

EINSCHLÜSSE IN DIAMANTEN –
“BOHRLÖCHER“ IN DEN TIEFEN ERDMANTEL

von

Thomas Stachel

Institut für Mineralogie
Senckenberganlage 28, D-60054 Frankfurt

Vortrag vor der Österreichischen Mineralogischen Gesellschaft
gehalten am 24. Jänner 2000 in Wien und am 25. Jänner 2000 in Leoben

Einleitung

Unser Wissen über die mineralogische und chemische Zusammensetzung des Erdmantels basiert auf verschiedenen Informationsquellen, wie etwa direkten Untersuchungen an Mantelxenolithen und primären Magmen, Hochdruckexperimenten oder Modellierungen geophysikalischer Daten. Die unmittelbarsten Zeugen, Mantelxenolithe, stammen, von wenigen Ausnahmen abgesehen (SAUTTER et al., 1991; MACDOUGALL & HAGGERTY, 1999), aus dem lithosphärischen Erdmantel und erlauben uns dadurch Einblicke bis in etwa 200 km Tiefe. Teilweise Reequilibration und metasomatische Überprägung von Xenolithen während des Aufstiegs in einer Schmelze und ihre starke Anfälligkeit für Alteration erschweren allerdings die Interpretation der gewonnenen Daten. Daraus ergibt sich der unmittelbare Vorteil ähnlicher Untersuchungen an Mineraleinschlüssen in Diamanten: durch einen chemisch inerten Container von allen späteren Einflüssen abgeschirmt und ohne Partner für eine mögliche Reequilibration, stellen sie unveränderlich frische Zeugen ihrer Quellregionen im Erdmantel dar. In Abhängigkeit von der Größe des lokalen geothermischen Gradienten, tritt Diamant erst ab einer Tiefe von 140 bis 200 km als die stabile Modifikation des Kohlenstoffs auf. Im Vergleich zu Mantelxenolithen liefern uns Diamanten dafür aber Informationen aus einem wesentlich größeren Tiefenbereich, der sogar die 660 km Diskontinuität überschreitet.

Einschlußsuiten

Bereits die ersten, vor etwa 30 Jahren begonnenen Untersuchungen an Einschlüssen in Diamanten ergaben, daß eine mineralogische Aufteilung in eine eklogitische und eine peridotitische Einschlußsuite möglich ist (MEYER & BOYD, 1972; SOBOLEV et al., 1976; SOBOLEV, 1977; HARRIS & GURNEY, 1979), entsprechend den beiden Hauptgesteinen des Oberen Erdmantels.

Die peridotitische Suite lässt sich weiter in eine lherzolitische (klinopyroxenführende) und eine harzburgitische (klinopyroxenfreie) Paragenese unterteilen. Nachfolgende geothermobarometrische Untersuchungen ergaben, dass beide Einschlussuiten (eklogitisch und peridotitisch) aus dem subkontinentalen lithosphärischen Oberen Erdmantel stammen (BOYD & GURNEY, 1986). Für peridotitische Einschlüsse erlauben geeignete Mineralparagenesen die Bestimmung paläogeothermischer Gradienten (Abb. 1), die in der Regel einem Oberflächenwärmefluß von 40–42 mW/m^2 entsprechen und damit typische Schildgeothermen darstellen (BOYD & GURNEY, 1986; STACHEL & HARRIS, 1997).

