüfte die Möglichkeit eines mineralogisch-geochemischen Herkunftsnachweises für Coltan (in Zentralafrika gebräuchlicher Handelsname für Columbit-Tantalitkonzentrate, die zwischen 10 und 70% Ta₂O₅ enthalten können) aus dem Kahuzi-Biega Nationalpark in der Demokratischen Republik Kongo (DR Kongo; „Durban Process“). Die Studie basierte auf sieben Proben, was als unzureichend anzusehen ist (POIRIER & LASTRA, 2002). Auch für Edelsteine, z.B. Smaragd und Rubin, wurden bereits bestimmte Parameter auf ihre Eignung als Tracer getestet (Isotope, Spurenelementgehalte, physikalische Eigenschaften wie Lumineszenz).

Stark steigende Nachfrage führte im Jahr 2000 zu einem drastischen Anstieg des Weltmarktpreises für Tantal, einem für die Elektronikindustrie enorm wichtig gewordenen Metall. Etwa 50-60% der Produktion werden für die Erzeugung miniaturisierter Elektrolytkondensatoren verwendet, die z.B. in Autos, Mobiltelefonen und Laptop-Computern in großen Stückzahlen eingebaut sind. Seit vielen Jahren werden etwa 70-80% der Tantalproduktion aus Pegmatit-Lagerstätten in Westaustralien, Brasilien und Kanada gedeckt. Der Anteil von Tantalerzkonzentraten aus Afrika am Welthandelsvolumen beträgt seit dem Jahr 2000 etwa 20-30%. Auf der Hauptversammlung des „Tantalum-Niobium International Study Center (TIC)“ im Oktober 2008 wurde eine Schätzung vorgestellt, nach der der afrikanische Marktanteil im Jahr 2008 bereits 38% betrug (Tabelle 1). Durch die Schließungen der weltgrößten Tantalmine, Wodgina (Westaustralien), Ende 2008, und der kanadischen Lagerstätte Tanco am Bernic Lake (Manitoba) Mitte 2009 wird ein Anstieg des afrikanischen Anteils auf über 50% erwartet.

Ta ₂ O ₅ (t)	2000	2008 Schätzung	2009 Prognose
Australien	586	590	0
Südamerika	209	227	341
Nordamerika	68	68	68
Europa	45	54	54
Afrika	599	738	865
Asien	227	254	272
Summe	1734	1932	1600

Tabelle 1

Bergbauproduktion von Tantal (als Ta₂O₅) nach Angaben von D. HENDERSON (T.I.C. General Assembly, 2008).

Die hohen Gewinne, die der Abbau von Columbit-Tantalit durch den „Coltan-Boom“ ab 2000 einbrachte, machten sich Rebellen Gruppen in den Ostprovinzen der DR Kongo zu nutze. Der illegale Abbau und Handel von Coltan, wie auch von Zinnerz (Zinnstein), Gold und Diamanten, trug so zur Fortsetzung bewaffneter Konflikte in der DR Kongo und in den Nachbarstaaten bei. Exportstatistiken zeigen, dass zumindest zwischen 2001 und 2004 Coltan aus den Kivu-Provinzen über benachbarte afrikanische Länder in die Verbraucherländer exportiert wurde, denn die exportierten Mengen lagen in einzelnen Jahren weit über den in diesen Ländern produzierten. Eine aktuelle Studie geht davon aus, dass über Ruanda im Jahr 2007 insgesamt 1105 Tonnen Coltan (als Konzentrat) gehandelt wurden; davon stammen lediglich 490 Tonnen aus ruandischer Produktion (GARRETT & MITCHELL, 2009).

Die Expertengruppe des Sicherheitsrats der Vereinten Nationen für die DR Kongo regte die Einrichtung eines Zertifizierungssystems an, das die Herkunft mineralischer Rohstoffe belegen kann (z.B. UNITED NATIONS SECURITY COUNCIL, 2002, 2008). Als Kontrollinstrument zur Überwachung der Handelsströme wurde ein analytischer Herkunftsnachweis vorgeschlagen, der es ermöglicht, an einer Stichprobe des gehandelten Rohstoffs eine Überprüfung durchzuführen. Dieser Herkunftsnachweis unterscheidet sich von bona fide Zertifizierungssystemen wie dem Kimberley-Prozess, der die Herkunft eines Diamanten durch die Nachvollziehbarkeit des Handelswegs belegt.

Coltan wurde für die Entwicklung eines Herkunftsnachweises ausgewählt, da das vergleichsweise hohe Verhältnis von Wert zu Volumen Coltan im Gegensatz zu beispielsweise Kupfererz für den illegalen Handel attraktiv macht. Weiterhin kann es aufgrund seiner Eigenschaften (hohe Dichte, Korngröße, Farbe) leicht im artisanalen Bergbau gewonnen werden. Coltan wird also auch zukünftig ein wichtiger Rohstoff für Zentralafrika sein.

Das Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) der Bundesrepublik Deutschland beauftragte 2006 die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), die analytische Nachweisbarkeit der Herkunft von Coltan zu prüfen. Mit Hilfe von Laborverfahren soll die Herkunft von Coltanerzen eindeutig belegt und damit eine „Coltan-Signatur“ identifiziert werden. Ein positives Ergebnis könnte für ein Zertifizierungssystem genutzt werden. Der Herkunftsnachweis von Coltan ist in zweierlei Hinsicht eine Herausforderung:

- Handelsware sind Erzkonzentrate - Gemenge von schwarzen, dichten Mineralen die von artisanalen Bergleuten handverlesen werden. Hauptbestandteil sind tantal- und niobreiche Minerale der Columbit-Tantalit-Gruppe (CGM).
- Columbit-Tantalit-Lagerstätten in granitischen *Pegmatiten* der „Selten-Elementklasse“ (s.u.) sind häufig zониert, also nicht homogen. Chemisch-mineralogische Eigenschaften können daher innerhalb einer Lagerstätte stark variieren. Aus diesen Gründen ist ein einzelner Columbit-Kristall nicht unbedingt repräsentativ für die gesamte Lagerstätte.

Es gilt also, Eigenschaften zu finden, die sich zwischen verschiedenen Abbaugebieten signifikant stärker unterscheiden als innerhalb desselben Abbaugebiets. Weiterhin ist wichtig, dass die Repräsentativität von verfügbaren Erzkonzentraten in manchen Fällen eingeschränkt ist. Waschproben, die zum Beispiel in Ruanda durch „ground sluicing“ am Fuß von freigelegten Pegmatitkörpern gewonnen werden, sind am ehesten repräsentativ für einen Erzkörper.

Auch Konzentrate aus einer Aufbereitung vor Ort sollten die Variabilität der abgebauten Lagerstätte widerspiegeln. Problematisch sind Waschproben aus alluvialen Seifen, da verschiedene Liefergebiete möglich sind, sowie Konzentrate, die aus kleinen, lokalen Abbauen in größeren Erzkörpern gewonnen wurden, oder die lokal gemischt wurden.

Die vorgestellte Herangehensweise eines analytischen Herkunftsnachweises verfolgt einen zwei-stufigen Ansatz: Das „Screening“ datiert Referenzproben aus bekannten Coltan-Bergbaugebieten und untersucht die chemische und die mineralogische Zusammensetzung. Es dient zur Identifizierung von Eigenschaften, die deutliche regionale Unterschiede zeigen. Die Analysenergebnisse bilden dann die Basis einer Datenbank aller bekannten Coltanvorkommen. In einem zweiten Schritt werden Bergbaugebiete mit vorwiegend artisanalem Bergbau in Ruanda, Mosambik, Äthiopien und Namibia detailliert untersucht. Die kontrollierte Probennahme schließt Mischungen aus verschiedenen Abbauorten aus. Detailuntersuchungen prüfen die Variabilität der Eigenschaften innerhalb einer Lagerstätte und erkunden, ob eine kleinräumige Unterscheidung (einzelne Minen oder gar Erzkörper) der Herkunft innerhalb geologischer Provinzen möglich ist.

TANTAL-NIOB IN PEGMATITEN

Tantal-Nioberzkonzentrate (Coltan)

Tantal- und Nioberze finden sich vor allem in spezialisierten Graniten und deren Pegmatiten, sogenannten „rare metal granites“ (Selten-Metall-Granite). Häufigste Erzmineralphasen sind die Oxide der Columbit-Tantalitgruppe (daher der Begriff Coltan), orthorhombische Mischkristalle der Reihe $[(\text{Fe},\text{Mn})(\text{Nb},\text{Ta})_2\text{O}_6]$. Sie sind durch hohe Dichten ($5,3\text{-}8,1\text{ g/cm}^3$), schwarze Farbe, deutliche Spaltbarkeit nach (100) und verbreitete Zwillingsbildung nach (021) gekennzeichnet. Columbit-Tantalitphasen (columbite-tantalite group minerals = CGM) werden je nach Zusammensetzung mit den Suffixen (-Fe) und (-Mn) belegt; die in der Literatur häufig verwendeten Begriffe Manganocolumbit, Manganotantalit, Ferrocolumbit und Ferrotantalit sollten nicht länger verwendet werden (BURKE, 2008). Die CGM sind häufig vergesellschaftet mit weiteren Ta-Nb-führenden Oxiden, wie Tapiolit, Wodginit, Ixiolith, Fergusonit, Samarskit, Euxenit, Gliedern der Pyrochlorgruppe – vor allem Mikrolith, mit Oxiden wie Zinnstein (Cassiterit), Wolframit, Scheelit, Ilmenit, Rutil, Magnetit, aber auch mit Monazit, Zirkon, Thorit, Sulfiden, gediegen Wismut, u.a (Tabelle 2). Schlecht aufbereitete Konzentrate enthalten Silikatphasen wie Albit, Kalifeldspat, Quarz, aber auch Granat, Spodumen, Beryll, Turmalin, u.a..

Selten-Elementpegmatite

Die Selten-Elementpegmatite („rare-element pegmatites“) bilden eine Klasse von Granitpegmatiten, die sich durch signifikante, aber sehr variable Konzentrationen von seltenen Elementen auszeichnet (ČERNÝ & ERCIT, 2005). Sie werden petrogenetisch in LCT-(Lithium-Cäsium-Tantal)- und NYF-(Niob-Yttrium-Fluor)-Familien untergliedert.

In der LCT-Familie werden vier Typen unterschieden, u.a. basierend auf den Gehalten an auftretenden Feldspäten und Glimmern (Tabelle 3): Beryll-, komplexe, Albit-Spodumen- und Albit-Typen. ČERNÝ (1991) unterscheidet weiterhin sechs Untertypen. Es gibt viele Übergänge zwischen ihnen und die Unterteilung ist nicht immer befriedigend (SIMMONS & WEBBER, 2008).

Die NYF-Pegmatitfamilie enthält höhere Konzentrationen an Y und den Seltenen-Erd-Elementen (SEE). Die Definition eines eigenen SEE-Typs innerhalb der Selten-Element-Klasse, der sich durch hohe SEE, U, Th, Be, Nb > Ta und F-Gehalte auszeichnet, geht auf ERCIT (2005) zurück. In NYF-Pegmatiten finden sich keine wirtschaftlich interessanten Tantalanreicherungen.

Die Zusammensetzung von Silikaten und Oxiden in Pegmatiten folgt häufig Fraktionierungstrends. Diese werden beispielsweise in Muskoviten durch ihre Cs-Konzentrationen und K/Rb-Verhältnisse, in Zirkon durch Zr/Hf-Verhältnisse, in Beryll durch La/Li-Verhältnisse und Cs-Gehalte, und in CGM durch Mn/Fe- und Ta/Nb-Verhältnisse wiedergegeben (vgl. SIMMONS & WEBBER, 2008).

CGM in verschiedenen Pegmatittypen und Untertypen sind durch weite chemische Variationen gekennzeichnet. ČERNÝ & ERCIT (1989) zeigten, dass die F-Konzentrationen in Pegmatiten die Mn/Fe-Verhältnisse der Columbite kontrollieren. Dies wurde durch experimentelle Untersuchungen bestätigt (LINNEN & CUNEY, 2005). In Abbildung 1 werden „Entwicklungstrends“ von CGM und Tapiolit in verschiedenen Typen der LCT-Pegmatitfamilie modellhaft dargestellt.

	Mineralbezeichnung
Ökonomisch wichtige Tantal-Erzminerale	Columbit-(Fe) [(Fe,Mn)(Nb,Ta) ₂ O ₆]
	Columbit-(Mn) [(Mn,Fe)(Nb,Ta) ₂ O ₆]
	Tantalit-(Fe) [(Fe,Mn)(Ta,Nb) ₂ O ₆]
	Tantalit-(Mn) [(Mn,Fe)(Ta,Nb) ₂ O ₆]
	Tapiolit-(Fe) [FeTa ₂ O ₆]
	Mikrolith [(Ca,Na) ₂ Ta ₂ O ₆ (O,OH,F)]
Untergeordnet oder nur lokal häufig auftretende Tantal-Minerale	Wodginit [MnSnTa ₂ O ₈]
	Ixiolith [(Ta,Nb,Sn,Ti,Fe,Mn) ₂ O ₄]
	Uranmikrolith [(Ca,Na,U,Ce,Y)(Ta,Nb,Ti) ₂ (O,OH) ₇]
	Bismutotantalit [Bi(Nb,Ta)O ₄]
	Stibiotantalit [Sb(Nb,Ta)O ₄]
	Aeschynit [(Ce,Th,Ca)(Nb,Ti,Ta) ₂ O ₆]
	Fergusonit [Y(Nb,Ta)O ₄]
	Samarskit [(Y,U,Ca)(Nb,Fe) ₂ (O,OH) ₆]
	Euxenit [(Y,U,Th,Ca)(Nb,Ta,Ti) ₂ O ₆]
Sehr häufige Begleitminerale (sehr stark aufbereitungsabhängig)	Cassiterit [SnO ₂]
	Hämatit [α-Fe ₂ O ₃] / Magnetit [Fe ₃ O ₄]
	Ilmenit [FeTiO ₃]
	Monazit [CePO ₄]
	Rutil [TiO ₂]
	Zirkon [ZrSiO ₄]
	Apatit [Ca ₅ (F/(PO ₄) ₃)]
Lokal häufige Begleitminerale	Wolframit [(Fe,Mn)WO ₄]
	Granat (z.B. Almandin [Fe ₃ Al ₂ (SiO ₄) ₃], Spessartin [Mn ₃ Al ₂ (SiO ₄) ₃]
	Beryll [Al ₂ Be ₃ (Si ₆ O ₁₈)]
	Turmalin

Tabelle 2

Wichtige Tantal- und Niobminerale, sowie Nebengemengteile in „Coltan“-Erzkonzentraten.

Pegmatit-Klasse	Typische Nebenelemente	Pegmatit-Familie	Pegmatit-Typ (Feldspat- und Glimmergehalte)	Pegmatit-Subtyp	Typische Minerale	
Abyssal	U, Th, Zr, Nb, Ti, SEE, Mo					
Muskovit	Li, Be, Y, SEE, Ti, U, Th, Nb>Ta					
Selten-Element	Li, Rb, Cs, Be, Ga, Nb < > Ta, Sn, Hf, B, P, F	LCT	Beryll (Kf > Ab; Ms > Bi)	Beryll-Columbit	Beryll, Columbit-Tantalit	
			Komplex (Selten-Element) (Kf - Ab; Ms - Lpd)	Beryll-Columbit-Phosphat	Beryll, Columbit-Tantalit, Triplit, Triphylin	
				Spodumen	Spodumen, Beryll, Tantalit	
				Petalit	Petalit, Beryll, Tantalit	
				Lepidolith	Lepidolith, Topas, Beryll, Mikrolith	
			Elbait	Elbait, Mikrolith		
			Amblygonit	Amblygonit, Beryll, Tantalit		
			Albit-Spodumen (Ab > Kf; (Ms))		Spodumen	Spodumen
			Albit (Ab >> Kf; (Ms, Lpd))			Tantalit, Beryll
			Seltene-Erd-Elemente (Kf > Plg bis Ab; Bi \geq Ms)		Allanit-Monazit	Allanit, Monazit
		Gadolinit	Gadolinit			
Miarolithisch	Be, Y, SEE, Ti, U, Th, Zr, Nb>Ta, F	NYF				
Kf - Kalifeldspat; Plg - Plagioklas; Ab - Albit; Bi - Biotit; Ms - Muskovit; Lpd - Lepidolith						

Tabelle 3

Klassifikation von Selten-Elementpegmatiten, modifiziert nach ČERNÝ & ERCIT (2005) und SIMMONS & WEBBER (2008).

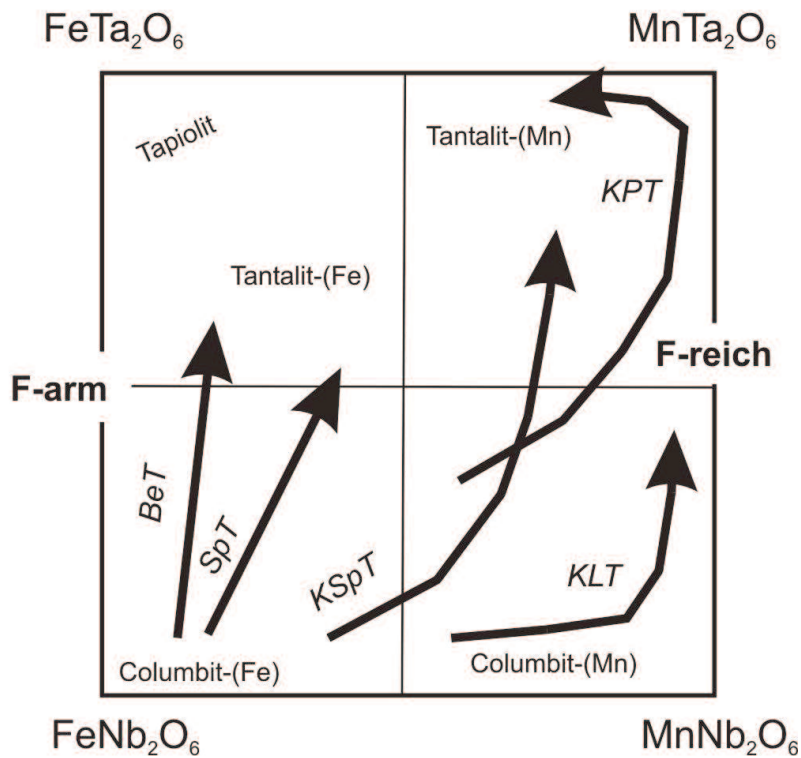


Abb. 1
 Fraktionierungstrends von Columbit
 Tantalit in Selten-Element-Pegma-
 titen (nach ČERNÝ, 1989).
 BeT = Beryll-Typ;
 SpT = Spodumen-Typ;
 KSpT = komplexer Spodumen-Typ;
 KLT = komplexer Lepidolith-Typ;
 KPT = komplexer Petalit-Typ.

