

DISS. ETH NR. 12702

**The Forno unit (Rhetic Alps):  
Evolution of an ocean floor sequence  
from rifting to Alpine orogeny**

A dissertation submitted to the

SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of  
Doctor of Natural Sciences

presented by

André Roman Puschnig  
Dipl. Erdw. Universität Basel

born April 7<sup>th</sup> 1968  
citizen of Austria

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. V. Trommsdorff  
Prof. Dr. S.M. Schmid  
Dr. P. Ulmer

ETH Zurich,  
Univ. Basel,  
ETH Zurich,

examiner  
co-examiner  
co-examiner

1998

## Abstract

The Forno unit in the Eastern Central Alps (Oberengadin / Switzerland; Valtellina / Northern Italy) is an ocean floor sequence of the Tethys ocean. It consists of a volcanic base and typical oceanic sediments of Middle Jurassic to Lower Cretaceous age. The Forno unit occupies a special tectonic position between Austroalpine and Middle Penninic units that represent remnants of the Adriatic margin and the European margin at the time of rifting, respectively. A detailed study of this unit reveals new information on the Alpine evolution of the Central Alps and the opening of the Tethys ocean.

In the studied area, structural observations in the Margna nappe, Forno-Malenco unit and Suretta nappe reveal that the Forno unit has the same structural evolution as the Lower Austroalpine units but a contrasting evolution to that of the Middle Penninic Suretta nappe. The Margna nappe and the Forno-Malenco unit were deformed in the Upper Cretaceous (W-directed nappe stacking), whereas the deformation in the Suretta nappe started in the Tertiary. The Turba Mylonite Zone, an extensional structure, separates these two stacks. The contact between the Suretta nappe and the Forno-Malenco unit represents the southern continuation of the Turba Mylonite Zone. This deformation phase is characterized in the Forno unit and the Margna nappe by localized shear zones with a top-to-SE movement, and in the Suretta nappe by a penetrative deformation with the same kinematics.

The eo-Alpine metamorphic evolution of the Forno-Malenco unit is identical with the metamorphic path recorded in the Margna nappe. This demonstrates that the South-Penninic units have the same tectono-metamorphic evolution as the Austroalpine units but differs from that of the Middle Penninic units. A comparison with published radiometric ages from the Austroalpine-Penninic border region verifies the different tectono-metamorphic evolutions of the Austroalpine/South-Penninic (Cretaceous) and Middle Penninic units (Tertiary).

Crosscutting relationships between the Bergell intrusives and the Forno-Malenco unit allow a relative timing of deformation phases at the eastern border of the Bergell pluton (pre-, syn-, post-intrusive) to be established. Field relations indicate that the Turba Mylonite Zone is overprinted by the second phase of backfolding. Both phases are intruded by the Bergell tonalite. The transverse folding, a regional deformation phase, occurred between the time of the intrusion of the tonalite (32 Ma) and the granodiorite (30 Ma). Local deformation, not affecting the entire Penninic-Austroalpine border region in Valmalenco, can be attributed to the emplacement of the intrusives.

Metabasaltic dikes and bodies which intrude the Malenco metaperidotite (Forno, Cassandra) provide constraints on the pre-Alpine history of the Forno unit and indicate a primary, pre-Alpine association of Forno and Malenco domains. Locally, pre-Alpine contacts occur between metabasaltic rocks and Late Hercynian intrusives of the Margna nappe.

The Forno, Cassandra and Margna amphibolites all display a typical tholeiitic differentiation trend and have a MORB character. Petrogenetic calculations show that this mafic suite follows a plagioclase-dominated, tholeiitic low-pressure fractionation (ol + plag + cpx) typical for ocean floor basalts. The rare earth element pattern of the Forno, Cassandra and Margna basalts is consistent with 10 to 15% of partial melting of a light rare earth element depleted mantle.

Oceanic and Alpine alteration zones occur at the contacts between basic and ultrabasic rocks. Oceanic altered basalts, so-called rodingites, consist of a paragenesis of grossular + vesuvianite + chlorite  $\pm$  diopside  $\pm$  calcite. The rodingites are significantly enriched in calcium and depleted in sodium and silicon with respect to the unaltered precursor. Immobile elements such as Ti, Zr, Y and V and the rare earth elements were not mobilized during oceanic metasomatism and preserve their MORB character. The isotopic composition of strontium in the rodingites is higher than that of the unaltered precursor. This change is interpreted as interaction with seawater. Alpine overprinted rodingites show a blackwall formation. The blackwalls consist predominantly of chlorite and are significantly enriched in magnesium and depleted in calcium with respect to the rodingite.

