

# Der Bushveld-Komplex: die größte Intrusion der Erde und wichtigste Quelle für mineralische Rohstoffe der Platinmetalle

Robert B. Trumbull<sup>1</sup>, Ilya V. Veksler<sup>1</sup>, David L. Reid<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

<sup>2</sup> Department of Geological Sciences, University of Cape Town, Südafrika

*The Bushveld Complex in South Africa is the world's largest magmatic intrusion and at the same time the most important source of technologically important metals including chromium, vanadium and above all the platinum group elements. This flat, saucer-shaped intrusion has a volume of about 1 million km<sup>3</sup> and by itself classifies as a Large Igneous Province. Within this vast intrusion, the platinum ores are mined from just two thin layers: the Merensky Reef and the UG<sub>2</sub>. Each of these is about one meter thick and both are continuous over hundreds of kilometers. The ore-bearing horizons, like other layers in the complex, clearly formed by igneous processes of crystallization in a magma chamber. The research challenges are to understand what processes accomplished the thousand-fold concentration of platinum from background levels to ore grade, and how ores were concentrated in such thin layers in a 9 kilometer-thick intrusion. Apart from providing answers to these scientific questions, the detailed mineralogical and microchemical studies of Bushveld ores at the GFZ are also being applied to find ways of improving the efficiency of ore beneficiation and platinum recovery.*



Der Bushveld-Komplex in Südafrika entstand vor 2,05 Mrd. Jahren und ist die mit Abstand größte je entdeckte Magmenintrusion der Erde. Diese Intrusion liegt nördlich der Hauptstadt Pretoria, ist rund 300 km breit, 9 km mächtig und bedeckt eine Fläche von 70 000 km<sup>2</sup>, was der Größe des Freistaats Bayern entspricht (Abb. 1).

Das geschätzte Volumen dieser schüsselförmigen Intrusion beträgt rund 1 Mio. km<sup>3</sup> und gilt damit als „Large Igneous Province“ (LIP). LIPs treten weltweit und in jedem Erdzeitalter auf, sie sind aber unregelmäßig verteilt und nicht an Plattengrenzen gebunden. Die Deccan Traps in Indien und die Paraná-Etendeka-Provinz in Südamerika und Namibia sind weitere Beispiele für LIPs. Sie entstehen durch Vorgänge im tiefsten Erdmantel und an der Kern-Mantel-Grenze in Zusammenhang mit der Bildung und dem Aufstieg von heißen Mantelplumes (vgl. Beitrag von Steinberger *et al.* in diesem Heft).

Das Deutsche GeoForschungsZentrum GFZ untersucht im Bushveld-Komplex Prozesse der Magmenbildung und -entwicklung in einer LIP. Da in Bushveld die Magmenentwicklung eng mit einer Vererzung verbunden ist, kann hier zudem die Entstehung mineralischer Rohstoffe untersucht werden; der Komplex ist sehr reich an Chrom, Nickel, Vanadium und vor allem an Platinmetallen. Seit dem Jahr 2010 beteiligt sich das GFZ gemeinsam mit den Universitäten Kapstadt und Bloemfontein an einem Forschungsprojekt im Bushveld, das im Rahmen des Verbundprojekts Inkaba yeAfrica durchgeführt wird. Das Ziel dieser Arbeiten ist es, die Entstehung der Platinerze in Zusammenhang mit Prozessen der Magmenentwicklung (Kristallisation, Fraktionierung, Assimilation) zu verstehen.

Das besondere Merkmal von Bushveld ist ein ausgeprägt regelmäßiger Lagenbau der Gesteine, der dank der wirtschaftlichen Bedeutung durch Bergbau und Bohrungen gut aufgeschlossen ist (Abb. 2). An Bohrkernen können die Gesteinsabfolgen in der Magmenkammer und insbesondere die Übergänge zu den Erzlagen lückenlos und in Detail untersucht werden.

