

DISS. ETH NO. 21552

**STRUCTURAL AND PETROLOGICAL INVESTIGATION OF THE
HIGH-PRESSURE ZONE IN THE RHODOPE METAMORPHIC COMPLEX,
N. GREECE**

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH

(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

EVANGELOS MOULAS

Dipl. in Geology and Geoenvironment, National and Kapodistrian University of Athens

born on 22.06.1985

citizen of
Hellenic Republic

Accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Jean-Pierre Burg	ETH Zurich	examiner
Prof. Dr. Torgeir B. Andersen	University of Oslo	co-examiner
Prof. Dr. Dimitrios K. Kostopoulos	University of Athens	co-examiner
Prof. Dr. James A.D. Connolly	ETH Zurich	co-examiner

2014

Abstract

Most of the available information for the pressure and temperature (P - T) in the earth's interior comes from metamorphic phase equilibria. The interpretation of this P - T information requires knowledge of the spatial and temporal evolution of the P - T fields in the Earth's interior. This study investigates the occurrence of high grade (high P - T) rocks in the Rhodope metamorphic complex (RMC) where eclogites and microdiamond-bearing paragneisses have been reported. Regional geologic constraints suggest that these high-grade rocks occur within the crustal scale Nestos shear zone. In the introductory first chapter, two main problems are stated: i) the control that tectonic processes exert on the emplacement and the formation of high-pressure rocks and ii) the possibility of externally imposed pressure variations. By "externally imposed" is meant the pressure imposed by the sum of all forces apart from gravity. Such problems are relevant for the interpretation of P - T information from zones of lithospheric convergence since it is usually the metamorphic pressure that is converted to depth in geodynamic reconstructions.

This study begins with the investigation of a sapphirine-bearing kyanite eclogite from the intermediate thrust units of the RMC. This rock has experienced a poly-metamorphic history and its eclogite mineralogy has been replaced by low-pressure minerals. Symplectites of spinel-sapphirine-plagioclase-corundum have replaced the kyanite during low pressure metamorphic overprint. The presence of quartz and corundum in different domains within these eclogites suggests the development of local (mosaic) thermodynamic equilibrium. We use compositional variables as unknowns and we consider only the local chemical composition to deduce the P - T conditions where the symplectites after kyanite formed. We conclude that the symplectites formed at $P < 0.7$ GPa and $T \sim 720$ °C at amphibolite-facies conditions. The P - T estimates are combined with zircon U-Pb geochronology (using SHRIMP) and suggest that the post-eclogite-facies metamorphic evolution took place in Eocene times.

Chapter 3 investigates high-grade rocks from the Kesebir-Kardamos dome in Eastern Rhodope. The Kesebir-Kardamos dome is a sub-elliptical, structural and metamorphic culmination that trends NE-SW and results from the deformation of syn-metamorphic thrust sheets. High-grade metamorphic rocks occur in the flanks of this dome. Syn-metamorphic kinematic indicators from the intermediate imbricate nappes show a generally top-to-S movement varying from SSW-to-SE. The high-grade rocks

were exhumed and covered by marine (Lutetian-Priabonian?) sediments; slumps suggest that sedimentation took place in a tectonically active environment. The peak metamorphic conditions recorded by the high-grade rocks are ca 1.2 GPa and 730°C. U-Pb SHRIMP dating of zircons from the paragneisses yields Early Cretaceous (145 Ma) ages, interpreted as the time of the major metamorphic overprint whereas some zircon rims yield reset ages at Eocene times (53 and 44 Ma). Our new structural, petrological and geochronological data suggest that the major shear zone between the intermediate and lower units in the core of the Kesebir-Kardamos dome is equivalent to the Nestos-Suture zone in central Rhodope.

In chapter 4, we investigate the role of viscous heterogeneities on the development of pressure differences during deformation. The Kolosov-Muskhelishvili equations are used to treat viscous heterogeneities as elliptical inclusions. Results show that significant pressure differences can develop during deformation inside and outside such rheological heterogeneities. These solutions are applied for rheology contrasts imposed by rheologically weak shear zones and rheologically strong boudins. The pressure differences can reach magnitudes equivalent to the far-field tectonic stress and are limited by the strength of the rocks that can reach 1 to 2 GPa for strong lithologies.

The final discussion deals with the importance of local equilibria in metamorphic rocks. The local variation of thermodynamic variables in rocks (Pressure, Temperature, and Composition) suggests that extrapolation of the P - T information recorded by the rocks in the whole crust or lithosphere may be misleading.

