

Seismic and Petrological Investigations
of the Lithosphere in the
Swarm-Earthquake and CO₂ Degassing Region
Vogtland/NW-Bohemia

Seismische und petrologische Untersuchungen
der Lithosphäre in der
Schwarmbeben- und CO₂ Entgasungs-Region
Vogtland/NW-Böhmen

Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades
doctor rerum naturalium (Dr. rer. nat.)
des Fachbereichs Geowissenschaften
der Freien Universität Berlin

vorgelegt von
Dipl.-Geophys. Wolfram H. Geissler
aus Bad Gottleuba

Potsdam 2004

Angefertigt mit Genehmigung
des Fachbereichs Geowissenschaften der Freien Universität Berlin.

Tag der Disputation: 25. Januar 2005

Gutachter:

Prof. Dr. Rainer Kind (1. Gutachter)
Freie Universität Berlin, Geoforschungszentrum Potsdam

Prof. Dr. Frank Schilling (2. Gutachter)
Freie Universität Berlin, Geoforschungszentrum Potsdam

*... Die Quellen zu der Geschichte der Erde bewahrt sie selber
wie in einem Schriftengewölbe in ihrem Innern auf,
Quellen, die vielleicht in Millionen Urkunden niedergelegt sind
und bei denen es nur darauf ankömmt, daß wir sie lesen lernen
und durch Eifer und Rechthaberei nicht verfälschen. ...*

– Adalbert Stifter, Der Nachsommer

Abstract

Western and Central Europe is affected by widespread rifting and associated volcanism in the foreland of the Alpine orogene. There is still an ongoing discussion on the causes of that rifting: passive rifting due to stresses induced by the Alpine collision and the North-Atlantic opening or active rifting due to active mantle up-welling. Teleseismic tomography studies imaged anomalous low seismic velocities beneath the French Massif Central and the Eifel area/Rhenish Massif, Germany, which can be interpreted as small-scale mantle plumes beneath the Tertiary to Quaternary volcanic fields. The existence of similar “mantle fingers” beneath the other volcanic fields in Central Europe was suggested, including the Eger Rift.

The Eger Graben is the approximately 50 km wide and 300 km long ENE-WSW striking central graben structure of the Eger Rift, which experienced several phases of magmatic activity since the Upper Cretaceous-Tertiary boundary. CO₂ emanations, sparse alkaline volcanic activity, neotectonic movements, and an unusual intraplate swarm-earthquake activity in the Vogtland/NW-Bohemia region accompany the recently active rifting process in the western part of the rift.

The present study focuses on the seismic structure and petrological composition of the lower crust and uppermost mantle beneath the presently active swarm-earthquake region and CO₂ degassing field Vogtland/NW-Bohemia.

Seismic data of several temporary and permanent seismic stations in the region provided the base of a receiver function study. Using this method, local depth variations of the Moho discontinuity could be detected. Moho depths range from 27 km beneath the Cheb Basin to 38 km beneath the central Bohemian Massif. A local Moho updoming from about 31 to 27 km was detected beneath the area with the CO₂ emanation centres and the Quaternary volcanoes at the surface, and the main swarm-earthquake activity in the upper crust. The lateral dimension of the affected area is approximately 40 km wide. Locally weak conversions at the Moho and increased reflectivity in the lower crust may indicate a magmatic overprinting of the crust-mantle boundary.

The results of this study also include the first average crustal v_p/v_s ratios on a local scale in the area under investigation. The v_p/v_s ratios range from 1.63 to 1.89 with a mean value of 1.73.

Furthermore, using teleseismic receiver functions, a local positive “6 s phase” was detected underneath the area of CO₂ emanations and Quaternary volcanism. This phase might stem from a converter at about 50 to 60 km depth. Possibly, this converter coincides with an upper mantle reflector observed previously by reflection seismic studies.

The receiver function study also shows an apparent deepening of the 410 km discontinuity beneath the area under study. Probably, this apparent deepening is the result of lower seismic velocities in the upper mantle in comparison to the IASP91 reference model. However, a real deepening of the '410' cannot be ruled out completely at the present stage of investigation.

