

# Manteldynamik, magmatische Prozesse und das Aufbrechen der Kontinente

Robert B. Trumbull, Jakob K. Keiding, Ilya Veksler, Rolf L. Romer  
Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

*The separation of Africa and South America about 130 million years ago was accompanied by huge volumes of magma derived from the mantle. Erosion has removed many of the surficial lavas but dolerite dyke swarms beneath them are preserved. These dykes are under study to determine the composition of magmas, the age of magmatism, and the direction of extensional stress in the crust. Here, we compare two dolerite dyke swarms from the southern African margin that are separated by about 2000 km. The northern area is the Etendeka Province of NW Namibia with the Henties Bay-Outjo dyke swarm (HOD). The southern area, at the tip of Africa, hosts the False Bay dyke swarm. The dolerites from these two areas differ in compositional diversity and magmatic temperatures, both being higher in the north. Three magma types are distinguished in the northern area and only one in the south. Temperatures calculated from olivine-melt equilibrium show a north-south decrease by about 150 °C. Converted to mantle potential temperature and compared with global averages, the data indicate “normal” upper mantle temperatures in southern region like in the mid-ocean ridge systems (1380 °C), and mantle temperatures in the northern area (1520 °C) similar to hotspot islands like Hawaii and Iceland. We conclude that breakup-related magmatism in the south was related to extension and passive decompression of an upper mantle with normal temperature and composition. The Tristan mantle plume greatly enhanced magma production in the Etendeka Province but was not the cause of continental breakup.*



Die Dynamik des Erdmantels, das Aufbrechen von Superkontinenten wie Gondwana und die Entwicklung „neuer“ Kontinentalränder im Südatlantik stehen im Fokus des vom Deutschen GeoForschungsZentrum GFZ gemeinsam mit Partnern koordinierten DFG-Schwerpunktprogramms „SAMPLE“ (South Atlantic Margin Processes and Links with onshore Evolution). Die multidisziplinären Teilprojekte liefern Beiträge zu den Themen Lithosphärenstruktur, Deformation, Magmatismus und Breakup-Prozesse, sowie zur Sedimentationsentwicklung, Reifung organischen Materials und thermogene Methan-Migration in marinen Sedimentbecken. Die letztgenannten Themen liefern Beiträge sowohl für die Exploration und Erschließung von Kohlenwasserstoffressourcen (KW) als auch für die Bilanzierung natürlicher Beiträge zum Treibhauseffekt.

### Forschungsschwerpunkt Südatlantik: Stofftransport von der Kern-Mantel-Grenze zur Erdoberfläche

Zu den aktuellen, ungelösten Problemen der Geodynamik zählt die stoffliche und physikalische Beschaffenheit der tiefsten Schichten des Erdmantels. Die Untersuchung dieser Fragestellung ist wichtig, weil angenommen wird, dass sogenannte Mantelplumes im Grenzbereich zwischen Erdmantel und Erdkern entstehen. Ein Mantelplume ist ein örtlich begrenzter Bereich im Mantel, der aufsteigt, weil er wegen seiner thermischen und gegebenenfalls auch stofflichen Eigenschaften leichter ist als der umgebende Mantel. Ein aus dem tiefsten Mantel aufsteigender Mantelplume hat auf Grund der enormen Auftriebskraft und Wärmeenergie eine große Wirkung auf die Lithosphäre. Neben mechanischen Prozessen wie Hebung, Ausdünnung und Bruchbildung in der starren Lithosphäre, wird der obere Mantel auch partiell aufgeschmolzen. Es ent-

