

Thermo-mechanical evolution of the Pelagonian Gneiss Dome (Greece)

Insights from numerical modeling and new geological
and geochronological data

Doctoral Thesis

Author(s):

Schenker, Filippo L.

Publication date:

2013

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-009898849>

Rights / license:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

DISS. ETH NO. 21010

Thermo-mechanical evolution of the Pelagonian Gneiss Dome (Greece): Insights from numerical modeling and new geological and geochronological data

A dissertation submitted to
ETH ZURICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by

Filippo Luca Schenker
MSc ETH in Earth Sciences

born 23.05.1983

citizen of
Gretzenbach (SO)

Accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Jean-Pierre Burg	ETH Zurich	Referee
Prof. Dr. Jean-Pierre Brun	University of Rennes 1	Co-referee
Prof. Dr. Dimitrios K. Kostopoulos	University of Athens	Co-referee
Prof. Dr. Taras Gerya	ETH Zurich	Co-referee
Dr. Eric Reusser	ETH Zurich	Co-referee

2013

Abstract

Gneiss domes or extensional Migmatitic Core Complexes (MiCC's) expose partially molten crustal rocks exhumed during post-thickening extension. Low heat flow in active collisional mountains suggests that there is (i) either input from extra-crustal heat sources or (ii) under-assessment of the pre-extensional collisional heat content to form high grade metamorphic core complexes. This thesis evaluates this hypothesis and focusses on the thermal and mechanical evolution of gneiss domes by combining thermo-mechanical numerical modeling, structural, petrological, geochemical and geochronological investigations on the Pelagonian Zone (Greek Macedonia).

We studied the effects of collisional thermal heritage by changing, in numerical experiments, the thermal gradient (temperature at the Moho, T_{MOHO}) and thickness of the lithosphere (h_0) and extending a five-layer setup (atmosphere, upper crust, lower crust, lithospheric and asthenospheric mantle) with particular attention to MiCC formation and heat source of migmatization. We identified time, structural, petrological and thermal constraints to assess the role of the distinct partial melting heat sources. Asthenospheric heat induced MiCCs ($T_{\text{MOHO}} < 700$ °C and $35 < h_0 \leq 50$ km) show early rift tectonics, during which the asthenosphere rises. Subsequently, (i) migmatization and (ii) Ultra-High-temperature (UHT, granulite facies) conditions of the lower crust, (iii) migmatitic doming and (iv) mantle melting dislocated by about 30 km with respect to the MiCC take place in a short temporal range (from ca. 5 to 9.5 model-Ma). The migmatitic core rocks experienced isobaric heating to migmatization at intermediate pressure, coeval with exhumation and cooling of the carapace rocks. Thus, migmatitic core and metamorphic carapace exposed along the detachment have a strongly decoupled thermal history. An example of asthenosphere derived MiCC is recognized in the Eocene Rhodope Migmatitic Dome Complex. Collisional-heat induced MiCCs ($T_{\text{MOHO}} > 700$ °C and/or $h_0 > 60$ km) exhibit (i) migmatization that precedes extension and (ii) lower crustal doming paired with a flat Moho. The asthenosphere upwelling with the related (iii) lower crustal UHT metamorphism and (iv) mantle melt takes place late after doming below the axis of the migmatitic dome. Therefore, UHT metamorphism and extensional mantle melt are not expected in MiCCs formed in short extensional pulses ($t < 12$ Model-Ma). The P-T-t path of the migmatitic core shows an isothermal decompression in the supra-solidus regime contemporaneously with dom-

ing. The latter characteristics are applicable to the Miocene Naxos dome. The migmatitic core of both end-members developed convection cells, whose importance as a buoyant driving force in exhuming the dome remains unsolved.

Geological mapping of the metamorphic dome in the Aliakmon river area of the Pelagonia Zone, in Greece, shows that metamorphism developed isogrades of the Edenite vector in amphiboles coincident with the trace of the main foliation bent into the structural dome. Early deformation within the dome was heterogeneous with domains of minor deformation characterized by a foliation that may be magmatic and zones of intense top-to-the-SW shearing, which is determined from shear criteria and crystallographic preferred orientation of calcite in marbles. High metamorphic conditions with anatectic melts are associated with top-to-the-SW shearing on the tilted eastern flank of the dome whereas migmatites in the core dome are roofed by a later, top-to-the-NE, discrete shear zone associated with crystallization of biotite, chlorite and actinolite.

