

# **Anatomy of an ancient subduction channel in the depth range of its seismogenic coupling zone - insights from field studies in the Swiss Alps and Southern Chile**

Raik Bachmann



1. Gutachter: Prof. Dr. O. Oncken  
GeoForschungsZentrum Potsdam, Freie Universität Berlin
2. Gutachter: Prof. Dr. C. M. Krawczyk  
GGA-Institut Hannover, Technische Universität Berlin
- Datum der Disputation: 09.01.2008

**Anatomy of an ancient subduction channel in the depth  
range of its seismogenic coupling zone - insights from field  
studies in the Swiss Alps and Southern Chile**

Raik Bachmann

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)  
in der Wissenschaftsdisziplin Geologie

vorgelegt im Fachgebiet  
Geowissenschaften der Freien Universität Berlin

Potsdam, November 2007

begutachtet durch:

Prof. Dr. O. Oncken  
Prof. Dr. C. M. Krawczyk

2007



## **Eidesstattliche Erklärung**

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Dissertation ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Literatur angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Potsdam, November 2007



*„Etwas lernen und mit der Zeit darin immer geübter werden,  
ist das nicht auch eine Freude? Wenn dann von fern her  
Gleichgesinnte kommen und zu Freunden werden,  
ist das nicht auch eine Freude?  
Von anderen aber nicht erkannt  
und doch nicht verbittert werden,  
ist man dann nicht erst recht ein Edler?“*

*Konfuzius*





---

## Contents

Summary

Zusammenfassung

1. Introduction	1
1.1. Overview	1
1.2. Objectives and motivation	2
1.3. Working areas	2
1.3.1. Alps	2
1.3.2. Chile	7
2. Methods	13
2.1. Overview	13
2.2. Analyses of structural data	13
2.3. PT estimates	13
2.4. Image analyses	15
2.5. Profile reconstruction using 2DMove	15
2.6. Provenance analyses	15
2.7. Sr isotope signature	17
2.8. Geochronology	17
2.8.1. Rb/Sr dating	17
2.8.1.1. The Rb/Sr isotope system	17
2.8.1.2. Sample preparation and analyzing procedure	19
2.8.2. Ar/Ar dating	19
2.8.2.1. The Ar isotope system	19
2.8.2.2. Sample preparation and analyzing procedure	21
3. Anatomy of recently active convergent plate interface zones - structures and processes within a subduction channel	23
3.1. General remarks	23
3.2. Concepts of plate interface processes	23
3.3. Material input and fluid release	25
3.4. Earthquake distribution	27

3.5. Geophysical signatures	29
4. Anatomy of a fossil subduction channel - a quantitative view on changing structures along the plate interface	35
4.1. Introduction	35
4.2. Concepts of plate interface processes	37
4.2.1. The subduction channel	37
4.2.2. Mechanical concepts for coseismic and interseismic deformation	39
4.3. Geological setting	40
4.3.1. Alpine evolution	40
4.3.2. Geology of the working area	41
4.3.3. Age constraints and metamorphism	41
4.4. Methods	42
4.5. Observations and results	44
4.5.1. Structural data	44
4.5.2. Geothermobarometry and temperature estimates	46
4.6. Restoration of the fossil plate interface	46
4.7. Spatial variation of characteristics along the fossil plate interface	48
4.7.1. General information	48
4.7.2. Deformation	51
4.7.3. Clasts	53
4.7.4. Pseudotachylytes	53
4.7.5. Mineralized veins	56
4.8. Discussion	58
4.8.1. Post-accretion changes	58
4.8.2. Long-term kinematics - tectonic erosion vs. accretion	59
4.8.3. Short-term kinematics - unstable slip vs. stable sliding	61
4.8.4. Fluid flow and constraints for long- and short-term deformation	63
4.9. Conclusion	65

---

5. Temporal constraints for unstable slip - $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology applied to pseudotachylytes	67
5.1. Introduction	67
5.2. Geological, metamorphical and structural framework of the working area	68
5.3 Pseudotachylytes - General information	70
5.4. Published age data	73
5.5. Methods	73
5.6. Sampling and petrography	75
5.7. Results	77
5.8. Discussion	81
5.9. Conclusion	83
6. Abandonment of the South Penninic-Austroalpine paleosubduction interface zone, Central Alps: constraints from Rb/Sr geochronology	85
6.1. Introduction	85
6.2. Geological framework	86
6.2.1. Alpine evolution	86
6.2.2. Geology of the working area	88
6.2.3. Structural aspects of the fossil plate interface zone	90
6.3. Published age data	91
6.4. Analytical procedure of Rb/Sr geochronology and Sr isotope signature	93
6.5. Petrography and sampling	94
6.6. Results	98
6.6.1. Rb/Sr data	98
6.6.2. Sr isotope signature	100
6.7. Discussion	101
6.7.1. Rb/Sr ages	101
6.7.2. Sr isotopes	105
6.7.3. Exhumation of the South Penninic-Austroalpine plate interface zone	106
6.7.4. Gosau group - additional evidence for abandonment of the Alpine subduction zone	108