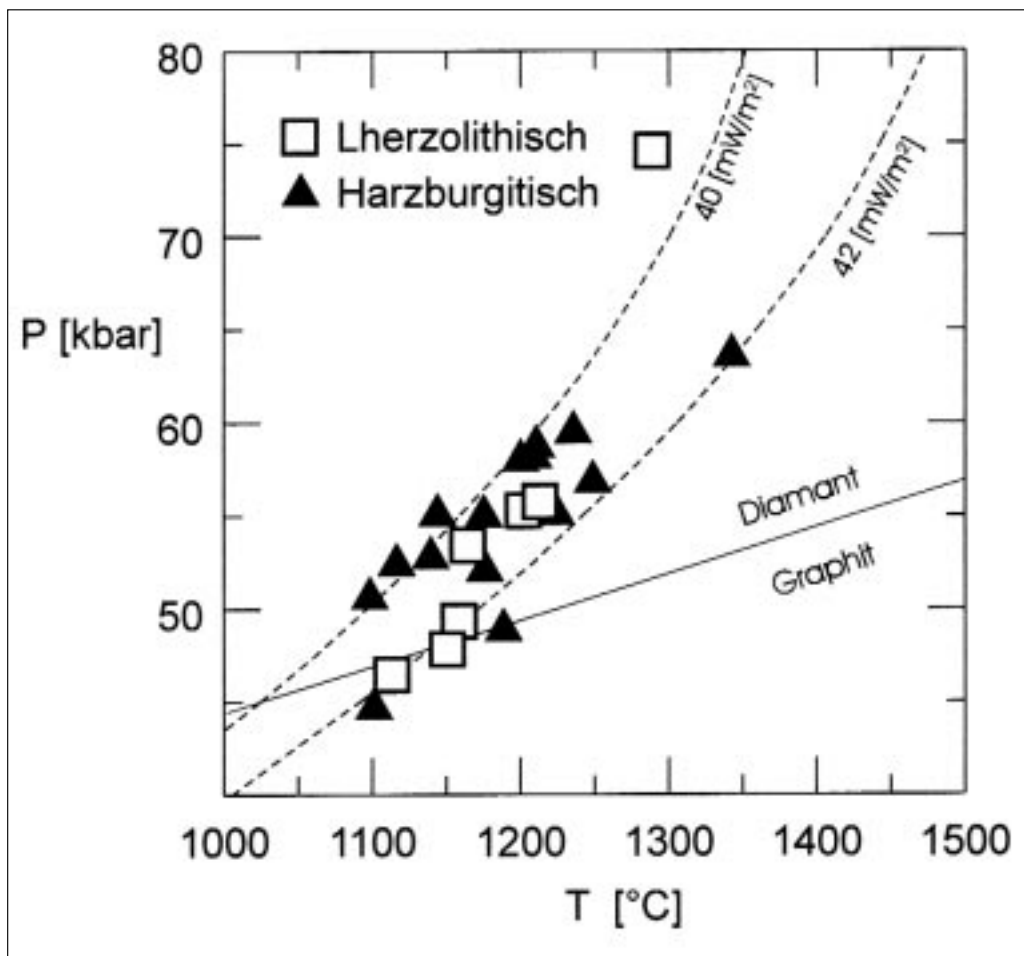


Abb. 1

Druck- und Temperaturabschätzungen (HARLEY, 1984; BREY & KÖHLER, 1990) für lherzolitische und harzburgitische Granat-Orthopyroxen-Einschlüsse in Diamanten weltweit. Konduktive Geothermen für 40 bis 42 mW/m^2 Oberflächenwärmefluß nach POLLACK & CHAPMAN (1977).

Zusätzlich zu diesen lithosphärischen Diamanten wurden inzwischen auch Einschlüsse gefunden, die aus der Übergangszone (410–660 km) und sogar aus dem Unteren Erdmantel (> 660 km) stammen. Experimentelle Arbeiten (RINGWOOD, 1967; IRIFUNE, 1987) belegen, dass Si in Granat ab einem Druck von ca. 8 GPa (240 km) neben der Tetraederposition zunehmend die normalerweise größeren dreiwertigen Ionen (Al, Cr und Fe³⁺) vorbehaltene Oktaederposition besetzt, ein Vorgang, der einer Löslichkeit von Pyroxen in der Granatstruktur (majoritische Granate) entspricht. Die höchsten beobachteten Majoritgehalte in Diamanteinschlüssen können nur durch eine Bildung innerhalb der Übergangszone (410–660 km) erklärt werden (MOORE & GURNEY, 1985; DEINES et al., 1991; STACHEL et al., 2000a). Eine Bildung von Diamanten im Unteren Erdmantel wird durch Einschlüsse von Ferroperiklas zusammen mit Stishovit und Magnesium- und Kalziumsilikatperovskiten belegt, wie sie in Diamanten aus der brasilianischen Mine Sao Luiz (HARTE & HARRIS, 1994; HARTE et al., 1999) sowie aus dem Kankan-Gebiet in Guinea, West-Afrika, (STACHEL et al., 2000b) vorliegen. Für Guinea konnten wir dabei durch die Beobachtung retrograder Phasenumwandlungen ursprünglicher Kalziumsilikatperovskite dokumentieren, dass die Exhumierung der Diamanten aus dem Unteren Erdmantel bis in Tiefen von etwa 300–250 km (Lithosphärenbasis) recht langsam stattfindet, von wo aus dann eine rasche vulkanische Förderung erfolgt (JOSWIG et al., 1999). Eine in den Einschlüssen dokumentierte starke Anreicherung von inkompatiblen Spurenelementen sowie das Auftreten von positiven und negativen Eu-Anomalien (STACHEL et al., 2000b) legen eine Ableitung der Diamanten aus dem Unteren Erdmantel aus subduzierter ozeanischer Kruste (Megalith-Modell von RINGWOOD, 1991) nahe.

