

Diss. ETH No. 12580

**ISOTOPIC DATING OF DEFORMATION  
USING MICROSAMPLING TECHNIQUES:  
THE EVOLUTION OF THE  
PERIADRIATIC FAULT SYSTEM (ALPS)**

A dissertation submitted to the  
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZÜRICH  
for the degree of  
Doctor of Natural Sciences

presented by  
Wolfgang Müller  
Mag. rer. nat., University of Vienna (Austria)  
born July 8, 1967  
citizen of Austria

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. Rudolf H. Steiger  
PD. Dr. Neil S. Mancktelow  
Dr. Simon P. Kelley

ETH Zürich  
ETH Zürich  
The Open University,  
Milton Keynes, U.K.

examiner  
co-examiner  
co-examiner

1998

## Abstract

Microsampling techniques have been developed and applied to date fault rocks collected from various segments in the Periadriatic fault system of the Alps. The need for microsampling techniques arises from the fact that deformation of rocks produces a mixture of both newly formed minerals and inherited porphyroclasts. To unequivocally date deformation, the position and relationship of the mineral to be dated within the rock fabric must be known and techniques must be employed that are capable of sampling on the sub-mm scale.

The newly developed Rb-Sr microsampling technique allows microgram-sized ( $> 5 \mu\text{g}$ ) mineral samples to be prepared from a rock thick section under microscopic control using a microdrill. Due to significantly improved chemical procedures and filament loading techniques,  $>100 \text{ pg}$  Sr samples can be precisely analyzed and dated. This method was applied to date synkinematic minerals, mostly white mica, that have grown at specific microstructural sites, such as between stretched porphyroclasts or within pressure shadows within mylonites. Secondary isotopic equilibria on the mm-scale induced by strong dynamic recrystallization of the previous mineral assemblage have also been utilized to date mylonitization. However, due to incomplete isotopic exchange over a few mm even in ultramylonites and the limited spread in  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  ratios of the various recrystallized layers, this approach was found to be less reliable when compared to the results obtained from newly formed synkinematic minerals. Single zircon U-Pb ages of dykes within the fault zones are used as an independent control on the mylonite ages. However, if strongly mylonitized, variable degrees of both deformationally-induced Pb loss and inheritance preclude the precise dating of these dykes.

The suitability of pseudotachylytes for dating deformation has been investigated mainly by  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  techniques. Pseudotachylytes must be considered as whole rock samples comprising melt formed due to frictional melting, incompletely resorbed inherited porphyroclasts and minerals grown during subsequent alteration of the fine-grained mineral assemblage. Stepwise-heating  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  analysis allows qualitative discrimination between these different mineral phases, which can be identified using the chemical information coming from reactor-produced Ar-isotopes of K, Ca, Cl and especially their respective Ca/K- and Cl/K-ratios. Chemical analyses using the microprobe and high-resolution SEM imaging are critical for establishing the chemical composition of the pseudotachylyte melt to be identified in the  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  spectra. The spatial resolution of the laser-ablation  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  technique enables an in situ distinction between melt and porphyroclasts, except for very clast-laden pseudotachylytes. The short-lived frictional melting process may not allow Ar to quantitatively escape from

the melt and as a result inhomogeneous distribution of inherited/excess  $^{40}\text{Ar}$  was found in some pseudotachylytes. Isochron plots are required for correcting any inherited  $^{40}\text{Ar}$  component. Chlorine contents in pseudotachylytes correlate positively with inherited  $^{40}\text{Ar}$  and were used as a proxy to identify anomalously old pseudotachylyte ages. Rb-Sr microsampling ages of cogenetic mylonites were found to be similar to  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ages of pseudotachylytes, thus providing independent age constraints. Rb-Sr microsampling analyses of pseudotachylytes do not yield reliable chronological information due to incomplete Sr isotopic equilibration, since feldspars often occur as relictic clasts in the pseudotachylyte melt.