Die schwarzen Streifen in der Abbauwand in Abb. 2a und im Bohrkern (Abb. 2b) sind Minerallagen von fast reinem Chromit (FeCr<sub>2</sub>O<sub>4</sub>), die in Wechsellagerung mit weißgrauem Anorthosit (Ca-Feldspat) vorkommen. An vielen Stellen im Bushveld wird

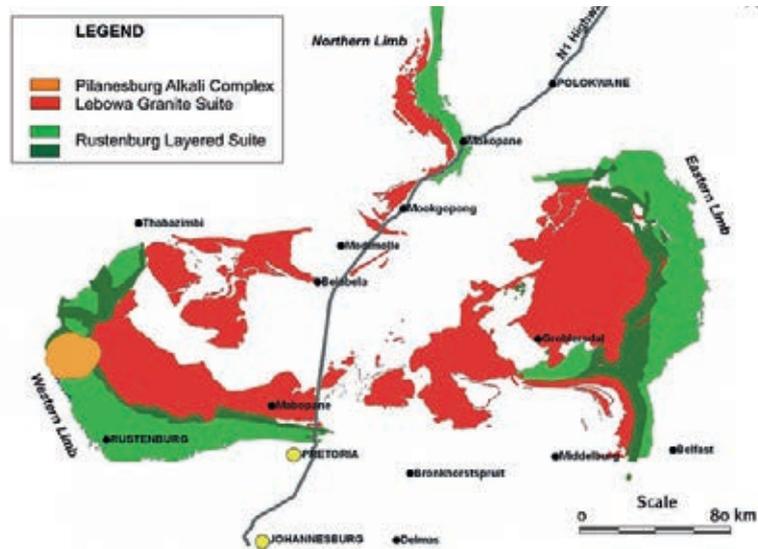


Abb. 1: Lokation und Größe des Bushveld-Komplexes in Südafrika. An den Rändern des Komplexes befinden sich in der „Rustenburg Layered Suite“ (grün) bedeutende Chrom- und Platinminen.

Fig. 1: Location and size of the Bushveld Complex in South Africa. The famous chromium and platinum mines are located along the outer rims of the complex in the “Rustenburg Layered Suite” (green colours).



Abb. 2: Beispiele des auffälligen Lagenbaus im Bushveld-Komplex. a) Die Abbauwand einer Platinmine zeigt eine Wechsellagerung von Chromit (schwarz) und Anorthosit (weiß). Die Chromitlagen in diesem Foto sind bis zu einem Meter dick. b) Feinskalige Wechsellagerung von Chromit und Anorthosit in Bohrkernen der Erzlage UG<sub>2</sub> (Fotos: R. Trumbull, GFZ)

Fig. 2: The spectacular layering of the Bushveld Complex. a) The working face of a platinum mine shows alternating chromite (black) and anorthosite (white) layers. The chromite layers are up to 1 meter thick. b) fine-scale layering of chromite and anorthosite in drill cores of the UG<sub>2</sub> ore horizon

Links: Platinbergbau am Südrand des Bushveld-Komplexes (Foto: R. Trumbull, GFZ)

Left: Platinum mining in the southern Bushveld complex



Kontakt: R. B. Trumbull  
(robert.trumbull@gfz-potsdam.de)

Chrom aus solchen Chromitlagen gewonnen; ganz ähnliche Lagen aus Magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) sind weltbedeutende Ressourcen für Vanadium. Chrom und Vanadium sind wichtige Rohstoffe zur Stahlveredlung und Südafrika zählt zu deren weltgrößten Lieferanten. Am wertvollsten sind aber die Platinerze, denn der Bushveld-Komplex birgt etwa 70% der bekannten Weltreserven an Edelmetallen der Platingruppe (Platin, Palladium, Iridium, Osmium, Ruthenium und Rhodium).

Die Elemente der Platingruppe sind für viele technische Anwendungen unersetzlich und der Bedarf steigt stetig. So werden z. B. nahezu alle neuen Automobile und Lastwagen weltweit mit Platin- oder Palladium beschichteten Katalysatoren ausgestattet. Deutschland und Südafrika befinden sich diesbezüglich in einer symbiotischen Partnerschaft. Südafrika ist der weltgrößte Platinproduzent, während Deutschland als Technologiestandort einer der wichtigsten Endabnehmer von Platinmetallen ist (etwa 20% des Weltmarkts), aber keine eigenen Reserven besitzt.

