DISS. ETH Nr. 17778

Sources and evolution of Late Cretaceous magmatism in Eastern Srednogorie, Bulgaria: constraints from petrology, isotope geochemistry and geochronology

A dissertation submitted to the
ETH ZURICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by
SVETOSLAV GEORGIEV

M.Sc. Geology, Sofia University “Sv. Kliment Ohridski”, Bulgaria

born 26.10.1978
citizen of Bulgaria

accepted on the recommendation of

Prof. Christoph A. Heinrich, examiner
Dr. Albrecht von Quadt, co-examiner
Prof. Suzanne Mahlburg Kay, co-examiner
Prof. Peter Marchev, co-examiner

Zurich 2008

ABSTRACT

Eastern Srednogorie is the easternmost part of the Apuseni-Banat-Timok-Srednogorie (ABTS) magmatic belt in Southeastern Europe, which provides a unique opportunity to study processes of primitive magma formation and evolution in arc environments. Located between the richly mineralized Central Srednogorie zone to the west and the Black Sea to the east, this zone represents the possible link of the ABTS belt with the Pontide magmatic belt in Turkey. The knowledge for the time evolution of Eastern Srednogorie zone is therefore crucial for the understanding of the geodynamics of the area.

The Late Cretaceous magmatism in Eastern Srednogorie is abundant and extremely diverse in composition covering a wide range from ultramafic volcanics to granites. In contrast to other parts of the belt, relatively mafic lavas predominate here. Three magmatic regions are distinguished within Eastern Srednogorie from south to north: Strandzha, Yambol-Burgas and East Balkan. Systematic differences exist between these magmatic regions, namely the increased alkalinity of samples from the Yambol-Burgas region in the middle. Despite of the large volume and intriguing composition of the magmatism, Eastern Srednogorie has remained relatively understudied compared to adjacent parts of the ABTS belt.

In order to constrain the sources and the evolution of the magmatism, we conducted a large number of whole-rock major and trace element analyses of volcanic and intrusive rocks from this zone, combined with Sr and Pb isotope analyses of key samples. All rocks display clear subduction like signature of their trace elements patterns, particularly the enrichment in large ion lithophile elements and light rare earth elements relative to high field strength elements. A distinct primitive nepheline-normative ankaramite magma type is recognized among the mafic volcanic rocks from Yambol-Burgas region. Lower crustal clinopyroxene and amphibole cumulates carried to the surface as xenoliths in a mafic dike are a possible source for the ankaramite formation.

Thermodynamic modeling of the melting process suggests that low degrees of batch melting of a clinopyroxene rich, amphibole containing source similar to the cumulates, at 1 GPa, temperatures of 1240-1300 °C, oxidized conditions and water content of 0.2 wt% reproduces accurately most of the observed major and trace element characteristics of the studied ankaramites. Underplating of lherzolite melts at the crust/mantle boundary in an extensional environment as a response of slab-roll back provides the necessary heat to melt lower crustal cumulates and explains part of the geochemical peculiarities of the magmatism. Fractional crystallization of mainly clinopyroxene, plus olivine and Fe-Ti oxides from the ankaramitic magma in deep (8 kb) magma chamber produced most of the observed range of basalts and basaltic andesites in Eastern Srednogorie. The more evolved andesitic varieties were probably formed by crystallization at lower

temperatures in lower pressure magma chambers. Whole rock Sr and Pb isotopes indicate a larger degree of assimilation of basement rocks by the Late Cretaceous magmas in Strandzha compared to Yambol-Burgas region.

Detailed high-precision zircon U-Pb geochronology conducted in this study constrains the time evolution of the Cretaceous magmatism and also provides crucial information for age of the basement rocks and their assimilation from the Late Cretaceous magmas. The first evidence for the Late Cretaceous magmatic activity comes from the northernmost region (East Balkan), where shallow intrusive and volcanic rocks were formed at ca. 90 Ma, based on stratigraphic relations. With time, the magmatism shifted to the south and several intrusions crystallized in Strandzha region at ca. 86 Ma. Evidence for these 90 and the 86 Ma events are not detected in the central Yambol-Burgas region. The abundant magmatism in this region commenced at ca. 81 Ma and lasted till ca. 78 Ma, with some indications for slightly younger ages. This peak of the magmatic activity partly overlaps with the formation of numerous intrusions in Strandzha region to the south between 81 and 78 Ma.