Entstehung von Diamanten und Herkunft der kratonischen Lithosphäre

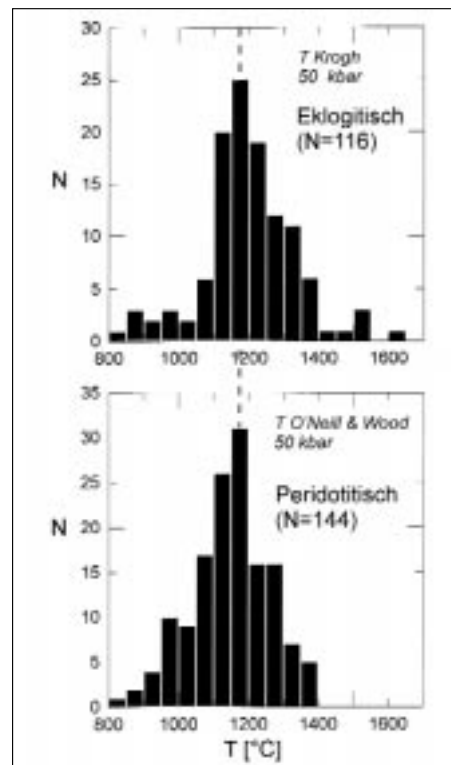
Einschlüsse weisen in der Regel eine kubo-oktaedrische Symmetrie auf, die durch die sehr hohe Formenergie des umgebenden Diamanten erzwungen wird. Daraus lässt sich auf eine gleichzeitige Bildung von Einschluß und Diamant schließen. Somit können im Prinzip radiogene Isotopensysteme (Sm-Nd, ⁴⁰Ar-³⁹Ar, Re-Os) in Einschlüssen zur Altersdatierung von Diamanten verwendet werden. Ein Problem ist dabei die geringe Korngröße der Einschlüsse, aufgrund derer für das Sm-Nd System zusammengesetzte Proben aus einer Vielzahl von Diamanten gemeinsam untersucht werden müssen. Zudem besteht Unsicherheit darüber, ob hohe Sm-Nd-Modellalter nicht nur das Alter einer chemisch langfristig isolierten Diamantquellregion widerspiegeln. PEARSON & SHIREY (1999) geben eine Zusammenfassung bisheriger Datierungen und kommen zu der Bewertung, dass trotz aller Unsicherheiten von einer Diamantbildung im allgemeinen deutlich (bis zu 3 Ga) vor dem Eruptionsalter der jeweiligen Kimberlitschlote auszugehen ist. Lange Mantelresidenzzeiten (> 1 Ga) werden zudem auch durch den generell hohen Aggregationszustand von im Diamantgitter als Spurenelement eingebautem Stickstoff angezeigt (HARRIS, 1987). Das bedeutet, dass Diamanten in keiner genetischen Beziehung zum transportierenden Kimberlitmagma stehen.

Nach einem vor allem von BOYD & GURNEY (1986) entwickelten Modell soll die Bildung peridotitischer Diamanten im Zuge metamorpher oder metasomatischer Ereignisse unter Subsolidusbedingungen in einem Mantelbereich stattfinden, der durch die Extraktion von Komatiiten (BOYD, 1989) im Archaikum chemisch verarmt wurde.