U-Pb SHRIMP dating on zircons of pre-, syn- and post-foliation melts revealed three events: (i) Neoproterozoic, syn-foliation melt at 683 ± 4 Ma cut by a Neoproterozoic leucogranite (the post-foliation melt). (ii) Late- to post-Variscan sub-solidus foliation in ortho- and leucogneisses truncated by a sub-volcanic dike at 279 ± 8.1 Ma. Most of the granitoids dated for this study intruded between 315 and 280 Ma. (iii) Early Cretaceous foliation with syn, to post- anatectic melts at 116.6 ± 7.6 Ma. Mafic intrusions with carbonates bearing a $\delta^{13}\text{C}$ isotopic mantle signature at 279 ± 2 Ma signal the breakup of Gondwana / rifting of Tethys. Two acidic and one mafic sample yielded Lower-Middle Triassic zircon ages (246-242 Ma).

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating on white micas from core and carapace rocks showed (i) regional Aptian-Albian metamorphic overprint responsible for the 116-110 Ma ages in carapace rocks and (ii) younging towards the dome core. The 116 Ma $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ cooling ages are contemporaneous with the growth of zircon metamorphic rims in the core migmatites. Cooling at upper structural levels synchronous with metamorphism at greater depth is a characteristic of dome core “underheating” in extensional crustal detachments. Accordingly, the ages bracket doming between ca. 110-100 Ma and 80-65 Ma. The low cooling rates and the punctuated anatexis in the dome core are atypical for metamorphic core complexes exhumed along an extensional detachment. Cretaceous cooling of the dome flanks was also recorded at 92 Ma from reset zircons of the Mid-Jurassic-Early Cretaceous “flysch”-phyllitic series and on 76-67 Ma detrital zircons in Campanian to Maastrichtian

conglomerates. Since no Cretaceous heat source could be recognized, early peak conditions may have been generated during collision with extra heat production from in situ shear heating during collision and later exhumation.

The structural, geochemical and geochronological results further contribute constraining the role played by the Pelagonian block and the adjacent Vardar units in the development of the Alpine-Himalayan collision system of the Rhodope and Aegean region.

The Pelagonian Massif is a syn-metamorphic stack of nappes thrust during the Lower Cretaceous in a collision involving the Eurasian margin and a southern continental block. Pelagonia constituted a distal part of this southern block. Before entering in the collision, Pelagonia was overthrust in the Late Jurassic/Early Cretaceous by a Tethys-related oceanic basin that developed during the Lower Jurassic between Pelagonia and Eurasia. The oceanic thrust sheet was incorporated in the nappe pile and split by the exhumation and doming of Pelagonia in the late Lower Cretaceous, resulting in the nowadays arrangement of the Vourinos ophiolites on the eastern and the Vardar zone on the western flank of the Pelagonia dome.

Zircon and apatite fission track measurements date cooling/exhumation in the Late Oligocene-Early Miocene. Cooling of the Pelagonian rocks below a top-to-the-NE normal fault coincides with Aegean (e.g. Naxos) and Rhodope (e.g. Kavala granodiorite) extension. Steep, E-W faults cutting sediments younger than Miocene represent the youngest tectonic event, still active in the Ptolemais-Kozani basin.

Zusammenfassung

Gneisdome oder extensionsbedingte migmatitische Kernkomplexe (MiKK) legen partiell geschmolzene Krustengesteine frei, die während der, auf eine Phase der Verdickung folgenden, Extension exhumiert wurden. Niedriger Wärmefluss in einem aktiven Kollisionsgebirge legt nahe, dass (i) entweder Wärmezufuhr von Quellen ausserhalb der Kruste stattfand, (ii) oder dass der vor der Extension vorhandene, kollisionsbedingte Wärmegehalt, der nötig ist, um hochgradig metamorphe Kernkomplexe zu bilden, unterschätzt wird. Diese Arbeit untersucht diese Hypothese und konzentriert sich mit Hilfe eines multidisziplinären Ansatzes, der thermo-mechanische Modelle, strukturgeologische, petrologische, geochemische und geochronologische Untersuchungen kombiniert, auf die thermische und mechanische Entwicklung von Gneisdomen in der Pelagonischen Zone (griechisches Mazedonien).

