

DISS. ETH NO. 19342

**Tectono-metamorphic evolution of the Gruf Complex  
(Swiss and Italian Central Alps)**

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

DOCTOR OF SCIENCES

presented by

**Andrea Galli**

Dipl. Natw. ETH

born on March 26<sup>th</sup>, 1980

citizen of Bioggio (TI)

Accepted on the recommendation of:

Examiner: Prof. Dr. M.W. Schmidt

Co-examiner: Prof. Dr. J.-P. Burg

Co-examiner: Dr. E.C. Reusser

Co-examiner: Dr. A. Möller

ETH Zurich

ETH Zurich

ETH Zurich

University of Kansas

2010

## Abstract

Aim of this study is to map the Gruf Complex (eastern Central Alps) and to constrain its tectono-metamorphic evolution. The Gruf Complex, exposed between the Tertiary calc-alkaline Bergell Intrusion and the ophiolitic rocks of the Chiavenna Unit and the Adula Nappe, is prevalently constituted of migmatitic metagranitoids and partly migmatitic pelitic to psammitic metasediments associated with leucosomes and leucogranites. Lenses of charnockites, granulites, meta-ultramafic, -basic and -calcareous rocks occur within these two major groups.

Metagranitoids consist of coarse-grained, massive to slightly foliated, metaluminous to slightly peraluminous migmatitic biotite-orthogneisses, characterised by a disorganised and fluidal texture. In the northernmost part of the Gruf Complex, the migmatitic biotite-orthogneiss contains numerous, decimetric to metric enclaves of mostly mafic composition which are geochemically similar to the Chiavenna amphibolites. Internally boudinaged, 8 km long and 0.5 km thick, sheet-like bodies of opx-bearing charnockite associated to up to 50 m large lenses of websterite to gabbro occur within migmatitic metagranitoids. Charnockites are leucocratic, medium- to coarse-grained and metaluminous to peraluminous. Charnockites are separated from the host orthogneisses by thin mylonites. Their internal structure is marked by irregular flow structures and the occurrence of metric granulite schlieren and enclaves. Granulites occur as garnet-orthopyroxene-biotite-alkalifeldspar-bearing schlieren ( $\pm$  sapphirine, sillimanite, cordierite, corundum, spinel, plagioclase, quartz) within charnockites and as residual enclaves both in the charnockites and the migmatitic orthogneisses. Websterites to gabbros are greenish-brownish, middle- to coarse-grained, massive and mainly composed of clinopyroxene, orthopyroxene and interstitial biotite and plagioclase. The contacts to the enclosing orthogneisses are intrusive.

Metasediments are composed of alternating garnet-bearing paragneisses and garnet-cordierite-bearing sillimanite-biotite-schists. Both rock types display a migmatitic banding of quartzofeldspathic leucosomes and biotite-garnet-( $\pm$  sillimanite)-rich melanosomes to mesosomes. This banding is prevalently parallel to the main foliation. However, where the degree of anatexis is stronger, leucosomes migrate discordantly to the main fabric and collect in dykes and pockets. Massive, fine- to coarse-grained, peraluminous garnet-sillimanite two-mica leucogranites occur spatially associated to migmatitic metasediments. Leucogranites display sharp and irregular intrusive contacts to the metasediments and more diffuse contacts to the migmatitic metagranitoids.

Lenses of metaperidotite associated to amphibolites and calc-silicates are contained both in the metagranitoids and metasediments. Metaperidotites exhibit alternating ilmenite, dunite, pyroxenite and chromite layers crosscutted by several metaroddingite and ferro-gabbro dykes. Compositional banding and dykes are overgrown by a penetrative foliation mainly defined by oriented orthopyroxene. Talc-chlorite-bearing veins cut across this main foliation. Metaperidotites display mylonitic contacts to the metasediments. In contrast, leucosomes from the biotite-orthogneisses are intrusive, with decimetric leucocratic veins intruding fractures at the rim of ultramafic lenses and related amphibolites.

The regional structure of the Gruf Complex is dominated by an ENE-WSW trending, steeply

dipping attitude underlined by bulk orientation of lithological contacts and the parallel main foliation. The regional fabric dips to the NNW in the northern and central Gruf and prevalently to the SSE in the southern part, suggesting a dome-like architecture for the Gruf Complex. The regional mineral elongation plunges 30-40° between E and NE. In contrast, charnockites and meta-peridotites display a separate internal foliation and lineation with no clear regional trend. Intensity and style of deformation strongly depend on the rock type and degree of anatexis. In the metagranitoids the deformation generally concentrate in ductile shear zones. Three main sets of conjugated shear zones have been recognised which describe a syn- to late migmatitic or magmatic vertical flattening and a marked top-to-the NE dextral-normal movement documenting the upward movement of the Gruf Complex with respect to the surrounding units. Metasediments are characterised by a more regular and penetrative foliation. However, these rocks often display a more complex deformation pattern marked by the contorted refolding of the main foliation.