Additionally, (ultra-) mafic nodules (xenoliths, megacrysts), sampled from a tephra deposit near the Quaternary scoria cone Železna Hůrka, were investigated as rocks of the lower crust/uppermost mantle composition in this area. Most of the analysed xenoliths are wehrlitic samples, clinopyroxenites, or hornblendites and show cumulus textures. They probably represent cumulates of the host melt or fragments of small dikes/sills of crystallized alkaline melts, which intruded into the uppermost mantle and lower crust before the host melt rose to the surface. Spinel lherzolite xenoliths, the typical upper mantle rocks beneath Central Europe, could not be found in the Quaternary volcanics. Megacrysts of olivine, clinopyroxene, amphibole and phlogopite were also sampled and analysed in this study. The pressure (depth) of origin was estimated for several xenoliths using different available geothermobarometers; most estimates are in the range 8 to 12 kbar (29 to 41 km). Depth estimates from clinopyroxene and amphibole megacrysts are more or less in the same range (7 to 11 kbar; 25 to 38 km). Assuming, that at least some of the megacrysts might be deep-seated phenocrysts, these estimates provide constraints on the depth level of magmatic reservoirs in the study area. Since CO₂-dominated degassing is presently going on and previously isotope (He, C) geochemical investigations on these gases showed upper mantle signatures, there might still exist active melts at this depth level.

Up to now, only two Quaternary volcanic vents are known in the study area. Maybe the alkaline magmatic activity is mostly concentrated in the uppermost mantle and lower crust and causes there metasomatism, resulting in an upper mantle composition dominated by olivine and clinopyroxene (\pm amphibole, \pm phlogopite). A comparison of calculated seismic velocities shows that rocks similar to the analysed xenoliths have lower seismic velocities than normal upper mantle rocks (spinel lherzolites). Therefore, the seismic discontinuity in about 50 to 60 km depth could represent the base of a local metasomatic mantle containing a few percent of partial melts.

The seismic and petrological results are discussed together with the results of previous regional seismic, seismological, and geochemical and isotope investigations on CO₂-dominated gas emanations. All available information is finally compiled into a conceptual model of the lithosphere in the swarm-earthquake and CO₂ degassing region Vogtland/NW-Bohemia. An interconnection between the different geodynamic processes (neotectonic movements, swarm-earthquakes, CO₂ degassing) observed in the area under study by presently active deep-seated magmatic activity ("magmatic underplating") is proposed.

Zusammenfassung

West- und Mitteleuropa sind gekennzeichnet durch weitverbreitete Rift-Prozesse und damit verbundenen Vulkanismus im Vorland des Alpen-Orogens. Als Ursachen werden lokale passive Extension im Spannungsfeld der Alpinen Kompressionstektonik und der Nordatlantiköffnung sowie aktive Weitungsprozesse in Beziehung zu Mantelaufwölbungsprozessen diskutiert. Anomal niedrige seismische Geschwindigkeiten wurden durch teleseismische Tomographie-Studien unter dem Französischen Zentralmassiv und unter der Eifel (Rheinisches Massiv, Deutschland) abgebildet. Diese negativen Geschwindigkeitsanomalien können als kleinskalige Aufstrombereiche von Mantelmaterial (Mantel Plumes) unter den tertiären und quartären Vulkanfeldern interpretiert werden. Die Existenz ähnlicher „Mantel-Finger“ wurde auch für die anderen Vulkanfelder in Mitteleuropa, einschließlich des Eger-Rifts, postuliert.

Der Eger-Graben ist die etwa 50 km breite und 300 km lange ENE-WSW streichende zentrale Grabenstruktur des Eger-Rifts. Das Gebiet ist gekennzeichnet durch eine mehrphasige magmatische Aktivität seit der Grenze Oberkreide/Tertiär. Der quartäre bis rezente Rift-Prozess ist verbunden mit CO₂-Entgasungen, spärlicher vulkanischer Aktivität, neotektonischen Bewegungen sowie einer ungewöhnlichen Intraplatten-Schwarmbebenaktivität in der Region Vogtland/NW-Böhmen.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Analyse der seismischen Struktur und der petrologischen Zusammensetzung der unteren Erdkruste und des obersten Mantels unter der derzeit aktiven Schwarmbebenregion und dem CO₂-Entgasungsfeld Vogtland/NW-Böhmen.