The new mylonite and pseudotachylyte ages allow a reconstruction of deformational events along the Periadriatic fault system. Pseudotachylyte and mylonite ages from the Peio fault are in the range of 74 - 68 Ma and provide direct evidence for late Cretaceous sinistral and normal faulting. A dyke crosscutting the Peio mylonites was dated by single-zircon U-Pb to be 32 Ma old. Pseudotachylyte ages around 60 Ma (62 - 58 Ma) were analyzed for samples from the Rumo fault and the basal Silvretta nappe. These data indicate pronounced late Cretaceous - Paleocene extension as also found elsewhere in the Austroalpine basement. The timing of this event coincides with sedimentation of the Gosau Group sediments and an apparent slowdown of the Africa-Europe plate motion. Ages of mylonites and pseudotachylytes ranging between 37 and 35 Ma south of the Peio fault suggest renewed late Eocene thrusting immediately south of the Peio fault. Calcareous and basement mylonites related to E(SE)-directed thrusting along the Giudicarie fault were dated to be Oligocene in age (32 - 30 Ma), cogenetic with dextral shearing along the Tonale-Pustertal faults. Consequently, the Giudicarie fault must be interpreted as a cogenetic restraining bend within the dextral Tonale-Pustertal fault system. The amount of dextral displacement along the Tonale fault is therefore constrained to be <30 km by the limited jump in metamorphic grade at the Giudicarie fault. Early Miocene ages of pseudotachylytes from the dextral Tonale-, Pustertal and Jaufen faults range between 22 and 16 Ma and argue for a period of enhanced fault activity, which is contemporaneous with Miocene lateral extension of the Alps. The latter is independently dated by the exhumation of tectonostratigraphically deep Penninic units in the Lepontine dome and the Tauern window and by contemporaneous sedimentation within basins along the faults.

Taken together, the ages obtained demonstrate a long-lasting and periodically renewed activity along various faults of the Periadriatic fault system from the late Cretaceous to the early Miocene, especially for those faults now exposed in the southernmost Austroalpine units.

## Zusammenfassung

Spezielle „Microsampling“-Techniken wurden entwickelt und eingesetzt, um Gesteine aus den verschiedenen Störungszonen des Periadriatischen Störungssystems der Alpen direkt geochronologisch zu datieren. Die Notwendigkeit für Microsampling-Techniken ergibt sich aus der Tatsache, dass bei der Deformation von Gesteinen eine Mischung von neugebildeten Mineralen und alten Porphyroklasten entsteht. Um den Deformationsprozess eindeutig datieren zu können, müssen sowohl die Position als auch die textuellen Beziehungen des zu analysierenden neugebildeten Minerals im Gestein genau bekannt sein. Daher müssen Methoden angewandt werden, die es erlauben, im sub-mm Bereich Proben zu entnehmen und diese danach präzise zu analysieren.

Die neuentwickelte Rb-Sr Microsampling Methode erlaubt es, mit Hilfe eines an einem Mikroskop befestigten Bohrers, Mikrogramm-Mengen von Mineralen ( $> 5 \mu\text{g}$ ) aus Gesteinsdünnschliffen unter Mikroskopkontrolle zu präparieren. Aufgrund von signifikant verbesserten chemischen Aufschluss- und Trennverfahren sowie verbesserten Ladetechniken zur massenspektrometrischen Analyse, können  $>100 \text{ pg Sr}$  präzise analysiert und datiert werden. Diese Methode wurde vor allem angewandt, um synkinematisch gewachsene Minerale, meist Hellglimmer, aus speziellen mikrostrukturellen Positionen wie zwischen gestreckten Porphyroklasten oder aus Druckschatten zu analysieren. Sekundäre Isotopengleichgewichte im mm-Massstab, die aufgrund von starker dynamischer Rekristallisation des vorhergehenden Mineralbestandes entstanden sind, wurden ebenfalls zur Datierung herangezogen. Da solche Isotopenaustauschvorgänge sogar in Ultramyloniten über wenige Millimeter unvollständig ablaufen und aufgrund des zusätzlich geringen Unterschiedes im  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnis von benachbarten Mineraldomänen, sind die solchermassen erhaltenen Ergebnisse weniger zuverlässig als jene, die auf synkinematisch gewachsenen Mineralen beruhen. Einzelzirkon U-Pb Alter von Ganggesteinen innerhalb der Störungszonen wurden zur unabhängigen Kontrolle der Mylonit-Alter herangezogen. Im Fall von starker Mylonitisierung können unterschiedlich starker, sekundärer, deformationsbedingter Pb-Verlust in Kombination mit Vererbung alter Zirkonkomponenten eine detaillierte Altersaussage unmöglich machen.

