

**Pre-Alpine and Alpine evolution of the Ronda  
Ultramafic Complex and its country-rocks  
(Betic chain, southern Spain):  
U-Pb SHRIMP zircon and fission-track dating**

A dissertation submitted to the  
**Swiss Federal Institute of Technology Zürich**

for the degree of  
**Doctor of Natural Sciences**

presented by

**Lourdes Sánchez Rodríguez**  
Licenciada en Ciencias Geológicas, Universidad de Oviedo (Spain)

born February 11<sup>th</sup>, 1971  
citizen of Spain

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Dieter Gebauer	ETH Zürich	examiner
Prof. Dr. Jose María Tubía	Universidad del País Vasco (Spain)	co-examiner
Prof. Dr. Jose Ignacio Gil Ibarra	Universidad del País Vasco (Spain)	co-examiner
Dr. Diane Seward	ETH Zürich	co-examiner

## Abstract

Combined cathodoluminescence (CL) studies and U-Pb Sensitive High Resolution Ion Microprobe (SHRIMP) dating of distinct magmatic and metamorphic zircon domains constitutes a powerful tool to decipher the geological history of complex metamorphic terranes. This combination of techniques was applied to different structural units within the Alpujarride Complex, in the internal zone of the Betic chain (southern Spain). In the Alpujarride Complex several orogenic lherzolite massifs - the Ronda peridotites - occur as slices of mantle rocks, containing ~ 5% of mafic layers. The Ronda peridotites are emplaced in metamorphic country rocks, which include granulites, migmatites and eclogites. Anatectic granites crosscut both the peridotites and the country-rocks. They formed by partial melting of the metasedimentary country rocks during hot emplacement of the peridotites.

The main aims of this study were to define the ages of partial melt events in the Ronda peridotites via dating the protolith of mafic layers within the peridotites, and to constrain the age of subduction related HP-metamorphism and of LP-HT metamorphism induced in the country rocks by the hot emplacement of the ultramafic rocks. Dating the regional metamorphism of the country-rocks was also an important objective in order to assess how much was due to the effect of the HT-emplacement of the peridotites. Additionally, fission-track analyses on zircons and apatites of country-rocks at different levels of the metamorphic complex provided the means for a time-controlled late thermal history of the area and allowed, together with the SHRIMP data, the calculation of cooling and exhumation rates.

Early/Middle Jurassic and Late Jurassic/Early Cretaceous protolith ages were obtained from magmatic oscillatory-zoned domains of the zircons separated from three HP/UHP garnet pyroxenites ( $178 \pm 6$  Ma,  $143 \pm 16$  Ma and  $131 \pm 3$  Ma). Magmatic cores of zircons of an eclogite yielded an Early Jurassic protolith age ( $183 \pm 3$  Ma). These ages were interpreted to reflect extensional/transensional stages in the area of the Alboran Sea, related to Pangea's break-up and opening of the Atlantic Ocean. HP-HT metamorphism is recorded in unzoned rims of the zircons of an eclogite, and was dated at  $19.9 \pm 1.7$  Ma, which is interpreted to represent peak metamorphism ( $790 \pm 15^\circ\text{C}$ ), immediately following the P-peak ( $17 \pm 1$  kbar; PT-data of Tubía et al., 1997). Thus, Miocene subduction-type metamorphism could be deduced through geochronology for the first time in the Betic chain. The crystallisation age of the anatectic granites was determined at  $18.8 \pm 4.9$  Ma.

A first granulite-facies metamorphism in the country rocks was proven to be Hercynian ( $313 \pm 5$  Ma) in the zircons of both leucosome and melanosome differentiates of the kinzigites overlying the Ronda peridotites. A Hercynian event ( $\sim 300$  Ma) was also dated in newly grown metamorphic zircon domains of rocks located at different structural levels within the Alpujarride sequence. This proves the existence of a Hercynian metamorphic event, which

produces granulitisation in the lower crust, and migmatitisation in middle sections of the crust. The data presented in this thesis clearly show that Hercynian metamorphism affected the rocks of the Internal Betic chain prior to the Early Miocene emplacement of the ultramafic rocks into the continental crust. A LP-HT metamorphic imprint related to the hot emplacement of the ultramafic rocks was determined on different rock samples to be Early Miocene, yielding an average age of  $20.9 \pm 0.7$  Ma.

The youngest detrital zircon grains were dated in different metamorphic country-rocks (at different levels within the Alpujarride sequences), yielding ages ranging from  $\sim 480$  to  $\sim 340$ . These ages indicate Ordovician to Early Carboniferous maximum depositional age for their protoliths. Detrital intercalations within the marbles that occur at the top of the Alpujarride sequences contained inherited detrital zircon grains from which the youngest was dated at  $325 \pm 19$  Ma. This figure represents a maximum age for the deposition of the carbonate sequences of the Alpujarride Complex.

SHRIMP data presented in this thesis suggest very high exhumation ( $>31$  mm/y for the country-rocks;  $>50$  mm/yr for the peridotites) and cooling rates ( $200$ - $340$  °C/Ma) for the area of Ronda. A more detailed geochronological control of the last cooling stages was obtained through a zircon and apatite fission-track study. Fission-track data presented in this work indicate that nappe stacking in the western Alpujarrides took place before the  $17.1 \pm 1.9$  Ma, when the rocks cooled down to  $\sim 260$  °C. Very fast cooling (in the order of  $\sim 300$ - $400$  °C/Ma) affected these rocks in the period  $\sim 21$ - $19$  Ma. In the period  $\sim 19$ - $12$  Ma the different structural levels of the Alpujarride Complex underwent a different cooling path, with progressive decrease of the cooling rates. The upper structural unit (los Reales nappe) cooled faster ( $\sim 200$ - $100$  °C/Ma) than the lowest structural unit (the Ojén nappe;  $\sim 100$ - $50$  °C/Ma).