A continent-ocean transition at the Adriatic continental margin can be reconstructed by retrodeformation of the Alpine structures. Exhumed subcontinental mantle occurs between the Margna continental block and the basalts of the Forno unit. A position of the Forno basalts near the continental margin of the Adriatic domain can be assumed.

From these data the evolution of a continent-ocean transition can be reconstructed: (1) Jurassic rifting led to the formation of continental margins. (2) A shear zone developed during the continental break-up, exhuming Adriatic subcontinental mantle (Malenco peridotites). (3) MORB melts, produced during adiabatic decompression of asthenospheric mantle, intrude the exhumed mantle and formed the volcanic ocean floor (Forno basalts). (4) Sediments of Mid Jurassic to Lower Cretaceous age were deposited on the volcanic base and document the oceanic evolution of the Forno unit.

## **Zusammenfassung**

Die Forno-Einheit in den östlichen Zentralalpen (Oberengadin / Schweiz; Veltlin / Norditalien) ist eine ozeanische Sequenz der Tethys. Sie besteht aus einer vulkanischen Basis und typischen Sedimenten des Ozeanbodens (Mittlerer Jura bis Untere Kreide). Die Forno-Einheit ist in einer speziellen tektonischen Position zwischen ostalpinen und mittelpenninischen Einheiten, die Relikte des adriatischen respektive des europäischen Kontinentalrandes repräsentieren. Eine detaillierte Untersuchung dieser Einheit liefert daher wichtige Hinweise für die alpine Entwicklung der Zentralalpen und für die Öffnung des Tethys-Ozeans.

Beobachtungen der alpinen Strukturen am Ostrand der Bergell-Intrusion in der Margna-Decke, der Forno-Malenco-Einheit und der Suretta-Decke zeigen, dass die Forno-Malenco-Einheit die gleiche strukturelle Entwicklung aufweist wie die unterostalpinen Einheiten, sich aber von der strukturellen Entwicklung der mittelpenninischen Suretta-Decke unterscheidet. Die Margna-Decke und die Forno-Malenco-Einheit zeigen eine oberkretazische Entwicklung (west-gerichtete Deckenstapelung), währenddessen die Suretta-Decke nur eine tertiäre Entwicklung aufweist. Eine Extensionstruktur, die Turba-Mylonitzone, trennt diese beiden Stockwerke. Der Kontakt zwischen der Suretta-Decke und der Forno-Malenco-Einheit im Untersuchungsgebiet repräsentiert dabei die südliche Fortsetzung der Turba-Mylonitzone. In der Forno-Einheit und der Margna-Decke ist diese Deformationsphase durch lokale Scherzonen mit einer Bewegung des Hangenden nach

SE und in der Suretta-Decke durch eine penetrative Deformation mit gleicher Kinematik gekennzeichnet.

Die eo-alpine Metamorphosentwicklung der Forno-Malenco-Einheit ist identisch mit dem Metamorphose-Verlauf der Margna-Decke und zeigt, dass die südenninischen Einheiten die gleiche tektono-metamorphe Entwicklung wie die ostalpinen Einheiten haben, und sich klar von der der mittelpenninischen Einheiten abgrenzt. Ein Vergleich der publizierten Altersdaten aus dem ostalpin-penninischen Grenzbereich belegen die unterschiedlichen strukturellen und metamorphen Entwicklungen von ostalpinen/südpenninischen (Kreide) und mittelpenninischen Einheiten (Tertiär).

Feldbeziehungen zwischen den Intrusiva des Bergeller Plutons und der Forno-Malenco-Einheit erlauben eine zeitliche Abschätzung von Deformationsphasen am Bergell-Ostrand (prä-, syn-, post-intrusiv). Feldbeziehungen zeigen, dass die südliche Fortsetzung der Turba-Mylonitzone durch die Zweite Rückfaltung überprägt ist und beide Phasen vom Bergeller Tonalit (32 Ma) intrudiert werden. Die Querfaltung ist eine regionale Struktur des Bergell-Ostrandes und kann zeitlich zwischen der Intrusion von Tonalit und Granodiorit (30 Ma) eingegrenzt werden. Lokale Deformationen, die nicht den ganzen ostalpin-penninischen Grenzbereich erfassen, werden als Strukturen der Platznahme der Intrusiva interpretiert.

Hinweise auf die präalpine Geschichte der Forno-Einheit sind belegt durch metabasaltische Gänge sowie grössere basaltische Körper, die den Malenco-Metaperidotit durchschlagen (Forno, Cassandra). Dies dokumentiert eine primäre, präalpine Vergesellschaftung von Forno- und Malenco-Einheit. Lokal sind auch präalpine Kontakte zwischen metabasaltischen Lagen und spätherzynischen Intrusiva der Margna-Decke beobachtbar.