Stromatic structures, melt-filled shear zones, veinlets, patches, pockets and dykes of leucosomes crosscutting the main foliation, magmatic breccias and back veining of Gruf leucosomes into the base of the Bergell Intrusion indicate that migmatization was coeval with the main Alpine deformation and with the emplacement of the Bergell Pluton. The occurrence of sillimanite + alkali feldspar and the scarcity or lack of syn-kinematic muscovite observed in most of the regionally-dominant migmatitic micaschists of the Gruf Complex suggest that partial melting was mostly induced by the breakdown of muscovite at about 700-750 °C and 6-7 kbar.

Charnockites and granulites show a more complex metamorphic evolution. Thermobarometric calculations, P-T pseudosections and orthopyroxene Al content, indicate that both charnockites and granulites equilibrated at ultrahigh-temperature (UHT) metamorphic peak conditions of  $T = 920-940$  °C and  $P = 8.5-9.5$  kbar. Peak assemblages were subsequently overprinted by intergrowth, symplectite and corona textures involving orthopyroxene, sapphirine, cordierite and spinel at  $T = 720-740$  °C and  $P = 7-7.5$  kbar. Garnet diffusion modelling suggests that metamorphic peak assemblages and post-peak reaction textures always involving cordierite developed during two separate metamorphic cycles. Fluid-absent partial melting of pelitic and psammitic sediments during the UHT event lead to the formation of charnockitic magmas and granulitic residuals. Intense melt loss and thorough dehydration of the granulites (although retaining biotite) favoured the partial preservation of peak mineral assemblages during Alpine regional metamorphism.

To understand the geotectonic significance of charnockites and granulites, in particular in the context of the Alpine migmatisation, zircons from 15 high grade samples have been U-Pb dated by SHRIMP II analysis. The age of the granulite metamorphism results to 282-261 Ma and is obtained from oscillatory zoned zircons from charnokite sheets. Furthermore, some of these zircons contain inclusions of the complete suite of granulite facies minerals, rendering a Permian age of the granulites unequivocal. Two samples from an enclave-rich biotite-orthogneiss sheet yield Cambrian and Ordovician zircon cores, while two deformed leucogranites and six ortho- and augengneisses, which compose two thirds of the Gruf complex, give zircon ages of 290-260 Ma. Most zircons have milky rims with ages ranging from 34-30 Ma. These rims date the Alpine amphibolite facies migmatisation, an interpretation confirmed by directly dating a leucosome pocket

from the upper amphibolite facies migmatitic metapelites also common in the Gruf.

The Gruf charnokites associated with boudins of granulites and websterites to gabbro-norites are identified as part of the post-Variscan European lower crust. A geotectonic reconstruction reveals that this piece of lower crust must have been stranded in the (European) North upon rifting of the Neothetis and that exhumation of this lower crust occurred during migmatitisation and formation of the Bergell Pluton in the aftermath of the breakoff of the European slab. During its ascent, the dynamics of the uprising Bergell Pluton helped the exhumation of the Gruf Complex as a pluton-related migmatitic dome. As a corollary, the Gruf Complex has to be treated independently from the other Penninic units.

The joint exhumation of the Bergell with the hot Gruf Complex also explain the increase of metamorphic temperatures across the Chiavenna Unit and the Tambo Nappe towards the contact with the Gruf Complex. The differential movement of the Gruf Complex did not occur along a well defined Gruf Line but was accommodated in a wide zone within the enclave-rich biotite-orthogneiss. The enclaves embedded within the orthogneiss are relics of the Chiavenna ophiolites sheared into the orthogneiss during its syn-kinematic partial melting.

## Riassunto

Lo scopo di questo studio consiste nel mappare il Complesso del Gruf (parte orientale delle Alpi Centrali) e caratterizzarne l'evoluzione tettono-metamorfica. Il Complesso del Gruf affiora tra il plutone calcocalino della Bregaglia e le rocce ofiolitiche mesozoiche dell'Unità di Chiavenna. Il Gruf è costituito in prevalenza da rocce migmatitiche metagranitoidiche e da migmatiti di origine sedimentaria a composizione pelitica e psammitica. Quest'ultime sono associate a leucosomi e graniti leucocratici. Lenti di charnockiti, granuliti, rocce metamorfiche ultramafiche, basiche e carbonatiche sono contenute nelle migmatiti.

