

Diss. ETH No. 8283

**STABLE ISOTOPE INVESTIGATIONS OF FLUID - ROCK  
INTERACTION DURING METAMORPHISM AND EXHUMATION  
OF ECLOGITE-FACIES ROCKS: CASE STUDIES FROM THE  
SWISS AND ITALIAN ALPS**

A dissertation submitted to the  
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of  
Doctor of Natural Sciences

presented by  
**Gretchen Lieuana Früh-Green**  
Dipl. Petrogr. Univ. Zürich

born June 5, 1956

citizen of Mogelsberg SG and  
California, USA

accepted on the recommendation of

Prof. A.B. Thompson,   examiner  
Dr. C.M. Graham,       co-examiner  
Prof. S.M. Schmid,     co-examiner

1987

## SUMMARY

Although stable isotope geochemistry has mainly been used in the past to estimate metamorphic temperatures, it is widely becoming a useful tool to determine the nature and extent of fluid-rock interaction during metamorphism. In this study, stable isotope geochemical methods have been applied to determine the scales and mechanisms of fluid interaction and motion during metamorphism and uplift of eclogite-facies rocks. In addition, the relationship between fluids and deformation, and the extent to which isotopic equilibrium is attained in high-grade metamorphic rocks is investigated. Two areas have been chosen where petrologic and chemical evidence point to fluid involvement during their evolution.

### Cima di Gagnone

Chapters 2 and 3 concern the production and extent of fluid migration during eclogite-facies metamorphism and subsequent amphibolite-facies overprinting of pelitic and mafic rocks at the Cima di Gagnone area of the Cima Lunga Nappe, the southwestern extension of the Adula Nappe. The central alpine Adula-Cima Lunga Nappe is a slice of pre-Mesozoic continental basement consisting predominantly of metagranitic and metapelitic gneiss and schist. Less abundant mafic and carbonate rocks, as well as ultramafics in the southern Cima Lunga Nappe, occur as lenses and layers in the polymetamorphic metasediments. Two phases of alpine metamorphism, accompanied by varying degrees of deformation, have affected these rocks. High pressure mineral assemblages (inferred to be Early Alpine by Van de Plas, 1959) are older than nappe emplacement and are overprinted by an Oligocene Barrovian-style regional metamorphism. High-pressure mineral assemblages are mainly preserved in mafic lenses and record a continuous increase in P-T conditions from 12-15 Kb / 500-600 °C in the north of the Adula nappe to more than 20Kb / 800 °C in the south (Heinrich, 1983). A distinct decrease in pressure characterizes the Tertiary Barrovian-style metamorphism which varies from greenschist facies in the north to upper amphibolite-facies (sillimanite grade) in the south.

The *Early Alpine eclogite-facies* metamorphism is characterized by *dehydration of amphibolite* (A1-->E), which produced nearly anhydrous kyanite-eclogite containing  $\text{Omp} + \text{Gar} + \text{Qtz} + \text{Kyn} + \text{Hbl} + \text{Zoi} \pm \text{Ilm} \pm \text{Rut}$  (Heinrich, 1986, see Table 1.1. for abbreviations). Simultaneous *hydration* reactions in neighbouring *pelitic* rocks may have acted as sinks for the hydrous fluid produced by the dehydrating amphibolites. The subsequent *Tertiary, amphibolite-facies* metamorphic event is marked by

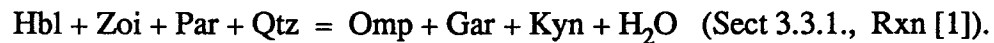
*re-hydration* of the kyanite-eclogites (E-->A2). Fluid infiltration-fronts are indicated by a systematic mineralogical transition from eclogite in the cores of competent lenses to symplectite (Plg ± Bio ± Hbl) to fine-grained amphibolite, forming rims along contacts to pelitic country rocks. Simultaneous deformation and grain coarsening resulted in the formation of amphibolite tails parallel to the schistosity in the neighbouring metapelites. Based on relict corona textures, Heinrich (1982, 1983) has suggested that the hydrous fluid was produced by dehydration reactions in the metapelites (now containing Qtz + Plg + Bio + Gar ± Mus ± Kyn ± Sta ± Ksp).