stehen magmatische Provinzen von gewaltigen Ausmaßen, die sogenannten „Large Igneous Provinces“, die globale Wirkungen auf Umwelt und Leben haben können (Sobolev et al., 2011; vgl. auch Beitrag von Sobolev und Steinberger in diesem Heft). Trifft ein Plume auf dünne, ozeanische Lithosphäre, entsteht ein ozeanisches Plateau, wie z. B. Ontong-Java, Kerguelen oder Hawaii. Unter kontinentaler Lithosphäre führt der Plume zur Bildung mächtiger Basaltdecken, sogenannten Flutbasalten. Das Aufbrechen des Superkontinents Gondwana und die Entstehung des Südatlantiks vor rund 130 Mio. Jahren sind für die Befürworter der „Plumetheorie“ eine Folge des Aufstiegs des Tristan-Plumes (benannt nach der Insel Tristan da Cunha). Andere Forscherinnen und Forscher beschränken die Rolle des Tristan-Plumes auf eine thermisch bedingte, erhöhte Schmelzbildung im oberen Mantel. Manche stellen die Existenz von Mantelplumes insgesamt in Frage und meinen, die Dehnung und das Aufbrechen der Lithosphäre sowie auch die erhöhte Schmelzbildung können durch Prozesse im oberen Mantel erklärt werden, wie in der klassischen Theorie der Plattentektonik beschrieben. Die Beantwortung dieser Frage ist nicht nur wichtig, um die Ursachen für die wechselnde Bewegung der Lithosphärenplatten zu klären, sondern hat auch eine fundamentale Bedeutung für die globalen Stoffkreisläufe von z. B. Kohlenstoff oder Wertmetallen wie Kupfer und Platin. Für den Stoffkreislauf ist die Tiefe, aus welcher das Plume-Material stammt, entscheidend bzw. auch ob der gesamte Mantel oder nur die oberen Mantelschichten am Materialaustausch teilnehmen.

Um diese Fragen zu lösen, beleuchten Geophysikerinnen und Geophysiker, Petrologinnen und Petrologen sowie Geodynamik-Modelliererinnen und -Modellierer unterschiedliche Aspekte der Entstehung des Südatlantiks. Die Geophysik bildet Strukturen in und unter der Lithosphäre ab und trifft Aussagen über die Mächtigkeit und die physikalischen Eigenschaften der Erdschichten (elastische Parameter, elektrische Leitfähigkeit, Wärmeleitfähigkeit und Dichte). Allerdings gelten diese Informationen nur für den heutigen Zustand. Dagegen können geologische und petrologisch-geochemische Untersuchungen an den alten Gesteinen der Region den Zusammenhang zwischen Tektonik und Magmenbildung in der Vergangenheit rekonstruieren. Geochemische und mineralogische Daten geben Auskunft über die Magmenquellen im Mantel sowie über wichtige physikalische Eigenschaften der Magmen selbst (Druck, Temperatur, Dichte, Viskosität). Die zeitliche Einordnung der Prozesse (z. B. Magmenbildung, Krustendehnung, Vulkanismus) wird durch radiometrische Datierungen von Gesteinsproben ermittelt.

*Links: Die Tafelberge der Etendeka-Provinz in NW-Namibia bestehen aus zahlreichen Basaltdecken, die vor rund 130 Mio. Jahren während des Aufbrechens des Superkontinents Gondwana entstanden sind. (Foto: I. Veksler, GFZ)*

*Left: Table mountains in the Etendeka Province of NW Namibia are stacks of lava flows that formed about 130 million years ago during the breakup of the supercontinent Gondwana.*

### Mantelmagmatismus von der Skelettküste zum Kap der Guten Hoffnung

Eine SAMPLE-Projektgruppe unter GFZ-Leitung beschäftigt sich mit der Magmenbildung im Erdmantel und mit dem Mag-



**Kontakt:** R. Trumbull  
(bobby@gfz-potsdam.de)





Abb. 1: Feldaufnahme eines Doleritgangs in der Namibwüste, NW-Namibia. Der schwarze Gang, eine mit Basalt gefüllte Spalte, zieht als langgestreckter Bergrücken durch die Steinwüste. Die Gangorientierung spiegelt die Extensionsrichtung an dieser Stelle vor 130 Mio. Jahren wieder. (Foto: I. Veksler, GFZ)