6.7.5. Isotopic dating - a hint for mass transfer mode	109
6.8. Conclusion	113
7. Final discussion and conclusions	115
References	125
Appendix A – Microprobe bulk analyses of pseudotachylyte groundmass	135
Appendix B – $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ analytical data	141
Appendix C – Sample locations	149
Acknowledgement	155
CV	159

Chapters 4 and 6 are going to be submitted in the following international scientific journals:

**Chapter 4:**

**“Anatomy of a fossil subduction channel – a quantitative view on changing structures along the plate interface”**

R. Bachmann, O. Oncken, W. Seifert, V. Georgieva

to be submitted to *Journal of Structural Geology*

**Chapter 6:**

**“Abandonment of the South Penninic-Austroalpine paleosubduction interface zone, Central Alps: constraints from Rb/Sr geochronology”**

R. Bachmann, J. Glodny, W. Seifert, O. Oncken

to be submitted to *International Journal of Earth Science*

Chapter 5 is going to be prepared for submission to an adequate scientific paper in the following way:

**Chapter 5:**

**“Temporal constraints for unstable slip –  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  geochronology applied to pseudotachylytes”**

R. Bachmann, M. Sudo, V. Georgieva, O. Oncken



## Summary

Modern concepts on processes of seismically active parts of converging plate interfaces are derived from lab experiments, theoretical inferences, and geophysical observations, which have either poor resolution, or are strongly dependent on insufficiently constrained assumptions. Therefore, we studied a continuous exposure of an ancient subduction channel in the depth range of its former seismogenic zone in the Central Alps of Europe. This subduction channel developed due to Late Cretaceous - Early Tertiary subduction and accretion of the South Penninic lower plate underneath the Adriatic upper plate (Austroalpine domain). Additionally, we include information from Southern Chile, where material, which formerly underwent deformation within a subduction channel, was exhumed to the surface by large scale basal accretion. There, we concentrated on the formation of mineralized vein systems. However, we mainly focused on the exhumed plate interface zone in the European Alps. During subduction of the South Penninic ocean, material from both the continental upper plate and the oceanic lower plate was progressively involved into the subduction factory and transported downwards, forming either the shaly and serpentinitic matrix of the subduction mélangé, or competent clasts. Rb/Sr deformation ages for mylonitized rocks of the South Penninic mélangé and for deformed Austroalpine basement shed light on the pre-Alpine and Alpine deformation history along the suture, as well as on the mode of syn-subduction interplate mass transfer. According to our Rb/Sr deformation ages and our structural data, the latest increment of subduction-related deformation occurred at ~50 Ma, and is characterized by a roughly top-W direction of tectonic transport. Identical Rb/Sr ages for pervasively deformed Austroalpine and South Penninic rocks point to tectonic erosion of the upper plate

during subduction. This is also evidenced by the presence of upper plate clasts in the subduction mélangé, and from the syn-subduction evolution of Gosau forearc basins pointing to tectonic erosion as prevailing mass transfer mode during the time of subduction. Lack of a metamorphic contrast between the South Penninic mélangé and the Austroalpine upper plate favors exhumation of the suture zone due to a combination of tectonic underplating and surface erosion. The end of sedimentation in the forearc Gosau basins is contemporaneous with basal accretion of the South Penninic mélangé and the Middle Penninic units at ~50 Ma. Therefore, we hypothesize a causal link of both processes, with the change from tectonic erosion to basal accretion caused by underplating of subducted material, which is responsible for a regional uplift leading to inversion of the forearc basins. The end of subduction-related deformation is most likely caused by locking of the South Penninic paleosubduction interface due to underplating of the Middle Penninic micro-continent, so that the active subduction interface is relocated into the new Middle Penninic footwall.