TANTALVORKOMMEN IN AFRIKA

Der afrikanische Kontinent ist reich an pegmatitischen Tantal-Nioblagerstätten (VON KNORRING, 1970; VON KNORRING & CONDLIFFE, 1987; VON KNORRING & FADIPE, 1981; FETHERSTON, 2004). In den zentralafrikanischen Ländern der DR Kongo, Ruanda, Uganda und Burundi wird seit über 40 Jahren Tantal gewonnen. Weitere Tantal-Nioberschmelzprovinzen finden sich in Ägypten, Äthiopien, Somalia, Madagaskar, Mosambik, Namibia, Nigeria, Simbabwe, Südafrika und in Westafrika. Dabei wird Tantalerz oder „Coltan“ überwiegend im informellen, artisanalen sogenannten „Kleinbergbau“ gewonnen.

Fast alle afrikanischen Tantalagerstätten sind mit Selten-Metallgraniten und granitischen Selten-Elementpegmatiten assoziiert. Coltan wird meistens in deren Verwitterungszonen, oder in eluvialen und alluvialen Seifenlagerstätten gewonnen. Überregional können fünf Epochen von Tantal-Niobmineralisationen unterschieden werden (Abb. 2): (1) archaisch, älter als 2500 Mio. Jahre (z.B. Simbabwe, Südafrika, Sierra Leone); (2) paläoproterozoisch, ca. 2000 Mio. Jahre (z.B. Eburnean in Westafrika, Ubendian in Zentralafrika); (3) früh-neoproterozoisch, 900-1000 Mio. Jahre (z.B. kibarische und Namaqua Orogenesen); (4) spät-neoproterozoisch bis altpaläozoisch, 450 bis 600 Mio. Jahre (panafrikanisch, z.B. Mosambik, Äthiopien, Damara Orogen in Namibia) und (5) mesozoisch (jurassische Ringkomplexe des Jos Plateaus in Nigeria). Die im Rahmen der Studie untersuchten Tantalprovinzen werden im Folgenden kurz vorgestellt und sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

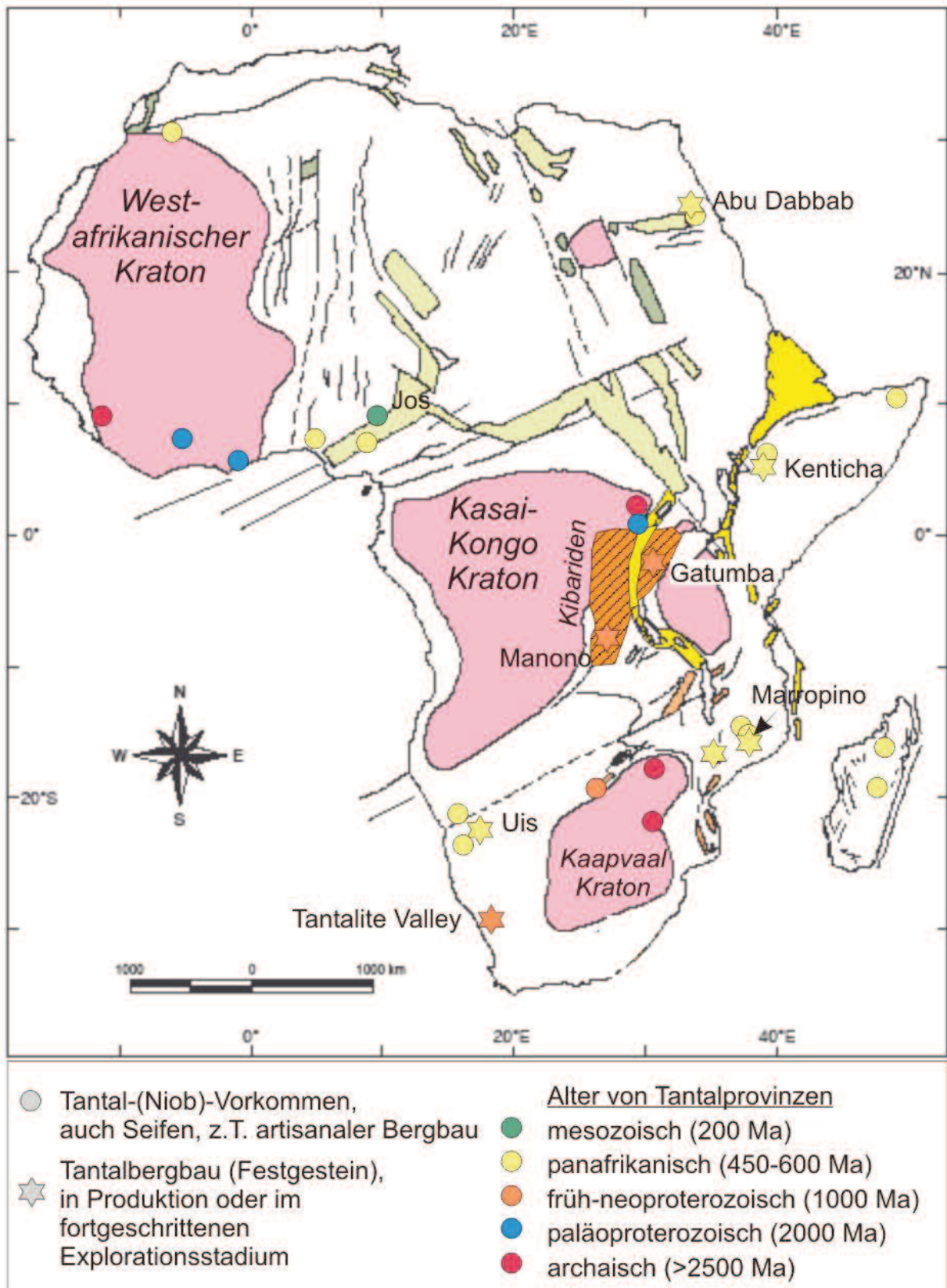


Abb. 2

Tantal-(Niob)-Lagerstätten und Vorkommen in Afrika (Kartengrundlage nach SCHLÜTER, 2006).

rosa = Kratone älter als 2000 Ma; dunkelgrün = paläozoische Riftstrukturen; hellgrün = mesozoische Riftstrukturen; gelb = känozoische Riftstrukturen); „Altersprovinzen“ sind farblich gekennzeichnet.

Collan Provinz	Kibarden ¹	DRC-CAR Kraton ²	Alto Ligonha ³	Adola Belt ⁴	Eastern Desert ⁵	Tantalite Valley ⁶	Damará ⁷	Jos Plateau ⁸	"Older Granites" ^{9,10}	Birimian ¹⁰	Simbaabwe Kraton ¹¹
Länder	DRC, Ruanda, Burundi, Uganda	DRC (Ituri)	Mosambik	Äthiopien	Ägypten	Namibia	Namibia	Nigeria	Nigeria	Ghana, Cote d'Ivoire	Simbaabwe
Länge	26°-30° E	28-29° E	37-39°E	29° E	34°35' E	18°30' E	14°50' E	9° E	2-10° E	1°W	31-32° E
Breite	1°00'-8°30' S	1°N	15-17°S	5°30' N	25°19' N	28°46' S	21°15' S	10°N	5-12° N	6°N	17-20° S
Lokalitäten (Beispiele)	Manono, Pangl, Shabunda, Nembu, Gatumba	Mambasa, Lubero	Marropino, Morrua, Mutala, Mulane	Kenticha, Bupo, Shuni Hill	Abu Dabbab, Nuweibi	Homestead, White City, Lepidolite	Uis, Rubikon, Heilikon	Jos, Bauchi, Rirwai Komplex	Jjero/Ikoro, Iregun, Egbe, Wamba, Jemaa, Gurum	Kokobin, Issia	Bikila, Benson
Mineralisations-Typ	LCT-Pegmatite	unbekannt	LCT-Pegmatite	LCT-Pegmatite	Selten-Metall-Granite	LCT-Pegmatite	LCT-Pegmatite	Ringkomplexe, Blotitgranit	LCT-Pegmatite	LCT-Pegmatite	LCT-Pegmatite
Alter der Intrusionen	kibarisches, spät-orogen	unbekannt	panafrikanisch, post-orogen/ anorogen	panafrikanisch, post-orogen	panafrikanisch	kibarisches, spät-orogen	panafrikanisch, post-orogen	Jura, anorogen	panafrikanisch, post-orogen	paläoproterozoisch, spät-orogen	archaisch
Nebengesteine	Metasedimente, Metabasite, Granite	Gneise, Amphibolite, Granite	Metabasite, Metasedimente (Lurio Belt)	Ultrabasite, Metasedimente	Ultrabasite, Metabasite, Metasedimente	Metabasite (Gabbro), Metasedimente	Metasedimente	Migmatit-Gneiskomplex, Metasedimente, Granite	Migmatit-Gneiskomplex, Metasedimente, Granite	Metasedimente, Amphibolite, Gneise, Granite	Metasedimente, Amphibolite, Gneise, Granite
Alter der Nebengesteine	mesoproterozoisch (kibarisches)	archaisch, alproterozoisch	mesoproterozoisch	neoproterozoisch	neoproterozoisch	paläo- bis mesoproterozoisch	neoproterozoisch	archaisch bis paläoproterozoisch	archaisch bis paläoproterozoisch	paläoproterozoisch (Birimian)	archaisch
Produktion	>600 t Konzentrate (Gesamtregion, 2008)	gering (Seifen)	70 t Ta ₂ O ₅ (Marropino, 2007); Mocuba mine seit 2008; artisanaler Abbau	81 t Ta ₂ O ₅ (Kenticha, 2007); geringerer artisanaler Abbau	Produktionsbeginn für 2010 geplant	derzeit keine	historisch bedeutend; derzeit geringe artisanale Tätigkeit	historisch bedeutend; derzeit geringe artisanale Tätigkeit	historisch bedeutend; derzeit geringe artisanale Tätigkeit	geringe artisanale Tätigkeit	historisch bedeutend; derzeit geringe artisanale Tätigkeit

generelle Referenzen: FETHERSTON, 2004; MILESI et al., 2006; PETTERS, 1991; SCHWELA, 2007; V. KNORRING & CONDLIFFE, 1987; V. KNORRING & FADIPE, 1987; WRIGHT et al., 1985

¹, ANGERMEIER et al., 1974; BASSOT & MORIO, 1989; DEWAELE et al., 2008; LEHMANN et al., 2008; POHL, 1987, 1994; VARLAMOFF, 1972;

², ANGERMEIER et al., 1974; CARTE GEOLOGIQUE ET MINIERE DE LA REPUBLIQUE DEMOCRATIQUE DU CONGO (2005); ³, CRONWRIGHT, 2005; VON KNORRING & CONDLIFFE, 1987

⁴, KÜSTER, 2008; KÜSTER et al., 2009; ⁵, KÜSTER, 2008; ⁶, DIEHL, 1992; ⁷, DIEHL, 1992; ⁸, IXER et al., 1987; MÜCKE & NEUMANN, 2006; OBOMHENSE, 2007

⁹, MATHEIS, 1987; MATHEIS & CAEN-VACHETTE, 1983; SCHAETZL, 1971; ¹⁰, ALLOU et al., 2005; BERING, 1976; ¹¹, MARTIN, 1964; VON KNORRING & CONDLIFFE, 1987; WATSON, 1962

Tabelle 4

Wichtige afrikanische Tantalzprovinzen.

Archaische und paläoproterozoische Vorkommen

Westafrika (Leo- und Man-Shield)

Kleine alluviale Lagerstätten von Columbit und Cassiterit, die sich von spätorogenen Graniten (>2500 Ma) ableiten lassen, sind aus dem archaischen Man-Shield in Sierra Leone bekannt (WRIGHT et al., 1985).

Paläoproterozoische (Birimian, ca. 2000-2100 Mio. Jahre) Pegmatite in Burkina Faso, SW Mali, SW Niger, Ghana und der Elfenbeinküste führen gelegentlich Sn, Nb, Ta, Be und Li, z.B. in Issia (Elfenbeinküste; ALLOU et al., 2005) und bei Oda (Süd-Ghana; BERING, 1976). Die Tantalproduktion dieser Länder ist gering.

DRC-CAR-Kraton

Der archaische DRC-CAR-Kraton (Democratic Republic of Congo - Central African Republic, auch bekannt als „Haut-Zaïre“ oder „West-Nilian“; MILÉSI et al., 2006) wird aus Granitgneiskomplexen aufgebaut (2900-3100 Mio. Jahre), die von späten Pegmatitgängen durchschlagen, und von mesoarchaischen Grünsteingürteln („Kibalien“) überlagert werden. Zwei Phasen von Deformation und Granitintrusion bei 2900-2700 und 2500-2400 Mio. Jahren sind bekannt, gefolgt von granulitfazieller Überprägung panafrikanischen Alters (570 Mio. Jahre). Der Einfluss der paläoproterozoischen ubendischen Orogenese (ca. 2100-2000 Mio. Jahre), die beispielsweise in den Ruwenzori Mountains (Uganda) dominiert (z.B. PETTERS, 1991), auf den Südrand des DRC-CAR-Kratons ist unsicher.

In kontaktmetamorph veränderten Serizitschiefern aufsitzende E-W-streichende pegmatitische Ganglagerstätten bei Etaetu und Mambasa (Provinz Ituri) führen Columbit-Tantalit, Cassiterit und Wolframit (ANGERMEIER et al., 1974; CARTE GÉOLOGIQUE ET MINIÈRE DE LA RÉPUBLIQUE DÉMOCRATIQUE DU CONGO, 2005). Seifenvorkommen wurden bis in die 1950er Jahre abgebaut. Heutiges Interesse in der Region gilt bevorzugt den Goldlagerstätten.

Simbabwe-Kraton

In Simbabwe wird Tantalierz schon lange im artisanalen Bergbau gewonnen (FETHERSTON, 2004). Nach Angaben des USGS wurden in den Jahren 2002 bis 2004 bedeutende Mengen exportiert (äquivalent über 160 Tonnen Ta₂O₅), während „normale“ Jahresproduktionen derzeit bei 10 Tonnen zu liegen scheinen. Produziert wird vor allem bei Sutswe (z.B. Benson Mine), Rusambo und Shamva im Nordosten des Landes. Die bedeutenden LCT-Pegmatitlagerstätten bei Bikita im Victoria Schist Belt im Süden von Simbabwe sind 2650 Mio. Jahre alt (MARTIN, 1964); neben Lithium-Mineralen und Pollucit wurden Tantalit-(Mn), Simpsonit, Mikrolith, Euxenit, Fergusonit, Cassiterit u.a. beschrieben. Von 1916 bis 1950 wurden in Bikita 160 Tonnen Columbit-Tantalit produziert.

Früh-neoproterozoische Vorkommen

Kibariden (DR Kongo, Ruanda, Burundi, Uganda)

Der NNE-SSW streichende Gürtel der Kibariden zieht sich von Uganda über Ruanda bis in die Katanga-Region der DR Kongo (POHL, 1987, 1994; DEWAELE et al., 2008). Er besteht im Wesentlichen aus paläo- und mesoproterozoischen klastischen Sedimenten, die von drei Granitgenerationen intrudiert werden.

Die ältesten, etwa 1380 Mio. Jahre alten Granite sind nicht mineralisiert, während die jüngsten, etwa 900 bis 1000 Mio. Jahre alten sogenannten „Zinngranite“ (auch als G4-Granite bekannt) die vielleicht größte Tantalprovinz der Welt bilden, zusammen mit bedeutenden Vorkommen an Zinn, Wolfram, Seltenen Erdelementen und Gold. Die Mineralisationen sind an meist kleine Pegmatitkörper, Greisen und Quarzgänge gebunden, die in bestimmtem Abstand zu den Zinngraniten auftreten (VARLAMOFF, 1972). Die Selten-Elementpegmatite gehören zur LCT-Familie nach ČERNÝ (1991) und intrudieren Metasedimente, basische Intrusivgesteine und ältere Granite. Viele Pegmatite führen Zinn und Niob-Tantalminerale, manche auch Lithium, Beryllium und komplexe Phosphate (z.B. LEHMANN et al., 2008). Cassiterit tritt auch in hydrothermalen Quarzgängen auf, die jedoch kein Tantal führen, lokal und genetisch aber mit Pegmatiten assoziiert sind. Die Quarz-Wolframitgänge sind gewöhnlich Zinn- und Tantal-frei. Der Zusammenhang der verschiedenen Mineralisationstypen ist Gegenstand intensiver Forschung (z.B. DEWAELE et al., 2008).

Erwähnenswert ist das Auftreten von Karbonatitkörpern mit signifikanten Niobreserven im zentralafrikanischen Riftsystem (Lueshe, Bingo). Diese Körper sind offensichtlich jünger als die Kibariden, jedoch sind bisherige Datierungen unbefriedigend (ca. 800-830 Mio. Jahre mit Rb/Sr, KAMPUNZU et al., 1998; 516 ± 26 Mio. Jahre mit K/Ar, WOOLLEY, 2001). Der bedeutendste Körper ist Lueshe (Nord-Kivu) mit 180 Mio. Tonnen Reserven (bei 1% Pyrochlor). In Zusammenhang mit diesen Karbonatiten werden mit Alkaliintrusionen verknüpfte, an zonierte Granitpegmatite gebundene, Sn-W-REE-Ta-Zr Mineralisationen in einem N-S streichenden neoproterozoischen Grabensystem westlich des Kivu-Sees gesehen (Bishasha, Mumba, Numbi; MILÉSI et al. (2006)).

In der DR Kongo werden Zinn-Tantalagerstätten seit etwa 1910 abgebaut (ANGERMEIER et al., 1974). Die Einzellagerstätte Manono-Kitoto in Katanga ist mit etwa 100 Millionen Tonnen Reserven einer der größten Pegmatitkörper der Erde (BASSOT & MORIO, 1989). Seit dem Ausbruch des Bürgerkriegs 1998 wird die Produktion in den rohstoffreichen Kivu-Provinzen westlich des Kivu-Sees durch bewaffnete Gruppen kontrolliert. Kürzlich wurden Bergbaulizenzen an ausländische Investoren vergeben, und mit einem geregelteren Abbau ist nach Beendigung der Kämpfe zu rechnen. Im Jahr 2008 wurden nach Angaben der kongolesischen Bergbaubehörde 524 Tonnen Coltan exportiert, entsprechend einem Zuwachs von 33 Prozent gegenüber 2007.

In Ruanda gehören viele Bergbaukonzessionen noch der staatlichen REDEMI (Régie d'Exploitation et de Développement des Mines), aber es wurden viele Gebiete mit artisanalem Bergbau an ausländische Unternehmen verpachtet. Zwischen 1958 und 2005 wurden in Ruanda etwa 60000 Tonnen Cassiterit und 5000 Tonnen Coltan produziert (BRGM, 1987; USGS Mineral Commodity Summaries 1990-2005). Die derzeitige Jahresproduktion liegt laut USGS bei 190 Tonnen Konzentrat (USGS Mineral Commodity Summaries), nach GARRETT & MITCHELL (2009) jedoch bei 490 Tonnen. Aus Burundi (113 Tonnen Ta₂O₅ im Zeitraum 1997-2006) und Uganda (28 Tonnen Ta₂O₅ im Zeitraum 2000-2006) werden weit geringere Produktionszahlen gemeldet.