## Die Platinerze im Bushveld und ihr Entdecker

Im Gegensatz zu Gold, Silber, Kupfer, Blei und Zink, die weit verbreitet sind und in verschiedenen Erztypen vorkommen, werden Erze der Platinmetalle nur in mafischen (d. h. in hohem Maß magnesium- und eisenhaltigen) Intrusionen gefunden, wobei der Bushveld-Komplex in Südafrika die bei weitem größte Intrusion ist. Der Entdecker der Platinerze im Bushveld-Komplex, Hans Merensky (1871 bis 1952), wurde als Sohn eines deutschen Missionars in Südafrika geboren, ging in Brandenburg zur Schule und studierte Bergbau und Geologie in Berlin. Im Jahr 1904 kehrte er zurück nach Südafrika und arbeitete als Wirtschaftsgeologe in vielen Branchen der Mineralindustrie, bis er 1924 seine berühmte Entdeckung der Platinerze im Bushveld machte. Das erstaunliche an dieser Lagerstätte ist, dass weit mehr als die Hälfte aller Weltreserven der Platinmetalle in nur zwei jeweils etwa meterdicken Gesteinslagen konzentriert sind, die kontinuierlich über Hunderte von Kilometern verlaufen. Eine der beiden Erzlagen ist nach Hans Merensky benannt: das „Merensky Reef“. Die zweite liegt etwa 50 bis 100 m unterhalb des Merensky Reefs und trägt den eher unscheinbaren Namen „UG2“. Beide Lagen sind magmatische Kumulatgesteine, d. h. sie entstanden als Kristallablagerungen in der Bushveld-Magmenkammer.

Der natürliche Gehalt an Platinmetallen im Erdmantel und in der Kruste beträgt nur wenige Milligramm pro Tonne Gestein, das gilt auch für das ursprüngliche Magma der Bushveld-Intrusion. Die Platinerze von Bushveld enthalten dagegen 3 bis 10 g/t, welches eine tausendfache Anreicherung der Metalle in der Magmenkammer erfordert. Seit der Entdeckung der Erze durch Hans Merensky werden zwei grundsätzliche Fragen kontrovers diskutiert: welche Prozesse haben bei der Platinvererzung im Bushveld eine Rolle gespielt und warum sind die Erze in nur zwei Lagen des Komplexes konzentriert – oder gibt es noch weitere? Vieles spricht dafür, dass die Entstehung der Platinerze

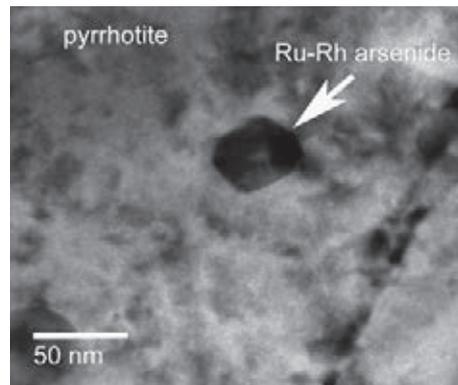


Abb. 3: Diese Aufnahme mit dem hochauflösenden Transmissionselektronenmikroskop (HRTEM) am GFZ brachte erstmals den Beweis für Nanominerale der Platinmetalle im Merensky Reef (Ru= Ruthenium; Rh=Rhodium). (Foto: R. Wirth, GFZ)

Fig. 3: This image from the high-resolution transmission electron microscope (HRTEM) at GFZ furnished the first proof of natural nanominerals of platinum.

im Bushveld mit den Prozessen der Abkühlung, Kristallisation und chemischen Fraktionierung des Magmas zusammenhängt. Darauf weisen die Form und die räumliche Verteilung der Erzlagen sowie deren Mineralbestand, chemische Zusammensetzung und Gefüge hin. Aber die 1000-fache Metallanreicherung in diesen Lagen lässt sich durch „klassische“ Vorgänge der Kristallisation und Fraktionierung von Magmen nicht erklären, diese sind nicht effizient genug.