Fig. 1: Field photo of a dolerite dyke in the Namib desert, NW Namibia. The black dyke is a fracture filled with basalt, which resists erosion and forms a sharp linear ridge in the desert. The dyke orientation reflects the stress directions in this locality 130 million years ago.

menaufstieg durch die Lithosphäre. Der Fokus liegt auf dem afrikanischen Kontinentalrand des Südatlantiks. Dort treten basaltische Intrusivgänge auf, welche die Förderspalten für die inzwischen meist erodierten Flutbasaltdecken an der Oberfläche darstellen (Abb. 1). Solche Basalt- oder Doleritgänge sind besonders wertvolle Untersuchungsobjekte. Sie geben Auskunft über die Dehnungsrichtung (Spannungsfeld), über das Alter der Magmenintrusion (Spaltenfüllung) und über Stoffbestand, Herkunft und Bildungsbedingungen der Magmen.

Unser Projekt nutzt die Tatsache, dass Doleritgänge, welche mit der Öffnung des Südatlantiks in Verbindung stehen, entlang des gesamten rund 2000 km langen Verlaufs des Kontinentalrands auftreten, von Angola im Norden bis zum Kap der Guten Hoffnung im Süden. Vergleichsstudien werden an vier ausgewählten Segmenten entlang des Kontinentalrands durchgeführt (Abb. 2 und 3). In jedem der vier Gebiete werden geochemische Untersuchungen und Altersbestimmungen durchgeführt, sowie strukturelle Vermessungen im Gelände und mittels Fernerkundung, um so ein Gesamtbild der tektonischen und magmatischen Entwicklung zu erhalten. Die umfangreichen Feldarbeiten und Probenahmen werden gemeinsam mit den Universitäten von Kapstadt und Windhoek, sowie mit den geologischen Diensten Südafrikas und Namibias durchgeführt.

## Magmenbildung am Kontinentalrand

In diesem Beitrag zeigen wir Forschungsergebnisse aus dem nördlichsten und südlichsten Untersuchungsgebiet. Sie sind

etwa 2000 km voneinander entfernt, weisen aber Doleritgänge gleichen Alters auf.

**Norden:** Die Etendeka-Provinz in NW-Namibia untersuchen wir als Stellvertreterin für magmatische Tätigkeit unter dem Einfluss eines Mantelplumes. Hier trifft der Walvis-Rücken auf den Kontinentalrand und man findet Reste der einst weitläufigen und mächtigen Flutbasaltdecken sowie etwa 20 Intrusivkomplexe mit bis zu 40 km Durchmesser. Zudem treten Tausende von Doleritgängen auf, die als „Henties Bay-Outjo Dykeswarm“ (HOD) bezeichnet werden. Das Alter der Doleritgänge liegt zwischen 128 und 135 Mio. Jahren (Erlank et al., 1984; Renne et al., 1996).

**Süden:** Die Kapprovinz Südafrikas zeigt nur wenige Hinweise auf Magmatismus während der Ozeanöffnung. Reste von Flutbasalten sind nicht bekannt und es gibt nur einen einzigen Intrusivkomplex. Doleritgänge sind nicht selten, obgleich weit weniger zahlreich als im Norden. Stellvertretend für das Gebiet im Süden wird der „False Bay Dykeswarm“ bei Kapstadt untersucht. Das Alter der False-Bay-Dolerite liegt im Bereich von 126 bis 138 Mio. Jahren (Reid et al., 1991).

Im Folgenden werden zwei Aspekte vertieft: einerseits die Magmendiversität und andererseits die Temperaturverteilung im Erdmantel. In beiden Aspekten stellen wir starke Kontraste zwischen den Untersuchungsgebieten im Norden und Süden fest, die für das Gesamtbild der Magmenbildung am Kontinentalrand und für die Rolle des Mantelplumes von großer Bedeutung sind.