Seismische Daten von verschiedenen temporären und permanent installierten Erdbebenstationen im weiteren Untersuchungsgebiet sind die Grundlage für eine Studie mittels P-zu-S konvertierter seismischer Wellen (*receiver functions*). Mit dieser Methode konnten lokale Tiefenvariationen der Moho-Diskontinuität beobachtet werden. Die Tiefenlage der Moho reicht von 27 km unter dem Cheb Becken bis zu 38 km unter dem zentralen Böhmischem Massiv. Eine lokale Aufwölbung der Moho von einigen Kilometern (von 31 auf 27 km) deckt sich mit der Lage der CO₂-Entgasungszentren sowie der Position der quartären Vulkane an der Erdoberfläche und überlappt mit der Epizentralverteilung der Haupt-Schwarmbebenaktivität in der oberen Kruste. Der Durchmesser der Moho-Aufwölbung beträgt ungefähr 40 km. Lokal beobachtete schwache Moho-Konversionen und eine erhöhte Reflektivität der Unterkruste deuten möglicherweise auf eine magmatische Überprägung der Kruste-Mantelgrenze hin.

Die Ergebnisse dieser Arbeit schließen außerdem die ersten mittleren krustalen v_p/v_s Verhältnisse im lokalen Maßstab für das Untersuchungsgebiet ein. Die beobachteten Werte liegen zwischen 1,63 und 1,89, der Mittelwert beträgt 1,73.

Unter dem Gebiet mit CO₂-Entgasungen und quartärem Vulkanismus wurden weiterhin lokal positive konvertierte Phasen mit einer Verzögerungszeit von 6 Sekunden („6 s phase“) detektiert. Sie können wahrscheinlich einem seismischen Konverter in 50 bis 60 km Tiefe zugeordnet werden. Möglicherweise entspricht dieser Konverter einem Reflektor im oberen Erdmantel, der bereits in reflexionsseismischen Messungen beobachtet wurde.

Die *receiver function*-Studie zeigt außerdem ein scheinbares Abtauchen der 410-km-Diskontinuität unter dem Untersuchungsgebiet. Wahrscheinlich wird dieses scheinbare Abtauchen durch verringerte seismischer Geschwindigkeiten im oberen Erdmantel im Vergleich zum IASP91 Referenzmodell verursacht. Zum derzeitigen Untersuchungsstand kann jedoch auch ein reales Abtauchen der „410“ nicht gänzlich ausgeschlossen werden.

Als zweiter Schwerpunkt dieser Arbeit wurden (ultra-) mafische Knollen (Xenolithe, Megakristalle) als Gesteine der unteren Erdkruste und des oberen Erdmantels in der Region untersucht, die einem Tephra-Vorkommen in der Nähe des quartären Schlackenkegels Železna Hůrka (Eisenbühl) entstammen. Die meisten der analysierten Xenolithe sind Wehrlite, Klinopyroxenite oder Hornblendite und zeigen Kumulus-Texturen. Sie repräsentieren wahrscheinlich Kumulate der Wirtsschmelze oder Bruchstücke von kleinen Gängen kristallisierter alkaliner Schmelzen, die in den obersten Mantel und die Unterkruste intrudierten, bevor die Wirtsschmelze zur Erdoberfläche aufstieg. Spinell-Lherzolith-Xenolithe, die typischen Gesteine des oberen Erdmantels unter Mitteleuropa, konnten in den quartären Vulkaniten bisher nicht gefunden werden. Megakristalle (Olivin, Klinopyroxen, Amphibol, Phlogopit) wurden für die Studie ebenfalls beprobt und untersucht. Die Herkunftstiefen (Drucke) wurden für einige Xenolithe anhand unterschiedlicher verfügbarer Geothermobarometer abgeschätzt. Die erhaltenen Druckwerte liegen in der Mehrzahl zwischen 8 und 12 kbar, was einer Herkunftstiefe von etwa 29 bis 41 km entspricht. Die Schätzungen für die Klinopyroxen- und Amphibol-Megakristalle liegen im selben Bereich (7 bis 11 kbar, 25 bis 38 km). Unter der Annahme, dass zumindest einige der Megakristalle Hochdruck-Phänokristalle sind, bieten diese Abschätzungen Hinweise auf den Tiefenbereich magmatischer Reservoirs im Untersuchungsgebiet. Isotopen-geochemische Untersuchungen (He, C) an den rezent austretenden CO₂-reichen Gasen ergeben deutliche Signaturen des oberen Erdmantels. Wahrscheinlich existieren derzeit entgasende Schmelzen in dem durch die p-T Abschätzungen abgegrenzten Tiefenbereich.