Zusammenfassung

Die verfügbaren Informationen zu Druck und Temperatur (P - T) im Erdinnern kommen meist aus metamorphen Phasengleichgewichten. Die Interpretation dieser P - T Daten erfordert Wissen über die räumliche und zeitliche Entwicklung dieser P - T Felder. Diese Studie untersucht das Auftreten von hochgradigen (hohe P - T) metamorphen Gesteinen im Rhodope metamorphen Komplex (RMC), welche durch das Auftreten von Paragneisen mit Mikrodiamanten und Eklogiten belegt werden. Regionalgeologische Randbedingungen deuten darauf hin, dass diese hochgradigen Gesteine innerhalb der Nestos Scherzone auftreten. Im einleitenden ersten Kapitel werden zwei Probleme identifiziert: i) die Rolle tektonischer Prozesse auf die Platznahme und die Bildung von Hochdruckgesteinen und ii) die Möglichkeit äusserlich aufgezwungener Druckvariationen. Mit "äusserlich aufgezwungen" ist die Summe aller angreifenden Kräfte ausser der Gravitation gemeint. Solche Problemstellungen sind relevant um P - T Informationen in Zonen lithosphärischer Konvergenz zu interpretieren, zumal es in geodynamischen Rekonstruktionen üblich ist, die Tiefe aus dem metamorphen Druck herzuleiten.

Die Studie beginnt mit der Untersuchung eines Sapphirin-enthaltenden Kyanit-Eklogit aus dem mittleren Überschiebungsteil des RMC. Dieses Gestein hat eine polymetamorphe Geschichte und seine eklogitische Mineralogie ist durch Tiefdruckminerale ersetzt worden. Spinell-Sapphirin-Plagioklas-Korund-Symplectite haben den Kyanit während Tiefdruck metamorphen Überprägung ersetzt. Das Auftreten von Quarz und Korund in unterschiedlichen Einheiten innerhalb dieser Eklogit deutet auf lokale (mosaik) thermodynamische Gleichgewichte hin. Um die P - T -Bedingungen herzuleiten, bei denen die Symplectite und die Kyanit gebildet wurden, nehmen wir die Zusammensetzungsvariable als unbekannt an und betrachten lediglich lokale chemische Zusammensetzungen. Daraus schliessen wir, dass die Symplectite bei $P < 0.7$ GPa und $T \sim 720$ °C unter Amphibolit-Fazies Bedingungen gebildet wurden. Die P - T Schätzungen werden mit Zirkon U-Pb geochronologischen Daten (SHRIMP) kombiniert und deuten darauf hin, dass nach der eklogitfaziellen Metamorphose eine metamorphe Überprägung im Eozän stattgefunden hat.

In Kapitel 3 werden hochgradige Gesteine vom Kesebir-Kardamos Dom im Osten der Rhodopen untersucht. Der Kesebir-Kardamos Dom ist eine fast elliptische strukturelle und metamorphe Kulmination, die NO-SW streicht und aus der Deformation synmetamorpher Überschiebungsdecken

resultiert. Syn-metamorphe kinematische Indikatoren aus den mittleren Decken zeigen eine generelle südvergente Bewegung, mit einer Variation von SSW-SO. Die hochgradigen Gesteine wurden nach der Exhumation von marinen Sedimenten bedeckt (Lutetian-Priabonian?). Schlammfalten deuten darauf hin, dass die Sedimentierung in einer tektonisch aktiven Umgebung stattfand. Die höchsten metamorphen Bedingungen, die von den hochgradigen Gesteinen aufgezeichnet wurden, sind ca. 1.2 GPa und 730 °C. Die U-Pb Datierung der Zirkone aus den Paragneisen ergibt ein Alter in der frühen Kreide (145 Ma), das wir als die Zeit der grössten metamorphen Überprägung interpretieren. Gewisse Zirkonränder ergeben Rückstellungsalter im Eozän (53 und 44 Ma). Unsere neuen strukturellen, petrologischen und geochronologischen Daten deuten darauf hin, dass die Scherzone zwischen den mittleren und tieferen Einheiten des Kerns des Kesebir-Kardamos Doms äquivalent sind zur Nestos Suturezone in den Zentral-Rhodopen.

In Kapitel 4 untersuchen wir die Rolle viskoser Heterogenitäten bei der Entwicklung von Druckunterschieden während der Deformation. Die Kolosov-Muskhelishvili Gleichungen werden genutzt, um die viskosen Heterogenitäten als elliptische Einschlüsse zu behandeln. Unsere Resultate zeigen, dass sich während der Deformation signifikante Druckunterschiede innerhalb und ausserhalb der rheologischen Heterogenitäten entwickeln können. Diese Resultate werden auf rheologische Kontraste angewendet, wie sie zwischen rheologisch schwachen Scherzonen und rheologisch starken Boudins vorkommen können. Die Druckunterschiede können dabei ähnliche Magnituden erreichen, wie die tektonischen Spannungen. Ein oberes Limit ist gegeben durch die Belastbarkeit der Gesteine, die bei starken Lithologien 1 bis 2 GPa betragen können.

Die abschliessende Diskussion handelt über die Wichtigkeit lokaler thermodynamischer Gleichgewichte in metamorphen Gesteinen. Lokale Variationen thermodynamischer Variablen in Gesteinen (Druck, Temperatur und Zusammensetzung) weisen darauf hin, dass die Extrapolation von *P-T* Informationen, welche im Gestein gespeichert sind, auf die gesamte Kruste oder Lithosphäre zu Fehlinterpretationen führen kann.