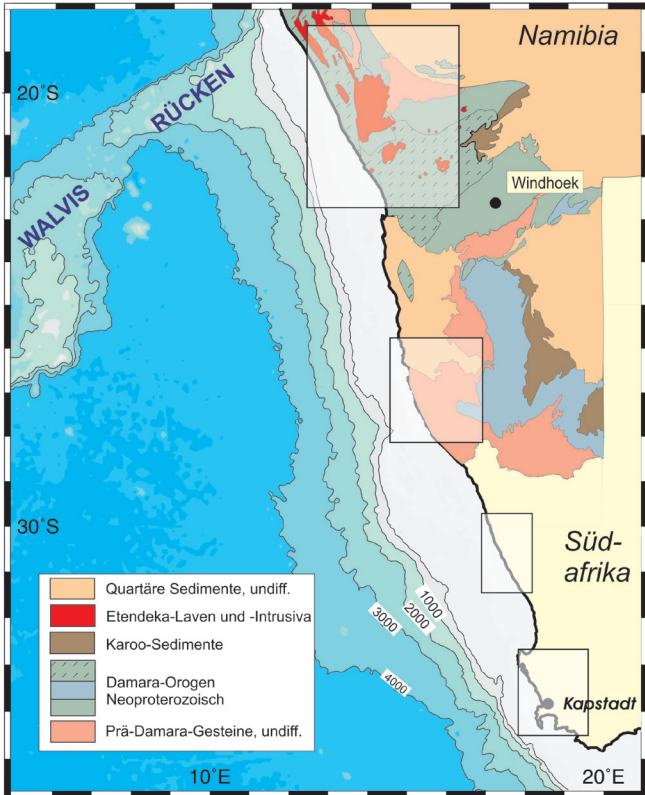


Abb. 2. Karte des südwestlichen Kontinentalrands von Afrika mit der Position der vier Untersuchungsgebiete (Rechtecke). Der Walvis-Rücken ist in der Bathymetrie des Südatlantiks (blaue Farben) deutlich zu sehen.

Fig. 2. This map of the southwestern continental margin of Africa shows the location of the four study areas (boxes). The prominent bathymetric feature of the South Atlantic is the Walvis Ridge.

Abb. 3: Ein Kontrollposten an der Grenze zum Diamantsperrgebiet südlich von Lüderitz, Namibia, in einem der Untersuchungsgebiete (Foto: R. Trumbull, GFZ)

Fig. 3: An entrance gate to the Diamond Restricted Area south of Lüderitz, Namibia, in one of the four study areas.



## Magmendiversität

Die False-Bay-Dolerite im Süden zeigen nur wenig Magmendiversität. Sie haben ähnliche geochemische „Signaturen“ in Bezug auf Spurenelemente und radiogene Isotopenverhältnisse. Die Dolerite stammen daher wahrscheinlich aus einem einzigen Magmentyp. Die geringe Variation innerhalb der Gruppe ist durch Prozesse des Magmenaufstiegs in der Kruste (Kristallisation, Assimilation) entstanden. Im Norden hingegen ist nicht nur die Anzahl der Doleritgänge größer als im Süden, auch ihre chemische Zusammensetzung variiert viel stärker. Im Norden der HOD sind mindestens drei eigenständige Magmentypen vertreten. Diese weisen charakteristische Signaturen auf, vor allem in der Spurenelementverteilung und in den radiogenen Isotopenverhältnissen (Abb. 4), die auf unterschiedliche Magmenquellen deuten (Trumbull et al., 2007). Der weitaus häufigste der drei Magmentypen, der „Tafelberg“-Typ, bildet auch den Hauptanteil der Flutbasalte in der Etendeka-Provinz. Daher gelten die vielen Doleritgänge vom Tafelberg-Typ als Förderkanäle für die Basaltdecken. Die zwei anderen Magmentypen in dem HOD, „Alkalin“-Typ und „Horingbaai“-Typ, sind weitaus seltener, aber für das Gesamtbild wichtiger, denn sie enthalten Hinweise auf Materialeinträge aus dem unteren Mantel. Die radiogenen Nd- und Sr-Isotopenverhältnisse deuten auf nur geringen Krusteneinfluss und auf eine ähnliche Quelle wie die Alkalibasalte von Tristan da Cunha (Abb. 4) hin. Auch weisen manche Dolerite dieser beiden Typen hohe Gehalte an Elementen wie Mg, Cr und Ni auf, die auf hohe Temperaturen in der Mantelquelle hindeuten. Auf eine Abschätzung der Schmelztemperaturen wird im folgenden Abschnitt näher eingegangen.