Namaqualand-Komplex

Der Orange-River-Pegmatitgürtel, der sich von der nordwestlichen Kapprovinz Südafrikas bis nach Süd-Namibia erstreckt, ist die wohl ausgedehnteste Pegmatitprovinz Afrikas. Der aus basischen magmatischen Gesteinen (Olivingabbro) und Gneisen aufgebaute mesoproterozoische Tantalite Valley Basic Complex ist Teil des hochgradig metamorphen Namaqualand-Komplexes

in Südafrika und Namibia. Pegmatite der LCT-Familie treten an prominenten Scherzonen als bis zu 1 km lange und über 10 m mächtige, häufig symmetrisch zonierte Körper auf. Sie bestehen aus Quarz, Kalifeldspat, Albit, Muskovit, sowie Spodumen, Lepidolith, Amblygonit, Beryll, Wismut-Mineralen, Tantalphasen und diversen Phosphaten (DIEHL, 1992). Die Intrusionsalter werden mit 880 bis 930 Ma angegeben. Einige Pegmatite des Tantalite Valley Complex in Süd-Namibia wurden bis in die 1970er Jahre, und dann wieder Anfang dieses Jahrhunderts abgebaut. Reserven werden zu 0,74 Mio. t mit 430 ppm Ta₂O₅ angegeben (FETHERSTON, 2004).

Weitere früh-neoproterozoische Vorkommen

Paläoproterozoische (ca. 2100 Mio. Jahre) Paragneise des Kamativi Schist Belt (Teil des Magondi Belts; PETERS, 1991) im Westen von Simbabwe wurden von Sn-, Ta-, W- und Amblygonit-führenden Pegmatiten intrudiert (WATSON, 1962; RIJKS & VAN DER VEEN, 1972). Diese Pegmatite sind wahrscheinlich kibarischen Alters (990 ± 15 Mio. Jahre). Die Kalinda und Kamativi Minen waren mit Unterbrechungen von 1937 bis 1994 in Betrieb und produzierten zuletzt (1994) 1200 Tonnen Sn- und 60 Tonnen Ta-Konzentrate (FETHERSTON, 2004). Seither sind dort artisanale Bergleute aktiv.

Panafrikanische (spät-neoproterozoische) Vorkommen

Panafrikanische Gürtel streichen von der Eastern Desert in Ägypten über Äthiopien nach Mosambik und Madagaskar (Mosambik Belt). Pegmatitprovinzen ähnlichen Alters finden sich auch im Damara Orogen des zentralen Namibia und in den „Older Granites“ von Nigeria.

Äthiopien

Aus dem Arabisch-Nubischen Schild sind Tantalmineralisationen sowohl in peraluminösen Selten-Metallgraniten und Selten-Elementpegmatiten (z.B. Kenticha, Äthiopien; Abu Dabbab und Nuweibi, Ägypten; Majayahan, Somalia; Umm al Suquian, Saudi-Arabien), als auch in peralkalinen Selten-Metallgraniten bekannt (z.B. Ghurayyah, Saudi-Arabien). Sie bildeten sich während einer post-akkretionären magmatischen Phase, die von etwa 610 Mio. Jahren im Norden bis 530 Mio. Jahren im Süden andauerte (KÜSTER, 2008).

Die Lagerstätten Abu Dabbab (40 Mio. t Erz zu 252 g/t Ta₂O₅) und Nuweibi (98 Mio. t Erz zu 143 g/t Ta₂O₅) werden derzeit intensiv durch die Firma Gippsland (Australien) exploriert (SCHWELA, 2007).

Die gesamte äthiopische Tantalproduktion von jährlich 50-80 Tonnen Tantalmetall aus etwa 120 Tonnen Konzentrat mit 55-60% Ta₂O₅ stammt aus der Kenticha Mine im Süden des Landes, die derzeit durch die staatliche Ethiopian Mineral Development Share Company (EMDSC) abgebaut wird. Der Pegmatit von Kenticha, mit Reserven von 2500 t Ta₂O₅ bei einem Durchschnittsgehalt von 150 g/t Ta₂O₅ im unverwitterten Gestein, gehört zu einer bedeutenden Pegmatitprovinz im Adola Belt im südlichen Abschnitt des Arabisch-Nubischen Schildes (KÜSTER et al., 2009). Der vorwiegend aus neoproterozoischen Granitoiden und Ophiolithen (900-700 Mio. Jahre) aufgebaute Adola Belt weist kollisionalen Magmatismus zwischen 700 und 550 Mio. Jahren auf. Pegmatite intrudierten häufig entlang regionaler Scherzonen, vorzugsweise in ultramafische und mafische Nebengesteine. Die Pegmatite wurden mittels der U-Pb-Methode an Tantalit auf 530 Mio. Jahre datiert.

Es handelt sich um zonierte oder lagig aufgebaute Pegmatite der LCT-Familie (komplexer Spodumen-Subtyp nach ČERNÝ, 1991), die neben Tantalit-(Mn) und Spodumen untergeordnet Ixiolith, Amblygonit und Beryll führen, während Zinnstein meist fehlt.

Mosambik

Eine bedeutende Tantalprovinz findet sich in der Alto-Ligonha-Region in NE Mosambik. Bereits seit den 1950er Jahren wurden hier Edelsteine, Industriemineralien und seltene Metalle (SEE, Be, Nb-Ta, Li, U-Th) aus mindestens 100 bekannten Selten-Elementpegmatiten gewonnen (LÄCHELT, 2004). Der tiefgründig verwitterte, zonierte Marropino LCT-Pegmatit (2850 t Ta₂O₅ Reserven, 288 g/t Ta₂O₅) intrudierte vor 480 Mio. Jahren in mafische Gneise und Schiefer der mittelproterozoischen Morrua Formation (Lurio Belt). Der Haupterkörper erstreckt sich über 1 km streichender Länge (ENE-WSE) und ist bis zu 80 m mächtig. Im Jahr 2006 wurden durch die Firma NOVENTA 81 Tonnen Ta₂O₅ produziert (SCHWELA, 2007). Erzkonzentrate von Marropino sind durch hohe Konzentrationen an radiogenen Elementen und Seltenen Erd-elementen charakterisiert, die zum Teil an Monazit und Zirkon gebunden sind, aber auch an tantalhaltige Minerale wie Bismutotantalit, Samarskit und Euxenit. Bei Morrua, 50 km nördlich von Marropino, wurden von 1957 bis 1979 neben Spodumen, Beryll und Gold auch 1900 Tonnen Tantalkonzentrate gewonnen (CRONWRIGHT, 2005). Durch Explorationsbohrungen sind 6 Pegmatitkörper mit >3 m Mächtigkeit bekannt, die sich bis zu 1 km im Streichen verfolgen lassen; die Reserven werden mit 3950 Tonnen Ta₂O₅ angegeben. Neunzig Kilometer nördlich von Marropino sind bedeutende Reserven an die bis zu 50 m mächtigen zonierten Pegmatitkörper von Mutala (Munhamola, Moneia) gebunden, die derzeit von „garimpeiros“ abgebaut werden.

Damara-Orogen (Namibia)

Selten-Elementgranite in der zentralen Zone des Damara-Orogens in Namibia führen Lithium-, Beryllium-, Zinn- und Niob-Tantal-Mineralisationen. Die „Zinnpegmatite“ von Uis sind die historisch bedeutendsten Tantallieferanten Namibias. Die Ressourcen werden mit 7,2 Mio. t (zu 500 ppm Ta₂O₅) und 2 Mio. t (zu 240 ppm Ta₂O₅) angegeben (FETHERSTON, 2004). Derzeit wird in kleinem Maßstab im Kleinbergbau produziert. Zinn-führende Pegmatite konzentrieren sich in vier Gürteln, von denen der NE-streichende, 100 km lange und bis zu 8 km breite Cape Cross-Uis Belt die größte Bedeutung hat. Die meisten Pegmatite sind nicht zoniert, bis zu 50 m mächtig, und führen Cassiterit, Columbit-Tantalit, Ixiolith, Tapiolit und Wodginit. In den häufig spektakulär zonierten Pegmatiten der Gegend um Usakos und Karibib wurde lange Zeit Bergbau auf Amblygonit-Montebrazit, Lepidolith, Petalit, Pollucit, Beryll, Nb-Ta-Mineralien, Wismut, Feldspat, Glimmer, Quarz sowie Edel- und Halbedelsteine betrieben. Die größeren Lithium-Pegmatite von Helikon und Rubikon führten geringe Mengen an Nb-Ta-Mineralien. Benachbarte Satellitengänge bei Rubikon sind jedoch außergewöhnlich Ta-reich. Tantalminerale wurden aus vielen Pegmatiten in Karibib beschrieben (z.B. VON KNORRING & FADIPE, 1981).

Nigeria

Der präkambrische Grundgebirgskomplex in Nigeria wurde vor allem im SW des Landes von panafrikanischen orogenen Graniten („Older Granites“) und post-kinematischen, spät-tektonischen teilweise Sn-Nb-Ta-führenden Quarz-Mikroclin-Muskovit-Pegmatiten intrudiert (ca. 562-534 Mio. Jahre; MATHEIS & CAEN-VACHETTE, 1983; KÜSTER, 1990; AKINTOLA & ADEKEYE, 2008).

Die Produktionszahlen stehen deutlich hinter denen der Sn-Nb-Ta-Seifen vom Jos-Plateau zurück (s.u.). In der Gegend von Ijero wurden von 1944 bis 1970 produziert: 247 t Cassiterit, 13 t Columbit, 5 t Tantalit; in Egbe werden zwischen 1950 und 1970 117 t Cassiterit und 39 t Columbit-Tantalit verzeichnet (SCHAETZL, 1971).

Weitere neoproterozoische Vorkommen

In Madagaskar, das als südliche Fortsetzung des Mosambikgürtels angesehen werden kann, werden syntektonische (750-600 Mio. Jahre) und post-tektonische Pegmatite (600-480 Mio. Jahre) unterschieden (PETTERS, 1991). Die jüngeren Pegmatite gehören häufig dem SEE-reichen Typ der Selten-Elementpegmatitklasse an (ERCIT, 2005) und führen, neben Beryll und verschiedenen Edelsteinen, seltene U-SEE-Ta-Nb-Oxide (VON KNORRING & CONDLIFFE, 1987). Auffallend sind hohe Konzentrationen an Scandium; Zinnstein scheint weitgehend zu fehlen. Aus den vergangenen 15 Jahren wird keine Produktion von Ta-Nb-Erzen ausgewiesen; allerdings wurden bedeutende Mengen an Edel- und Halbedelsteinen (v.a. Turmalin, Saphir, Rubin) und Beryll gewonnen (USGS Minerals Yearbook, Madagascar 2006).

Panafrikanische Selten-Elementpegmatite finden sich auch im Anti-Atlas von Marokko und im Hoggar (Algerien).

Mesozoische Vorkommen

Jos Plateau, Nigeria

Im Bergland von Jos in Zentralnigeria sind etwa 50 granitische Ringkomplexe bekannt. Diese jurassischen sogenannten „Younger Granites“ (213-141 Mio. Jahre) intrudieren einen präkambrischen Grundgebirgskomplex aus Gneisen und Migmatiten (WRIGHT et al., 1985; MÜCKE & NEUMANN, 2006). Biotitgranite stellen die jüngsten Vertreter der jüngeren Granite dar; sie enthalten häufig Cassiterit und in vergreisten Zonen als Nebengemengteil Columbit. In Seifen sind Cassiterit und Columbit mit Rutil, Ilmenit, Zirkon, Monazit, Thorit, seltener Magnetit und Chromit vergesellschaftet. Alluviale Zinnseifenlagerstätten wurden von 1913 bis Ende der 80er Jahre des vorigen Jahrhunderts abgebaut. Als Vorräte werden 140.000 t Cassiterit und 70.000 t Columbit angegeben. In den jüngeren bis rezenten Seifen variiert das Columbit-Cassiteritverhältnis zwischen 1:20 und 1:3, während Columbit in den älteren Seifen fehlt (WRIGHT et al., 1985). Im artisanalen Bergbau werden heute signifikante Mengen Zinn- und Columbitkonzentrate gewonnen (OBOMHENSE, 2007). Die Columbitproduktion in Nigeria bewegte sich bis in den 1970er Jahren im Bereich von 1000-2000 Jahrestonnen. Nach Angabe des USGS wurden von 2002 bis 2006 insgesamt 838 Tonnen Columbitkonzentrat mit einem durchschnittlichen Gehalt von 5-10 % Ta₂O₅ exportiert (USGS MINERAL COMMODITY SUMMARIES, USGS MINERAL YEARBOOK). Diese Angaben scheinen die aktuelle Situation im Kleinbergbau deutlich zu unterschätzen (OBOMHENSE, 2007).

METHODE DES HERKUNFTSNACHWEISES

Vorraussetzungen

Ein Herkunftsnachweis von Erzmineralkonzentraten kann nur dann gelingen, wenn messbare und für eine Diskrimination geeignete Parameter vorliegen. Diese Parameter werden für jede Problemstellung variieren. Im vorliegenden Fall sollen illegal abgebaute und gehandelte Erzmineralkonzentrate von solchen unterschieden werden, die legal produziert wurden (Positivnachweis). Einige Fakten dazu:

1. Die Heterogenität von Selten-Elementpegmatiten manifestiert sich im komplexen Zonenaufbau vieler Erzkörper, variierenden Mineralparagenesen und stark variierenden Mineralzusammensetzungen.
2. Tantal-Erzkonzentrate stellen Mischungen dar die, über die Zonen von Pegmatiten übergreifend, das zum Abbaupunkt geförderte Erz widerspiegeln. Daher repräsentieren sie im Unterschied zu gewonnenen Stückproben weite Bereiche der geochemisch-mineralogischen Variabilität eines Erzkörpers.
3. In den Handel kommende „Coltan“-Konzentrate sind in der Regel nicht chemisch vorbehandelt. Dadurch sind ursprüngliche Mineralzusammensetzungen und Verwachsungen erhalten, jedoch nicht unbedingt die Kornverbände und Korngrößen.
4. Die mineralogische Zusammensetzung von Coltan-Konzentraten variiert infolge aufbereitungstechnischer Maßnahmen. Im artisanalen Bergbau Zentralafrikas werden meist nur einfache gravimetrische Klassierungsmethoden (Windsichtung, Waschpfannen, „sluice boxes“, Handsortierung) eingesetzt, gelegentlich kombiniert mit Magnetscheidung. Dadurch enthalten als „Coltan“ gehandelte Schwermineralmischkonzentrate variable Anteile an anderen Schwermineralen und gesteinsbildenden Silikaten.
5. Die Konzentrate werden in kleinen Mengen (einige Kilogramm pro Bergmann und Woche) gewonnen und über eine komplexe Kette von Zwischenhändlern (négociants) in Sammelstellen (comptoirs) gelagert, oft vermischt und von dort exportiert (hunderte Kilogramm bis wenige Tonnen).
6. Die Probennahme in einer Lagerstätte muss nachvollziehbar die Größe eines vererzten und im Abbau befindlichen Areals abbilden. Ein Abbauareal kann auch mehrere individuelle Pegmatitkörper umfassen. Bei weiterem Abbaufortschritt ist eine ergänzende (neue) Beprobung notwendig. Bei einer Beprobung bereits gewonnener Konzentrate (z.B. aus Sammelstellen) ist die verlässliche Kenntnis zur genauen Herkunft zwingend erforderlich.
7. Um der Problematik um vermischte Konzentrate zu entgehen, kann ein Herkunftsnachweis nur dann erfolgreich sein, wenn er an Einzelkörnern der Wertminerale durchgeführt wird. Die Variation bestimmter Parameter in vielen Einzelkörnern eines Konzentrats reflektiert die Variation innerhalb des abgebauten Erzkörpers.
8. Eine große Bedeutung kommt einem geeigneten Beprobungsprotokoll zu.

Mögliche Analysenparameter für einen Herkunftsnachweis sollten bestimmte Kriterien erfüllen: (1) sie sollten eine Unterscheidung zwischen Konzentratproben verschiedener Herkunft ermöglichen; (2) sie sollten möglichst rasch, sicher und, letztendlich, auch preiswert an vielen Körnern bestimmbar sein.

In Erzkonzentraten können prinzipiell mineralogische, chemische, kristallographische, oder physikalische Eigenschaften an Einzelkörnern bestimmt werden. Die Auswahl der Analysenparameter erfolgt für jeden Rohstoff gesondert, jedoch stets basierend auf der verfügbaren technischen Ausstattung. Es macht zum Beispiel in der Praxis wenig Sinn, einen Herkunftsnachweis nur mittels aufwändig zu bestimmender Parameter durchzuführen. Für Coltan wurden durch Literaturstudium und umfangreiche analytische Tests drei Parameter identifiziert, die in ihrer Kombination zu einer hinlänglichen Diskrimination führen: (1) das radiometrische Alter der Tantalminerale, (2) die Mineralphasenzusammensetzung der Konzentrate, und (3) die chemische Zusammensetzung der Tantalminerale, einschließlich der Bestimmung von Haupt-, Neben- und Spurenelementen sowie stabilen Isotopenzusammensetzungen an Einzelkörnern. Durch Kombination von mikroanalytischen Methoden basierend auf Elektronenstrahl- und Laseranregung können alle Parameter in kurzer Zeit bestimmt und für jedes Konzentrat ein umfangreicher Datensatz erzeugt werden.

Prinzipiell ist die Bestimmung weiterer Parameter zur Diskrimination hilfreich. So wurden mittels Röntgendiffraktion und Rietveldverfeinerung kristallographische Gitterparameter von Tantaloxiden bestimmt, Sauerstoffisotopenzusammensetzungen analysiert, und erste Versuche zur Messung der Hafniumisotopie unternommen. Diese Messungen sind jedoch noch keine Routine und werden nachfolgend nicht näher behandelt.

Untersuchungsmethoden

Tantalerzproben von bekannten, gut charakterisierten Tantal-führenden Pegmatiten und Graniten wurden schrittweise untersucht (Abb. 3). Dabei wurden drei unterschiedliche Vorgangsweisen verwendet, die sowohl unterschiedlichen Probentypen Rechnung tragen (z.B. Einzelkristalle vs. Konzentrate), als auch die optimale analytische Methode identifizieren.