Bis jetzt sind nur zwei quartäre Eruptionszentren im Untersuchungsgebiet bekannt. Eventuell ist die derzeitige alkaline magmatische Aktivität im obersten Mantel und in der Unterkruste konzentriert. Diese führt dort möglicherweise zu metasomatischen Prozessen, die in einer Zusammensetzung des oberen Erdmantels resultieren, die durch Olivin und Klinopyroxen dominiert ist (\pm Amphibol, \pm Phlogopit). Ein Vergleich von berechneten seismischen Geschwindigkeiten zeigt, dass Gesteine, die

ähnlich zu den analysierten Xenolithen sind, geringere seismische Geschwindigkeiten besitzen als die typischen Gesteine des oberen Mantels (Spinell-Lherzolithe). Die beobachtete seismische Diskontinuität in 50 bis 60 km Tiefe könnte somit die Basis eines lokal metasomatisch überprägten Mantels sein, der außerdem wenige Prozent partieller Schmelzen enthält.

Die seismischen und petrologischen Ergebnisse werden zusammen mit den Ergebnissen vorhergehender regionaler seismischer, seismologischer sowie gas-geochemischer und Isotopen-Studien an den CO₂-Entgasungen diskutiert. Die verfügbaren Informationen werden schließlich in ein Konzeptionsmodell der Lithosphäre unter dem Schwarmbeben- und CO₂-Entgasungsgebiet Vogtland/NW-Böhmen integriert. Eine Verbindung zwischen den verschiedenen im Untersuchungsgebiet beobachteten geodynamischen Prozessen (neotektonische Bewegungen, Schwarmbeben, CO₂-Entgasungen) durch rezente verdeckte tiefe magmatische Aktivitäten („*magmatic underplating*“) wird vorgeschlagen.

Contents

| | | |
|----------|--|-----------|
| A | Introduction and scope of this study | 1 |
| A.1 | The European Cainozoic Rift System and associated intraplate volcanic fields..... | 1 |
| A.2 | Geological and geophysical settings of the western Bohemian Massif..... | 3 |
| A.2.1 | Pre-Tertiary geology of the study area..... | 3 |
| A.2.2 | Tectono-magmatic evolution of the Eger (Ohře) Rift..... | 4 |
| A.2.3 | Seismicity of the region..... | 5 |
| A.2.4 | CO ₂ emanations at the Earth's surface..... | 7 |
| A.3 | The Moho and the upper mantle in previous studies..... | 9 |
| A.3.1 | The Moho structure..... | 9 |
| A.3.2 | Seismic constraints on the upper mantle structure..... | 11 |
| A.3.3 | Results of thermobarometric studies on xenoliths from adjacent volcanic fields..... | 11 |
| A.4 | Scope of this study..... | 12 |
| B | Seismic investigations (receiver functions) | 15 |
| B.1 | Observational technique (receiver function method)..... | 15 |
| B.2 | Data..... | 16 |
| B.3 | Results..... | 19 |
| B.3.1 | Observed receiver functions (single and sum traces)..... | 19 |
| B.3.2 | Moho depth..... | 25 |
| B.3.3 | Crustal v_p/v_s ratios..... | 27 |
| B.3.4 | Discontinuities of the mantle transition zone..... | 28 |
| B.3.5 | Synthetic receiver functions for published crustal seismic velocity models..... | 31 |
| B.3.6 | Uncertainties and resolution of the method..... | 33 |
| B.4 | Geophysical indications for Moho updoming and the origin of the “6 s phase”..... | 37 |
| B.4.1 | Local Moho updoming beneath the western Eger Rift..... | 37 |
| B.4.2 | The origin of the “6 s phase” – conversions from subcrustal depths or multiples from an intracrustal layer?..... | 39 |
| C | Petrological studies on xenoliths | 43 |
| C.1 | Sample site..... | 43 |
| C.2 | Analytical methods and basics of geothermobarometry..... | 45 |
| C.2.1 | Geochemical (XRF, ICP-MS) and mineral-chemical (EMPA) investigations ... | 47 |
| C.2.1.1 | X-ray fluorescence spectrometry (XRF)..... | 47 |
| C.2.1.2 | Inductively coupled plasma mass-spectrometry (ICP-MS)..... | 47 |
| C.2.1.3 | Electron microprobe analysis (EMPA)..... | 48 |
| C.2.2 | Geothermobarometry of xenoliths..... | 48 |
| C.2.2.1 | Amphibole thermobarometry..... | 49 |
| C.2.2.2 | Olivine-spinel thermometry (spinel barometry)..... | 50 |
| C.2.2.3 | Pyroxene thermometry..... | 52 |
| C.2.2.4 | Phlogopite-liquid (glass) thermobarometry..... | 53 |
| C.2.2.5 | Olivine-clinopyroxene barometry..... | 53 |
| C.2.2.6 | Clinopyroxene barometry..... | 54 |