## Temperaturverteilung im Mantel

Die Basis für eine Berechnung der Schmelzbedingungen in magmatischen Gesteinen sind temperatur- und druckabhängige Phasengleichgewichte, in diesem Fall zwischen Mineralphasen wie Olivin, Pyroxen oder Plagioklas und der basaltischen Schmelze, aus der sie kristallisieren (Abb. 5). Die thermodynamischen Basisdaten sind gut bekannt, so dass man aus chemischen Analysen der Dolerite und deren Kristalle die Kristallisationstemperatur mit einer Genauigkeit von etwa 50 °C ableiten kann (Putirka, 2008). Bedingt durch die Kristallisationsabfolge markieren Gleichgewichtszustände zwischen Olivin und Schmelze die höchsten Temperaturen und sind für eine Abschätzung der primären Schmelzbedingungen am besten geeignet. Die aus dieser Methode abgeleiteten Temperaturen zeigen ein markantes Nord-Süd-Gefälle von etwa 150 °C. Für eine Interpretation der Temperaturunterschiede in Bezug auf den Erdmantel ist eine Umberechnung in die Potentialtemperatur hilfreich. Die Mantel-Potentialtemperatur (TP) ist eine vom Aufschmelzungsgrad und Druck unabhängige Größe und somit für überregionale Vergleiche besser geeignet. Als Referenz gilt die Mantel-Potentialtemperatur für das globale mittelozeanische Spreizungssystem (MORB), mit rund 1300 ± 50 °C. Dieser Wert gilt als „normal“ für den oberen Mantel weltweit. Weitaus höhere TP-Werte wurden für die Hotspot-Inseln wie Hawaii oder Island ermittelt (1450 bis 1600 °C).

In Potentialtemperatur umgerechnet liegen die Maximalwerte im Süden der False-Bay-Dolerite mit 1380 °C nur leicht über den Bereich des „normalen“ Mantels. Dagegen zeigen TP-Werte bis 1520 °C für den Norden (HOD) deutlich erhöhte Manteltemperaturen an (Keiding et al., 2011).