Le rocce metagranitoidiche sono formate da orthogneiss migmatitici a biotite, a grana grossolana, compatte o debolmente foliate, caratterizzate da una tessitura disorganizzata e fluidale. La loro composizione varia da metaluminosa a peraluminosa. Nella parte più settentrionale del Complesso del Gruf, questi orthogneiss contengono numerose enclavi a composizione basica geochimicamente molto simili alle anfiboliti di Chiavenna. Corpi budinati (8 x 0.5 km) di charnockiti a ortopirosseno associate a lenti (< 50m) di websteriti/gabbronoriti affiorano nelle migmatiti. Le charnockiti sono leucocratiche, a granulometria da media a grossolana e a composizione da metaluminosa a peraluminosa. Queste rocce sono separate dagli orthogneiss migmatitici incassanti da sottili zone milonitiche centimetriche. La loro struttura interna è caratterizzata da strutture di flusso irregolari e da schlieren e enclavi granulitiche. Granuliti a granato, ortopirosseno, biotite e feldspato potassico ( $\pm$  saffirina, sillimanite, cordierite, corindone, spinello, plagioclasio e quarzo) formano schlieren nelle charnockiti o enclavi restitiche sia nelle charnockiti sia negli orthogneiss migmatitici. Le websteriti/gabbronoriti sono di color verde-marrone, presentano una granulometria da media a grossolana, sono compatte e prevalentemente composte da clinopirosseno, ortopirosseno e biotite e plagioclasio interstiziali. I contatti con gli orthogneiss incassanti sono di natura intrusiva.

I metasedimenti migmatitici sono caratterizzati dall'alternanza di paragneiss a granato e scisti biotitici a sillimanite, granato e cordierite. Entrambe le litologie presentano una bancatura migmatitica definita dall'alternanza di leucosomi quarzo-feldspatici e mesosomi/melanosomi ricchi in biotite, granato e sillimanite. Questa bancatura è prevalentemente parallela alla scistosità dominante. Ciononostante, dove il grado di fusione parziale è più elevato, i leucosomi migrano in maniera discordante rispetto alla scistosità formando filoni e tasche centimetriche. Associati a questi metasedimenti migmatitici si osservano graniti leucocratici a due miche, granato e sillimanite, compatti, a granulometria da fine a grossolana e di composizione peraluminosa. Questi graniti presentano contatti intrusivi netti e irregolari con i metasedimenti e contatti più diffusi con gli orthogneiss migmatitici.

Lenti di metaperidotiti, spesso associate ad anfiboliti e calcsilicati, sono contenute sia nelle rocce metagranitoidiche sia nei metasedimenti. Queste metaperidotiti sono caratterizzate dall'alternanza composizionale di layer lerzolitici, dunitici, pirossenitici e cromitici. Il layering è tagliato da numerosi filoni metarodingitici e ferrogabbroici. Layering e filoni presentano una scistosità penetrativa comune, prevalentemente definita dall'orientazione preferenziale degli ortopirosseni. Vene

tardive a talco e clorite ritagliano questa scistosità. I contatti tra le metaperidotiti e i metasedimenti migmatitici sono di natura milonitica. Al contrario, i contatti tra le metaperidotiti e le rocce meta-granitoidiche sono di natura intrusiva e caratterizzati da filoni decimetrici di leucosomi granitici che intrudono e fratturano i bordi delle lenti metaperidotitiche.

La struttura regionale del Complesso del Gruf è dominata da un trend strutturale della scistosità e dei contatti litologici orientato ENE-WSW. Nella parte settentrionale e centrale del Gruf, la fabbrica regionale si immerge verso NNW; nella parte più meridionale, al contrario, verso SSE. Ciò suggerisce che l'architettura dell'intero complesso sia definita da un duomo strutturale. L'elongazione dei minerali a livello regionale si immerge con un angolo di 30-40° verso E e NE. Eccezioni sono rappresentate dalle charnockiti e dalle metaperidotiti, le quali presentano scistosità e lineazioni differenti e irregolari, senza un chiaro trend regionale. Lo stile e l'intensità della deformazione dipende dalla litologia e dal suo grado di fusione. Nelle rocce metagranitoidiche la deformazione si concentra prevalentemente in zone di scorrimento duttili. Sono stati identificati tre tipi principali di zone di scorrimento, coniugati tra loro, che descrivono un appiattimento verticale syn-migmatitico e un marcato movimento destrale e normale con senso di scorrimento top-to-the NE. Questo movimento rispecchia la risalita del Gruf rispetto alle unità limitrofe. I metasedimenti sono generalmente interessati da una scistosità più regolare e penetrativa. Queste rocce possono tuttavia localmente presentare una deformazione più complessa, marcata dalla ripiegatura apparentemente caotica della scistosità.