The age of several granitic rocks from the basement of Eastern Srednogorie is determined as Permian/Carboniferous (~ 275 – 300 Ma). The significant presence of inherited zircon grains with such ages in the Late Cretaceous rocks from East Balkan and Strandzha regions implies that similar rocks were assimilated by the Cretaceous magmas. In contrast, the rocks from the intermediate Yambol-Burgas region record mostly Ordovician (~ 460 Ma) or older inherited ages, suggesting a different basement between these regions and/or different depths of magma formation and storage.

The magmatic ages and the geochemical data are compared to the adjacent Central Srednogorie zone, and integrated into a model for the geodynamic evolution of Eastern Srednogorie. Our model involves a southward retreating slab and related arc magmatism which formed the ~ 90 Ma calc-alkaline to high-K shallow intrusions and volcanics in the north (East Balkan) and large 87-78 Ma old mid-crustal tholeiitic, calc-alkaline and high-K intrusions in the south (Strandzha). Subduction roll-back, combined with processes of widening of the Black Sea basin led to the formation of the Yambol-Burgas intra-arc rift basin which separated East Balkan from Strandzha region. The crustal thinning led to decompression and increased heat flow, which facilitated large–scale melting of lower crustal amphibole containing wherlites to produce primitive ankaramites in Yambol-Burgas region. Mixing of the ankaramitic melts with subduction-derived magmas from the mantle wedge, followed by subsequent fractional crystallization and assimilation of basement material produced the observed range of the magmatism. The main phase of the intra-arc rift magmatism was from 81 till 78 Ma. The following compression led to crustal shortening, deformation and northward thrusting, responsible for the present-day structure of Eastern Srednogorie zone.

The Hf isotopes recorded in zircon grains from Eastern Srednogorie constrain further our

geodynamic model and provide detailed insights for the temporal geochemical evolution of the Late Cretaceous magmatism. Late Cretaceous zircons span a wide range of initial εHf values supporting the conclusion from the whole-rock geochemistry for the involvement of several sources in the Cretaceous magmatism. The age and zircon Hf isotope composition of magmatic rocks from Strandzha and East Balkan region closely match with the southern and northern parts of the Central Srednogorie zone, providing strong evidence that the initial evolution of the two zones was similar and controlled by slab retreat process. However, most of the zircons from the 81-78 Ma Yambol-Burgas region, as well as some zircons with similar age from Strandzha region deviate from the trend of increasing εHf with time, indicating the involvement of a less radiogenic source, such as lower crustal cumulates. Additional information for the geochemical signature of Lower Cretaceous-Upper Jurassic, Permian and Ordovician magmatism is obtained from the study of Hf isotopes in the inherited zircons.

ZUSAMMENFASSUNG

Der östlichste Teil, Ost Srednogorie, des Apuseni-Banat-Timok-Srednogorie (ABTS) magmatischen Gürtels in Süd – Ost – Europa bietet die einmalige Gelegenheit die Entstehung primitiver Magmen und die Entwicklung von Inselbögen zu untersuchen. Die Ost – Srednogorie Zone wird im Westen von der hoch mineralisierten Zentral - Srednogorie Zone und im Osten vom Schwarzen Meer begrenzt, sie representiert eine mögliche Verbindung des ABTS – Gürtels mit dem Pontide magmatischen Gürtel in der Türkei.

Die Zusammensetzung des Spät – Kreide Magmatismus in Ost Srednogorie umfasst alles von ultramafischen Vulkaniten bis zu Graniten. Im Vergleich zu anderen Gebieten des ABTS dominieren mafische Laven das Untersuchungsgebiet. Ost Srednogorie wurde in drei magmatische Regionen unterteilt, von Süden nach Osten: Strandzha, Yambol – Burgas und Ost Balkan. Es bestehen systematische Unterschiede zwischen diesen magmatischen Regionen. Die Yambol - Burgas Region in der Mitte weist erhöhte Alkalität der Gesteinsproben auf. Trotz der grossen Häufigkeit an magmatischen Gesteinen und deren faszinierenden Zusammensetzung ist Ost Srednogorie im Vergleich zum ABTS Gürtel nur wenig untersucht.