Wir untersuchten die Auswirkungen von kollisionsbedingter Wärme, indem in numerischen Experimenten der Temperaturgradient (Temperatur an der Moho, T_{MOHO}) und die Dicke der Lithosphäre (h_0) geändert wurden und ein fünf-lagiges Modell (Atmosphäre, obere Kruste, untere Kruste, lithosphärischer und asthenosphärischer Mantel) auseinander gezogen wurde. Speziell wurde dabei auf die Bildung von MiKKs und die Wärmequelle der Migmatisierung geachtet. Es wurden zeitliche, strukturelle, petrologische und thermische Bedingungen identifiziert, um die Rolle der verschiedenen Wärmequellen der partiellen Aufschmelzung zu bestimmen. MiKKs aufgrund asthenosphärischer Wärme ($T_{\text{MOHO}} < 700 \text{ °C}$ und $35 < h_0 \leq 50 \text{ km}$) weisen eine frühe Rifttektonik auf, während derer die Asthenosphäre aufsteigt. Daraufhin beobachtet man innert einer kurzen Zeitspanne (während ungefähr 5 bis 9.5 Modell-Ma) (i) Migmatisierung, (ii) UHT- (Granulitfazies-) Bedingungen in der unteren Kruste, (iii) migmatitische Dombildung und (iv) Aufschmelzen des Mantels ungefähr 30 km entfernt vom MiKK. Die migmatitischen Kerngesteine werden bei mittleren Drucken isobar bis zur Migmatisierung erwärmt und gleichzeitig werden die umhüllenden äusseren Gesteine exhumiert und abgekühlt. Daher weisen der migmatitische Kern und die metamorphe Hülle, die entlang eines Abscherhorizonts freigelegt ist, eine gänzlich entkoppelte thermische Geschichte auf. Ein Beispiel für ein MiKK asthenosphärischer Herkunft ist der Eozäne migmatitische Dom-Komplex der Rhodopen. MiKKs aufgrund kollisionsbedingter Wärme ($T_{\text{MOHO}} > 700 \text{ °C}$ und/oder $h_0 > 60 \text{ km}$)

weisen (i) eine Migmatisierung auf, die der Extension vorausgeht und (ii) Dombildung in der unteren Kruste, kombiniert mit einer flachen Moho. Das Aufsteigen der Asthenosphäre, mit der dazugehörigen (iii) UHT-Metamorphose der unteren Kruste und (iv) der Aufschmelzung des Mantels, findet nach der Dombildung, unterhalb der Achse des migmatitischen Doms, statt. Deshalb werden UHT-Metamorphose und extensionsbedingte Mantelschmelze nicht in MiKKs erwartet, die in kurzen Extensionspulsen gebildet wurden ($t < 12$ Modell-Ma). Der P-T-t-Pfad des migmatitischen Kerns zeigt eine, mit der Dombildung zeitgleiche, isothermale Dekompression im Supra-Solidus Regime. Diese Merkmale können auf den Miozänen Naxos Dom angewandt werden. In den migmatitischen Kernen dieser beiden Endglieder entwickelten sich Konvektionszellen, wobei deren Rolle als treibende Auftriebskräfte für die Exhumation der Dome ungeklärt bleibt.

Geologische Kartierung des metamorphen Domes im Gebiet des Aliakmon Flusses zeigt, dass die Metamorphose Isograden des Edenit-Vektors gebildet hat, die mit der Spur der im Dom gebogenen Hauptschieferung übereinstimmen. Die frühe Verformung im Dom war heterogen mit Zonen geringer Verformung, die durch eine möglicherweise magmatische Schieferung charakterisiert sind, und Zonen, die zu einer starken SW-vergenten Scherung gehören (bestimmt anhand von Scherkriterien und kristallographisch bevorzugter Orientierung von Kalziten in Marmoren). Hochmetamorphe Bedingungen mit anatektischen Schmelzen stehen in Zusammenhang mit einer SW-vergenten Bewegung auf der gekippten östlichen Flanke des Doms, wohingegen Migmatite im Kern des Doms von einer späteren, diskreten, NE-vergenten Scherzone mit auskristallisierten Biotiten, Chloriten und Aktinoliten bedeckt wurden.