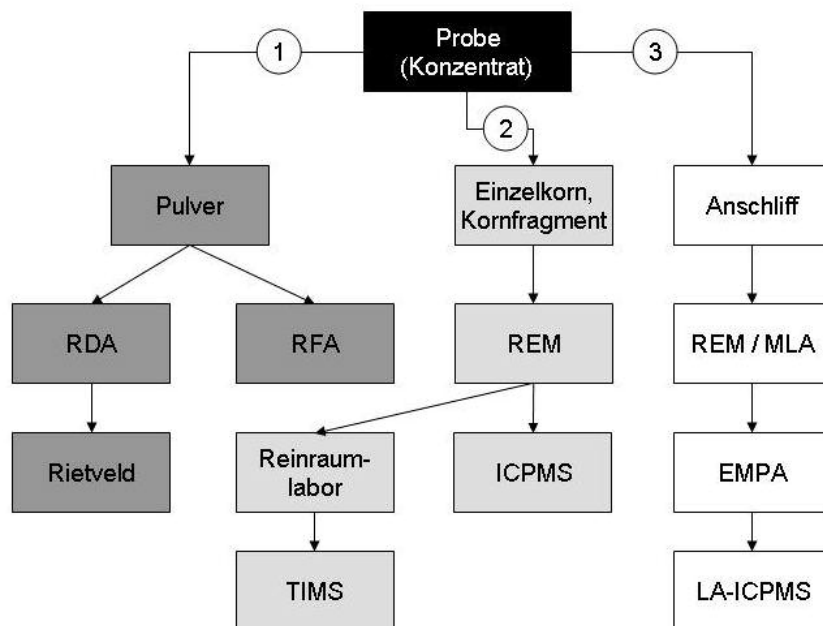


Abb. 3
Drei methodische Ansätze zur Charakterisierung von Tantal-Niobaten. EMPA, Elektronenstrahlmikrosondenanalyse; (LA)-ICPMS, (Laser Ablation) - induktiv gekoppeltes Plasma Massenspektrometrie; MLA, Mineral Liberation Analysis; RDA, Röntgendiffraktionsanalyse; REM, Rasterelektronenmikroskopie; RFA, Röntgenfluoreszenzanalyse; TIMS, Thermionenmassenspektrometrie.

In einem ersten Ansatz wurden Konzentratproben als homogenisierte Schmelzpillen mittels wellenlängendispersiver Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA; PANalytical Axios und Philipps PW 2400) auf ihre Haupt- und wichtigsten Spurenelementkonzentrationen, sowie mittels Röntgendiffraktion (Philipps PW 3710) auf ihren Mineralbestand untersucht. Die Verwendung von Rietveld-Verfeinerungsprogrammen ermöglichte eine Quantifizierung des Mineralbestandes, sowie eine Abschätzung der Zusammensetzung (i.w. Fe-Mn-Verteilung) der Columbit-Tantalminerale. Aus physikalischen Gründen (Absorption) ist diese Methode jedoch problematisch und führte bisher zu keinen befriedigenden Ergebnissen.

In einem zweiten Ansatz wurden Einzelkörner von Columbit-Tantalit und anderer Ta-haltiger Minerale mittels optischer und rasterelektronenmikroskopischer (REM) Ansprache separiert und zur spektrometrischen Analyse aufgeschlossen. Zur Analyse der Haupt- und Spurenelemente wurden die Körner in einer Mischung aus 48% HF und 65% HNO₃ gelöst und mittels ICP-OES (Hauptelemente) und Sektorfeld-ICP-MS (Spurenelemente) analysiert. Alle wichtigen Spurenelemente, inklusive Li, Be und den SEE, die mittels RFA nicht bestimmt werden können, werden mit sehr guten Nachweisgrenzen bestimmt; zusätzlich kann ohne großen Aufwand auch ein U-Pb Modellalter errechnet werden, das in vielen Fällen bereits eine grobe Zuordnung der Probe in eine „Altersprovinz“ zulässt. Mehrere Einzelkörner (5-10) einer Probe können mit vertretbarem Zeitaufwand charakterisiert werden, und somit sind Aussagen zur Variabilität innerhalb einer Lokalität möglich. Heterogenitäten der Körner wie interner Zonarbau oder eingeschlossene Mineralphasen können jedoch nicht erkannt werden.

Im weiteren Analysengang wurden mit dem REM charakterisierte Körner fragmentiert, chemisch aufgelöst und auf ihre U-Pb-Verhältnisse am Thermionenmassenspektrometer (TIMS, ThermoFinnigan Triton der BGR, Hannover und MM354, University of Toronto) untersucht. Die Methoden zur Trennung von U und Pb wurden nach ROMER & WRIGHT (1992) und ROMER & SMEDS (1994) adaptiert. Die Daten wurden mittels Isoplot (LUDWIG, 2003) ausgewertet. Die U-Pb Datierungsmethode kann sehr präzise und konkordante Mineralalter liefern. In der Praxis häufig auftretende diskordante und komplexe Alter sind auf Alterationsphänomene, die zu Bleiverlust führen können, auf die Bildung von Pb-reichen Sekundärphasen wie Plumbomikrolith, auf Einschlussphasen mit gestörtem U-Pb-System, und auf die Bildung von Fe-Mn-Nanooxiden in metamikten Domänen von U- und Th-reichen CGM (ROMER et al. 1996, ROMER et al., 2007) zurückzuführen. Um solche Phänomene zu minimieren, wurden an der BGR Fragmente (Masse je 1-4 mg) von Einzelkörnern einer Probe analysiert, die vorher in mehreren Schritten mit warmer verdünnter HF, HCl und HNO₃ gelaugt wurden (Multikornmethode). In Toronto wurden sehr kleine Kornfragmente (<100 µm, <<1 mg) untersucht, die mechanisch abradiert, aber nicht gelaugt wurden (Einzelkornmethode). Bedingt durch die geschilderten Probleme und die aufwändige Probenvorbereitung ist die Datierung von Columbit-Tantalit mittels TIMS zwar die genaueste, aber auch die zeitaufwändigste und teuerste Methode der Altersdatierung von Einzelkörnern.

In einem dritten Ansatz wurden Anschliffpräparate von Einzelkristallen und Konzentraten hergestellt. Die Konzentrate wurden auffichtmikroskopisch voruntersucht sowie mittels eines REM (Quanta 600 FEG von FEI) und der Software Mineral Liberation Analysis (MLA, JKTech, Brisbane) quantitativ auf ihren Mineralbestand analysiert. Die Software ermöglicht eine automatisierte Messung der gesamten Probenoberfläche in relativ kurzer Zeit.

Auf der Basis eines Mosaikbildes aus Rückstreuelektronenbildern, energiedispersiven Röntgenspektren (EDAX 32), sowie dem Vergleich der Spektren mit einer eigens programmierten Standarddatenbank können Partikel und Körner klassifiziert und vermessen werden. Das Ergebnis wird in einer Datenbank gespeichert und enthält Informationen wie Modalbestand, Korngröße, Verwachsungsgrad, u.v.m.

Die chemische Zusammensetzung der Tantal-Niobphasen und weiterer aussagekräftiger Minerale wurde mittels wellenlängendispersiver Röntgenspektrometrie an einer Elektronenstrahlmikrosonde (CAMECA SX 100) ermittelt. Im Routinebetrieb werden Nachweisgrenzen von 200 ppm für schwere Elemente wie U, Pb, Zr, Hf und Sn erreicht. Pro Konzentrat wurden 100 bis 300 Messpunkte festgelegt, um die chemische Variabilität sowohl des Konzentrates, als auch der häufig extrem zonierten Einzelkörner zu dokumentieren (Abb. 4).

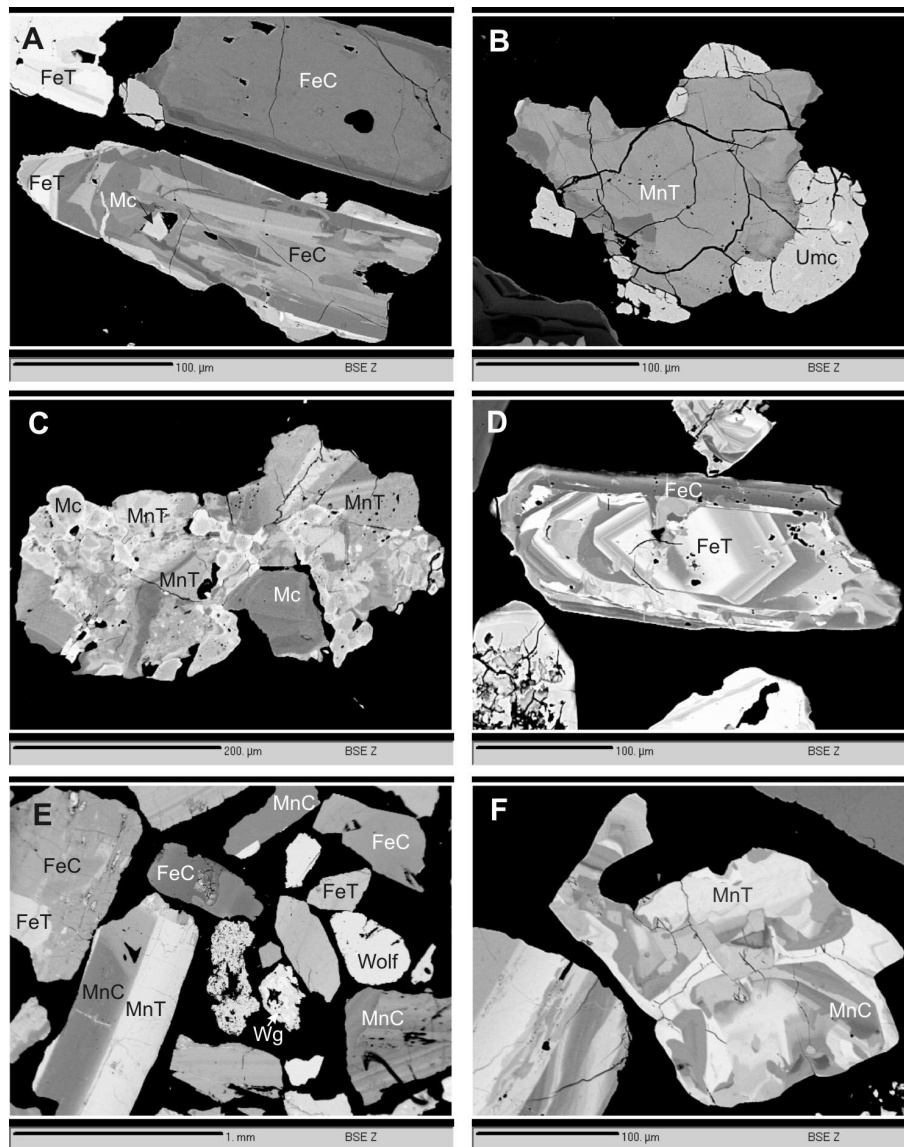


Abb. 4

Rückstreuelektronenbilder von Nb-Ta-Oxidphasen. (A) Gatumba, Ruanda; (B) Ruhanga, Ruanda; (C) Nyarigamba, Ruanda; (D) Nyambisindu, Ruanda; (E) Yubili Mine, Kivu, DR Kongo; (F) Manono, Katanga, DR Kongo.

Abkürzungen: FeC, Columbit-(Fe); FeT, Tantalit-(Fe); MnC, Columbit-(Mn); MnT, Tantalit-(Mn); Mc, Mikrolith; Umc, Uranmikrolith; Wg, Wodginit; Wolf, Wolframit.

Lokalität Land	unbekannt Madagaskar	Cyubi Ruanda	Bauchi Nigeria	Mumba Masisi DRC	Liha DRC	Lenda Lubero DRC	DRC C101 C114 AS7816r	Enehe DRC C101 AS7816r
Collan Nr. AS Nr.	C139 AS7962	C137 AS7958	C148 AS7971r	C113 AS7828r	C100 AS7815r	C114 AS7829	C101 AS7816r	C101 AS7816r
Korn Nr. Analyse Nr. Mineral	MW (120) Columbit-(Fe)	2 Taploiti	88 219 220	26 27	11 11	3 17	3 180	3 181
NWG (wt%)	Tantalit-(Fe)	Wodginit	Columbit-(Fe)	Tantalit-(Mn)	Columbit-(Fe)	Columbit-(Fe)	Taploiti	Tantalit-(Fe)
SiO ₂	<	<	<	<	<	<	<	<
CaO	<	<	<	<	0,031	<	<	<
Sc ₂ O ₃	1,40	<	<	<	0,123	<	<	<
TiO ₂	3,83	0,229	1,58	0,699	2,76	1,09	0,167	0,34
MnO	9,06	1,48	2,06	10,91	4,97	7,94	1,31	2,10
FeO	11,09	14,32	20,24	3,46	14,40	10,21	14,46	15,06
ZrO ₂	0,363	<	0,269	0,155	0,489	0,378	0,314	<
Nb ₂ O ₅	60,26	5,57	73,03	18,17	48,68	35,86	6,85	27,20
SnO ₂	0,742	0,586	0,039	3,72	0,265	0,031	0,300	<
HfO ₂	0,029	<	<	0,043	0,036	0,050	0,107	<
Ta ₂ O ₅	13,36	77,19	2,27	61,55	25,50	43,52	76,33	54,64
WO ₃	0,905	0,114	0,348	<	1,41	0,268	0,204	0,153
UO ₂	0,168	<	<	<	0,273	0,155	<	<
Total	101,23	99,38	99,85	98,71	98,87	99,50	100,05	99,50
100XMn	45,28	9,45	9,35	76,18	25,92	44,06	8,40	12,38
100XTa	11,77	66,21	1,84	67,08	23,96	42,20	87,02	54,72

Lokalität Land	Ruhanga Ruanda	Shuni Hill Äthiopien	Uis Namibia	Kenticha Äthiopien	Manono DRC	Muika DRC	Gasasa Ruanda
Collan Nr. AS Nr.	C084 AS7749r	C258 AS8088	C286 AS8141	C254 AS8084	C392 AS8369r	C116 AS7831	C083 AS7748
Korn Nr. Analyse Nr. Mineral	1 Columbit-(Mn)	1 Columbit-(Fe)	1 Tantalit-(Fe)	164 Columbit-(Mn)	42 Columbit-(Mn)	13 Columbit-(Fe)	20 Tantalit-(Fe)
NWG (wt%)	Tantalit-(Fe)	Tantalit-(Fe)	Tantalit-(Fe)	Tantalit-(Mn)	Wodginit	Wodginit	Tantalit-(Fe)
SiO ₂	<	<	<	<	<	<	<
CaO	<	<	<	<	<	<	<
Sc ₂ O ₃	<	<	<	<	<	<	<
TiO ₂	0,654	0,646	0,275	1,41	0,416	1,91	0,253
MnO	15,69	7,34	11,21	10,65	11,15	7,81	6,82
FeO	3,65	11,64	5,14	5,02	9,50	10,75	12,75
ZrO ₂	0,072	0,261	<	0,112	0,875	0,875	13,56
Nb ₂ O ₅	59,09	43,68	21,30	14,16	61,93	40,41	26,07
SnO ₂	0,170	0,080	0,103	0,302	0,107	0,155	47,96
HfO ₂	<	0,036	<	0,077	0,117	0,158	<
Ta ₂ O ₅	19,45	68,69	61,37	67,65	16,99	38,11	32,46
WO ₃	0,128	0,041	0,168	0,118	0,674	0,496	56,36
UO ₂	0,068	0,073	<	0,202	0,054	0,161	0,236
Total	98,97	98,73	99,56	99,81	100,77	100,67	100,45
100XMn	81,32	38,97	68,83	68,24	54,29	42,39	35,13
100XTa	16,53	33,11	63,42	74,19	14,17	36,20	28,93

<: unterhalb der Nachweisgrenze 100XMn = 100*Mn/(Mn+Fe) 100XTa = 100*Ta/(Ta+Nb)

Tabelle 5

Repräsentative Mikrosondenanalysen von Columbit-Tantalit, Taploiti, Wodginit und Ixiolith aus afrikanischen Tantalpegmatiten.

Alle Messungen wurden durch kontrastreiche Rückstreuелеktronenbilder dokumentiert und in eine Labordatenbank eingelagert. Vorteile der Mikrosonde sind hohe räumliche Auflösung ($1\ \mu\text{m}$) und zerstörungsfreie Analysen, Nachteile sind der zum Erreichen der o.a. Nachweisgrenzen und zur Bilddokumentation nötige hohe Zeitaufwand. Als Standards wurden natürliche und synthetische Mineralphasen (Columbit-(Fe), Tantalit-(Mn), Tapiolit, Cassiterit, Zirkon, Uraninit) sowie Reinmetalle verwendet. Spurenelementkonzentrationen bis in den sub-ppm Bereich wurden mittels Laser Ablation (LA)-ICP-MS an den Universitäten Würzburg und Erlangen bestimmt. Es wurde ein 266 nm Nd:YAG Laser (New Wave) gekoppelt mit einem Quadrupol-Massenspektrometer (Agilent 7500i) und Argon als Trägergas verwendet. Der Durchmesser des Laserstrahls lag zwischen 30 und $50\ \mu\text{m}$. Die Kalibration erfolgte an NIST-Gläsern SRM 610 und 612, verrechnet wurde mit GLITTER Version 3.0 (Macquarie Research Ltd; 2000). Aus Gründen der Vergleichbarkeit und Qualitätssicherung wurde ein homogener Columbit-(Fe), der vorher mittels XRF, EMPA und ICP-MS-Analysen charakterisiert war, als interner Standard mitgemessen (Tab. 5, C139). Vorteile der LA-ICP-MS sind sehr niedrige Nachweisgrenzen für viele Elemente (LODs $< 1\ \text{ppm}$, v.a. für die SEE) und die simultane Messung von 32 Spurenelementen. Nachteile sind eine geringe räumliche Auflösung und die Zerstörung der Probenoberfläche. Die Bestimmung von U-Pb Isotopenverhältnissen und damit eine Altersbestimmung von Einzelkörnern wurde ebenfalls in situ an einem Sektorfeld-ICP-MS (Element II), gekoppelt mit einem UP213 Ultraviolett Lasersystem (New Wave) in einer kleinvolumigen Ablationszelle an der Universität Frankfurt durchgeführt. Die Rohdaten wurden auf das Untergrundsignal, gewöhnliches Blei, laserinduzierte Elementfraktionierung, instrumentelle Massendiskriminierung und zeitabhängige Elementfraktionierung korrigiert (GERDES & ZEH, 2006; DILL et al., 2008a,b). Die analytische Reproduzierbarkeit für den GJ-1 Zirkon lag bei 0,8% für $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ und bei 0,5% für $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$. Es wurde keine matrixabhängige U-Pb Fraktionierung beobachtet.