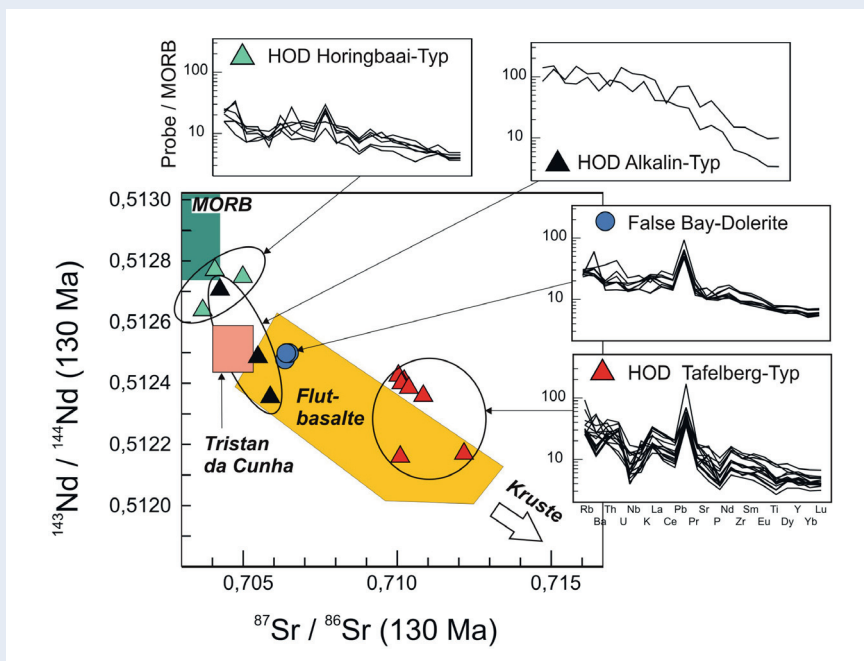


Abb. 4. Der Mittelteil dieser Grafik zeigt die Nd- und Sr-Isotopenverhältnisse der Doleritgänge in den Untersuchungsgebieten; die vier kleineren Felder zeigen die Spurenelementmuster (Elementgehalt normiert durch die Zusammensetzung von MORB=Mid Ocean Ridge Basalt). Die unterschiedlichen Elementmuster und Isotopenverhältnisse sind Merkmale der drei unterschiedlichen Magmentypen im Norden (HOD) und der False Bay-Dolerite im Süden.

Fig. 4. The central plot shows the Nd- and Sr isotope composition of dolerite dykes in the study areas, and the four plots grouped around show the distinctive trace element patterns (sample composition relative to MORB). The trace element patterns and isotope ratios are characteristic features of the three magma types in the northern area (HOD) and the False-Bay dolerites in the southern area.



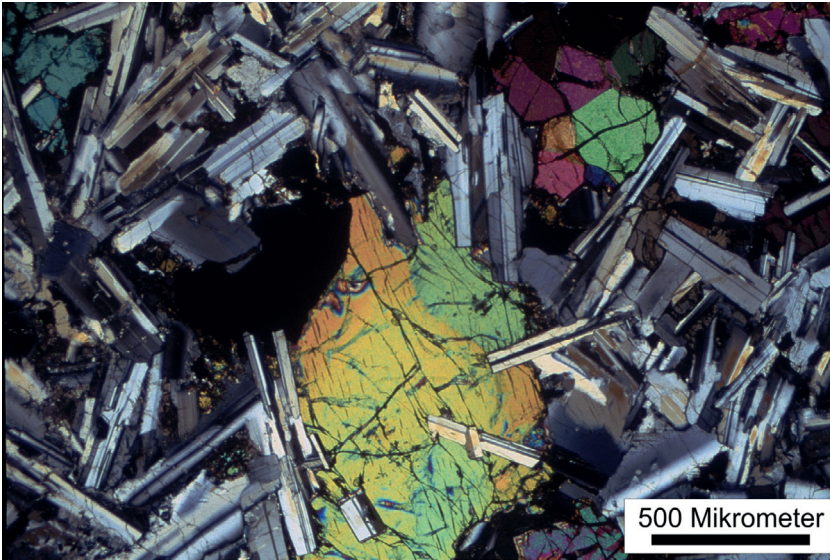


Abb. 5: Kleine Objekte mit großem Informationsgehalt: Gesteinsdünnsschliffe, wie dieser von einem Doleritgang in Namibia, sind die Grundlage für Bestimmungen der magmatischen Temperatur- und Druckbedingungen. Die farbigen Kristalle sind Klinopyroxene und Olivine, die graugestreiften Kristalle sind Plagioklase. (Foto: R. Trumbull, GFZ)

Fig. 5: Small objects hold big secrets: Thin sections like this one of a dolerite dyke from Namibia are the basis for determining magmatic temperature and pressure. The coloured crystals are clinopyroxene and olivine, the grey striped crystals are plagioclase.