Die U-Pb Datierung von Prä-, Syn- und Post-Schieferungs-Schmelzen weist auf drei Ereignisse hin: (i) Neoproterozoische Syn-Schieferungs-Schmelze um 683 ± 4 Ma, die von Neoproterozoischen Leukograniten abgeschnitten wird (Post-Schieferungs-Schmelze); (ii) spät- bis Post-Variszische Sub-Solidus Schieferung in Ortho- und Leukogneisen, die von Sub-Vulkanischen Gängen um 279 ± 8.1 Ma abgeschnitten wird; (iii) früh Kretazische Schieferung mit Syn- bis Post-Anatektischen Schmelzen um 116.6 ± 7.6 Ma. Mafische Intrusionen mit Karbonat-Einschlüssen, die eine $\delta^{13}\text{C}$ Mantel-Signatur aufweisen, wurden um 279 ± 2 Ma datiert. Dieses Alter bestimmt den Zeitpunkt des Auseinanderbrechens von Gondwana in Nord-Europa, d.h. des Riftings der Tethys. Zwei saure und eine mafische Probe weisen Zirkonalter in der unteren bis mittleren Trias (246-242 Ma) auf.

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Datierung von Hellglimmern aus Gesteinen des Kerns und der äusseren Regionen zeigt (i) regionale metamorphe Überprägung im Aptium-Albium, die für die 116-110 Ma Alter in den äusseren Gesteinen verantwortlich sind; (ii) Jüngung in Richtung des Domkerns. Die 116 Ma $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Abkühlalter sind zeitgleich mit dem Wachstum von metamorphen Zirkonrändern in Kern-Migmatiten. Gleichzeitige Abkühlung von oberen strukturellen Zonen und Metamorphose in grösserer Tiefe ist charakteristisch für eine „Unterhitzung“ von Domkernen, die in Zusammenhang mit extensiven, krustalen Abscherungen stehen. Dementsprechend, weisen die Alter auf eine Dombildung zwischen ca. 110-100 Ma bis 80-65 Ma hin. Jedoch sind die niedrigen Abkühlraten und die punktuelle Anatexis im Domkern atypisch für metamorphe Kernkomplexe, die entlang eines Abscherhorizonts freigelegt wurden. Abkühlung der Domflanken während der Kreide wurde auch von, um 92 Ma zurückgesetzten, Zirkonen der „Flysch“-Phyllit-Serie des mittleren Jura und der frühen Kreide, und von 76-67 Ma alten detritischen Zirkonen in Konglomeraten des Campanium und Maastrichtium aufgezeichnet. Da keine kreidezeitliche Wärmequelle identifiziert werden konnte, könnten frühe Spitzenbedingungen während der Kollision bestanden haben, aufgrund einer zusätzlichen Wärmeproduktion durch in situ Entstehung von Scherwärme während der Kollision und späteren Exhumation.

Die strukturellen, geochemischen und geochronologischen Resultate tragen weiter dazu bei, die Rolle des Pelagonischen Blocks und der benachbarten Vardar-Einheiten in der Entwicklung der Rhodopen und der Ägäis im Alpen-Himalaya-Kollisions-Systems einzugrenzen.

Nimmt man an, dass unter Eurasien seit dem mittleren Jura eine Subduktion existiert und dass die kreidezeitliche Pelagonische Metamorphose während der Kollision stattfand, folgern wir daraus, dass im frühen Mesozoikum nur ein ozeanisches Tethys-Becken geöffnet wurde. Dieser Ozean wurde im späten Jura/ in der frühen Kreide auf Pelagonien obduziert und wurde zusammen mit Pelagonien in die Kollision miteinbezogen. Die ozeanische Überschiebungsdecke wurde während der darauffolgenden Exhumierung und Dombildung in Pelagonien geteilt, was zu der heutigen Anordnung der Vourinos Ophiolite auf der östlichen und der Vardar-Zone auf der westlichen Flanke des Pelagonischen Doms führte.

Die Datierung von Zirkon und Apatit Spaltspuren dokumentiert zusätzlich Abkühlung/ Exhumation im späten Oligozän - Frühen Miozän. Die Abkühlung von Palagonischen Gesteinen unterhalb einer NE-vergente Abschiebung ist zeitgleich mit der Extension in der Ägäis (z. Bsp. Naxos) und in den Rhodopen (z. Bsp. Kavala Granodiorite). Steile WE-Brüche, die Sedimente abschneiden, die jünger als Miozän sind, stellen das jüngste tektonische Ereignis dar, das immer noch im Ptolemais-Kozani Becken aktiv ist.