Die Anordnung von Wachstumsflächen und die polyedrische Gestalt natürlicher Diamanten sowie die Ausbildung glatter Oberflächen verweisen allerdings auf Wachstum in einem freien Raum (Schmelze) hinein (SUNAGAWA et al., 1984; BULANOVA, 1995). Untersuchungen zur Kohlenstoffisotopie ($\delta^{13}\text{C}$) von Diamanten zeigen, dass die peridotitische Suite eine angenäherte Normalverteilung um den Erdmantelwert von -5‰ (relativ zum PD-Belemniten Standard) bildet, was im Einklang mit einer primordialen Herkunft des Kohlenstoffs aus dem Erdmantel steht (GURNEY, 1989). Die Kohlenstoffisotopie eklogitischer Diamanten zeigt ebenfalls ein Maximum nahe -5‰ , die Verteilung ist allerdings deutlich zu isotopisch leichteren Werten hin geneigt (-34 bis $+3\text{‰}$). Daraus wurde auf einen Einfluss organischen Kohlenstoffs (-35 bis -20‰) geschlossen, der sich aus der sedimentären Auflage subduzierter ozeanischer Kruste ableiten soll (FRANK, 1969; KIRKLEY et al., 1991). Eklogitische Diamanten würden somit metamorph während der Subduktion ozeanischer Lithosphäre gebildet. Untersuchungen der Sauerstoffisotopie ($\delta^{18}\text{O}$) diamantführender Eklogitxenolithe (JACOB et al., 1994; JACOB & FOLEY, 1999) stützen eine solche Subduktionshypothese, wobei vor allem die Beobachtung von Trends hin zu isotopisch leichterem Sauerstoff wohl nur durch die Seewasseralteration ozeanischer Kruste erklärt werden kann. Isotopische Fraktionierung primordialen Kohlenstoffs im Zuge eines Rayleigh Destillationsprozesses könnte die beobachteten $\delta^{13}\text{C}$ -Werte eklogitischer Diamanten allerdings ebenfalls erklären (GALIMOV, 1991). Zudem konnten CARTIGNY et al. (1998) zeigen, dass die Stickstoffisotopie eklogitischer Diamanten keinerlei Hinweise auf den Einfluss einer subduzierten Komponente enthält. In jedem Fall belegen geothermometrische Daten (Abb. 2), dass die Bildung eklogitischer Einschlussparagenesen bei Temperaturen um 1150°C stattfindet, also bei den gleichen Temperaturen, die wir für peridotitische Diamanten finden, womit eine Bildung eklogitischer Diamanten in einer kalten, abtauchenden ozeanischen Platte auszuschließen ist.

Abb. 2

Equilibrierungstemperaturen für Einschlussparagenesen in eklogitischen (Grt-Cpx, KROGH, 1988) und peridotitischen (Ol-Grt, O'NEILL & WOOD, 1979; O'NEILL, 1980) Diamanten, berechnet für einen angenommenen Druck von 50 kbar.



Auf der Basis von Spurenelementuntersuchungen (hauptsächlich SEE) und in Anbetracht der hohen Cr/Al-Verhältnisse in der peridotitischen Diamantquellregion haben wir ein neues, integriertes Modell für die Genese beider Diamantsuiten entwickelt (STACHEL et al., 1998). Die Reservoir für peridotitische und eklogitische Diamanten entstanden demnach gemeinsam an mittelozeanischen Rücken, vermutlich bereits im späten Archaikum. Während das peridotitische Reservoir einer durch Schmelzextraktion verarmten ozeanischen Lithosphäre entspricht, ist das Ausgangsgestein der diamantführenden Eklogite die ozeanische Kruste selbst (Abb. 3). Die SEE-Gehalte der eklogitischen Einschlüsse belegen allerdings, dass diese ozeanische Kruste nach der Umwandlung in Eklogit mehr als 10 % Schmelze verloren haben muss (IRELAND et al., 1994), was mit der Beobachtung in Einklang steht, dass Coesit in diamantführenden Eklogiten nur akzessorisch auftritt. Die durch hohe Grade der partiellen Schmelzbildung stark verarmte archaische ozeanische Lithosphäre kann sich aufgrund ihrer relativ geringen Dichte dauerhaft an der Basis kratonischer Lithosphäre anheften (Abb. 3). In diesem verschuppten Bereich ehemaliger ozeanischer Lithosphäre und eklogitischer Kruste findet dann Diamantbildung im Zuge wiederholter metasomatischer Anreicherungsprozesse statt, die zum Teil auf silikatisch-karbonatitische Schmelzen, zum Teil auf $\text{CH}_4\text{-H}_2\text{O}$ -reiche Fluide zurückgehen. Die Bildung peridotitischer und eklogitischer Diamanten findet so unter den gleichen PT-Bedingungen aber in chemisch sehr unterschiedlichen Reservoiren statt.