Detailed sampling for isotopic analyses has been made at outcrop CH271, which has been described by Heinrich (1979, 1982, 1983). Sample locations are shown in detail in Fig 2.3., isotopic compositions are given in Table 3.1. and are shown graphically in Figs. 3.1 and 3.3. The metapelites form two isotopically distinct groups. Those in the immediate vicinity of the mafic lens represent an isotopically "light" group, classified as P<sub>1</sub>-pelites, in which  $\delta^{18}\text{O}_{\text{WR}}$  varies between 6.0 ‰ and 7.0 ‰.  $\delta^{18}\text{O}_{\text{Qz}}$  in this group ranges from 8.6‰ to 9.4‰. In contrast, the metapelites which are located at least 30m away from the mafic rock (classified as P<sub>2</sub>-pelite) have  $\delta^{18}\text{O}_{\text{WR}}$  and  $\delta^{18}\text{O}_{\text{Qz}}$ -compositions which range from 8.4 ‰ to 10 ‰ and 10.4-11.8 ‰, respectively.

$\delta^{18}\text{O}_{\text{Qz}}$  from the eclogitic core of the mafic lense, Qtz segregation veins and symplectite lie within a narrow range from 7.8‰ to 8.2‰, with a relatively constant  $\delta^{18}\text{O}_{\text{WR}}$  of 5.5‰. The amphibolites form two distinct groups. The fine-grained amphibolites along the rims of the lens have compositions similar to the eclogitic core, whereas coarse-grained amphibolite layers which form the tails have consistent  $\delta^{18}\text{O}_{\text{WR}}$  and  $\delta^{18}\text{O}_{\text{Plg}}$  compositions of 6.5‰ and 7.9-8.4‰, respectively.

Although the isotopic compositions of the mafic rocks lie within the range of those known for basalts and some eclogites, the values for the P<sub>1</sub>-pelitic rocks are depleted in <sup>18</sup>O relative to known metasediments of similar metamorphic grade (see Fig 3.2.). The isotopic compositions of the P<sub>2</sub>-pelites are similar to those of isotopically constant pre-Mesozoic rocks from the Central Alps reported by Hoernes and Friedrichson (1980), who attribute the depletion in <sup>18</sup>O and large-scale homogenization to pervasive interaction with magmatic fluids during a pre-Alpine (Hercynian or older) metamorphic event. The possibility that these low-<sup>18</sup>O pelites were derived from igneous or meta-igneous rocks is discussed in Section 3.3.2. Assuming that prior to Alpine metamorphism, all the pelitic rocks in the Gagnone area had relatively similar chemical and isotopic compositions, the depletion in <sup>18</sup>O in the P<sub>1</sub>-metapelites, relative to the P<sub>2</sub>-pelites, suggest that further fluid-rock interaction occurred during alpine metamorphism and may be related to the dehydration of amphibolite during the A<sub>1</sub>-->E metamorphic event.

Based on a Rayleigh Distillation mechanism of fluid-rock interaction as presented by Rumble (1979, 1982), isotopic fractionation during dehydration of amphibolite (A1-->E) to form eclogite has been modelled for the simple reaction:



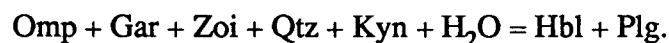
The results of the model have shown that fluid production during eclogite-facies dehydration would not be sufficient to cause the observed isotopic signatures in the surrounding P1-metapelites by a mechanism of exchange by fluid flow. Thus, the low  $\delta^{18}\text{O}$ -values may represent low  $^{18}\text{O}$ -source rocks, or may be the result of fluid-rock interaction and isotopic exchange with other fluids not locally derived from the dehydration of the amphibolites. The relative position of the  $^{18}\text{O}$  depleted P1-pelites to the mafic lens suggests that, if fluid flow is considered as the mechanism of isotope exchange, the contact between the relatively massive mafic rocks and the foliated metapelites may have acted as a preferential pathway for fluid flow. However, due to the polymetamorphic nature of these rocks, the timing of a possible infiltration event, involving an external fluid, remains uncertain.

In contrast to a model of isotopic exchange by fluid flow, the hydrous fluid produced during the A1->E dehydration event may have remained in the system (due to low permeabilities and/or a low  $P_{\text{H}_2\text{O}}$  - pressure gradient ?) as a static, grain-boundary film. In this case, the exchange mechanism may have been by oxygen diffusion between the two rock reservoirs, mafic rocks and pelites (i.e. rock-rock interaction), resulting in the  $\delta^{18}\text{O}$ -compositions observed in the P1-pelites.