Neue Erklärungsansätze zur Genese der Platinerze ergeben sich vor allem aus Vergleichsstudien zwischen dem Bushveld-Komplex in Südafrika und der Skaergaard-Intrusion in Grönland, an denen das GFZ gemeinsam mit zwei internationalen Gruppen beteiligt ist. Beide Intrusionen haben einen ähnlichen Aufbau und eine ähnliche chemische Zusammensetzung, nur ist Skaergaard deutlich kleiner und die Platinvererzung dort ist derzeit wirtschaftlich uninteressant.

Schon 1995 postulierten *Tredoux et al. (1995)*, dass die Anreicherung der Platinelemente in Bushveld bereits vor der Kristallisation in der Schmelze beginnt, und zwar durch die Bildung atomarer Cluster oder „nano-nuggets“, die als Kristallisationskeime dienen und die Abtrennung der Metalle aus dem Magma effizienter machen. Die Existenz solcher Cluster in natürlichen Platinerzen konnte erst nach der Entwicklung geeigneter Technologien nachgewiesen werden. Im Jahr 2013 ist es am GFZ mittels hochauflösender Transmissionselektronenmikroskopie gelungen, erstmals Nanopartikel von Platinmineralen in Proben des Merensky Reefs nachzuweisen (*Wirth et al., 2013*) (Abb. 3). Weitere Untersuchungen zur Charakterisierung dieser Phasen und zu deren Rolle bei der Vererzung dauern an.

Einen anderen Ansatz verfolgt die „Skaergaard-Gruppe“, die mit Feldstudien und Laborexperimenten die physikalisch-chemische Entwicklung der Schmelze während der Kristallisation in einer Magmenkammer untersuchen. Manche Minerale enthalten noch Einschlüsse von Schmelztropfen (heute Glas) und die Schmelzeinschlüsse in Skaergaard geben Hinweise darauf, dass eine Entmischung in der Schmelze während der Kristallisation stattfand. Bei der Entmischung entstehen zwei Schmelzen, die sich wegen unterschiedlicher Dichte und Viskosität voneinander trennen können. Der Nachweis von Schmelzentmischung in Gesteinen der Skaergaard-Intrusion wurden von *Jakobsen et al. (2005; 2011)* und *Holness et al. (2011)* publiziert. Parallel dazu zeigten experimentelle Arbeiten am GFZ (*Veksler et al., 2007; Veksler, 2009*), dass die Schmelzentmischung auch eine effiziente chemische Trennung von Elementen bewirkt. Das trifft zum Beispiel auf die Elemente Eisen und Phosphor zu, und genau diese sind an bestimmten Stellen der Skaergaard- und Bushveld-Intrusionen stark angereichert. In Bushveld treten vielerorts die enigmatischen „Iron-Rich Ultramafic Pegmatites“ oder IRUPs auf. IRUPs sind dunkle Intrusivgesteine, die bevorzugt im Bereich der erzführenden Lagen im Merensky Reef und in der tiefen Lage UG2 vorkommen und diese durchschlagen (Abb. 4). Ihre Entstehung und ihre Signifikanz für die Platinvererzung konnte bisher nicht erklärt werden. Ob die Prozesse der Schmelzentmischung zur Lösung dieser Fragen beitragen können, wird derzeit in einem DFG-Projekt gemeinsam mit der Universität Kapstadt und der Technischen Universität Berlin geprüft.