| | | |
|----------|---|------------|
| C.3 | Sample description | 55 |
| C.3.1 | Mantle xenoliths (ultramafic nodules) | 55 |
| C.3.2 | Megacrysts | 58 |
| C.3.3 | Crustal xenoliths | 62 |
| C.4 | Data | 66 |
| C.4.1 | Whole-rock major and trace element chemistry | 66 |
| C.4.2 | Mineral-chemical analyses (EMPA) | 70 |
| C.5 | Interpretation of the petrological data | 90 |
| C.5.1 | Composition and origin of xenoliths and megacrysts | 90 |
| C.5.1.1 | Mantle xenoliths and cumulates | 90 |
| C.5.1.2 | Megacrysts – high pressure precipitates or fragments of pegmatites or dikes ? | 91 |
| C.5.1.3 | Crustal rocks | 92 |
| C.5.2 | Depth origin of xenoliths (geothermobarometry) | 94 |
| C.5.3 | p-T data and regional geotherms | 98 |
| C.6 | Petrological indications for processes at the crust-mantle boundary | 99 |
| D | Synthesis | 101 |
| D.1 | A seismic and petrological model of the crust-mantle transition and the origin of the “6s phase” | 101 |
| D.1.1 | Relating seismic velocities to petrology | 101 |
| D.1.1.1 | Upper and middle crust | 101 |
| D.1.1.2 | Lower crust and uppermost mantle | 102 |
| D.1.2 | The origin of the “6 s phase” | 102 |
| D.1.2.1 | Arguments for an upper mantle origin of the “6 s phase” | 104 |
| D.1.2.2 | Arguments for a crustal origin of the “6 s phase” | 106 |
| D.2 | The structure of the crust and the subcrustal mantle beneath the western Eger (Ohře) Rift – towards a process orientated model | 107 |
| E | Conclusions and open questions | 111 |
| | Acknowledgements | |
| | References | 115 |
| | Appendices | |