Re-hydration of the eclogites and complete recrystallization of the metapelites during uplift and Tertiary regional metamorphism (E-->A2) is discussed in section 3.4. A quantitative model of dehydration and Rayleigh Distillation in the metapelites is presented for the simplified reaction



(Sect. 3.4.1. Rxn [2]; see also Heinrich 1982). The predicted isotopic composition of the hydrous fluid produced by the reaction above has been used to model simultaneous fluid infiltration and hydration of the mafic lense for the simplified reaction:



The results of these models have shown that the fine-grained amphibolites which comprise the rim of the mafic lens at outcrop CH271 may represent limited fluid-rock interaction (low fluid/rock ratios, <0.1:1); whereby only enough hydrous fluid was able to permeate the rock to cause complete amphibolitisation but no isotopic shift. The isotopic shift observed in the recrystallized tails of the mafic lens requires only local interaction with fluids produced by dehydration reactions in the immediately

surrounding metapelites. Amphibolite-facies deformation may have been instrumental in increasing permeability of these otherwise impermeable mafic rocks allowing higher F/R ratios and fluid flow. The increased amount of fluid during deformation may have enhanced the growth rates of the hornblende and plagioclase aggregates in the tails of the lens, resulting in the coarse-grained amphibolites and the strong foliation now observed (see also Section 2.3.1.1).

Comparison of the variations in mineral fractionations and isotopic temperature estimated for the metapelites indicates that local equilibrium within single layers was in general not achieved in these rocks. The temperature distributions suggest that garnet, ilmenite and rutile may have retained their eclogite-facies isotopic compositions. Lower isotopic temperatures are indicated for the amphibolite-facies metamorphism (350 - 500°C) than those estimated by cation-exchange geothermometry (460-670°C). Samples of comparable grain sizes and mineral modes exhibit variabilities which cannot be explained purely by diffusion and redistribution of oxygen upon cooling. The data may indicate the presence of differing, small amounts of an intergranular hydrous fluid, resulting in local (on a mm-scale) oxygen isotope redistribution between those minerals which are more easily reset to lower temperatures (e.g. plagioclase and mica). There is no correlation between the degree of isotopic equilibrium and the degree of recrystallization and/or deformation observed in these rocks.

### **Mte. Mucrone**

Chapters 4 and 5 deal with the role of fluids in processes of metamorphism and ductile deformation during the eclogite-facies evolution of metagranitoids from the Monte Mucrone in the Sesia Zone. Previous geological and petrological work has suggested that prior to deformation, restricted chemical communication resulted in local equilibrium domains and then gradually, in the later stages of deformation, large-scale equilibrium was approached. Fluids may have been important in the development of the orthogneiss as well as acting as a catalyst in the approach towards chemical equilibrium. Detailed mineralogical, textural and stable isotope studies have been made on ductile shear zones in the relatively undeformed rocks at the east face of the Mte. Mucrone in order to determine the role of fluids in deformation and recrystallization during the eclogite-facies metamorphism of these rocks.

The petrological, geochemical and microstructural data presented in this study indicate large variations in the degree of eclogite-facies recrystallization and deformation recorded in the Mte. Mucrone metagranitoids. At least two *main phases of eclogite-facies recrystallization* are evident in these rocks and can be directly related to

the *timing and degree of deformation*. An *initial pre-kinematic Jadeite Phase* resulted in the formation of fine-grained aggregates of jadeite + quartz + zoisite as pseudomorphs after the primary igneous plagioclase. Plagioclase breakdown reactions may have accompanied or have been subsequent to biotite breakdown reactions which produced garnet and phengitic white-mica. The progress of biotite breakdown may have been limited by the supply of alumina and calcium from plagioclase domains, as is indicated by chemically distinct corona textures of garnet and phengitic white-mica around biotite in the meta-quartz diorites. Incomplete reaction, resulting in the corona textures, may have been due to slow diffusion rates and/or a paucity of intergranular fluid during the initial stages of eclogite-facies metamorphism.