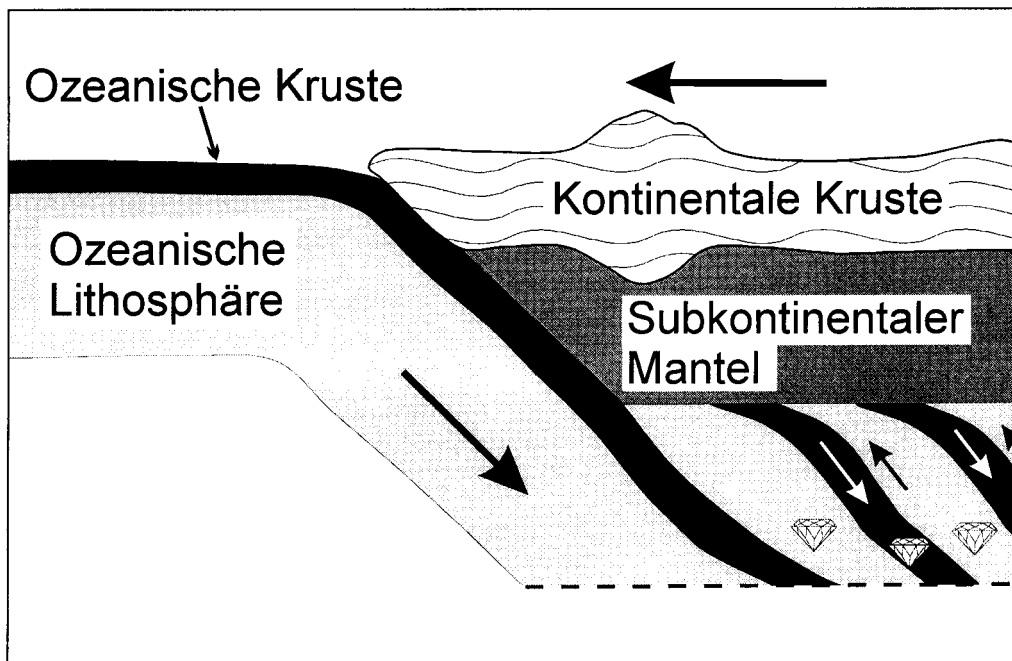


Abb. 3

Modell für die Imbrikation ozeanischer Kruste und Lithosphäre bei flacher Subduktion nach HELMS-STAEDT & SCHULZE (1989). Nach Einschuppung in die kratonische Lithosphäre wachsen peridotitische und eklogitische Diamanten unter ähnlichen PT-Bedingungen aber in unterschiedlichen chemischen Reservoiren.