### Ausblick: Mineralforschung für die Rohstoffeffizienz

Detaillierte Kenntnisse der platinhaltigen Minerale und ihrer Verteilung im Erz tragen dazu bei, die Prozesse der Erzbildung im Bushveld-Komplex besser zu verstehen, wie hier am Beispiel der „nano-nuggets“ von *Wirth et al. (2013)* gezeigt wird. Dabei sind vor allem quantitative Informationen über Korngrößen und Kornformen der Erzminerale für die Entschlüsselung der Bildungsprozesse entscheidend. Dieselben Daten werden auch für die Verfahrensentwicklung in der Erzaufbereitung und Metallgewinnung benötigt. Die Grundlagenforschung und angewandte Forschung sollen daher durch ein neues, vom GFZ koordiniertes Projekt AMREP (Angewandte Mineralogie für Ressourceneffizienz der Platinmetalle) verbunden werden. Die effiziente Gewinnung von nur wenigen Gramm Platin pro Tonne Gestein ist schwierig und teuer, was unter anderem daran liegt, dass die Platinträgerminerale im Erz fein verteilt, sehr feinkörnig und mineralogisch verschieden sind. Diese Faktoren beeinflussen ganz entscheidend die Erzaufbereitung. Derzeit liegt im Durchschnitt die Gesamteffizienz der Metallgewinnung in Bushveld bei 70 bis 80%. Das bedeutet, dass 20 bis 30% der Platingehalte in den Erzlagen ungenutzt auf Halden lagern. Das Ziel des Projekts AMREP ist es, die Effizienz der Metallgewinnung durch bessere Kenntnisse der Erzmineralogie und andere aufbereitungsrelevante Eigenschaften der Erze zu steigern. Damit können wichtige Beiträge zu einer verbesserten Ressourcennutzungseffizienz und Versorgungssicherheit geleistet werden.



Abb. 4: An der Abbauwand einer Platinmine im südlichen Bushveld-Komplex sind mehrere dunkle Intrusionen von eisenreichen Gesteinen (IRUPs) zu sehen. Die Erzlage UG2 liegt am Fuße der Abbauwand. (Foto: R. Trumbull, GFZ)

Fig. 4: The far wall of an open pit platinum mine in the southern Bushveld Complex shows numerous intrusions of dark, iron-rich rocks (IRUPs). The UG2 ore horizon is located at the foot of the pit.

### Literatur

- Holness, M. B., Stripp, G., Humphreys, M. C. S., Veksler, I., Nielsen, T. F. D., Tegner, C. (2011): Silicate Liquid Immiscibility within the Crystal Mush: Late-stage Magmatic Microstructures in the Skaergaard Intrusion, East Greenland. - *Journal of Petrology*, 52, 1, p. 175-222. DOI: <http://doi.org/10.1093/petrology/egq077>
- Jakobsen, J. K., Veksler, I., Tegner, C., Brooks, C. K. (2011): Crystallization of the Skaergaard Intrusion from an Emulsion of Immiscible Iron- and Silica-rich Liquids: Evidence from Melt Inclusions in Plagioclase. - *Journal of Petrology*, 52, 2, p. 345-373. DOI: <http://doi.org/10.1093/petrology/egq083>
- Jacobsen, J. K., Veksler, I., Tegner, C., Brooks, C. K. (2005): Immiscible iron- and silica-rich melts in basalt petrogenesis documented in the Skaergaard intrusion. - *Geology*, 33, 11, p. 885-888. DOI: <http://doi.org/10.1130/G21724.1>
- Tredoux, M., Lindsay, N. M., Davies, G., McDonald, I. (1995): The fractionation of platinum group elements in magmatic systems, with the suggestion of a novel causal mechanism. - *South African Journal of Geology*, 98, 2, 157-167.
- Veksler, I. (2009): Extreme iron enrichment and liquid immiscibility in mafic intrusions: experimental evidence revisited. - *Lithos*, 111, p. 72-82. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.lithos.2008.10.003>
- Veksler, I., Dorfman, A. M., Borisov, A. A., Wirth, R., Dingwell, D. B. (2007): Liquid Immiscibility and the Evolution of Basaltic Magma. - *Journal of Petrology*, 48, 11, p. 2187-2210. DOI: <http://doi.org/10.1093/petrology/egm056>
- Wirth, R., Reid, D., Schreiber, A. (2013): Nanometer-sized Platinum-Group Minerals (PGM) in base metal sulfides: new evidence for an orthomagmatic origin of the Merensky Reef PGE ore deposit, Bushveld Complex, South Africa. - *Canadian Mineralogist*, 51, 1, p. 143-155. DOI: <http://doi.org/10.3749/canmin.51.1.143>