An *initial high strain deformation event* resulted in superplastically-deformed pyroxene layers, grain coarsening and partial chemical homogenization. Enlargement of equilibrium domains may have resulted in the completion of the biotite reaction and produced the assemblage jadeite + garnet + phengite + quartz, characteristic of the mylonitic rocks. Bulk rock geochemical and stable isotope data indicate that infiltration of an external hydrous fluid phase is associated with deformation and recrystallization in the jadeite-garnet mylonites. Local changes in the activities of sodium, potassium and H<sub>2</sub>O could have produced the assemblages observed in the deformed rocks.

The *duration and timing* of fluid infiltration relative to *high strain deformation* appears to have been crucial to the mineralogical evolution of the Mte. Mucrone granitoids, resulting in the chemical and microstructural differences recorded in these rocks. A model has been presented for the formation of the ductile shear zones at the Mte. Mucrone. It has been suggested that subsequent to the formation of fine-grained aggregates of Jad + Zoi + Qtz, as pseudomorphs after igneous plagioclase, an initial stage of fluid infiltration occurred along fractures or faults, catalysing diffusive mass transfer and grain growth rates and resulting in the formation of coarser-grained, 1-5 cm wide, reaction zones. Fluid-induced reaction and grain coarsening may have acted as a hardening mechanism and resulted in the concentration of subsequent high strain deformation, and the formation of the mylonites, along these zones.

The jadeite-garnet mylonites, characterized by nearly homogeneous phase compositions and coarser grain-sizes of jadeite, garnet and phengite (relative to the unfoliated meta-quartz diorites), may represent syn-deformational recrystallization and limited fluid infiltration. Preserved chemical zoning in garnet, heterogeneous mica compositions, and inclusion-rich pyroxene grains in some mylonite samples (i.e. in overprinted mylonites) indicate local anhydrous deformation; whereby localized post-kinematic infiltration along these deformation zones resulted in new growth of omphacitic pyroxene and a second generation of more grossular-rich garnet. Limited permeabilities in some of

these mylonite zones may have resulted in an excess of fluid pressure during post-kinematic infiltration and led to fracturing into the less deformed wallrocks and the formation of the zoisite-garnet veins.

Complete recrystallization and formation of omphacite-garnet orthogneiss may have resulted from progressive syn-kinematic infiltration and longer deformation periods. The presence of omphacite and paragonite, characteristic of the orthogneiss, may be due to original variations in bulk rock chemistries and/or may be related to a decrease in Na-, K- and H<sub>2</sub>O-activities during deformation and fluid infiltration.

The microfabrics of the deformed rocks, combined with stable isotope and bulk rock geochemical data suggests that fluid infiltration may not have been continuous but rather occurred in pulses and was channelized along zones of increased permeabilities due to high strain deformation. High-strain deformation continued during exhumation and may have been accompanied by further pulses of fluid activity.

Rudimentary, isotopic mass-balance modelling of the infiltration event suggests that the hydrous fluid was <sup>16</sup>O-rich and may have been *produced locally* by dehydration reactions in the neighbouring metapelitic and metabasic rocks. However, comparison with the isotopic study of Desmons and O'Neil (1978) indicates a lack of large-scale isotopic exchange between the granitic rocks and the neighbouring eclogitic mica schist complex. Minimum fluid to rock ratios, based on depletions in <sup>18</sup>O in the deformed rocks, have been estimated to range from approximately 1.0 to 0.75 for equilibration with fluids with isotopic compositions of 6.0 to 6.5‰ and at a temperature of 500 °C. Stable isotope profiles perpendicular to the ductile shear zones indicate a decrease in W/R-ratios to values of less than 0.1 at distances of approximately 30 cm from the centers of these zones.

The evidence for metasomatic alteration, associated with deformation and formation of the mylonites and Omp-Gar orthogneisses, suggests that isotopic exchange occurred through a surface-controlled mechanism of chemical transformation and was driven by disequilibrium relationships between metagranitoid and the infiltrating fluid. Discordant calculated isotopic temperatures, as well as apparent discrepancies between a predicted order of recorded temperature and that determined may reflect the presence of intergranular, static fluid, resulting in diffusive oxygen exchange between quartz, phengite and Na- pyroxene upon cooling.

The results of this study suggest that under eclogite-facies metamorphic conditions, diffusion and growth rates may be extremely slow in nearly anhydrous rocks, and may directly hinder complete reaction and recrystallization. Both deformation and an external fluid appear to be determining factors in the metamorphic evolution of the Mte. Mucrone granitic body. However, an access of limited amounts of hydrous fluid appears to have

been determinant to the attainment of chemical homogenization of garnet and pyroxene.