Parameter des Herkunftsnachweises

Alter der Ta-Minerale

Viele Niob-Tantaloxide enthalten Uran in Konzentrationsbereichen von wenigen ppm bis zu einigen Prozent, jedoch kein gewöhnliches Blei. Sie eignen sich daher zur radiometrischen U-Pb-Altersbestimmung. Die Grundlagen und chemischen Methoden dazu wurden von ROLF ROMER entwickelt (ROMER & WRIGHT, 1992; ROMER & SMEDS, 1994; ROMER & LEHMANN, 1995; KÜSTER et al., 2009); erste Messungen mittels LA-ICPMS wurden von SMITH et al. (2004) publiziert. Dies ermöglichte zum ersten Mal die Messung von Einzelkörnern einer Probe ohne vorherige chemische Abtrennung. Die Methode wurde für die routinemäßige Messung von Konzentraten adaptiert (MELCHER et al., 2008a,b; DILL et al., 2008a,b).

Columbit-Tantalitkörner ergaben mit der konventionellen TIMS-Technik vielfach nicht-konkordante aber kolinear angeordnete U-Pb-Alter nahe dem oberen Schnittpunktsalter der Diskordia. Auch die mit der LA-ICP-MS Technik ermittelten U-Pb-Alter sind größtenteils diskordant; sie streuen aber über einen wesentlich größeren Bereich der Diskordia (vgl. Abb. 5). Die präziseren TIMS-Altersbestimmungen dokumentieren in wenigen Fällen bei verschiedenen Fragmenten des gleichen Korns oder verschiedenen Körnern der gleichen Probe streuende, und nicht ko-linear angeordnete diskordante U-Pb-Alter. Die Ursachen für dieses Verhalten konnten im Rahmen dieser Untersuchungen nicht immer geklärt werden.

Ein erhöhter Anteil an gewöhnlichem Pb, für das mangels Kenntnis der genauen Zusammensetzung nicht korrigiert werden kann, kann in Einzelfällen als Erklärung genannt werden. In anderen Fällen ohne Hinweis auf erhöhte Anteile an gewöhnlichem Pb muss davon ausgegangen werden, dass diese U-Pb-Systematik eine komplexe geologische Entwicklung der Probe widerspiegelt (s.u.). Bei nicht ko-linear angeordneten Datenpunkten für verschiedene Körner der gleichen Probe kann auch darüber spekuliert werden, dass Mischungen zwischen Mineralkonzentraten mit unterschiedlicher Herkunft innerhalb einer Altersprovinz vorliegen. Eine exakte und sichere Altersbestimmung konnte aber in fast allen Fällen durch gut definierte obere Schnittpunktsalter von Diskordias, häufig in Verbindung mit (nahezu) konkordanten U-Pb Altern für einzelne Probenpunkte vorgenommen werden.

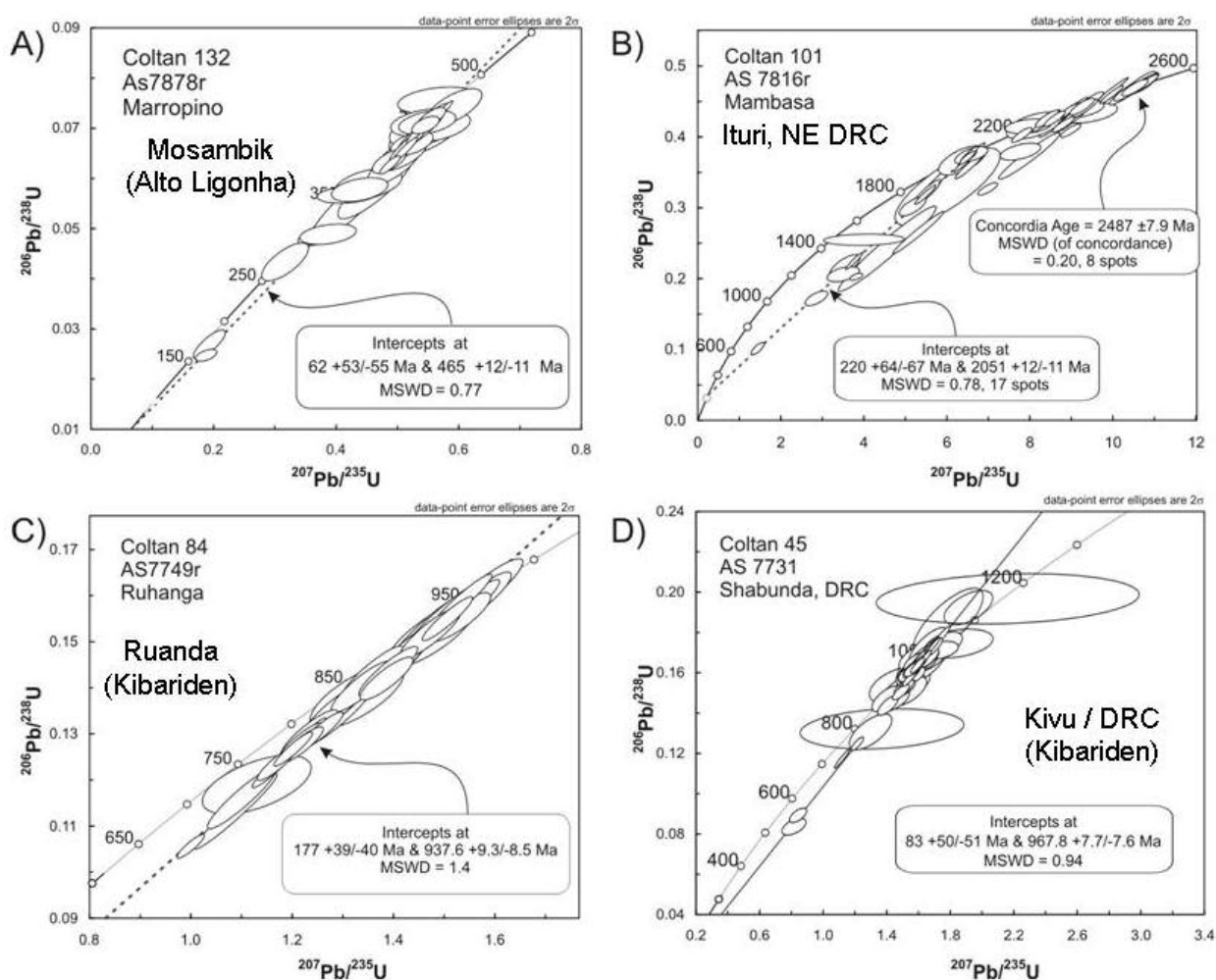


Abb. 5

U-Pb Datierung von Columbit-Tantalit-Konzentraten mittels LA-ICPMS (Universität Frankfurt). Jede Ellipse repräsentiert einen Messpunkt von etwa 30-50 µm Durchmesser. A) Marropino (Alto Ligonha, Mosambik): Erzkonzentrat (Mikrolith, Columbit-(Mn), Tantalit-(Mn), Bismutotantalit, Euxenit, Monazit u.a.) aus Produktion von 2005; B) G6, Enehe, Mambasa (Ituri, DRC): mehrere große Körner von Columbit-(Fe), Tantalit-(Fe) und Tapiolit aus der Sammlung des RMCA (gesammelt von SAFIANNIKOFF, 1971); C) Ruhanga (Gatumbadistrikt, Ruanda): Erzkonzentrat (Columbit-(Mn), Tantalit-(Mn), Cassiterit) aus der Produktion der REDEMI von 2006; D) Mazakala (Shabunda, Süd-Kivu, DRC): Konzentrat aus alluvialem Bergbau, v.a. Columbit-(Fe); Probe von CANMET (POIRIER & LASTRA, 2002).

Coltan Provinz	Kibariden	DRC-ZAR Kraton	Alto Ligonha	Adola Belt	Eastern Desert	Tantalite Valley	Damara	Jos Plateau	Birimian	Simbabwe Kraton
Länder	DRC, Ruanda, Burundi, Uganda	DRC (Itur)	Mosambik	Äthiopien	Ägypten	Namibia	Namibia	Nigeria	Ghana	Simbabwe
Lokalitäten (Beispiele)	Manono, Pangli, Shabunda, Nemba, Gatumba	Mambasa, Lubero	Marropino, Morrua, Muata	Kenticha, Bupo, Shuni Hill	Abu Dabbab, Nuweibi	Homestead	Uis, Rubikon	Jos, Bauchi	Kokobin	Bikita
Intrusionsalter	930 - 1000 Ma	1950 - 2490 Ma	440 - 480 Ma	530 Ma	550 - 600 Ma	980 Ma	500 Ma	200 Ma	2080 Ma	2580-2650 Ma
Ta-Mineralogie	FeC, FeT, MnC, MnT, Tap, Wod, Mk	FeC, FeT, Tap, Mk	MnC, MnT, Mk, UMk, BIT, Eux, Ferg	MnC, MnT, UMk, Mk	FeC, MnC, MnT, Wod	MnT, MnC	FeC, MnC, MnT	FeC, Wix	FeC, MnC, MnT, Mk	MnC, MnT, Mk, Eux, Ferg, Smp
Mineralogie (andere Metalle)	Cas, ilm, Rt, Wolf, Li	ilm, Rt	Mon, ilm, Bi, Li	Li		Bi, Li	Cas, Li	Cas, Wolf, Tho, Zfr	Cas	Cas, Li
CGM	N	5540 (45 Lok.)	507 (3 Lok.)	574 (3 Lok.)	122 (8 Lok.) ^b	408 (1 Lok.)	61 (Lok.) ^b	393 (2 Lok.)	300 (1 Lok.)	6 (5 Lok.) ^c
Mol% XMn	MW ± SD	56 ± 18	78 ± 17	76 ± 24	58 ± 31	99 ± 1	63 ± 28	11 ± 1	74 ± 8	75 ± 23
	MIN — MAX	3 — 99	35 — 99	37 — 99	14 — 100	87 — 99	9 — 100	4 — 79	34 — 80	37 — 99
Mol% XTa	MW ± SD	37 ± 16	57 ± 24	56 ± 17	25 ± 22	84 ± 2	52 ± 33	8 ± 3	50 ± 10	55 ± 30
	MIN — MAX	2 — 96	4 — 98	11 — 98	1 — 96	38 — 90	1 — 99	1 — 55	23 — 73	21 — 100
Gew% TiO ₂	MW ± SD	0.52 ± 0.39	1.71 ± 1.31	0.37 ± 0.14	1.21 ± 1.12	0.61 ± 0.16	0.53 ± 0.68	0.90 ± 0.03	0.23 ± 0.08	0.54 ± 0.26
	MAX	11,2	4,2	2,1	6,0	1,2	2,7	11,6	0,6	0,8
Gew% SnO ₂	MW ± SD	0.28 ± 0.32	0.11 ± 0.15	0.07 ± 0.02	0.50 ± 0.97	<0,01	0.13 ± 0.19	0.11 ± 0.05	0.32 ± 0.21	0.42 ± 0.19
	MAX	7,5	0,8	0,4	6,8	0,0	0,9	2,6	1,6	0,7
Gew% ZrO ₂	MW ± SD	0.17 ± 0.13	0.36 ± 0.24	0.16 ± 0.06	0.12 ± 0.09	0.43 ± 0.03	0.26 ± 0.24	0.10 ± 0.03	0.19 ± 0.10	0.18 ± 0.11
	MAX	2,1	1,4	0,6	0,6	0,7	0,5	1,5	0,9	0,3
Gew% WO ₃	MW ± SD	0.25 ± 0.29	0.92 ± 0.70	0.06 ± 0.02	0.20 ± 0.10	0.35 ± 0.10	1.36 ± 1.08	0.33 ± 0.13		
	MAX	4,4	2,5	0,5	0,8	1,1	3,6	6,2		
Gew% UO ₂	MW ± SD	0.07 ± 0.08	0.07 ± 0.07	0.10 ± 0.08	0.10 ± 0.08	0.28 ± 0.13	0.13 ± 0.10	<0,02	0.07 ± 0.04	0.17 ± 0.14
	MAX	9,9	0,5	3,6	0,9	1,1	0,3	0,4	0,2	0,3

a. unter Einbezug folgender Literatur: ABDALLA et al., 1998; JAHN, 1996; V. KNORRING & FADIPE, 1981

b. unter Einbezug folgender Literatur: BALDWIN et al., 2005; FRANSOLET et al., 1986; FRINDT et al., 2004; KELLER & VON KNORRING, 1989; VON KNORRING & FADIPE, 1981

c. unter Einbezug folgender Literatur: CERNY et al., 1992; VON KNORRING & FADIPE, 1981

CGM, Columbit-Tantalitgruppenminerale; MW, Mittelwert; STDEV, Standardabweichung; MIN, minimum; MAX, maximum; N, Anzahl der Messungen, Lok, Lokalitäten

FeC, Columbit-(Fe); FeT, Tantalit-(Fe); MnC, Columbit-(Mn); MnT, Tantalit-(Mn); Tap, Tapolit; Wod, Wodgmit; Mk, Mikrolith; Umk, Uranmikrolith; BIT, Bismutololith; Bi, Wismut-Mineral; Li, Lithium-Mineral; Cas, Cassiterit; ilm, Ilmenit; Rt, Rutil; Mon, Monazit; Tho, Thortit; Wolf, Wolframit; Zfr, Zirkon

MW + SD = Mittelwert Standardabweichung; MIN — MAX = Wertebereich; MAX = höchster Wert

XMn = 100*Mn/(Mn+Fe); XTa = 100*Ta/(Ta+Nb)

Tabelle 6

Wichtige Parameter von Tantalmineralisationen in afrikanischen Tantalprovinzen ist.

Bildungsalter von Columbit-Tantalit und Tapiolit eignen sich hervorragend, um geologische Alterprovinzen zu identifizieren, aus denen Konzentrate unbekannter Herkunft stammen könnten. Da Einzelkörner datiert werden, können zusätzlich Hinweise auf Mischungen zwischen Mineralkonzentraten verschiedener Herkunft gewonnen werden.

Die Ergebnisse der Coltanstudie zeigen die Annahme gut definierter Bildungsperioden der Tantal-Mineralisationen deutlich auf, wie sie durch die geologischen Rahmenbedingungen regional zu erwarten waren (Abb. 5; Tab. 6), lokal ergaben sich jedoch wesentliche Neuerkenntnisse. Die Detailstudien zeigen lokale Variabilitäten in einzelnen geologischen Altersprovinzen. So wurden die wirtschaftlich interessanten Pegmatite in Alto Ligonha (Mosambik) auf 465-481 Mio. Jahre (Marropino; Abb. 5A), 476 Mio. Jahre (Morrua) und 440 Mio. Jahre (Mutala) datiert. Innerhalb der wichtigen kibarischen Altersprovinz des Ost-Kongo, von Ruanda, Burundi und Uganda wurden bisher mehr als 30 Altersdaten erhalten, die eine grobe Gliederung in ein westliches Areal mit älteren Mineralisationen (Maniema, Pangi) sowie ein von Katanga (z.B. Lagerstätte Manono) nach Ruanda ziehendes östliches und etwas jüngeres Areal nahelegen (Abb. 5C, D). Die Datendichte wird zurzeit weiter erhöht.

Mehrfachmessungen einzelner Columbit-Tantalitkörner belegen, dass das U-Pb-System intragranular homogen ist. Nur für Proben weniger Lokalitäten (Mambasa; Ituri, DRC, Abb. 5B; Tantalite Valley, Namibia) wurden signifikante intragranulare Altersunterschiede nachgewiesen. Die Columbit-(Fe)-Tapiolit-(Fe)-Körner in Waschkonzentraten von Mambasa weisen Domänen mit archaischen (ca. 2500 Mio. Jahre) und paläoproterozoischen Altern (ca. 2000 Mio. Jahre) auf; die jüngeren Alter wurden sowohl in randlichen Anwachssäumen, als auch in Rissfüllungen nachgewiesen und belegen eine mehrphasige Bildung der Oxide. Die Ausgangsgesteine der Mineralisation waren wahrscheinlich spätarchaische Pegmatite, die am Südrand des DRC – ZAR-Kratons von der ubendischen Orogenese erfasst wurden. Jüngere pegmatitische Mineralisationen sind wahrscheinlich mit der ubendischen Orogenese assoziiert, wie Alter von 1900-2000 Ma in einigen Konzentratproben aus der Region Mambasa – Lubero belegen. Diese Neuerkenntnisse sind relevant für das Verständnis der geologischen und petrologischen Entwicklung in der komplexen Übergangszone zwischen dem DRC – CAR-Kraton und dem mesoproterozoischen Kibara Orogen.

Mineralogie der Ta-Erzkonzentrate

Die quantitative Bestimmung der mineralogischen Zusammensetzung von Schwermineralkonzentratproben ist ein wichtiger Parameter für einen Herkunftsnachweis. Zu diesem Zweck wird in erster Linie der mittels MLA klassifizierte Modalbestand ausgewertet (Abb. 6). Die automatisierte Messung tausender Einzelkörner in einer Probe erfolgt bei einer räumlichen Auflösung im Mikrometerbereich. Damit können für einzelne Lagerstätten typische, aber im Weltmassstab gesehen sehr seltene Ta-Mineralphasen mit hoher Sicherheit erfasst werden. Dies ergibt in vielen Fällen bereits klare Unterscheidungskriterien. Das Auftreten oder Fehlen von akzessorischen Beimengungen ermöglicht beispielsweise die Gruppierung von Vorkommen in Süd-Äthiopien, Nord-Mosambik und Süd-Namibia, die alle durch das fast völlige Fehlen von Zinnstein gekennzeichnet sind, gegenüber den Vorkommen aus der zentralafrikanischen Zinn-Tantalprovinz. Bismutotantalit in komplexen Paragenesen mit SEE-Th-U-reichen Tantalphasen ist einzig für einige Lagerstätten in Mosambik typisch. Einige sehr seltene Phasen (z.B. Magnocolumbit, Ferronigerit, Cesplumtantit) wurden nur in einzelnen Vorkommen identifiziert.

Zusätzliche Parameter wie Korngrößen, Verwachsungsgrade, Zonierungsmuster und weitere textuelle Eigenschaften (Verdrängungen, Einschlußparagenesen) helfen, mineralogisch ähnliche Proben zu klassifizieren. Die Untersuchung textueller Parameter, auch an Einzelkörnern in Konzentraten, liefert wichtige Hinweise auf die petrologische Entwicklung der untersuchten Pegmatitkörper.