Strutture stromatiche, zone di scorrimento riempite con magmi, venette, tasche e filoni di leucosomi ritaglianti la scistosità, breccie magmatiche e fenomeni di back-veining di leucosomi del Gruf alla base dell'intrusione della Bregaglia indicano che il processo di migmatizzazione è avvenuto contemporaneamente alla deformazione Alpina regionale e alla messa in posto del plutone. La presenza di sillimanite + feldspato potassico e la scarsità o completa mancanza di muscovite syn-cinematica riscontrate a livello regionale nei micascisti migmatitici del Gruf suggeriscono che la fusione parziale regionale è stata indotta dal breakdown della muscovite a  $T = 700-750\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $P = 6-7\text{ kbar}$ .

Le charnockiti e le granuliti, invece, presentano un'evoluzione metamorfica più complessa. Calcoli termobarometrici, P-T pseudosections e il contenuto di Al negli ortopirosseni indicano che queste rocce si sono formate a condizioni metamorfiche di UHT a  $T = 920-940\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $P = 8.5-9.5\text{ kbar}$ . La paragenesi formatasi al picco metamorfico è stata in seguito parzialmente cancellata da tessiture simplettitiche e corone di ortopirosseno, saffirina, cordierite e spinello a  $T = 720-740\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $P = 7-7.5\text{ kbar}$ . Modelli di diffusione nel granato suggeriscono che la paragenesi formatasi al picco metamorfico e le tessiture simplettitiche e corone sono il frutto di due differenti eventi metamorfici. La fusione secca di sedimenti pelitici e psammitici a condizioni di UHT ha generato magmi charnockitici e restiti granulitici. L'intensa perdita di magma e la deidratazione delle granuliti hanno favorito la preservazione (anche se in parte solo parziale) delle paragenesi del picco metamorfico durante il metamorfismo regionale alpino.

Per comprendere il significato geotettonico delle charnockiti e delle granuliti, in particolare nel contesto della migmatizzazione alpina, sono stati datati con la SHRIMP II zirconi separati da 15

campioni di alto grado metamorfico. L'età del metamorfismo granulitico è 282-261 Ma ed è stata ottenuta datando le zonazioni oscillatorie degli zirconi separati dalle charnockiti. Le inclusioni di minerali di facies granulitica trovate in alcuni degli zirconi datati confermano inequivocabilmente l'età permiana delle granuliti. I nuclei magmatici degli zirconi separati da due campioni di orthogneiss biotitico a enclavi basiche hanno età cambriane e ordoviciane. Gli zirconi separati da due leucograniti e sei orthogneiss, che assieme formano due terzi del Gruf, hanno età comprese tra 290 e 260 Ma. La maggior parte degli zirconi presentano bordi omogenei di età comprese tra 34 e 30 Ma. Questi bordi rispecchiano la migmatizzazione alpina di facies anfibolitica, interpretazione direttamente confermata dalla datazione di una tasca di leucosoma discordante nei metasedimenti migmatitici del Gruf.

Charnockiti, granuliti e websteriti/gabbronoriti formano parte della crosta inferiore europea post-varistica. Una ricostruzione geotettonica suggerisce che un pezzo di crosta inferiore appartenente alla crosta europea è stato esumato durante la migmatizzazione e la contemporanea formazione del plutone della Bregaglia, in seguito alla rottura della placca europea subducente. Durante la sua risalita, la dinamica verticale dell'intrusione ha aiutato l'esumazione del Complesso del Gruf quale duomo migmatitico direttamente associato al plutone. Quale corollario, il Complesso del Gruf deve essere inteso come indipendente dalle altre unità penniniche.

L'esumazione comune del Gruf e del plutone della Bregaglia spiega l'aumento delle temperature metamorfiche osservato nelle rocce dell'Unità di Chiavenna e della falda Tambo verso il Gruf. Il movimento differenziale del Gruf non è avvenuto lungo una linea tettonica ben definita ma, al contrario, è stato accomodato in un'ampia zona dentro l'orthogneiss a enclavi. Le enclavi basiche contenute in questa litologia sono da considerarsi relitti delle anfiboliti di Chiavenna inglobate nell'orthogneiss durante la fusione parziale sin-cinematica.