Um die Quelle und die Evolution des Magmatismus in Ost Srednogorie zu beschreiben wurden Gesamtgesteins - und Spurenelement – Analysen an Effusiv- und Intrusivgesteinen kombiniert mit Sr und Pb Isotopen– Analysen an ausgewählten Gesteinsproben durchgeführt. Die Spurenelemente aller analysierten Gesteine zeigen eine Anreicherung an lithophilen Elementen mit grossen Ionenradien (large ion lithophile elements) und leichten seltenen Erdelementen (light rare earth elements) relativ zu Elementen mit hoher Feldstärke (high field strengh elements). Diese Spurenelement Muster weisen eine deutliche Subduktionszonen Signatur auf. In den mafischen Effusivgesteinen der Yambol – Burgas Region wurde ein ausgeprägter Nephelin - führender Ankaramit Magma Typ unterschieden. Als mögliche Quelle für die Ankaramit Entstehung werden Xenolithe, Klinopyroxen – und Amphibol – Kumulate, aus der unteren Kruste in Betracht gezogen, welche in mafischen Gängen an die Oberfläche transportiert werden.

Thermodynamische Modellierungen der Schmelzprozesse indizieren, dass geringe Mengen von Partialschmelzen einer Quelle ähnlich den Klinopyroxen – Amphibol – Kumulaten unter oxidierenden Bedingungen bei 1 GPa, Temperaturen zwischen 1240 und 1300 °C und einem Wassergehalt von 0.2 wt% die Haupt - und Spurenelement Charakteristika der untersuchten Ankaramite reproduzieren. Das Absinken der kalten subduzierten Platte (slab - roll back) verursacht Extension im intra - Inselbogenbereich, welche zusammen mit der Einlagerung von Lherzolit – Schmelzen an der Krusten – Mantel – Grenze (underplating) die nötige Wärme liefern um unteres Krustenmaterial auf zu schmelzen. Diese Prozesse erklären zumindest einen Teil der geochemischen Eigenheiten des Magmatismus im Untersuchungsgebiet. Die grosse Variabilität der

geochemischen Zusammensetzung der Basalte und der basaltischen Andesite in Ost Srednogorie folgt aus der fraktionierten Kristallisation der Klinopyroxene, der Olivine und der Fe - Ti Oxide aus ankaramitischen Magmen in einer tiefen (8kb) Magma Kammer. Die weiter entwickelten andesitischen Basalte kristallisierten in Magma Kammern bei niedrigeren Temperaturen und niedrigeren Drücken. Gesamtgesteinsanalysen für Sr und Pb Isotopen zeigen, dass die Strandzha Region im Vergleich zur Yambol – Burgas Region eine grössere Assimilation von Grundgebirge (basement) in Spät – Kreide Magmen aufweist.

Die zeitliche Entwicklung der Kreide Magmen und auch das Alter des Grundgebirges (basement) und dessen Assimilationsgeschichte in Spät - Kreide Magmen werden neu beschrieben anhand detaillierter hoch Präzision U - Pb Geochronologie Analysen ausgeführt in dieser Studie. Die ersten Zeichen magmatischer Aktivität kommen aus der nördlichsten Region (Ost Balkan), wo sich vor ca. 90 Ma (Alter anhand von stratigraphischen Beziehungen) oberflächennahe Intrusiv- und Effusivgesteine bildeten. Vor ca. 86 Ma entstanden Intrusionen in Strandzha, was eine südwärts Verschiebung der magmatischen Aktivität voraussetzt. In der Zentral Yambol – Burgas Region wurden keine Indizien für die 90 Ma oder die 86 Ma Ereignisse entdeckt. Extensiver Magmatismus setzte in dieser Region vor 81 Ma ein und war aktiv bis vor 78 Ma mit einigen Indikatoren für jüngere Alter. Die Höchstaktivität überlappt teilweise mit der Entstehung zahlreicher Intrusionen in Strandzha im Süden der Region vor 81 und 78 Ma.