Die Eignung von Pseudotachylyten zur Deformationsdatierung wurde hauptsächlich mit  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Methoden untersucht. Dabei müssen Pseudotachylyte als Gesamtgesteinsproben angesehen werden, die aus Reibungsschmelze, unterschiedlich stark resorbierten Klasten des Ausgangsgesteins und alterationsbedingten Mineralen bestehen.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -Analysen durch stufenweises Aufheizen (stepwise-heating) erlauben eine qualitative Trennung der unterschiedlichen Mineralphasen, die mit Hilfe der chemischen Information aus den reaktorproduzierten Ar-Isotopen von K, Ca und Cl und speziell den Ca/K- und Cl/K-Verhältnissen identifiziert werden können. Mikrosonden-Analysen und hochauflösende Rasterelektronenmikroskop-Bilder sind notwendig, um die Zusammensetzung der Reibungsschmelze mit der Information aus den  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -Spektren parallelisieren zu können. Die räumliche Auflösung der Laser-Ablation

$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Methodik ermöglicht es, zwischen Schmelze und Klasten in situ zu unterscheiden, vorausgesetzt, die Pseudotachylit-Probe ist nicht zu reich an Klasten. Bedingt durch den kurzzeitigen Vorgang der Reibungsschmelzbildung ist es möglich, dass Ar nicht quantitativ aus der Schmelze entweicht. Deshalb wurde in manchen Pseudotachylyten eine kleinräumig inhomogene Verteilung von Überschuss- $^{40}\text{Ar}$  bzw. vererbtem  $^{40}\text{Ar}$  beobachtet, weshalb mit Isochronen-Plots allfällig vorhandene vererbte  $^{40}\text{Ar}$  Komponenten korrigiert werden müssen. Eine positive Korrelation zwischen Cl-Konzentrationen und vererbten  $^{40}\text{Ar}$ -Komponenten wurde gefunden und diente als erster Hinweis für anomal hohe Pseudotachylit-Alter. Rb-Sr Microsampling Alter von kogenetischen Myloniten sind vergleichbar den  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ -Altern von Pseudotachylyten, was als unabhängige Bestätigung der Pseudotachylit-Daten gewertet wird. Rb-Sr Microsampling Alter von Pseudotachylyten ergeben aufgrund von unvollständigen Sr-Isotopengleichgewichten keine verlässliche chronologische Information, da Feldspäte meist als restitische Klasten in der Pseudotachylit-Schmelze auftreten.

Die neuen Mylonit und Pseudotachylit Alter ermöglichen eine Rekonstruktion von verschiedenen Deformationsereignissen entlang des Periadriatischen Störungssystems. Pseudotachylit- und Mylonit-Alter der Peio Störungszone von 74 – 68 Ma ergeben einen direkten Hinweis für spätkreide-zeitliche Abschiebungen. Ein die Peio Mylonite diskordant durchschlagender Gang ergab ein Einzelzirkonalter von 32 Ma. Pseudotachylyte der Rumo Störungszone und der basalen Silvrettadecke besitzen Alter um 60 Ma (62 – 58 Ma). Alle diese Altersdaten sprechen für eine ausgeprägte Extensionsphase in der Spätkreide und im Paleozän, wie sie auch aus anderen Teilen des Ostalpins bekannt ist. Zeitlich stimmt diese Deformation mit der Sedimentation der Gosauseimente und einer deutlichen Verlangsamung der Afrika-Europa Plattenkonvergenz zusammen. Unmittelbar südlich der Peio Störungszone befindliche Mylonite und Pseudotachylyte besitzen Alter von 37 bis 35 Ma und deuten auf erneute, spät-eozäne Überschiebungen im Süden der Peio Linie hin. Kalk- und Grundgebirgsmylonite mit E(SE)-gerichtetem Bewegungssinn der Giudicarie Störungszone ergeben oligozäne Alter (32 – 30 Ma), die kogenetisch mit den dextralen Bewegungen entlang den Tonale-Pustertal-Störungszonen sind. Daher muss die Giudicarie Störungszone als kogenetische, dextral transpressive Struktur (restraining bend) innerhalb des Tonale-Pustertal-Störungssystems interpretiert werden. Aufgrund des schwachen Unterschiedes im Metamorphosegrad beiderseits der Giudicarie Störungszone muss der dextrale Versatz entlang der Tonale Störungszone kleiner als 30 km sein. Entlang der Tonale-, Pustertal- und Jaufen-Störungszonen auftretende Pseudotachylyte besitzen frühmiozäne Alter von 22 – 16 Ma und sind somit zeitgleich zur miozänen lateralen Extension der Alpen, die durch die Exhumierung der penninischen metamorphen Dome wie des Lepontin oder des Tauernfensters und der Sedimentation in störungsgebundenen Becken zeitlich eingegrenzt werden kann.

Die an Störungsgesteinen direkt gemessenen Alter beweisen eine lang anhaltende Aktivität am Periadriatischen Störungssystem von der Spätkreide bis ins frühe Miozän, was insbesondere für jene Störungszonen zutrifft, die heute im südlichsten Ostalpin auftreten.