The rheological properties of the primary quartz diorite may have been such that the rock was highly resistant to deformation during the early stages of metamorphism and became more deformable after the formation of the fine-grained plagioclase pseudomorphs (reaction enhanced ductility). At the onset of eclogite-facies metamorphism, a paucity of grain boundary fluid, and as a result slow intercrystalline diffusion, caused local chemical and textural domains and an overall state of disequilibrium. High strain deformation may have enhanced intra- and intercrystalline diffusion rates and may have increased permeabilities such as to allow infiltration of an external hydrous fluid into the previously dry system.



## ZUSAMMENFASSUNG

Diese Studie untersucht mit Hilfe stabiler Isotopen den Umfang und die Mechanismen der Gesteins-Fluid Wechselwirkungen während eclogitfazieller und folgender retrograder Metamorphosen. Zusätzlich wurde die Wechselwirkung zwischen Fluiden und Deformation untersucht und der Umfang, in welchen Isotopengleichgewicht in hochgradigmetamorphen Gesteinen erreicht wurden. Dazu wurden zwei Gebiete ausgewählt, in denen petrologische und chemische Daten auf einen Einfluss von Fluiden während der metamorphen Entwicklung hindeuten.

In den Kapiteln 2 und 3 wird der Einfluss von Fluiden während der eclogitfaziellen und darauffolgenden amphibolitfaziellen Metamorphose in pelitischen und mafischen Gesteine der Cima-Lunga Decke diskutiert. Die Frühalpine eclogitfazielle Metamorphose ist durch Entwässerung von Amphibolit charakterisiert (A1->E), wodurch die nahezu H<sub>2</sub>O-freie Paragenese  $\text{Omp} + \text{Gar} + \text{Qtz} + \text{Dis} + \text{Hbl} + \text{Zoi} \pm \text{Ilm} \pm \text{Rut}$  produziert wird. Gleichzeitig ablaufende Hydratationsreaktionen in benachbarten pelitischen Gesteinen können die bei der Dehydratation der Amphibolite freigesetzten H<sub>2</sub>O-reichen Fluide aufgenommen haben. Die darauf folgende tertiäre amphibolitfazielle Metamorphose ist gekennzeichnet durch die Rehydratation der Disthen-Eclogite (E->A2). Die Front der Fluidbewegung ist markiert durch die randliche Umwandlung der Eclogitlinsen in Symplektit ( $\text{Dio} + \text{Plg} \pm \text{Hbl}$ ), gefolgt von feinkörnigem Amphibolit ( $\text{Plg} + \text{Hbl} \pm \text{Gra} \pm \text{Qtz}$ ), der seinerseits an den Enden der Linsen in grobkörnigen Amphibolit ( $\text{Plg} + \text{Hbl} \pm \text{Bio} \pm \text{Tit}$ ) übergeht. Aufgrund von reliktschen Corona-Strukturen kann gezeigt werden, dass die wässrigen Fluide durch Dehydrationsreaktionen der Pelite erzeugt sind.

Die Isotopenanalysen der Metapelite fallen in zwei Kategorien: Die in der unmittelbaren Umgebung der mafischen Linsen (P1-Pelite) sind  $\delta^{16}\text{O}$ -reich, wobei das  $\delta^{18}\text{O}_{\text{WR}}$  (Gesamtgestein) zwischen 6.0 und 7.6‰ variiert und das Quarz- $\delta^{18}\text{O}$  zwischen 8.6 und 9.4‰. Im Gegensatz dazu haben die Metapelite ca. 30m entfernt von den mafischen Linsen (P2-Pelite) Gesamtgesteins- $\delta^{18}\text{O}$ -werte zwischen 8.4 und 10.0‰;  $\delta^{18}\text{O}_{\text{Qz}}$  liegt zwischen 10.4 und 11.8‰. Die  $\delta^{18}\text{O}_{\text{Qz}}$ -werte der eclogitischen Kerne, sowie der Quarzadern und der Symplektite liegen zwischen 7.8 und 8.2‰, mit konstantem  $\delta^{18}\text{O}_{\text{WR}}$  von 5.5‰. Die Amphibolite zerfallen ebenfalls in zwei Gruppen: Die feinkörnigen Ränder der Linsen haben  $\delta^{18}\text{O}_{\text{WR}}$ -Werte ähnlich den eclogitischen Kernen, während die grobkörnigen Enden jeweils  $\delta^{18}\text{O}_{\text{WR}}$ -Werte von 6.5‰ zeigen.