## Zusammenfassung

Die Kombination von Kathodolumineszenz-Untersuchungen und U-Pb SHRIMP Datierungen von magmatischen und metamorphen Zirkondomänen ist gut dazu geeignet, die geologische Entwicklungsgeschichte von komplexen metamorphen Gebieten zu rekonstruieren. Mit Hilfe dieser beiden Techniken wurden unterschiedliche tektonische Einheiten des Alpujárride Komplexes (interne Zone der Betischen Koridilliere, Südspanien) untersucht. Innerhalb des Alpujárride Komplexes treten mehrere Lherzolith-Massive – die Ronda Peridotite – als Relikte des Erdmantels auf. Sie enthalten ~5% Pyroxenitlagen. Die Nebengesteine der Ronda Peridotite bilden Granulite, Migmatite und Eklogite. Diskordante anatektische Granite durchschlagen sowohl die Peridotite als auch die Nebengesteine. Sie entstanden als Teilschmelzen aus den metasedimentären Nebengesteinen während der Platznahme der heißen Peridotite.

Die Hauptziele dieser Arbeit waren, die Protolith-Alter der Ronda Pyroxenite und den Zeitpunkt der durch die Platznahme der Peridotite induzierten LP-HT Metamorphose in den Nebengesteinen zu bestimmen. Die Datierung der Regionalmetamorphose in den Nebengesteinen war ein gleichermassen wichtiges Ziel, um dadurch den Effekt der Kontaktmetamorphose durch die Peridotit-Platznahme besser abschätzen zu können. Zirkon- und Apatit-Spaltspurdatierungen von unterschiedlichen Niveaus der Nebengesteine erlaubten zusätzlich eine Rekonstruktion der späten thermischen Geschichte des Untersuchungsgebietes und ermöglichten, zusammen mit den SHRIMP Daten, die Abschätzung von Abkühl- und Hebungsraten.

Magmatisch oszillierend-zonierte Bereiche von Zirkonen aus drei HP/UHP Granat Pyroxeniten ergaben Protolithalter zwischen dem frühen/mittel Jura und der frühen Kreide ( $178 \pm 6$  Ma,  $143 \pm 16$  Ma and  $131 \pm 3$  Ma). Magmatische Kerne von Zirkonen eines Eklogits ergaben ein früh-jurassisches Protolithalter ( $183 \pm 3$  Ma). Diese Alter widerspiegeln Extensionsphasen im Bereich des heutigen Alboran Meeres, die mit dem Zerschneiden von Pangäa und der Öffnung des Nordatlantiks in Zusammenhang stehen. Nicht-zonierte Ränder von Eklogitzirkonen widerspiegeln eine HP-HT Metamorphose um  $19.9 \pm 1.7$  Ma, was als Temperaturhöhepunkt ( $790 \pm 15^\circ\text{C}$ ) unmittelbar nach dem Druckhöhepunkt ( $17 \pm 1$  kbar) interpretiert wird. Aufgrund dieser Daten konnte zum ersten Mal eine miozäne Subduktionsmetamorphose in der Betischen Kordilliere nachgewiesen werden. Das Kristallisationsalter der anatektischen Granite wurde mit  $18.8 \pm 4.9$  Ma bestimmt.

Die erste granulitfazielle Metamorphose der Nebengesteine ist herzynischen Alters ( $313 \pm 5$  Ma). Gesteine aus unterschiedlichen Einheiten des Alpujárride Komplexes lieferten weitere herzynische Alter ( $\sim 300$  Ma) in neugewachsenen, metamorphen Zirkondomänen. Dies beweist eine herzynische Regionalmetamorphose innerhalb der internen Zone der Betischen Kordilliere deutlich vor der Platznahme der Peridotite in die kontinentale Kruste.

Diese Platznahme wurde an mehreren unterschiedlichen Nebengesteinsproben als Frühmiozän ( $20.9 \pm 0.7$  Ma) datiert.

Die maximalen Sedimentationsalter der Ausgangsgesteine der metamorphen Peridotit-Nebengesteine reichen von Silur bis ins untere Karbon, während jüngere Alter ( $< 325$  Ma) für die Karbonatsequenzen bestimmt wurden.

Die SHRIMP Daten dieser Arbeit lassen auf sehr hohe Exhumierungs- ( $> 31$  mm/a) und Abkühlraten ( $200-340^\circ\text{C}/\text{Ma}$ ) schließen. Die späte Abkühlgeschichte des Ronda Komplexes lässt sich durch Zirkon- und Apatitspaltspuralter fassen. Diese Daten deuten an, dass die Deckenstapelung innerhalb des westlichen Alpujarride Komplexes vor  $17.1 \pm 1.9$  Ma stattfand, als die Gesteine unter  $\sim 260^\circ\text{C}$  abgekühlt waren. Sehr hohe Abkühlraten ( $\sim 300-400^\circ\text{C}/\text{Ma}$ ) charakterisierte diese Gesteine im Zeitraum  $\sim 21-19$  Ma. Die unterschiedlichen strukturellen Einheiten des Alpujarride Komplexes zeigen verschiedene Abkühlpfade während des Zeitraumes  $\sim 19-12$  Ma. Die obere Decke (los Reales Decke) kühlte schneller ab ( $\sim 200-100^\circ\text{C}/\text{Ma}$ ), während die unterste Decke (Ojén Decke) durch Abkühlraten von  $\sim 100-50^\circ\text{C}$  charakterisiert ist.