Literatur

- BOYD, F.R. (1989): Compositional distinction between oceanic and cratonic lithosphere. - *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 96, 15-26.
- BOYD, F.R. & GURNEY, J. (1986): Diamonds and the African lithosphere. - *Science*, 232, 472-477.
- BREY, G.P. & KÖHLER, T. (1990): Geothermobarometry in four-phase lherzolites II. New thermobarometers, and practical assessment of existing thermobarometers. - *J. Petrol.*, 31, 1353-1378.
- BULANOVA, G.P. (1995): The formation of diamond. - *Journal of Geochemical Exploration*, 53, 1-23.
- CARTIGNY, P., HARRIS, J.W. & JAVOY, M. (1998): Eclogitic diamond formation at Jwaneng: No room for a recycled component. - *Science*, 280, 1421-1424.
- DEINES, P., HARRIS, J. & GURNEY, J. (1991): The carbon isotopic composition and nitrogen content of lithospheric and asthenospheric diamonds from the Jagersfontein and Koffiefontein kimberlite, South Africa. - *Geochim. Cosmochim. Acta*, 55, 2615-2625.
- FRANK, F.C. (1969): Diamonds and deep fluids in the upper mantle. - In: S.K. RUNCORN (Editor), *The Application of Modern Physics to the Earth's and Planetary Interiors*. Wiley, pp. 247-250.
- GALIMOV, E.M. (1991): Isotope fractionation related to kimberlite magmatism and diamond formation. - *Geochim. Cosmochim. Acta*, 55, 1697-1708.
- GURNEY, J. (1989): Diamonds. - In: J. ROSS et al. (Editors), *Kimberlites and related rocks*. GSA Spec Publ 14. Blackwell, Carlton, pp. 935-965.
- HARLEY, S. (1984): An experimental study of the partitioning of iron and magnesium between garnet and orthopyroxene. - *Contrib. Mineral. Petrol.*, 86, 359-373.
- HARRIS, J.W. (1987): Recent physical, chemical, and isotopic research of diamond. - In: P.H. NIXON (Editor), *Mantle Xenoliths*. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, pp. 477-500.
- HARRIS, J.W. & GURNEY, J.J. (1979): Inclusions in diamond. - In: J.E. FIELD (Editor), *The properties of diamond*. Academic Press, London, pp. 555-591.
- HARTE, B. & HARRIS, J. (1994): Lower mantle associations preserved in diamonds. - *Mineral. Mag.*, 58A, 384-385.
- HARTE, B., HARRIS, J., HUTCHINSON, M., WATT, G. & WILDING, M. (1999): Lower mantle mineral associations in diamonds from Sao Luiz, Brazil. - In: Y. FEI, C. BERTKA & B.O. MYSEN (Editor), *Mantle Petrology: Field Observations and High Pressure Experimentation: A tribute to Francis R. (Joe) Boyd*. Geochemical Society Special Publication No. 6. The Geochemical Society, Houston, pp. 125-153.
- HELMSSTAEDT, H. & SCHULZE, D.J. (1989): Southern African kimberlites and their mantle sample: implications for Archean tectonics and lithosphere evolution. - In: J. ROSS et al. (Editors), *Kimberlites and related rocks*. GSA Spec Publ 14. Blackwell, Carlton, pp. 358-368.
- IRELAND, T.R., RUDNICK, R.L. & SPETSIUS, Z. (1994): Trace elements in diamond inclusions from eclogites reveal link to Archean granites. - *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 128, 199-213.
- IRIFUNE, T. (1987): An experimental investigation of the pyroxene-garnet transformation in a pyrolite composition and its bearing on the constitution of the mantle. - *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 45, 324-336.
- JACOB, D. & FOLEY, S. (1999): Evidence for Archean ocean crust with low high field strength element signature from diamondiferous eclogite xenoliths. - *Lithos*, 48, 317-336.
- JACOB, D., JAGOUTZ, E., LOWRY, D., MATTEY, D. & KUDRJAVTSEVA, G. (1994): Diamondiferous eclogites from Siberia - remnants of Archean oceanic crust. - *Geochim. Cosmochim. Acta*, 58, 5191-5207.
- JOSWIG, W., STACHEL, T., HARRIS, J., BAUR, W. & BREY, G. (1999): New Ca-silicate inclusions in diamonds – tracers from the lower mantle. - *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 173, 1-6.