List of figures and plates

| | | |
|---------|---|-----|
| A.1 | Topographic map of the north-western part of the Bohemian Massif with earthquake epicentres 1985-1997. | 2 |
| A.2 | Distribution of Tertiary-Quaternary volcanic fields and sedimentary basins in the western part of the Bohemian Massif. | 4 |
| A.3 | Spatial distribution of earthquake hypocentres 1991-1999..... | 6 |
| A.4 | Results from gasgeochemical and -isotope (C, He) studies of CO ₂ -dominated emanations in the Vogtland/NW-Bohemia area. | 8 |
| A.5 | Results from deep-seismic reflection profile 9HR..... | 9 |
| A.6 | Depth of the Moho discontinuity in Central Europe..... | 10 |
| B.1 | Synthetic receiver functions from reflectivity theoretical seismograms..... | 17 |
| B.2 | Distribution of the seismological stations in the western Bohemian Massif. | 18 |
| B.3 | Individual receiver functions for some stations within the region shown in Figure B.2b. ... | 20 |
| B.4 | Stacked receiver functions from broadband stations. | 21 |
| B.5 | Stacked receiver functions from short-period stations..... | 24 |
| B.6 | Inversion results of Moho depth versus v_p/v_s ratio for the stations BOH2 and NALB..... | 25 |
| B.7 | Maps of Moho conversion times (a), Moho depth (b), and v_p/v_s ratios (c)..... | 26 |
| B.8 | Stacked move-out corrected traces of the single station analysis of permanent and temporary stations in the western Bohemian Massif. | 29 |
| B.9 | Migrated sections along 12°E and 12°30'E with data from permanent (a) and temporary (b) stations in the study area, respectively. | 30 |
| B.10 | Synthetic receiver functions from published regional seismic velocity models. | 32 |
| B.11 | Stacked receiver functions from stations GRA1 and MOX from different time spans (a, b) and backazimuths (c, d). | 34 |
| B.12 | Stacked receiver functions from stations GRA1 for every year between 1980 and 1997. ... | 35 |
| B.13 | Comparison of the Moho depths and the results of gas geochemical investigations..... | 38 |
| B.14 | Distribution of piercing points at 50 km depth. Receiver functions with common conversions points were stacked in each box A-Q (b)..... | 41 |
| B.15 | Forward modelling of observed receiver function waveforms. | 42 |
| C.1 | Location of the temporary exploratory excavation “Mýtina”..... | 44 |
| C.2 | The tephra-tuff deposit north of Mýtina. | 45 |
| C.3 | Lithostratigraphy of the tephra-tuff-deposit within the excavation Mýtina..... | 46 |
| C.4 | IUGS classification of ultramafic plutonic rocks [after Le Maitre, 1989]..... | 56 |
| C.5 | Chondrite (C1)-normalized REE patterns of host mela-nephelinites and (ultra-) mafic nodules from the tephra deposit in Mýtina. | 70 |
| C.6 | Ternary classification diagram for clinopyroxenes [after <i>Morimoto</i> , 1988]..... | 89 |
| C.7 | Lithostratigraphical section of the uppermost crust in the vicinity of Neualbenreuth..... | 93 |
| C.8 | Results from the Al-Ti-in amphibole thermobarometry. | 95 |
| C.9 | Results of p-T calculations plotted into a diagram of <i>Green and Falloon</i> [1998]..... | 99 |
| D.1 | Model of the Pleistocene lithosphere beneath the Železna Hůrka area. | 105 |
| D.2 | Cartoon illustrating the asthenosphere-lithosphere interaction in the Vogtland/NW-Bohemia region..... | 109 |
| Plate 1 | Photographs of typical hand specimen of (ultra-) mafic nodules from the Mýtina tephra. . | 59 |
| Plate 2 | Photographs of thin-sections of typical wehrlitic xenoliths or olivine-clinopyroxene cumulates from the Mýtina tephra, and a spinel lherzolite xenolith from the NE Bavaria.. | 60 |
| Plate 3 | Photographs of thin-sections of amphibole-bearing xenoliths and an amphibole megacryst | 61 |
| Plate 4 | Photographs of typical hand specimen of crustal xenoliths from the Mýtina tephra..... | 63 |
| Plate 5 | Photographs of thin-sections of typical crustal xenoliths. | 64 |
| Plate 6 | Photographs of thin-sections of feldspar-dominated crustal xenoliths. | 65 |