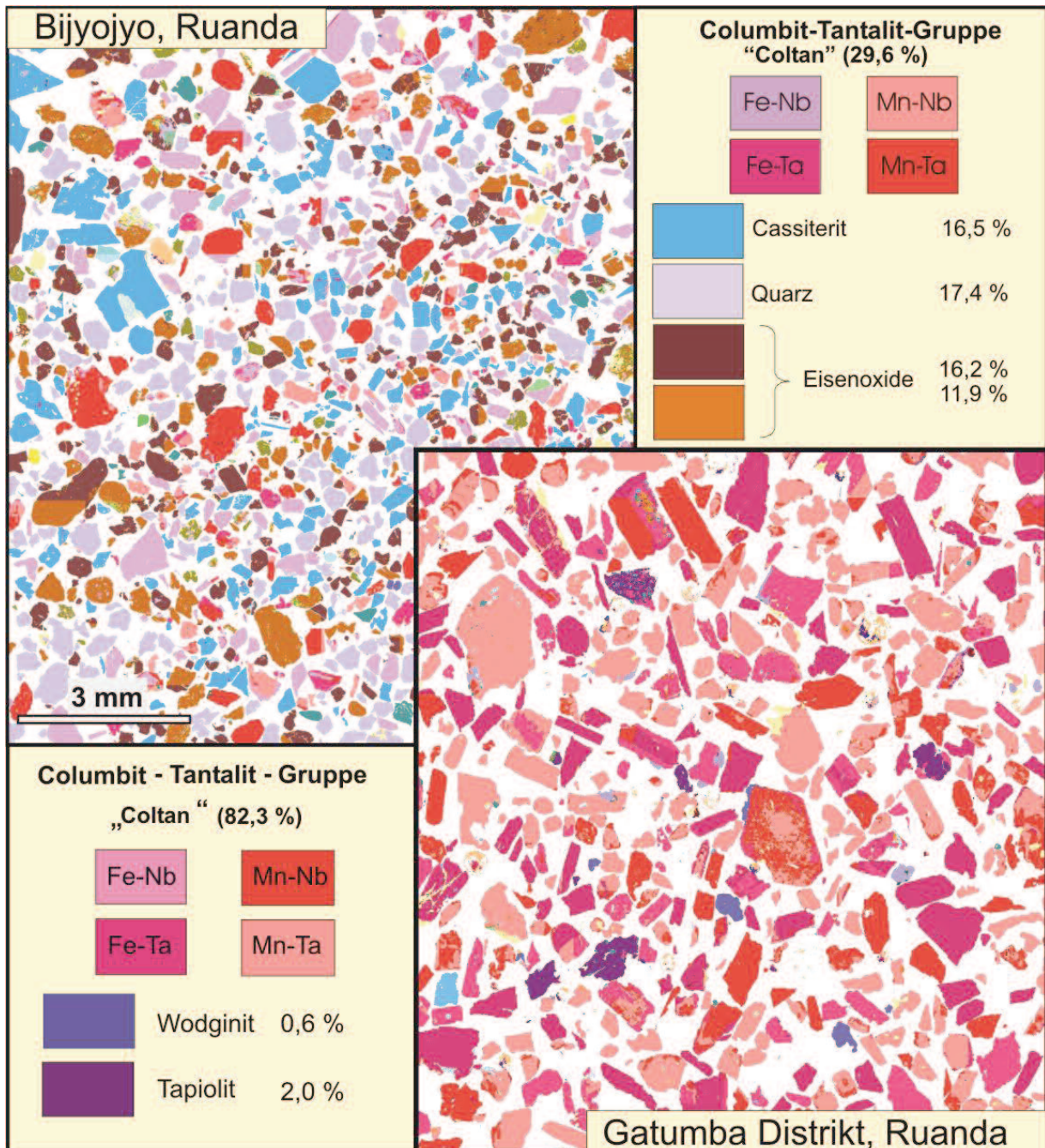


Abb. 6
Quantitative mineralogische Auswertung von zwei Tantalierzkonzentraten aus dem Gatumba Distrikt (Ruanda) mittels MLA.

Columbit-Tantalitchemie

Die generelle Formel der Minerale der Columbit-Tantalit-Gruppe wird mit AB_2O_6 umschrieben, wobei die A-Position durch Fe^{2+} und Mn^{2+} , untergeordnet durch Mg^{2+} und dreiwertige Kationen wie Sc^{3+} und Fe^{3+} , und die B-Position durch Nb^{5+} und Ta^{5+} , sowie vierwertige Kationen wie Ti^{4+} und Sn^{4+} besetzt wird. Der wichtigste Substitutionsmechanismus wird mit $3 M^{4+} \leftrightarrow A^{2+} + 2 B^{5+}$ angegeben. Wolfram substituiert wohl in der Columbit-Struktur zumeist mittels einer Wolframit-Typ-Substitution ($Fe^{2+} + 3W^{6+} \leftrightarrow 4B^{5+}$; z.B. ERCIT, 1994). Der Einbau dreiwertiger Kationen und lokal wechselnde Redoxbedingungen während der Kristallisation wurden zum Teil in der Literatur diskutiert (ČERNÝ & ERCIT, 1989; ERCIT, 1994; ROMER et al., 1996; MULJA et al., 1996; WISE et al., 1998).

Columbit-Tantalit baut auch Seltene Erdelemente (SEE) ins Gitter ein (z.B. ERCIT, 1994); die petrologische und kristallchemische Bedeutung der im Zuge der vorliegenden Studie dokumentierten extremen Variationen im Einbau der SEE wurde bisher noch nicht geklärt. Auch die anderen häufigeren Nb-Ta-Oxide zeichnen sich durch vielfältige und komplexe Substitutionen aus (z.B. ČERNÝ & ERCIT, 1989; ERCIT et al., 1992; ČERNÝ et al., 2004).

Die chemische Zusammensetzung von Columbit-Tantalit und anderen Tantalphasen (v.a. Wodginit, Ixiolith, aber auch Tapiolit, Mikrolith, Rutil-(Nb,Ta)) ist variabel und spiegelt die magmatische und postmagmatische Entwicklung der Pegmatite wider. Dabei spielen außer der Schmelzzusammensetzung und -entwicklung sowie der Fluidzusammensetzung auch Parameter wie Magmenquelle und Nebengestein (Kontamination) eine Rolle. Viele Tantalphasen sind chemisch zoniert (z.B. LAHTI, 1987). Komplexe Zonierungsmuster lassen sich sehr gut mit Rückstreuелектроненbildern abbilden, und reflektieren in der Regel fluktuierende Nb-Ta-Verhältnisse während des Kristallwachstums (Abb. 4). Gleichzeitig können jedoch auch die Fe-Mn-Verhältnisse und die Konzentrationen einiger Neben- und Spurenelemente variieren. Systematische typologische Beschreibungen von Zonierungsmustern können fallweise zur Diskrimination von Lokalitäten genutzt werden.

Traditionell (z.B. ČERNÝ & ERCIT, 1985) werden die Zusammensetzungen von Columbit-Tantalit, Tapiolit, Wodginit und Ixiolith im $XMn [100 * Mn / (Mn + Fe)] - XTa [100 * Ta / (Nb + Ta)]$ -Diagramm aufgetragen. Wie in Abb. 1 gezeigt, bilden Columbit-Tantalitminerale eines Pegmatitkörpers bestimmte, fallweise sehr komplexe Entwicklungstrends ab (z.B. Tanco, Kanada; VAN LICHTERVELDE et al., 2007). Die Variation der Minerale in diesem Diagramm ist somit typisch für eine bestimmte Lokalität und somit ein brauchbares Kriterium für einen Herkunftsnachweis einzelner Vorkommen. Unsere Untersuchungen haben gezeigt, dass etwa 100-150 Körner eines Konzentrates ausreichen, um den Trend und die Variation abzubilden. Das Diagramm ist geeignet, verschiedene Coltan-, „Provinzen“ zu diskriminieren, und auch zur Abgrenzung einzelner Lagerstätten innerhalb einer Provinz. Es zeigt sich allerdings, dass es Überlappungsbereiche gibt; hoch fraktionierte komplexe Selten-Elementpegmatite der LCT-Familie weisen beispielsweise weltweit immer starke Mn-Fe-Fraktionierung mit progressiver Mn-Anreicherung auf, gefolgt von starker Nb-Ta-Fraktionierung mit progressiver Ta-Anreicherung bei konstantem XMn bis zu Tantalit-(Mn) (Abb. 7a). Eine Unterscheidung solcher Pegmatite ist dann oftmals durch die Betrachtung der Neben- und Spurenelemente, oder auch der Alter möglich. Die in Abb. 7a-d gezeigten Beispiele belegen eine klare Trennung der Konzentrate unterschiedlicher Lokalitäten innerhalb einer großen Tantalpegmatitprovinz (Kibariden).

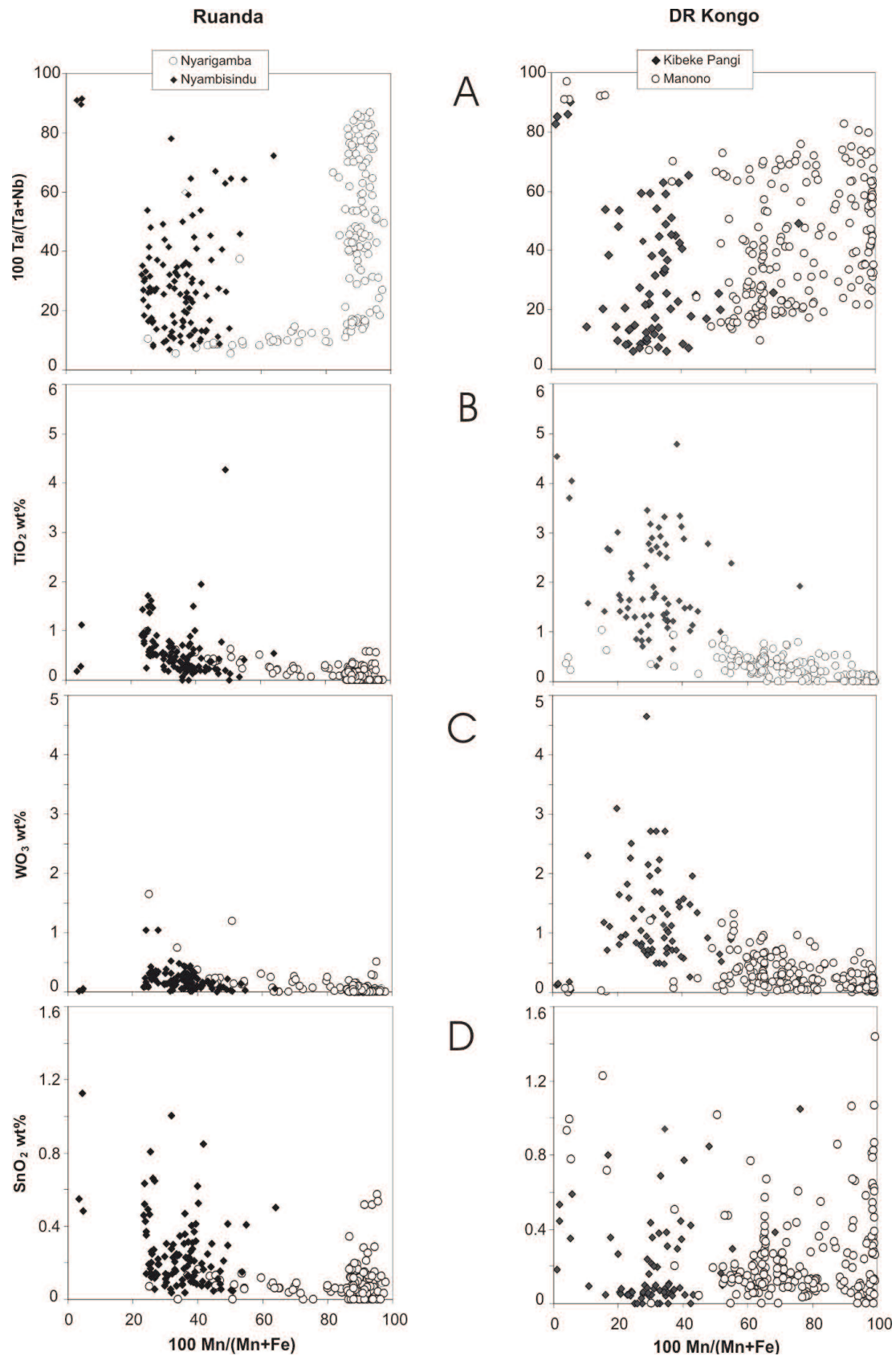


Abb. 7

Variation von Haupt- (Mn, Fe, Nb, Ta; Abb. 7a) und Nebenelementkonzentrationen (Ti, W, Sn; Abb. 7b-d) von Columbit-Tantalit und Tapiolit in vier Coltantkonzentraten aus den Kibariden; linke Seite: Nyarigamba und Nyambisindu, Gatumba Distrikt (Ruanda); rechte Seite: Kibeke Pangi (Süd-Kivu) und Manono (Katanga).

Zwei Konzentrate (Nyambisindu, Kibeke Pang) weisen ähnliche Variationen der Hauptelemente auf, dominiert durch Columbit-(Fe) mit Trends zu Tantalit-(Fe), und enthalten zusätzlich auch Tapiolit (hohe Fe- und Ta-Konzentrationen); dies würde Beryll- oder Spodumenpegmatiten entsprechen (Abb. 1). Bei gleicher Hauptelementzusammensetzung sind die Columbit-Tantalite von Kibeke Pang deutlich an Nebenelementen wie Ti (Abb. 7b) und W (Abb. 7c) angereichert. Zwei Datensätze von Mn-dominierten Zusammensetzungen (Nyarigamba, Manono) unterscheiden sich sowohl im Fraktionierungstrend der Hauptelemente, als auch in den Konzentrationen der Nebenelemente, vor allem von W und Sn (Abb. 7d). Die Fraktionierungstrends entsprechen denen von komplexen Lepidolithpegmatiten (Nyarigamba) bzw. komplexen Spodumen- und Lepidolithpegmatiten (Manono) nach ČERNÝ et al. (1989) (Abb. 1). Mittels ICP-MS wurde 35 Spurenelemente bestimmt. Einige (z.B. Mg, Sc, Ti, W, Hf) korrelieren sehr gut mit den Hauptelementen (Fe, Mn, Nb, Ta), allerdings gibt es deutliche Unterschiede in den Konzentrationsniveaus und daraus resultierend in den Steigungen der Korrelationsgeraden mit den Hauptelementen. Eine sinnvolle Auswertung der komplexen chemischen Daten ist nur über robuste multivariate geostatistische Verfahren möglich.

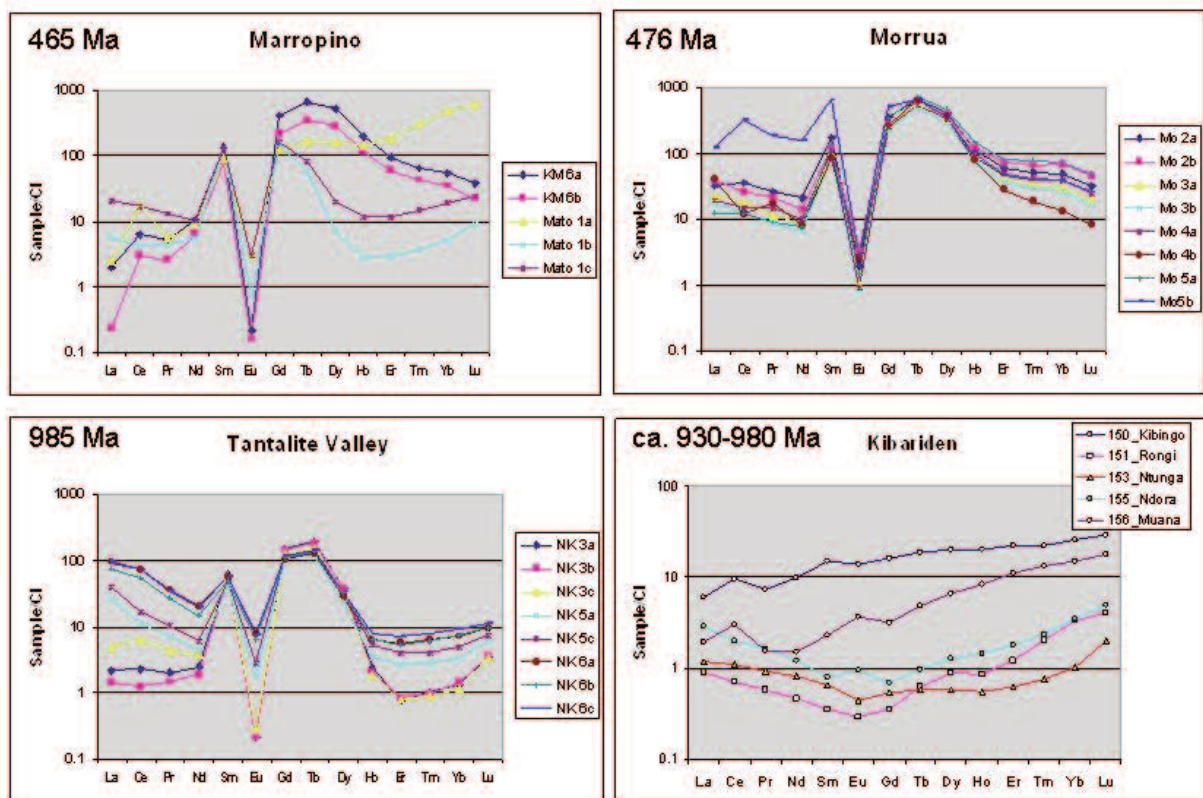


Abb. 8

Chondrit-normalisierte Seltenerdelementdiagramme von Columbit-Tantalit-Einzelkörnern nach Auflösung und ICPMS-Messung. A) Körner von Marropino (Mosambik); B) Körner von Morrua (Mosambik); C) Körner des Homestead Pegmatits, Tantalite Valley (Namibia); D) Mittelwerte aus mehreren Splits von großen Einzelkörnern aus den Kibariden (Sammlung RMCA): Kibingo, Rongi, Ntunga (Ruanda), Ndora (Burundi), Muana (Süd-Kivu, DRC). Bildungsalter nach LA-ICPMS und TIMS-Datierung in Millionen Jahren (Ma).

Als sehr vielversprechend hat sich die Bestimmung der Selten-Erdelement-Konzentrationen (SEE) herausgestellt (Abb. 8). Chondrit-normierte SEE-Verteilungsmuster von Tantaloxiden werden von der Hauptelementzusammensetzung beeinflusst. Während für Columbit-Tantalit mehr oder weniger stark von den leichten (La) zu den schweren SEE (Lu) ansteigende Muster typisch sind, wurden für Mikrolithe (Pyrochlor-Gruppen-Mineral) bislang nur von La nach Lu stark abfallende Muster beobachtet. Chondrit-normierte SEE-Verteilungsmuster von Columbit-Tantalit zeigen jedoch zusätzlich regionale und lokale Unterschiede. Dies bezieht sich auf die Form der Muster (nahezu flach, deutlich ansteigend, Trogformen, konvex u.s.w.), das Auftreten und die Ausbildung von Tetradeffekten (insbesondere der 3ten Tetrad) sowie auf Anomalien einzelner Elemente, i.w. Eu und Ce (positiv oder negativ ausgebildete Anomalien). Die SEE-Muster innerhalb einer Lokalität variieren wenig relativ zur regionalen Variation. Bestes Beispiel sind Coltanprovinzen mit stark ausgeprägter negativer Eu-Anomalie (Mosambik, Tantalite Valley, Bikita) im Gegensatz zu Provinzen, in denen diese Anomalie nahezu völlig fehlt (z.B. Kibariden) (Abb. 8).