Modellrechnungen zeigen, dass die Isotopenverhältnisse der P1-Pelite nicht durch lokalen Fluid-Austausch während A1->E erklärt werden können, sondern dass das System für externen Fluide austausch offen gewesen sein muss. Ein quantitatives Dehydratationsmodell und Rayleigh-Fraktionierung in den Metapeliten wird vorgestellt für

die vereinfachte Reaktion



Die vorausgesagte Isotopenzusammensetzung der durch diese Reaktion erzeugten Fluide wird verwendet für die Modellierung gleichzeitiger Fluidinfiltration und Hydratation der mafischen Linsen.

Die Ergebnisse dieser Modelle zeigen, dass die feinkörnigen Amphibolitränder der Eclogitlinsen eine begrenzte Wechselwirkung zwischen Fluid und Gestein darstellen (bei niedrigem Fluid/Gesteinsverhältnis =  $< 0.1$ ). Die beobachtete Veränderung im Isotopenverhältnis in den rekristallisierten Enden der mafischen Linsen erfordert lediglich eine lokale Wechselwirkung mit Fluiden, die durch Dehydratation in den unmittelbar angrenzenden Metapeliten erzeugt werden. Der Vergleich der Isotopenfraktionierung zwischen Mineralpaaren mit den Isotopentemperaturabschätzungen in Metapeliten zeigt, dass lokales Gleichgewicht in einzelnen Lagen im allgemeinen nicht erreicht wird. Die Temperaturverteilung deutet darauf hin, dass Granat, Ilmenit und Rutil ihre eclogitfaziellen Isotopenzusammensetzungen beibehalten können.

Für die amphibolitfazielle Metamorphose werden niedrigere Isotopentemperaturen angezeigt (350 - 500 °C) als die mit Kationaustauschgeothermometrie erhaltenen (460 - 670 °C). Diese Diskrepanzen deuten auf die Anwesenheit lokal verschiedener, geringer Mengen intergranularer Fluide hin, was eine lokale (im mm-Bereich) Sauerstoffisotopenunverteilung zwischen solchen Mineralen erzeugt, bei denen sich leicht eine Verschiebung zu niedrigeren Temperaturisotopenverhältnissen einstellt (z.B. Biotit und Plagioklas). Es existiert keine Korrelation zwischen dem Mass der Isotopen-equilibrierung und dem Mass der Rekristallisation und/oder Deformation in diesen Gesteinen.

Gegenstand der Kapitel 4 und 5 ist die Rolle der Fluide in Metagranitoiden des Monte Mucrone (Sesia Zone) während der Metamorphose und der duktilen Deformation bei der Entwicklung der Eklogitfazies. Frühere geologische und petrologische Untersuchungen ließen vermuten, daß vor der Deformation in begrenzten Gleichgewichtsdomänen beschränkter chemischer Ausgleich erfolgte. In einer späteren Phase der Deformation wurde dann graduell eine Annäherung zu einem umfassenden Gleichgewicht erreicht, wobei Fluide vermutlich als Katalysator wirkten.

Um die Wichtigkeit der Fluide bei der Deformation und der Rekristallisation während der eklogitfaziellen Metamorphose zu ermitteln, wurden an der Ostseite des Monte Mucrone an duktilen Scherzonen innerhalb relativ undeformierter Gesteine Proben entnommen, an welchen detaillierte mineralogische, textuelle und isotopengeologische (stabile Isotopen) Untersuchungen durchgeführt wurden.