Forno-, Cassandra- und Margna-Amphibolite zeigen alle einen typischen tholeiitischen Differentiationstrend und haben einen MORB-Charakter. Petrogenetische Modellrechnungen zeigen, dass diese Gesteins-Suite einer typischen plagioklasdominierten, tholeiitischen Tiefdruck-Fraktionierung folgt (ol + plag + cpx), wie es typisch für Ozeanbodenbasalte ist. Die Schmelze für die Forno-, Cassandra- und Margna-Metabasalte entstand sehr wahrscheinlich aus einer 10- bis 15-%igen partiellen Aufschmelzung eines an den leichten Seltenen Erde Elementen verarmten Mantels.

An den Kontakten zwischen basischen und ultrabasischen Gesteinen treten ozeanisch und alpin gebildete Alterationszonen auf. Ozeanisch veränderte Basalte, sogenannte Rodingite, bestehen aus einer Vergesellschaftung von Grossular + Vesuvian + Chlorit  $\pm$  Diopsid  $\pm$  Kalzit. Die Rodingite sind bezüglich des nicht-alterierten Ursprungsgesteins beträchtlich an Kalzium angereichert und an Natrium und Silizium abgereichert worden. Immobile Elemente wie Ti, Zr, Y und V und die Seltenen Erde Elemente wurden durch diese ozeanische Metasomatose nicht mobilisiert und weisen immer noch ihre MORB-Charakteristik auf. Die isotopische Zusammensetzung von Strontium der Rodingite ist bezüglich der nicht-alterierten Ursprungsgesteine erhöht und wird als Interaktion mit Meerwasser interpretiert. Alpin überprägte Rodingite weisen einen Blackwall auf. Diese Paragenese besteht vor allem aus Chlorit. Die Blackwalls sind bezüglich der Rodingite beträchtlich an Magnesium angereichert und an Kalzium abgereichert.

Durch Ausglätten der alpinen Strukturen lässt sich ein Ozean-Kontinent-Übergang am adriatischen Kontinentalrand rekonstruieren. Zwischen dem Margna-Block und den ozeanischen Basalten der Forno-Einheit tritt freigelegter subkontinentaler Mantel auf. Eine

kontinent-nahe Lage der Forno-Basalte zum adriatischen Bereich kann dabei angenommen werden.

Aus den erarbeiteten Daten lässt sich die Entwicklung eines Kontinent-Ozean-Übergangs herleiten: (1) Jurassisches Rifting führt zur Bildung von passiven Kontinentalrändern. (2) Eine Scherzone, entstanden beim Auseinanderbrechen der Kontinente, exhumierte dabei subkontinentalen, adriatischen Mantel (Malenco-Peridotit). (3) MORB-Schmelzen, entstanden durch adiabatistische Dekompression des asthenosphärischen Mantels, durchschlugen den freigelegten Mantel und führen zur Bildung eines vulkanischen Ozeanbodens (Forno-Basalte). (4) Sedimente des Mittleren Juras bis zur Unteren Kreide überlagern die vulkanische Basis und dokumentieren die ozeanische Entwicklung der Forno-Einheit.

## RIASSUNTO

L'unità 'Forno' (Alpi Centrali, Engadina superiore / Svizzera; Valtellina / Italia settentrionale) è una sequenza di fondo oceanico appartenente alla Tetide. È costituita da una unità basale vulcanica e da tipici sedimenti oceanici di età da medio-Giurassica a Cretacica inferiore. L'unità Forno occupa una peculiare posizione strutturale tra l'Austroalpino e le unità appartenenti al Penninico medio che rappresentano rispettivamente relitti del margine Adriatico e di quello Europeo al momento del rifting. Lo studio dettagliato condotto su questa unità ha fornito nuove informazioni riguardanti l'evoluzione alpina delle Alpi Centrali e l'apertura dell'oceano della Tetide.

Nell'area di studio, osservazioni strutturali condotte nella falda 'Margna', nell'unità 'Forno-Malenco' e nella falda 'Suretta', hanno messo in luce come l'unità Forno abbia la stessa evoluzione strutturale delle unità Austroalpine inferiori ma differisca dal Penninico medio e dalla falda Suretta. Margna e Forno-Malenco vennero deformate nel Cretaceo superiore (messa in posto delle falde con vergenza ad Ovest), mentre la deformazione nella falda Suretta ebbe inizio solamente nel Terziario. Le miloniti di Turba, frutto di una fase estensionale, separano queste due distinte unità. Il contatto tra la falda Suretta e l'unità Forno-Malenco rappresenta la continuazione meridionale delle miloniti di Turba. La fase deformativa responsabile della loro formazione, produsse nell'unità Forno-Margna localizzate zone di taglio con una direzione di movimento 'top to SE' mentre nella falda Suretta produsse una deformazione più penetrativa, sempre con la stessa direzione di trasporto.