List of tables

| | | |
|--------|--|-----|
| A.I | Results of geothermobarometric studies on upper mantle xenoliths from volcanic fields adjacent to the western Eger Graben area..... | 12 |
| B.I | Seismological station parameters for broadband stations..... | 22 |
| B.II | Seismological station parameters for short-period stations..... | 24 |
| B.III | Variations of Ps delay times (Moho, '410', '660'), crustal thickness H, and average crustal v_p/v_s ratio at station GRA1..... | 36 |
| C.I | Mineral parageneses of studied samples..... | 57 |
| C.II | Whole-rock chemistry of (ultra-) mafic nodules and host-rock samples..... | 67 |
| C.III | Mineral-chemical composition and structural formulae for peridotites..... | 71 |
| C.IV | Mineral-chemical composition and structural formulae for clinopyroxenites..... | 72 |
| C.V | Mineral-chemical composition and structural formulae for hornblendites..... | 73 |
| C.VI | Mineral-chemical composition and structural formulae for wehrlites and olivine-clinopyroxene aggregates..... | 74 |
| C.VII | Chemical composition and structural formulae of olivine megacrysts..... | 77 |
| C.VIII | Chemical composition and structural formulae of clinopyroxene megacrysts..... | 78 |
| C.IX | Chemical composition and structural formulae of amphibole and mica megacrysts..... | 80 |
| C.X | Chemical composition and structural formulae of groundmass minerals..... | 82 |
| C.XI | Chemical composition of glass and groundmass in xenoliths..... | 84 |
| C.XII | Chemical composition and structural formulae of olivine crystals from Železná Hůrka... .. | 85 |
| C.XIII | Mineral-chemical composition and structural formulae for feldspar-rich rocks..... | 86 |
| C.XIV | p-T estimates of selected (ultra-) mafic nodules (xenoliths and cumulates) from the Mýtina tephra and the Železná Hůrka scoria cone..... | 96 |
| D.I | Seismic velocities for hypothetical mantle assemblages beneath the swarm-earthquake region Vogtland/NW-Bohemia at specified pressure and temperature conditions..... | 103 |

List of abbreviations and symbols

| | |
|----------------|--|
| SCLM | SubContinental Lithospheric Mantle |
| ECRS | European Cainozoic Rift System |
| EMPA | Electron Microprobe Analysis |
| GFZ | GeoForschungsZentrum |
| GRSN | German Regional Seismic Network |
| H | crustal thickness |
| ICP-MS | Inductively Coupled Plasma Mass-Spectrometry |
| IG CAS | Institute of Geophysics, Czech Academy of Sciences |
| IPE Brno | Institute of Physics of the Earth, Masaryk University Brno |
| KH | Komorní Hůrka |
| KTB | Kontinentale Tief-Bohrung |
| KRASNET | KRASlice seismic NETwork |
| LVZ | Low Velocity Zone |
| M _L | Local Magnitude |
| ON | Olivine Nephelinite |
| p | pressure |
| REE | Rare Earth Elements |
| SZGRF | Seismologisches Zentralobservatorium Gräfenberg |
| T | Temperature |
| WEBNET | West-Bohemian seismic NETwork |
| XRF | X-Ray Fluorescence spectrometry |
| ZH | Železna Hůrka |

Symbols for rock-forming minerals used [mainly based on *Kretz*, 1983]:

| | | | |
|-------|------------------------------|---------|----------------------|
| am | amphibole (undifferentiated) | pt | peridotite |
| fsp | feldspar (undifferentiated) | (ol-)X | (olivine) megacryst |
| gl | glass | c | core (composition) |
| gm | groundmass | r | rim (composition) |
| m | mica (undifferentiated) | s | sector (composition) |
| o | ore (undifferentiated) | I | intergrowth |
| sulph | sulphide | | |
| ac | acmite (aegirine) | kfs | K feldspar |
| ab | albite | mag | magnetite |
| an | anorthite | ms | muscovite |
| ap | apatite | ol | olivine |
| bt | biotite | or | orthoclase |
| cpx | Ca clinopyroxene | opx | orthopyroxene |
| chl | chlorite | prg | pargasite |
| chr | chromite | phl | phlogopite |
| crd | cordierite | pl | plagioclase |
| en | enstatite (ortho) | qtz | quartz |
| fa | fayalite | rt | rutile |
| fs | ferrosilite (ortho) | sp, spl | spinel |
| fo | forsterite | st | staurolite |
| grt | garnet | ttn | titanite |
| hbl | hornblende | wo | wollastonite |
| ilm | ilmenite | zrn | zircon |
| jd | jadeite | | |