Einige granitische Gesteine aus dem Grundgebirge (basement) in Ost Srednogorie weisen ein Alter aus dem Perm/Karbon (~ 275 – 300 Ma) auf. Das Auftreten von geerbten Zirkon Körnern mit solchen Altern in Spät - Kreide Gesteinen des Ost Balkans und der Strandzha Region implizieren, dass ähnliche Gesteine von Kreide Magmen assimiliert wurden. Im Gegensatz dazu zeigen Gesteine der mittleren Yambol – Burgas Region ein ordovizisches (~ 460 Ma) oder noch ältere geerbte Zirkon - Alter, was auf unterschiedliche Grundgebirgsgesteine (basement) dieser Regionen oder unterschiedliche Tiefen der Magmen Entstehung und Einlagerung hindeutet.

Die magmatischen Alter und die geochemischen Daten wurden verglichen mit der benachbarten Zentral Srednogorie Zone und integriert in ein Geodynamisches Entstehungsmodel für die Ost Srednogorie Region. Dieses Model beinhaltet ein nach Süden gerichtetes Absinken der subduzierten Platte und zugehörigem Inselbogen Magmatismus, welcher vor ca. 90 Ma kalkalkalische bis hoch - K oberflächennahe Intrusionen und Vulkanite im Norden (Ost Balkan) bildete und vor 87 – 78 Ma grosse mittel – krustale tholeiitische, kalkalkalische und hoch - K Intrusionen im Süden (Strandzha) bildete. Das Absinken der subduzierten Platte (slab - roll back) kombiniert mit Extension im Schwarzen Meer führten zur Bildung der Yambol – Burgas inter - Inselbogen (intra-arc) Rift – Becken, welches den Ost Balkan von der Strandzha Region trennt. Das Ausdünnen der Kruste (crustal thinning) führte zu Dekompression und erhöhtem Wärmefluss, welche grossräumiges Aufschmelzen von unterem Krusten Material (Amphibole mit Wherliten)

erleichtern um die primitiven Ankaramite in der Yambol – Burgas Region zu produzieren. Das Mischen von Ankaramit – Schmelzen mit Schmelzen aus dem Mantelkeil, die fraktionierte Kristallisation und die Assimilation von Grundgebirgsmaterial (basement rock) produzieren die beobachtete Variabilität in der Zusammensetzung der magmatischen Gesteine. Die Hauptphase des inter - Inselbogen Rift – Magmatismus begann vor 81 und endete vor 78 Ma. Darauf folgte eine Kompressionsphase, welche zu krustaler Verkürzung (crustal shortening), Deformation und nordwärts gerichteten Überschiebungen (thrusting) führte, welche für die heutige Struktur der Ost Srednogorie Zone verantwortlich sind.

Die in Zirkon Körnern beinhalteten Hf Isotopen festigen das in dieser Studie entwickelte geodynamsiche Model für die Ost Srednogorie Zone und ermöglichen detaillierte Einsichten in die zeitliche Entwicklung des Spät - Kreide Magmatismus. Die Spät-Kreide Zirkone umfassen einen weiten Bereich von initialen εHf Werten, was die Schlussfolgerung aus der Gesamtgesteinsgeochemie, dass mehrere unterschiedliche Magma Quellen beteiligt sind, unterstützt. In Bezug auf das Alter und die Hf Isotopen Zusammensetzung sind die magmatischen Gesteine aus Strandzha und dem Ost – Balkan eng mit den südlichen und nördlichen Teilen der Zentral Srednogorie Zone korrelierbar. Diese Beziehung ist ein starkes Indiz, dass beide Zonen einen ähnlichen Ursprung und Entwicklungsweg haben, welcher kontrolliert wird durch das Absinken der subduzierten Platte und die Rotation der Subduktionsfront (slab retreat). Die meisten Zirkone aus der 81 – 78 Ma Yambol – Burgas Region und einige Zirkone mit ähnlichem Alter aus der Strandzha Region hingegen weisen auf einen Einfluss einer weniger radiogenen Magmaquelle respektive tiefe krustale Kumulate hin, da ihre εHf Werte vom allgemeinen zunehmenden Trend abweichen. Zusätzliche Informationen für die geochemischen Charakteristika der Früh - Kreide zu spät - jurassischem, permischem und ordovizischem Magmatismus werden aus der Studie der Hf Isotopen der geerbten Zirkone erhoben.