L'evoluzione metamorfica eoalpina dell'unità Forno-Malenco è la stessa di quella registrata dalla falda Margna. Ciò dimostra che le unità Sudpenniniche hanno la medesima evoluzione tettonometamorfica delle unità Austroalpine ma una storia diversa da quella sofferta dalle unità Penniniche centrali. L'analisi delle età radiometriche già pubblicate provenienti da rocce della transizione Austroalpino-Penninico confermerebbe le differenti evoluzioni tettonometamorfiche di questi due domini, e cioè dell'Austroalpino/Penninico meridionale (Cretaceo) e del Penninico centrale (Terziario) rispettivamente.

Rapporti geometrici tra le rocce intrusive del massiccio del Bregaglia e la unità Forno-Malenco hanno permesso di stabilire una cronologia relativa (evento pre-, sin- o post-intrusione) per le fasi deformative lungo il margine orientale del Bregaglia. Osservazioni

di campagna mostrano come la fascia milonitica di Turba sia ripiegata nella Seconda Fase di retropiegamento. Entrambe tali fasi sono tagliate in discordanza dalla tonalite del Bregaglia. La 'fase di piega trasversale', una fase di piega a scala regionale, si verificò tra l'intrusione della tonalite (32 Ma) e l'intrusione della granodiorite (30 Ma). Alcune fasi deformative a scala locale, che non interessarono l'intero sistema Austroalpino-Penninico in Valmalenco, possono essere attribuite alla messa in posto di queste rocce intrusive.

Filoni metabasaltici e corpi che intrudono la sequenza metaperidotitica di Malenco (Forno, Cassandra) forniscono dei vincoli alla storia pre-Alpina dell'unità Forno e indicano una originaria evoluzione comune in epoca pre-Alpina dei domini Forno e Malenco. Localmente, rocce intrusive tardo erciniche della falda Margna mostrano contatti di età prealpina con rocce metabasaltiche.

Le anfiboliti dell'unità Forno, e Margna presentano tutte caratteristiche tipiche di MORB e un trend di differenziazione tipicamente toleítico. Calcoli petrogenetici indicano che queste rocce mafiche seguirono una differenziazione toleítica di bassa pressione dominata da plagioclasio (ol + plag + cpx), caratteristica questa tipica di basalti di fondo oceanico. La distribuzione delle terre rare per i basalti di queste tre unità ben si sposa con la possibilità di una fusione al 10 - 15 % di un mantello impoverito in terre rare leggere.

Zone di alterazione oceanica ed alpina si trovano al contatto tra le rocce basiche e quelle ultrabasiche. Basalti oceanici alterati (definiti rodingiti) sono composti da grossularia + vesuvianite + clorite  $\pm$  diopside  $\pm$  calcite. Le rodingiti sono significativamente arricchite in calcio ed impoverite in sodio e silicio rispetto alla composizione primaria non alterata. Gli elementi meno mobili come Ti, Zr, Y e le terre rare non vennero mobilizzati durante le fasi metasomatiche oceaniche e perciò presentano ancora concentrazioni tipiche di MORB. La composizione isotopica dello Sr nelle rodingiti è più alta della composizione tipica del protolite. Questa variazione viene spiegata tramite interazione con acqua marina. Si è osservata la presenza di 'blackwalls' ai margini di rodingiti alpine. Essi consistono prevalentemente di clorite e, rispetto alla confinante rodingite, sono arricchiti in magnesio ed impoveriti in calcio.

Tramite la retrodeformazione delle strutture pre-alpine è stata possibile la ricostruzione di tale transizione continente-oceano al margine continentale Adriatico. Frammenti di mantello sottocontinentale affiorano tra il blocco continentale dell'unità Margna ed i basalti dell'unità Forno. È lecito supporre che i basalti dell'unità Forno ricoprissero una posizione prossima al margine continentale del dominio Adriatico.

Da questi dati si può proporre la seguente evoluzione: (1) Il rifting Giurassico condusse alla formazione di margini continentali. (2) Una mega zona di taglio si sviluppò durante la separazione continentale, permettendo l'esumazione del mantello sottocontinentale (peridotiti della Valmalenco). (3) Fusi a carattere MORB, prodotti durante la decompressione adiabatica del mantello astenosferico, intrusero il mantello oramai già esumato e formarono il fondo oceanico (basalti della serie Forno). (4) Sedimenti di età compresa tra Giurassico medio fino a Cretaceo inferiori si depositarono su questa base vulcanica e sono una testimonianza dell'evoluzione oceanica dell'unità Forno.