- KIRKLEY, M.B., GURNEY, J., OTTER, M.L., HILL, S.J. & DANIELS, L.R. (1991): The application of C isotope measurements to the identification of the sources of C in diamonds - a review. - *Applied Geochemistry*, 6, 477-494.
- KROGH, E. (1988): The garnet-clinopyroxene iron-magnesium geothermometer - a reinterpretation of existing experimental data. - *Contrib. Mineral. Petrol.*, 99, 44-48.
- MACDOUGALL, J.D. & HAGGERTY, S.E. (1999): Ultradeep xenoliths from African kimberlites: Sr and Nd isotopic compositions suggest complex history. - *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 170, 73-82.
- MEYER, H. & BOYD, F. (1972): Composition and origin of crystalline inclusions in natural diamonds. - *Geochim. Cosmochim. Acta*, 36, 1255-1273.
- MOORE, R. & GURNEY, J. (1985): Pyroxene solid solution in garnets included in diamonds. - *Nature*, 318, 553-555.
- O'NEILL, H. (1980): An experimental study of the iron-magnesium partitioning between garnet and olivine and its calibration as a geothermometer: corrections. - *Contrib. Mineral. Petrol.*, 72, 337.
- O'NEILL, H. & WOOD, B. (1979): An experimental study of the iron-magnesium partitioning between garnet and olivine and its calibration as a geothermometer. - *Contrib. Mineral. Petrol.*, 70, 59-70.
- PEARSON, D.G. & SHIREY, S.B. (1999): Isotopic dating of diamonds. - In: J. RUIZ & D.D. LAMBERT (Editors), *Applications of radiogenic isotopes to ore deposit research. Economic Geology, Special Publication: SEG Reviews in Economic Geology*, pp. 143-171.
- POLLACK, H. & CHAPMAN, D. (1977): On the regional variation of heat flow, geotherms, and lithospheric thickness. - *Tectonophysics*, 38, 279-296.
- RINGWOOD, A.E. (1967): The pyroxene garnet transformation in the earth's mantle. - *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 2, 255-263.
- RINGWOOD, A.E. (1991): Phase-transformations and their bearing on the constitution and dynamics of the mantle. - *Geochim. Cosmochim. Acta*, 55, 2083-2110.
- SAUTTER, V., HAGGERTY, S.E. & FIELD, S. (1991): Ultradeep (greater than 300 kilometers) ultramafic xenoliths - petrological evidence from the transition zone. - *Science*, 252, 827-830.
- SOBOLEV, N. (1977): Deep-seated inclusions in kimberlites and the problem of the composition of the upper mantle. (Translated from the Russian edition, 1974). - AGU, Washington, 279 pp.
- SOBOLEV, N., YEFIMOVA, E., KOPTIL, V., LAVRENT'YEV, Y. & SOBOLEV, V. (1976): Inclusions of coesite, garnet and omphacite in diamonds of Yakutia - first find of coesite paragenesis. - *Trans. Dokl. USSR Acad. Sci. Earth Sci. Sec.*, 230, 1442-1444.
- STACHEL, T. & HARRIS, J.W. (1997): Syngenetic inclusions in diamond from the Birim field (Ghana) - a deep peridotitic profile with a history of depletion and re-enrichment. - *Contrib. Mineral. Petrol.*, 127, 336-352.
- STACHEL, T., VILJOEN, K.S., BREY, G. & HARRIS, J.W. (1998): Metasomatic processes in lherzolitic and harzburgitic domains of diamondiferous lithospheric mantle: REE in garnets from xenoliths and inclusions in diamonds. - *Earth. Planet. Sci. Lett.*, 159, 1-12.
- STACHEL, T., BREY, G.P. & HARRIS, J.W. (2000a): Kankan diamonds (Guinea) I: from the lithosphere down to the transition zone. - eingereicht.
- STACHEL, T., HARRIS, J.W., BREY, G.P. & JOSWIG, W. (2000b): Kankan diamonds (Guinea) II: lower mantle inclusion parageneses. - eingereicht.
- SUNAGAWA, I., TSUKAMOTO, K. & YASUDA, T. (1984): Surface microtopographics and X-ray topographic study of octahedral crystals of natural diamonds from Siberia. - In: I. SUNAGAWA (Editor), *Materials science of the earth's interior. Terra Scientific, Tokyo*, pp. 331-349.

bei der Redaktion eingegangen: Februar 2000

Manuskript angenommen: April 2000