Die in dieser Arbeit dargestellten petrologischen, geochemischen und mikrostrukturellen Daten des Metagranitoides des Monte Mucrone spiegeln eine große

Variationsbreite des Rekristallisationsgrades und der Deformation unter eklogitfaziellen Bedingungen wider. Dabei korrelieren mindestens 2 Phasen einer eklogitfaziellen Rekristallisation zeitlich und intensitätsmäßig mit der Deformation. Während einer initialen präkinematischen Jadeit-Phase bildete sich ein feinkörniges Aggregat bestehend aus Jadeit + Quarz + Zoisit pseudomorph nach primärem magmatischen Plagioklas. Diese Zersetzungsreaktion wurde begleitet/oder gefolgt von einem fortschreitenden Zerfall des Biotites zugunsten der Bildung von Granat und phengitischem Hellglimmer. Corona-Texturen, bestehend aus Granat und phengitischem Hellglimmer, welche den Biotit in den Metagranitoiden umgeben, deuten darauf hin, daß die Biotitzersetzungsreaktion möglicherweise auf die Zufuhr von Al und Ca aus Plagioklasdomänen beschränkt war. Die Corona-Texturen sind Hinweise für unvollständig abgelaufene Reaktionen, welche Folge einer zu langsamen Diffusionsrate und/oder einer zu geringen Menge von intergranularem Fluid zu Beginn dieser Metamorphose sein könnten.

Ein erstes Deformationsereignis mit großen Verformungsbeträgen ("high strain") hatte superplastisch verformte Pyroxenlagen, Kornvergrößerung und partielle chemische Homogenisierung zur Folge. Eine Vergrößerung der Gleichgewichtsdomänen ließ die Biotitreaktion unter Bildung der für die Mylonite charakteristischen Mineralparagenese Jadeit + Granat + Phengit + Quarz vollständig ablaufen.

Geochemische Gesamtgesteinsanalysen und Werte stabiler Isotope zeigen, daß in den Jadeit-Granat-Myloniten mit der Deformation und der Rekristallisation eine Zufuhr einer wässrigen fluiden Lösung verbunden ist. Lokale Änderungen der Aktivitäten von Na, K und H<sub>2</sub>O kann zu den beobachteten Paragenesen in den deformierten Gesteinen geführt haben.

Dauer und Zeitpunkt des Eindringens der Fluide in bezug zur "High-Strain" Deformation scheint für die mineralogische Entwicklung der Granitoide des Monte Mucrone von entscheidender Bedeutung zu sein und äußert sich in chemischen und mikrostrukturellen Unterschieden in diesen Gesteinen. Es wird ein Modell für die Bildung der duktilen Scherzonen des Monte Mucrone vorgestellt. Dabei wird angenommen, daß unmittelbar nach der Bildung des feinkörnigen Aggregates von Jad + Zoi + Qtz - als Pseudomorphose nach magmatischem Plagioklas - entlang von Rissen und Spalten erste Fluide zugeführt wurden. Diese Fluidzufuhr hatte eine katalysierende Wirkung auf den diffusiven Massentransport und die Kornwachstumsraten, welche die Bildung von gröberkörnigen, 1-5 cm breiten Reaktionssäumen zur Folge hatte. Fluid-induzierte Reaktionen und Kornvergrößerung wirkten wahrscheinlich als Verhärtungsmechanismus und bewirkten entlang dieser Zonen eine Konzentration subsequenter "High-Strain" Deformation und die Bildung von Myloniten.

Die Jadeit-Granat-Mylonite, charakterisiert durch fast homogene Phasenzusammensetzung und gröbere Korngröße von Jadeit, Granat und Phengit (bezogen auf die

ungeschieferten Metaquarzdiorite), deuten auf synkinematische Rekristallisation und beschränkte Fluidzufuhr hin. Erhaltene chemische Zonierungen in Granat, heterogene Glimmerzusammensetzung und einschlußreiche Pyroxenkristalle in manchen Mylonitproben (d.h. in überprägten Myloniten) zeigen lokal eine Deformation ohne Wasserzufuhr. Lokale postkinematische Infiltration entlang dieser Scherzonen führte hingegen zur Neubildung von omphacitischem Pyroxen und einer 2. Generation von grossularreicherem Granat. Begrenzte Permeabilität könnte nach der Bildung dieser Mylonitzonen einen Überschuß an Fluid-P während dieser postkinematischen Infiltrationsphase bewirkt haben und zu kleineren Brüchen in den weniger deformierten umgebenden Gesteinen und zur Bildung von Zoi-Ga-Adern geführt haben.