DATENAUSWERTUNG

Als Ergebnis der Untersuchung eines Coltankonzentrats für einen „Herkunftsnachweis“ wird ein umfangreicher Datensatz erhalten, der eine quantitative mineralogische Beschreibung und ein radiometrisches Alter umfasst, sowie haupt- und spurenelementgeochemische Daten der wichtigsten Erzphasen. Dieser Datensatz wird mit der im Aufbau befindlichen Coltan-Datenbank verglichen, in der entsprechende Einträge für derzeit über 150 Lokalitäten weltweit gespeichert sind. Zur Bestätigung der Herkunft eingereicherter Proben (Positiv-Nachweis) bzw. Zuordnung unbekannter Konzentratproben zu einer Coltan-Provinz und/oder einem Lagerstättendistrikt wird hierarchisch vorgegangen. In einigen Fällen ist die Bestimmung eines radiometrischen Alters in Verbindung mit der Aussage, ob die Altersdaten innerhalb einer Probe homogen verteilt sind, bereits ein brauchbarer Hinweis auf eine Coltan-Provinz. Daher wurde besonderes Augenmerk auf die Entwicklung von Methoden zur raschen Einzelkorndatierung gelegt; hier genügen in den allermeisten Fällen bereits Modellalter. In Abhängigkeit von der Fragestellung müssen jedoch weitere Variablen mitberücksichtigt werden. Eine Vorgehensweise verwendet Diskriminierungsdiagramme (z.B. XMn – XTa; SEE-Muster) oder kommt aufgrund des Vorhandenseins eines spezifischen Minerals zu einer Zuordnung. Diese Ansätze beziehen sich auf die mineralogische Zusammensetzung und ausgewählte texturale und chemische Parameter (Abb. 9). Ergibt sich daraus keine Übereinstimmung mit Datensätzen der Referenzdatenbank, können multivariate statistische Verfahren angewandt werden. Hier müssen zwei Fälle unterschieden werden: (1) Zuordnung einer unbekanntenen Probe zu einer Coltan-Provinz oder zu einem Distrikt innerhalb einer Provinz; (2) Bestätigung, dass ein Konzentrat von einer bestimmten zertifizierten oder zu zertifizierenden Mine stammt (Positivnachweis).

Nach dem in Abb. 9 vorgestellten Beispiel ist die Herkunft von Coltan mit früh-neoproterozoischen Bildungsaltern auf die kibarische Provinz (Kongo, Ruanda, Burundi, Uganda) und auf die Namaqualand Provinz (Namibia, Südafrika) beschränkt (Anmerkung: eine theoretisch mögliche Herkunft aus früh-neoproterozoischen Pegmatiten in Simbabwe bzw. Sambia wird auf Grund der noch fehlenden Referenzdaten hier nicht näher betrachtet). Eine erste Unterscheidung erfolgt durch die mineralogische Zusammensetzung der Probe, z.B. durch Detektion von Cassiterit als Nebengemengteil in den Konzentraten.

Im positiven Fall führen Haupt- und Spurenelementcharakteristika einer repräsentativen Anzahl von Columbit-Tantalitkörnern (CGM) zur Unterscheidung von Coltan-Subprovinzen, Lagerstätten und Vorkommen innerhalb der kibarischen Provinz, mit der Möglichkeit einer regionalen Trennung durch statistische Testverfahren (siehe unten). Im negativen Fall (Cassiterit fehlt oder ist selten) wird die Hauptelementchemie der CGM zwischen Namaqualand (ausschließlich Mn-Ta-dominiert) und Kibariden (Fe-Nb, Fe-Ta, Mn-Nb, untergeordnet Mn-Ta-dominiert) unterscheiden. Im ersten Fall wird die Bestimmung der Seltenerdelementverteilung in den CGM eine klare Unterscheidung von kibarischem (keine oder wenig ausgeprägte Europiumanomalie) und Namaqualand-Coltan (ausgeprägte negative Europiumanomalie im Tantalit) ermöglichen. Eine weitere Untergliederung innerhalb der kibarischen Provinz erfolgt, analog zu oben, durch statistische Testverfahren.

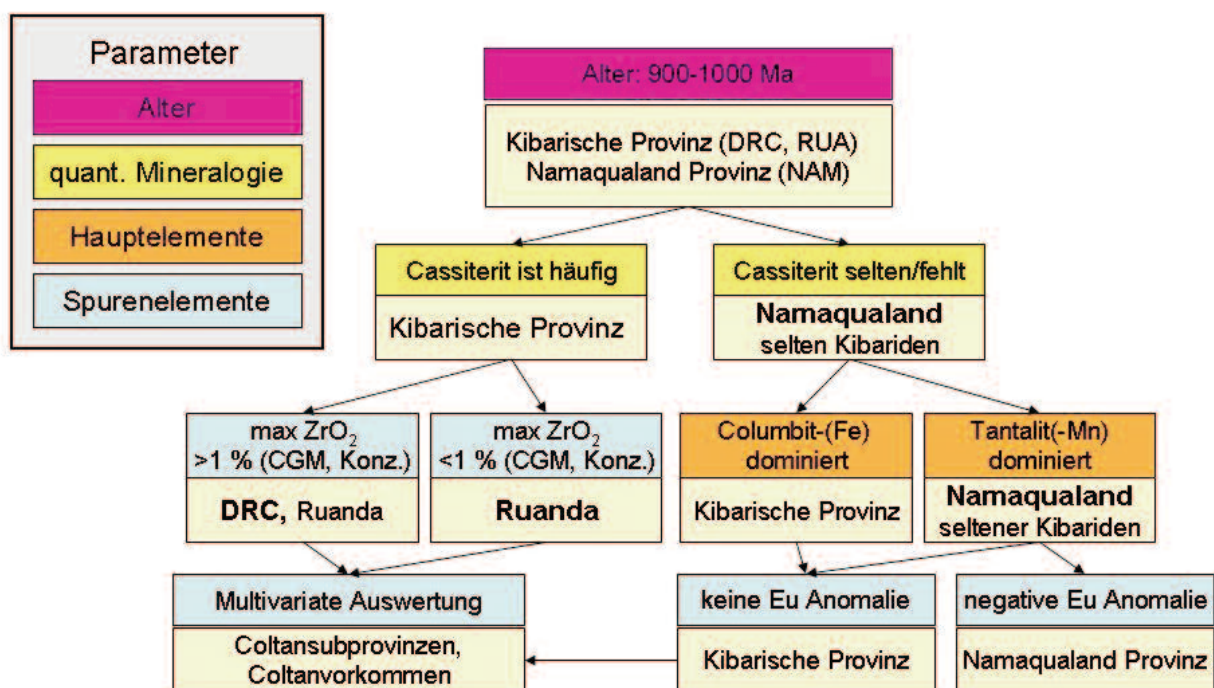


Abb. 9

Beispiel eines Herkunftsnachweises für afrikanisches Coltan aus Liefergebieten mit Altern von 900-1000 Millionen Jahren. Der Herkunftsnachweis basiert auf der Bestimmung der Parameter: (U-Pb)-Alter an Columbit-Tantalit (TIMS, LA-ICPMS); quantitative Mineralogie (MLA); Hauptelemente (Mikrosonde); Spurenelemente (LA-)ICPMS).

Probenklassifikation durch die Anwendung mathematischer Verfahren

Konzeptionell ist die Suche nach einem geochemischen Fingerprint ein überwachtetes Klassifikationsproblem, bei dem in einer multivariaten Datenbasis die Signaturen bekannter Gruppen extrahiert werden, um unbekannte Proben mit möglichst hoher Sicherheit einer bekannten Gruppe zuzuordnen. Dabei sind die generellen Charakteristika geochemischer Daten (z.B.: nicht-parametrische, z.T. polymodale Verteilungsfunktionen, Ausreißer; s. REIMANN & FILZMOSER, 2000) zu berücksichtigen.

Stratified cross-validation:

Correctly classified samples= 85.51 %
 Kappa statistic= 0.710
 TP Congo = 0.870
 TP Rwanda = 0.841

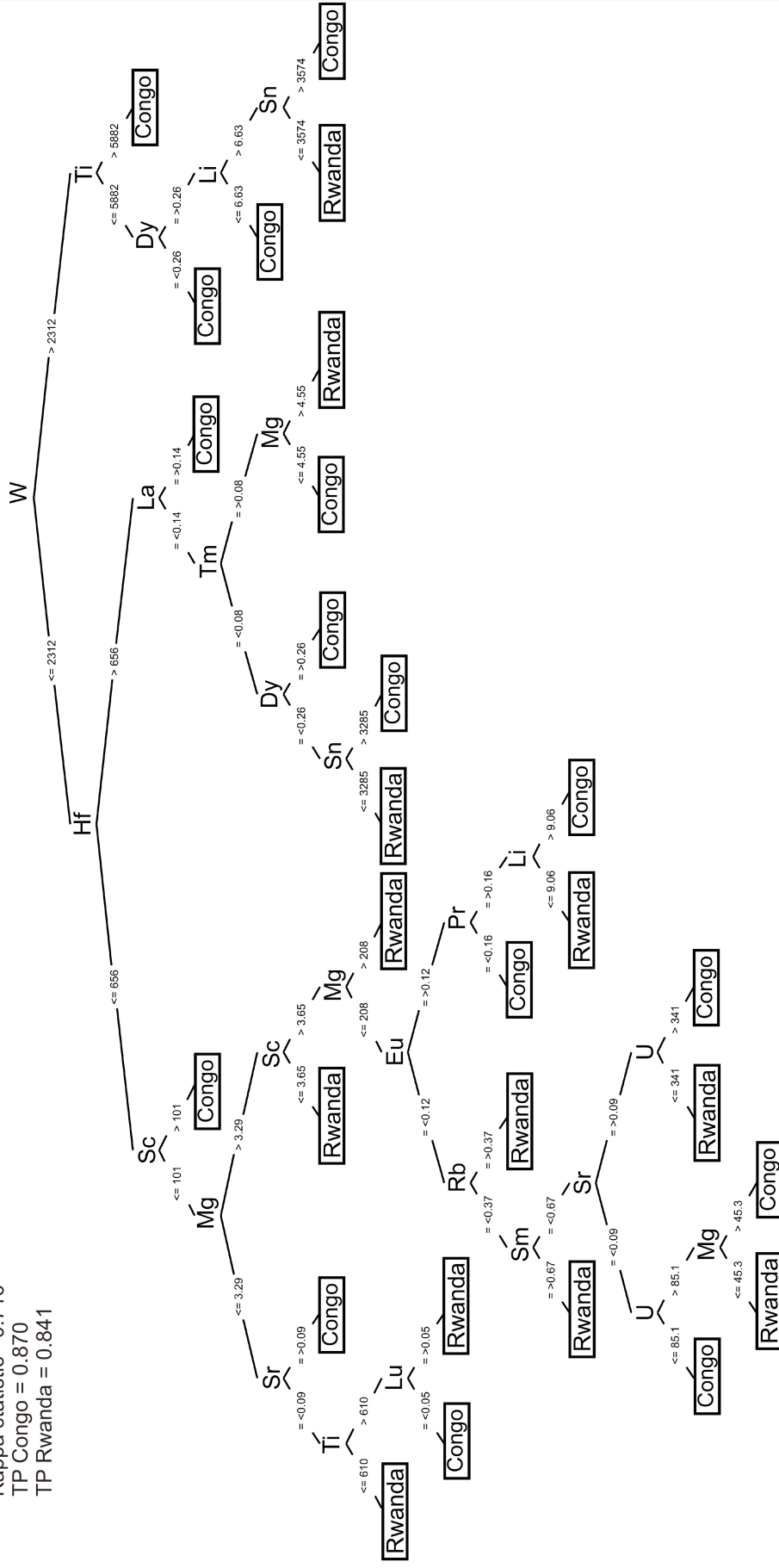


Abb. 10
 Klassifikationsbaum zur Unterscheidung von Coltan-Konzentraten aus Ruanda und dem Ostikongo.

Der hier vorgestellte Ansatz verwendet Techniken des maschinellen Lernens (WITTEN & FRANK, 2007) um aus den kombinierten Daten einen Klassifikationsbaum (QUINLAN, 1993; WITTEN & FRANK, 2007) zu erstellen. Beginnend an der Wurzel, bestimmt der Vergleich der Analysenwerte mit Modellwerten den Weg einer Probe durch eine Baumstruktur, an deren Ende die Gruppenzugehörigkeit vorhergesagt wird.

Zur Illustration dieses Ansatzes werden hier einzelne Punktmessungen an Coltanerzen (Konzentrat und Einzelkristalle) bewertet, um Erze aus Rwanda von Erzen aus den östlichen Provinzen der DR Kongo zu unterscheiden. Diese Gruppierung erweist sich aufgrund der regionalen Verteilung robuster Faktoren-Scores als Ausdruck einer genetisch zu erklärenden Ost-West-Zonierung der multivariaten Struktur der Spurenelement-Konzentrationen. Der erstellte Klassifikationsbaum (Abb. 10) klassifiziert aufgrund einer Validierung der Resultate (geschichteten Zehnfach-Kreuzvalidation) 85,5% der Messungen als korrekt.

Das erzielte Ergebnis kann zur Bewertung einer unbekannt Probe verwendet werden, indem Mehrfachmessungen an einem Konzentrat oder an Einzelkristallen einer bekannten Gruppe zugeordnet werden. Aufgrund der Verteilung der ermittelten Gruppenzugehörigkeiten kann dann eine statistisch validierte Aussage über das Herkunftsgebiet getroffen werden. Durch das Erkennen und durch die (geostatistische) Analyse der regionalen geochemischen Trends wird die Zuordnungssicherheit unbekannter Proben mit der Größe der Referenz-Datenbasis weiter zunehmen.

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Mineralogie und Zusammensetzung Tantal-Niob-führender Mineralphasen in Selten-Metall-Graniten und Pegmatiten sind äußerst variabel. Unsere Untersuchungen belegen regionale Gemeinsamkeiten die es ermöglichen, verschiedene afrikanische Tantalpegmatit-Provinzen zu unterscheiden. Die Zuordnung zu einer von insgesamt fünf Altersprovinzen basiert auf der direkten Altersbestimmung von Columbit-Tantalitkörnern mittels der U-Pb-Isotopenmethode: archaisch (z.B. Simbabwe- und Kongo-Kraton), paläoproterozoisch (z.B. Birimian Westafrikas), früh-neoproterozoisch (z.B. Kibariden, Namaqualand), spät-neoproterozoisch/altpaläozoisch (panafrikanische mobile Gürtel), und mesozoisch (Nigeria).

Innerhalb einer Altersprovinz können Pegmatitfelder und einzelne Pegmatite in vielen Fällen durch die Bestimmung mineralogischer und geochemischer Parameter diskriminiert werden. Dies ist durch die Komplexität mineralisierender Prozesse in Pegmatitsystemen begründet. Heterogenitäten vom Mikro- (z.B. komplexe Zonierungsmuster in vielen Ta-Nb-Oxidkörnern) zum Makrobereich (Erzkörper) spiegeln diese Prozesse wider. Daher erlauben sowohl quantitative mineralogische Daten (Modalbestand, Verwachsungsgrade, Korngrößen) als auch geochemische Datensätze (z.B. Fraktionierungstrends) die Zuordnung zu einzelnen Pegmatitkörpern. Detailuntersuchungen haben gezeigt, dass sich die chemische Zusammensetzung von Nb-Ta-Oxiden in zonierten Pegmatiten üblicherweise entlang von definierten Entwicklungstrends vollzieht, die sich vor allem in Veränderungen der Fe-Mn- und/oder Nb-Ta-Verhältnisse ausdrücken. Die Anreicherungsmuster verschiedener Spurenelemente sind davon weniger betroffen.

So konnte gezeigt werden, dass sich die Verteilungsmuster der Selten-Erdelemente sowohl innerhalb von zonierten Einzelkörnern, als auch innerhalb eines Erzkörpers nicht signifikant verändern; wichtige Parameter wie eine Europium-Anomalie oder Anreicherungen der mittleren und/oder schweren SEE können in allen Nb-Ta-Oxidkörnern eines Vorkommens beobachtet werden. Solche Parameter ermöglichen es prinzipiell auch, Mischungen verschiedener (bereits erfasster) Lokalitäten in gehandelten Erzkonzentraten zu erkennen. Somit könnten sie auch zur Überprüfung von Handelswegen eingesetzt werden.

Der Nutzen und die praktische Anwendbarkeit des vorgestellten Instrumentes werden derzeit von Politik und Wirtschaft diskutiert. Die besondere Struktur des Tantalbergbaus und der tantalverarbeitenden Industrie – hoher Anteil an artisanalem Bergbau in Entwicklungsländern, komplexe lokale und internationale Handelsketten, nur wenige Pulverproduzenten, Hauptabnehmer Elektronikindustrie – ist prinzipiell für Zertifizierungskonzepte geeignet. Die technische Machbarkeit kann demonstriert werden. Wir sind zuversichtlich, eine unter ökonomischen Gesichtspunkten durchführbare und von allen Stakeholdern akzeptierte Vorgehensweise entwickeln zu können.

Danksagung

Die Studie wurde vom deutschen Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) beauftragt. Wir danken dem Royal Museum for Central Africa (RMCA) in Tervuren (Belgien) und dem Naturhistorischen Museum Wien für die Überlassung von Probenmaterial für diese Pilotstudie. Des Weiteren trugen Firmen, Universitäten, geologische Dienste und Privatpersonen maßgeblich dazu bei, repräsentatives Probenmaterial von Tantalpegmatiten weltweit bearbeiten zu können. Für die Präparation und Durchführung der Analysen an der BGR danken wir P. Rendschmidt, D. Henry, J. Lodziak, F. Korte, D. Weck, P. Macaj, M. Bockrath und M. Schlegel. Dr. Dirk Küster (BGR) steuerte wichtige Informationen und Ergänzungen bei. Der Erstautor bedankt sich bei der ÖMG herzlich für die Möglichkeit, die Ergebnisse der Studie in Wien und Leoben präsentieren zu können.