Pseudotachylytes along a restricted segment of the upper plate base – delineated by ca. 200°C updip and ca. 300°C downdip - define the limits of the unstable slip region within the fossil seismogenic coupling zone. Our  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ages constrain the generation of pseudotachylytes during a time span between 60 Ma to 80 Ma. The heterogeneous texture of the ultra fine grained pseudotachylyte groundmass is composed of a mixture of amphibole, feldspar and biotite, as well as of incorporated rock fragments and single minerals of comparable size. Due to the temporal similarity between subduction and pseudotachylyte formation, and the fact that the pseudotachylytes occur subparallel to the main thrust where Austroalpine rocks were overthrust onto

South Penninic rocks, we interpret the generation of pseudotachylytes to be related to unstable slip processes occurring along the plate interface zone during subduction.

The zone of unstable slip coincides with a domain of intense formation of foliation-parallel mineralized veins with partly blocky minerals in the subduction *mélange*. We suggest that the mineralized veins reflect seismic failure in the *mélange* due to their similarity in spatial distribution and textures compared to pseudotachylytes. Mineralized veins, and brittle fractures continue into the conditionally stable region below, maybe indicating a domain of slow earthquakes and non-volcanic tremors as recently discovered for this depth range along many active convergent margins. The conditionally stable zone above the unstable slip area is devoid of mineralized veins, but displays ample evidence of fluid-assisted processes like the deeper zone: solution-precipitation creep and dehydration reactions in the *mélange* matrix, hydration and sealing of the base of the upper plate. Seismic rupture is possibly expressed by ubiquitous localized deformation zones.

Fluids are most likely provided by dehydration during subduction of sedimentary material from different sources. This is indicated by elevated Sr isotope signatures of marine (meta-) carbonates from the South Penninic *mélange*, which are caused by the interaction of syn-subduction fluids with old continental crust.

In summary, the exposed plate interface has experienced flow and fracturing over an extended period of time reflecting a multistage evolution, but resembles active convergent plate margins in terms of e.g. sediment input, earthquake distribution, fluid circulation, and possible slow slip events and associated tremors.



## Zusammenfassung

Moderne Konzepte über Prozesse in seismisch aktiven Bereichen konvergenter Plattenränder stammen vorwiegend aus Laborexperimenten, theoretischen Überlegungen und geophysikalischen Messungen. Diese haben entweder eine geringe räumliche und/ oder zeitliche Auflösung, oder sind in hohem Maße von nur ungenügend gefestigten Randbedingungen abhängig. Aus diesem Grund stellen wir Beobachtungen aus einem fossilen Subduktionskanal in den Schweizer Alpen vor, der im Tiefenbereich seiner ehemaligen seismogenen Koppelzone komplett zugänglich ist. Dieser Subduktionskanal entstand im Laufe von Subduktion und Akkretion der Südpenninischen ozeanischen Platte unter die Adriatische Oberplatte (Austroalpine Einheiten), welche in der späten Kreide bis zum frühen Tertiär stattfand. Zusätzlich verwenden wir Feldbefunde aus Südchile, wo Gesteine aus der ehemaligen Plattengrenzfläche durch großskalige basale Akkretion an die Erdoberfläche gebracht worden. Dort untersuchten wir vor allem die Ausbildung von mineralisierten Rissen. Allerdings fokussieren wir in der hier vorliegenden Arbeit weitestgehend auf die exhumierte Plattengrenzfläche in den Schweizer Alpen.

Während der Subduktion des Südpenninischen Ozeans wurde Material von der kontinentalen Oberplatte sowie von der ozeanischen Platte fortwährend entlang der Plattengrenzfläche in Richtung Erdmantel transportiert. Dabei bildete das Material einerseits die tonige oder serpentinierte Matrix der Subduktionsmélange, oder kompetentere Klasten. Rb/Sr Deformationsalter mylonitisierter Gesteine aus der Subduktionsmélange sowie der Austroalpinen Oberplatte geben Hinweise auf die prä-Alpine und Alpine Deformationsgeschichte entlang der

Suturzone, sowie auf den subduktionsbezogenen Massentransfer im Interplattenbereich. Unser Rb/Sr-Alter in Kombination mit gemessenen Strukturdaten deuten das Ende der subduktionsbezogenen Deformation im Arbeitsgebiet um ca. 50 Ma mit einem westgerichteten Transport der Hangendeinheiten an. Tektonische Erosion an der Basis der Oberplatte ist durch nahezu identische Deformationsalter für Südpenninische und Austroalpine Gesteine entlang der Suturzone belegt. Dies ist auch durch das Auftreten von Klasten bestehend aus Oberplattenmaterial in der Subduktionsmélange und der subduktionsbezogenen Entwicklung der Gosau forearc Becken bestätigt, für die tektonische Erosion als Hauptgrund ihrer Entstehung von verschiedenen Autoren postuliert wird.