Vollkommene Rekristallisation und Bildung von Omphacit-Granat-Orthogneissen können das Ergebnis einer progressiven synkinematischen Infiltration und längerer Deformationsperioden sein. Die Anwesenheit von Omphacit und Paragonit - charakteristisch in diesen Orthogneissen - läßt sich durch ursprüngliche Schwankungen des Gesamtgesteinschemismus und/oder durch eine Abnahme der Na-, K- und H<sub>2</sub>O-Aktivitäten während der Deformation und der Fluidzufuhr erklären.

Die Mikrostrukturen der deformierten Gesteine, Werte stabiler Isotopen und geochemische Gesamtgesteinsanalysen lassen vermuten, daß die Fluidzufuhr nicht kontinuierlich war, sondern daß sie pulsierend erfolgte und entlang von Zonen mit wachsender Permeabilität infolge von "High-Strain" Deformation kanalisiert wurde. Die "High-Strain" Verformung dauerte während der Hebung des Gebirges an und wurde wahrscheinlich von weiteren Stößen fluider Aktivität begleitet.

Rudimentäre Isotopenmassenbilanzmodelle der Infiltration zeigen, daß das wässrige Fluid in <sup>16</sup>O angereichert war und lokal durch Entwässerungsreaktionen in dem Nebengestein (Metapelite und Metabasite) gebildet worden sein könnte. Vergleiche aber mit Isotopenuntersuchungen von DESMONS und O'NEIL (1975) zeigen einen fehlenden großräumigen Isotopenaustausch zwischen granitischen Gesteinen und dem benachbarten Eklogit-Glimmerschieferkomplex. Beruhend auf <sup>18</sup>O-Abreicherung in den deformierten Gesteinen wurde die Variation der minimalen "fluid to rock ratio" (W/R) auf 1.0-0.75 geschätzt für die Equilibrierung der Fluide mit einer Isotopenzusammensetzung von 6.0-6.5 ‰ und bei Temperaturen von 500°C. Daten stabiler Isotopen, gemessen an Proben, welche senkrecht zu der duktilen Scherzone entnommen wurden, zeigen eine Abnahme des W/R-Verhältnisses zu Werten <0.1 bei einer Distanz von ca. 30 cm von der Mitte der Scherzone.

Der Beweis für metasomatische Veränderung, Deformation und Bildung von Myloniten und Omphacit-Granat-Orthogneissen läßt vermuten, daß der Isotopenaustausch durch chemische Veränderung - bedingt durch oberflächenkontrollierende Mechanismen - erfolgte und durch Ungleichgewichte zwischen Metagranitoiden und dem

infiltrierenden Fluid gelenkt wurde. Sowohl diskordante berechnete Isotopentemperaturen als auch scheinbare Unterschiede zwischen einer vorhergesagten Größenordnung überlieferter Temperaturen könnten die Anwesenheit von intergranularem statischen Fluid widerspiegeln, welches eventuell diffusiven O-Austausch zwischen Quarz, Phengit und Na-Pyroxen nach der Abkühlung bewirkte.

Diese Untersuchung ergibt, daß unter eklogitfaziellen metamorphen Bedingungen die Diffusions- und Wachstumsraten in wasserfreien Gesteinen sehr langsam sind und möglicherweise direkt eine vollkommene Reaktion und Rekristallisation verhindern. Sei es Deformation wie auch externe Fluide scheinen entscheidende Faktoren in der metamorphen Entwicklung des Granitkörpers des Mte. Mucrone zu sein. Jedoch scheint eine beschränkte Menge von wässriger Lösung (Fluid) entscheidend für die chemische Homogenisierung von Granat und Pyroxen zu sein.

Die rheologischen Eigenschaften des primären Quarzdiorites waren vermutlich so, daß das Gestein während der frühen Phase der Metamorphose sehr großen Widerstand gegen Deformation leistete und nach der Bildung der feinkörnigen Plagioklas-Pseudomorphosen besser deformierbar wurde (die Reaktion förderte die Duktilität). Am Beginn der eklogitfaziellen Metamorphose verursachte geringes Angebot an Korngrenzfluid - und als dessen Ergebnis langsame interkristalline Diffusion - die Bildung von lokal begrenzten chemischen und texturellen Domänen und ein generelles Ungleichgewicht. "High-Strain" Deformation hat möglicherweise intra- und interkristalline Diffusionsraten erhöht und die Permeabilität gesteigert, so daß ein Eindringen von externen wässrigen Fluiden in das ursprünglich trockene System möglich wurde.