Literatur

- ABDALLA, H. M., HELBA, H. A. & MOHAMED, F. H. (1998): Chemistry of columbite-tantalite minerals in rare metal granitoids, Eastern Desert, Egypt. – *Mineralogical Magazine*, 62, 821-836.
- AKINTOLA, O. F. & ADEKEYE, J. I. D. (2008): Mineralization potentials of pegmatites in the Nasarawa area of Central Nigeria. – *Earth Sciences Research Journal*, 12, 213-234.
- ALLOU, B. A., LU, H.-ZH., GUHA, J., CARRIGNAN, J., NAHO, J., POTHIN, K. & YOBOU, R. (2005): Une corrélation génétique entre les roches granitiques, et les dépôts éluvionnaires, colluvionnaires et alluvionnaires de colombo-tantalite d'Issia, Centre-Ouest de la Côte d'Ivoire. – *Exploration and Mining Geology*, 14, 61-77.
- ANGERMEIER, H. O., KRAUSS, U., KRUSZONA, M. & SCHMIDT, H. (1974): Zaïre, Rohstoffwirtschaftliche Länderberichte. – Bundesanstalt für Bodenforschung, Hannover, 120 p.
- BALDWIN, J. R., HILL, P. G., FINCH, A. A., VON KNORRING, O., OLIVER, G. J. H. (2005): Microlite-manganotantalite exsolution lamellae: evidence from rare-metal pegmatite, Karibib, Namibia. – *Mineralogical Magazine*, 69, 917-935.

- BASSOT J.-P. & MORIO, M. (1989): Morphologie et mise en place de la pegmatite kibarienne à Sn, Nb, Ta, Li de Manono (Zaire). – *Chronique de la recherche minière*, 496, 41-56.
- BERING, D. (1976): Bericht über eine Vorbereitung der Tantalit-Vorkommen im Raume Akim-Oda in Ghana. – Unveröff. Bericht, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Archiv-Nr. 75077, 16 S.
- BRGM (1987) : Plan Minéral du Rwanda, 437 p (BRGM).
- BURKE, E. A. J. (2008): Tidying up mineral names: an IMA-CNMNC scheme for suffixes, hyphens and diacritical marks. – *Mineralogical Record*, 39, 131-135.
- CARTE GEOLOGIQUE ET MINIERE DE LA REPUBLIQUE DEMOCRATIQUE DU CONGO (2005). – Musée Royal de l'Afrique Centrale, Tervuren, Belgien.
- ČERNÝ, P. (1989): Characteristics of pegmatite deposits of tantalum. – In: MÖLLER, P., ČERNÝ, P. & SAUPÉ, F. (eds.), *Lanthanides, tantalum and niobium*. Springer-Verlag, S. 195-239.
- ČERNÝ, P. (1991): Rare-element granitic pegmatites. Part I: Anatomy and internal evolution of pegmatite deposits. – *Geoscience Canada*, 18, 49-67.
- ČERNÝ, P. & ERCIT, T. S. (1985): Some recent advances in the mineralogy and geochemistry of Nb and Ta in rare-element granitic pegmatites. – *Bulletin de Minéralogie*, 108, 499-532.
- ČERNÝ, P. & ERCIT, T. S. (1989): Mineralogy of niobium and tantalum: crystal chemical relationships, paragenetic aspects and their economic implications. – In: *Lanthanides, Tantalum and Niobium* (Ed.), Möller, P. et al., Springer Verlag, Berlin, Germany, 27-29.
- ČERNÝ, P. & ERCIT, T. S. (2005): The classification of granitic pegmatites revisited. – *The Canadian Mineralogist*, 43, 2005-2026.
- ČERNÝ, P., CHAPMAN, R., FERREIRA, K. & SMEDS, S.-A. (2004): Geochemistry of oxide minerals of Nb, Ta, Sn and Sb in the Varuträsk granitic pegmatite, Sweden: the case of an “anomalous” columbite-tantalite trend. – *American Mineralogist*, 89, 505-518.
- ČERNÝ, P., ERCIT, T. S. & WISE, M. A. (1992): The tantalite-tapiolite gap; natural assemblages versus experimental data. – *The Canadian Mineralogist*, 30, 587-596.
- CRONWRIGHT, (2005): A review of the rare-element pegmatites of the Alto Ligonha Pegmatite Province, northern Mozambique and exploration guidelines. – MSc thesis (unpublished), Rhodes University, Grahamstown, South Africa.
- DEWAELE, S., TACK, L., FERNANDEZ-ALONSO, BOYCE, A., MUCHEZ, P., SCHNEIDER, J., COOPER, G. & WHEELER, K. (2008): Geology and mineralization of the Gatumba area, Rwanda (Central Africa): present state of knowledge. – *Etudes Rwandaises*, 16, 6-24.
- DIEHL, B. J. M. (1992): Niobium and tantalum. – In: *The Mineral Resources of Namibia*, pp 3.5-1 – 3.5-15 (Ministry of Mines and Energy, Geological Survey: Windhoek).
- DILL, H. G., MELCHER, F., GERDES, A. & WEBER, B. (2008a): The origin and zoning of hypogene and supergene Fe-Mn-Mg-Sc-U-REE phosphate mineralization from the newly discovered Trutzhofmühle aplite, Hagendorf pegmatite Province, Germany. – *Canadian Mineralogist*, 46, 1131-1157.
- DILL, H. G., WEBER, B., GERDES, A. & MELCHER, F. (2008b): The Fe-Mn phosphate aplite “Silbergrube” near Waidhaus, Germany: Epithermal phosphate mineralization in the root zone of a pegmatite. – *Mineralogical Magazine*, 72, 1143-1168.
- ERCIT, T. S. (1994): The geochemistry and crystal chemistry of columbite-group minerals from granitic pegmatites, southwestern Grenville province, Canadian Shield. – *The Canadian Mineralogist*, 32, 421-438.
- ERCIT, T. S. (2005): REE-enriched granitic pegmatites. – In: *Rare-element geochemistry and mineral deposits* (R. L. Linnen & Samson, I. M., Ed.), Geological Society of Canada Short, GAC Course Notes, 17, 175-199.
- ERCIT, T. S., ČERNÝ, P., HAWTHORNE, F. C. & MCCAMMON, C. A. (1992): The wodginite group. II. Crystal chemistry. – *The Canadian Mineralogist*, 30, 613-631.

- FETHERSTON, J. M. (2004): Tantalum in Western Australia. – Mineral Resources Bulletin, 22, 153 S., Geological Survey of Western Australia.
- FRANSOLET, A. M., KELLER, P. & FONTAN, F. (1986): The phosphate mineral associations of the Tsaobismund pegmatite, Namibia. – Contrib. Mineral. Petrol., 92, 502-517.
- FRINDT, S., HAAPALA, I. & PAKKANEN, L. (2004): Anorogenic Gross Spitzkoppe granite stock in central western Namibia: Part I. Petrology and geochemistry. – American Mineralogist, 89, 841-856.
- GARRETT, N. & MITCHELL, H. (2009): Trading conflict for development. Utilising the trade in minerals from eastern DR Congo for development. – Resource Consulting Services, 50 p.
(<http://www.crisisstates.com/download/others/Trading%20Conflict%20for%20Development.pdf>)
- GERDES, A. & ZEH, A. (2006): Combined U-Pb and Hf isotope LA-(MC)-ICP-MS analyses of detrital zircons: Comparison with SHRIMP and new constraints for the provenance and age of an Armorican metasediment in Central Germany. – Earth and Planetary Sciences Letters, 249, 47-61.
- IXER, R. A., ASHWORTH, J. R. & POINTER, C. M. (1987): Accessory mineralogy of the Ririwai biotite granite, Nigeria, and its albitized and greisenized facies. – Geological Journal, 22, 403-427.
- JAHN, S. (1996): Geochemische und mineralogische Untersuchungen zur Metallogeneese Seltenmetall-führender Granitoide in der Central Eastern Desert, Ägypten. – unveröffentl. Dissertation, Institut für Geowissenschaften I, Technische Universität Berlin, 271 S.
- KAMPUNZU, A. B., KRAMERS, J. D. & MAKUTU, M. N. (1998): Rb-Sr whole rock ages of the Lueshe, Kirumba and Numbi igneous complexes (Kivu, Democratic Republic of Congo) and the break-up of the Rodinia Supercontinent. – Journal of African Earth Sciences, 26, 29-36.
- KELLER, P. & VON KNORRING, O. (1989): Pegmatites at the Okatjimukuju farm, Karibib, Namibia Part I: Phosphate mineral associations of the Clementine II pegmatite. – European Journal of Mineralogy, 1, 567-593.
- KÜSTER, D. (1990): Rare-metal pegmatites of Wamba, central Nigeria – their formation in relationship to late Pan-African granites. – Mineralium Deposita, 25, 25-33.
- KÜSTER, D. (2008): Granitoid-hosted Ta mineralization in the Arabian–Nubian Shield: Ore deposit types, tectono-metallogenic setting and petrogenetic framework. – Ore Geology Reviews (DOI:10.1016/j.oregeorev.2008.09.008)
- KÜSTER, D., ROMER, G., TOLESSA, D., ZERIHUN, D. BHEEMALINGESWARA, K., MELCHER, F. & OBERTHÜR, T. (2009): The Kenticha rare-element pegmatite, Ethiopia: internal differentiation, U-Pb age and Ta mineralization. – Mineralium Deposita (DOI 10.1007/ss00126-0240-8)
- LÄCHELT, S. (2004): The geology and mineral resources of Mozambique. – Direcção Nacional de Geologia, Mozambique. Council for Geoscience, 515 S.
- LAHTI, S.I. (1987): Zoning in columbite-tantalite crystals from the granitic pegmatites of the Eräjärvi area, southern Finland. – Geochimica et Cosmochimica Acta, 51, 509-517.
- LEHMANN, B., MELCHER, F., SITNIKOVA, M. A. & RUZINDANA MUNANA, J. (2008): The Gatumba rare-metal pegmatites: chemical signature and environmental impact. – Etudes Rwandaises, 16, 25-40.
- LINNEN, R. L. & CUNEY, M. (2005): Granite-related rare-element deposits and experimental constraints on Ta-Nb-W-Sn-Zr-Hf mineralization. – In: Rare-element geochemistry and mineral deposits (R. L. Linnen & Samson, I. M., Ed.), Geological Society of Canada, GAC Short Course Notes, 17, 45-68.
- LUDWIG, K. R. (2003): User's manual for Isoplot 3.00 a geochronological toolkit for Excel. – Berkely Geochronological Center Special Publication, 4, 71 p.
- MARTIN, H. J. (1964): The Bikita tinfield. – Southern Rhodesia Geological Survey Bulletin, 58, 114-131.
- MATHEIS, G. (1987): Nigerian rare-metal pegmatites and their lithological framework. – Geological Journal, 22, 271-291.

- MATHEIS, G. & CAEN-VACHETTE, M. (1983): Rb-Sr isotopic study of rare-metal bearing and barren pegmatites in the Pan-African reactivation zone of Nigeria. – *Journal of African Earth Sciences*, 1, 35-40.
- MELCHER, F., SITNIKOVA, M. A., GRAUPNER, T., MARTIN, N., OBERTHÜR, T., HENJES-KUNST, F., GÄBLER, E., GERDES, A., BRÄTZ, H., DAVIS, D. W. & DEWAELE, S. (2008a): Fingerprinting of conflict minerals: columbite-tantalite (“coltan”) ores. – *SGA News*, 22, 1-14, June 2008.
- MELCHER, M., GRAUPNER, T., HENJES-KUNST, F., OBERTHÜR, T., SITNIKOVA, M., GÄBLER, E., GERDES, A., BRÄTZ, H., DAVIS, D. & DEWAELE, S. (2008b): Analytical fingerprint of columbite-tantalite (coltan) mineralization in pegmatites: focus on Africa. – *Proceedings, Ninth International Congress for Applied Mineralogy (ICAM) 2008, Brisbane, Qld, 615-624, Australasian Institute of Mining and Metallurgy.*
- MILÉSI, P. ET AL. (2006): An overview of the geology and major ore deposits of Central Africa: Explanatory note for the 1:4,000,000 map "Geology and major ore deposits of Central Africa". – *Journal of African Earth Sciences*, 44, 571-595.
- MÜCKE, A. & NEUMANN, U. (2006): Die mafischen Mineralien und oxidischen Erze der Alkali-Granite und benachbarter Flusssedimente des Jos Plateaus in Zentralnigeria: Petrografie, Mineralogie und Genese. – *Aufschluss*, 57, 275-300.
- MULJA, T., WILLIAMS-JONES, A. E., MARTIN, R. F. & WOOD, S. A. (1996): Compositional variation and structural state of columbite-tantalite in rare-element granitic pegmatites of the Preissac-Lacorne batholith, Quebec, Canada. – *American Mineralogist*, 81, 146-157.
- OBOMHENSE, S. (2008): Mining in Nigeria – Mekios and tin sheds. – *T.I.C. Bulletin*, 133, 5-7.
- PERELYGIN, A., KUCHKIN, A., KHARKOV, N. & MOSKVINA, T. (2008): Criminalistic identification of PGM-containing products of mining and metallurgical companies. – *Forensic Science International*, Volume 174, Issue 1, Pages 12-15
- PETERS, S. W. (1991): Regional geology of Africa. – *Lecture Notes in Earth Sciences*, 40, 722 S., Springer-Verlag.
- POHL, W. (1987): Metallogeny of the northeastern Kibara belt, Central Africa. – *Geological Journal*, 22, 103-119.
- POHL, W. (1994): Metallogeny of the northeastern Kibara belt, Central Africa - recent perspectives. – *Mineralium Deposita*, 9, 105-130.
- POIRIER, G. & LASTRA, F. (2002): Mineralogical Study of Columbite-Tantalite Ores from Kahuzi-Biega National Park (Democratic Republic of Congo) and Rwanda. – *CANMET MMSL Report 02-022(IR)*
- QUINLAN, J. R. (1993): C4.5: Programs for machine learning. – San Francisco (Morgan Kaufmann).
- REIMANN, C. & FILZMOSER, P. (2000): Normal and lognormal data distribution in geochemistry: Death of a myth. Consequences for the statistical treatment of geochemical and environmental data. – *Environmental Geology*, 39, 1001–1014.
- RIJKS, H. R. P. & VAN DER VEEN, A. H. (1972): The geology of the tin-bearing pegmatites in the eastern part of the Kamativi district, Rhodesia. – *Mineralium Deposita*, 7, 383-395.
- ROMER, R. L. & LEHMANN, B. (1995): U-Pb columbite age of Neoproterozoic Ta-Nb mineralization in Burundi. – *Economic Geology*, 90, 2303-2309.
- ROMER, R. L. & SMEDS, S. A. (1994): Implications of U-Pb ages of columbite-tantalites from granitic pegmatites for the Paleoproterozoic accretion of 1.90-1.85 Ga magmatic arcs to the Baltic Shield. – *Pre-cambrian Research*, 67, 141-158.
- ROMER, R. L. & WRIGHT, J. E. (1992): U-Pb dating of columbites: a geochronologic tool to date magmatism and ore deposits. – *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56, 2137-2142.
- ROMER, R. L., NOWACZYK, N. & WIRTH, R. (2007): Secondary Fe-Mn-oxides in minerals heavily damaged by α -recoil: possible implications for palaeomagnetism. – *International Journal of Earth Sciences*, 96, 375-387.

- ROMER, R. L., SMEDS, S.-A. & ČERNÝ, P. (1996): Crystal-chemical and genetic controls of U-Pb systematics of columbite-tantalite. – *Mineralogy and Petrology*, 57, 243-260.
- SCHAETZL, L. (1971): The Nigerian tin industry. – Report of the Nigerian Institute, Soc. Econ. Res., Ibadan, Nigeria.
- SCHLÜTER, T. (2006): Geological Atlas of Africa: with notes on stratigraphy, tectonics, economic geology, geohazards and geosites of each country. – Springer: Berlin, Heidelberg, 272 pp.
- SCHWELA, U. (2007): Tantalum. – *Mining Journal Supplement*, 12 pp.
- SIMMONS, W. M. B. & WEBBER, K. L. (2008): Pegmatite genesis: state of the art. – *European Journal of Mineralogy*, 20, 421-438.
- SMITH, S. R., FOSTER, G. L., ROMER, R. L., TINDLE, A. G., KELLEY, S. P., NOBLE, S. R., HORSTWOOD, M. & BREAKS, F. W. (2004): U-Pb columbite-tantalite chronology of rare-element pegmatites using TIMS and Laser Ablation-Multi Collector-ICP-MS. – *Contrib. Mineral. Petrol.*, 147, 549-564.
- UNITED NATIONS SECURITY COUNCIL (2002): Final report of the U.N. Panel of Experts on the Illegal Exploitation of Natural Resources and Other Forms of Wealth of the Democratic Republic of the Congo. – S/2002/1146, 16. Oktober 2002. New York: United Nations.
- UNITED NATIONS SECURITY COUNCIL (2008): Final report of the Group of Experts on the Democratic Republic of the Congo. – S/2008/43, 13. Februar 2008. New York: United Nations.
- USGS (2006): Mineral Yearbook
- USGS (2008): Mineral Commodity Summaries
- VAN LICHTERVELDE, M., SALVI, S., BEZIAT, D. & LINNEN, R. L. (2007): Textural features and chemical evolution in tantalum oxides: magmatic versus hydrothermal origins for Ta mineralization in the Tanco Lower Pegmatite, Manitoba, Canada. – *Economic Geology*, 102, 257-274.
- VARLAMOFF, N. (1972): Central and West African rare-metal granitic pegmatites, related aplites, quartz veins and mineral deposits. – *Mineralium Deposita*, 7, 202-216.
- VON KNORRING, O. (1970): Mineralogical and geochemical aspects of pegmatites from orogenic belts of equatorial and southern Africa. – In: *African Magmatism and Tectonics* (T. N. CLIFFORD & I. G. GASS, Hrgg.), 157-210, Oliver & Boyd, Edinburgh.
- VON KNORRING, O. (1985): Some mineralogical, geochemical and economic aspects of lithium pegmatites from the Karibib-Cape Cross pegmatite field in South West Africa/Namibia. – *Communications of the Geological Survey of South West Africa/Namibia*, 1, 79-84.
- VON KNORRING, O. & CONDLIFFE, E. (1987): Mineralized pegmatites in Africa. – *Geological Journal*, 22, 253-270.
- VON KNORRING, O. & FADIPE, A. (1981): Niobium and tantalum minerals. – *Communications of the Geological Survey of South West Africa/Namibia*, 1, 85-88.
- WATSON, R. L. A. (1962): The geology of the Kamativi and Lubimbi areas. – *Southern Rhodesia Geological Survey Bulletin*, 57, 39 pp.
- WISE, M. A., ČERNÝ, P. & FALSTER, A. U. (1998): Scandium substitution in columbite-group minerals and ixiolite. – *The Canadian Mineralogist*, 36, 673-680.
- WITTEN, I. H. & FRANK, E. (2007): Data mining. Practical machine learning tools and techniques. – Amsterdam (Morgan Kaufmann/Elsevier).
- WOOLLEY, A. R. (2001): Alkaline rocks and carbonatites of the World. Part 3: Africa. – *Geological Society of London*, S. 384.
- WRIGHT, J. P., HASTINGS, D. A., JONES, W. B. & WILLIAMS, H. R. (1985): Geology and mineral resources of West Africa. – *Georg Allen and Unwin, Boston Sydney*, pp. 129-137.

received: 01.05.2009
accepted: 15.05.2009