Der fehlende Metamorphosekontrast zwischen der Südpenninischen Subduktionsmélange und der Austroalpinen Oberplatte im Arbeitsgebiet ist erklärbar durch eine Kombination aus Oberflächenerosion und tektonischer Unterplattung (basale Akkretion) als Mechanismen der Exhumierung. Das Abklingen der Sedimentation in den Gosau forearc Becken tritt zeitgleich zur basalen Akkretion der Subduktionsmélange und Mittelpenninischer Einheiten an die Basis der Austroalpinen Oberplatte um ca. 50 Ma auf. Daher postulieren wir einen kausalen Zusammenhang zwischen beiden Ereignissen, wobei der Wechsel von einem erosiven zu einem akkretiven Plattenrand für den regionalen Hebungspuls, der zur Inversion der forearc Becken führte, verantwortlich ist. Publierte paläogeographische Rekonstruktionen erklären das Ende der subduktionsbezogenen Deformation am ehesten mit dem Stilllegen der Südpenninischen Subduktionszone, bedingt durch die Unterplattung Mittelpenninischer Einheiten, wobei dadurch die Deformation von der

Südpenninischen Subduktionsmélange ins Liegende verlagert wird.

Das Vorkommen von Pseudotachyliten in einem eng begrenzten Bereich entlang der Basis der Oberplatte – zwischen ca. 200°C und 300°C – definiert die obere und untere Grenze der Region instabilen Gleitens in der seismogenen Koppelzone. Unsere  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  Alter grenzen die Bildung der Pseudotachylite im Arbeitsgebiet auf eine Zeit zwischen 80 Ma und 60 Ma ein. Die heterogene ultra-feinkörnige Grundmasse der Pseudotachylite setzt sich aus einer Mischung aus Amphibol, Feldspat und Biotit zusammen. Neben diesen rekristallisierten Phasen findet man auch Fragmente und Einzelminerale aus dem Nebengestein in vergleichbarer Korngröße. Auf Grund der Gleichzeitigkeit von Subduktion und Pseudotachylitbildung, sowie der Lage der Pseudotachylite subparallel zur Hauptüberschiebung, interpretieren wir, dass die Pseudotachylite auf Erdbeben in der seismogenen Koppelzone während der Subduktion des Südpenninischen Ozeans zurückzuführen sind.

Der Bereich instabilen Gleitens (d.h. der Entstehung von Erdbeben) fällt mit einem Bereich intensiver Bildung foliationsparalleler mineralisierter Risse mit zum Teil bockiger Textur in der Subduktionsmélange zusammen. Das Vorkommen dieser Risse im selben Tiefenbereich wie Pseudotachylite, aber ausschließlich auf die Subduktionsmélange bezogen, interpretieren wir als Anzeichen für Seismizität in der Subduktionsmélange. Mineralisierte Risse und spröde Brüche findet man ebenfalls entlang der Plattengrenzfläche im Bereich unterhalb der Region instabilen Gleitens. Dort sind sie möglicherweise Anzeiger für sogenannte „langsame“ Erdbeben und damit verbundener „tremors“, wie sie derzeit an verschiedenen aktiven Subduktionszonen in vergleichbaren Tiefenbereichen entdeckt werden. Die

Zone oberhalb des Bereiches instabilen Gleitens entlang der Plattengrenzfläche zeigt keine mineralisierten Risse, aber auch hier gibt es zahlreiche Hinweise auf Fluidzirkulationen: Lösungs-Fällungskriechen und Entwässerungsreaktionen in der Subduktionsmélange, Hydratation und damit einhergehende Abdichtung durch Mineralneuwachstum in der Oberplatte. Auch hier ist Seismizität möglicherweise durch das Auftreten von spröden Bruchflächen gegeben.

Fluide, die im Subduktionskanal zirkulieren, sind vor allem durch Entwässerungsreaktionen des subduzierten Materials freigesetzt worden. Darauf deuten erhöhte Sr-Isotopensignaturen mariner (Meta-) Karbonate aus der Südpenninischen Subduktionsmélange hin, die durch die Interaktion mit kontinentalem Krustenmaterial alteriert wurden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das fossile Platteninterface zwar Überprägungen durch spätere Prozesse erfahren hat und damit eine vielschichtige Geschichte besitzt, es aber immer noch vergleichbare Strukturen und Hinweise auf Prozesse aufzeigt, die auch an rezent aktiven konvergenten Plattenrändern vorkommen. Dies beinhaltet vor allem den Sedimenteintrag, die Verteilung von Erdbeben, die Fluidzirkulation und möglicherweise auch „langsame“ Erdbeben und damit verbundene „tremors“.