## Ausblick

Die hier gezeigten Untersuchungsergebnisse tragen wesentlich zur Beantwortung der Frage nach der Bedeutung eines Mantelplumes für die Öffnung des Südatlantiks bei. Wir konnten einen deutlichen thermischen und stofflichen Einfluss eines Mantelplumes im Norden des Gebiets zeigen, aber genauso deutlich ist das Fehlen dieses Einflusses im Süden. Alles deutet darauf hin, dass der Kontinentaufbruch im Süden ohne Einfluss eines Mantelplumes erfolgte und dass die magmatische Tätigkeit dort als Folge der Dehnung der Lithosphäre und Druckentlastung des oberen Mantels entstand. Die petrologische Untersuchung von Doleritgängen hat sich als erfolgreiches Mittel für eine Kartierung der Temperaturverteilung vor 130 Mio. Jahren im Erdmantel erwiesen. Gerade die Verteilung von Wärme und Masse aus dem Erdmantel während des Aufbrechens ist für den integrierten Forschungsansatz im Südatlantik von allgemeiner Bedeutung. So hat die Verteilung starker magmatischer Tätigkeit entlang des Kontinentalrands beispielsweise entscheidende Konsequenzen für die Subsidenz- und Temperaturentwicklung der Sedimentbecken und somit auch für deren Kohlenwasserstoffpotential. Informationen über die Verteilung magmatischer Aktivität am Kontinentalrand können daher in besonderer Weise bei der Planung von Kohlenwasserstoff-Explorationsvorhaben helfen.

Das GFZ wird gemeinsam mit seinen Forschungspartnern im Schwerpunktprogramm weiteren Fragen nachgehen: Zum einen soll die Höhe des Gesamteintrags von S, Cl, F und CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre durch die magmatische Tätigkeit im Südatlantik untersucht werden, um die globale Wirkung dieses Ereignisses zu verstehen. Weiterhin ist geplant, eine Datenbasis zur Ermittlung des Rohstoffpotentials dieser magmatischen Provinz zu erarbeiten. Ähnliche Flutbasaltprovinzen in Sibirien und SO-China enthalten bedeutende Ressourcen an Cr, Ni, Cu und Platinmetallen, das könnte auch auf den Südatlantik zutreffen.

## Mehr Informationen zum Projekt SAMPLE unter:

[www.sample-spp.de](http://www.sample-spp.de)

## Literatur

- Erlank, A. J., Marsh, J. S., Duncan, A. R., Miller, R. M., Hawkesworth, C. J., Betton, P. J., Rex, D. C. (1984): Geochemistry and petrogenesis of the Etendeka volcanic rocks from SWA/ Namibia. – In: Erlank, A. J. (Eds.), Petrogenesis of the volcanic rocks of the Karoo province : national geodynamics programme, (Special publication / Geological Society of South Africa ; 13), 195-245.
- Keiding, J. K., Trumbull, R. B., Veksler, I. V., Jerram, D. A. (2011): On the significance of ultra-magnesian olivines in basaltic rocks. - *Geology*, 39, 12, 1095-1098, 10.1130/G32214.1.
- Putirka, K. D. (2008): Thermometers and barometers for volcanic systems. - In: Putirka, K. D., Tepley, F. J. (Eds.), Minerals, Inclusions and Volcanic Processes, (Reviews in mineralogy and geochemistry ; 69), Mineralogical Society of America, 61-120.
- Reid, D. L., Erlank, A. J., Rex, D. C. (1991): Age and correlation of the False Bay dolerite dyke swarm, south-western Cape, Cape Province. - *South African Journal of Geology*, 94, 2-3, 155-158.
- Renne, P. R., Glen, J. M., Milner, S. C., Duncan, A. R. (1996): Age of Etendeka flood volcanism and associated intrusions in southwestern Africa. - *Geology*, 24, 7, 659-662, 10.1130/0091-7613(1996)024<0659:AOEFVA>2.3.CO;2.
- Sobolev, S. V., Sobolev, A. V., Kuzmin, D. V., Krivolutsкая, N. A., Petrunin, A. G., Arndt, N. T., Radko, V. A., Vasiliev, Y. R. (2011): Linking mantle plumes, large igneous provinces and environmental catastrophes. - *Nature*, 477, 7364, 312-316, 10.1038/nature10385.
- Trumbull, R. B., Reid, D. L., De Beer, C. H., Romer, R. L. (2007): Magmatism and continental breakup at the west margin of southern Africa: A geochemical comparison of dolerite dikes from NW Namibia and the Western Cape. - *South African Journal of Geology*, 110, 2-3, 477-502, 10.2113/gssajg.110.2-3.477