

# Structural geology and hydrogeology of brittle fault zones in the central and eastern Gotthard massif, Switzerland

**Doctoral Thesis**

**Author(s):**

Lützenkirchen, Volker Henning

**Publication date:**

2002

**Permanent link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-004522949>

**Rights / license:**

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

Diss. ETH NO. 14749

# **Structural Geology and Hydrogeology of Brittle Fault Zones in the Central and Eastern Gotthard Massif, Switzerland**

A dissertation submitted to the

SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH

for the degree of

Doctor of Natural Science

presented by

VOLKER HENNING LÜTZENKIRCHEN

Diplom-Geologe

Philipps-Universität Marburg, Germany

born 18<sup>th</sup> September 1971

citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Simon Löw, examiner

Prof. Dr. Aurèle Parriaux, co-examiner

Dr. Martin Huber, co-examiner

2002

## Summary

Fluid flow in crystalline rock is a complex subject essentially related to brittle deformation structures. Amongst these, brittle fault zones are considered most important, as they control most of the flow in crystalline environments. The aim of this thesis as part of a ETH-funded project on brittle fault zones in the crystalline Gotthard- and Aar massif (Swiss Central Alps) was to improve the understanding of the complex relation between fault zone structure their hydrogeological properties. In this context, the structure, and the deformation mechanisms were analysed, in order to identify the main structural features, which govern flow through fault zones. Furthermore, the large-scale hydraulic properties of fault zones and their significance for the regional groundwater flow were investigated. and local tunnel hydraulics.

Extensive field investigations carried out mainly in the central and eastern Gotthard massif revealed a regional fault zone pattern, which shows different mean orientations of fault zones with respect to the western and the eastern part of the study area, respectively In the western part, the steeply dipping fault zones strike predominantly SW-NE to WSW-ENE, whereas they strike predominantly W-E to WNW-ESE in the eastern part. This is to a great deal attributed to the close relationship of brittle fault zones to preexisting ductile shear zones in terms of structural development and regional varying differences of the orientation of the latter, as reported by several authors. On a retrograde metamorphic path during post-collision uplifting of the Alps, these older ductile shear zones probably represented zones of weakness focussing later brittle shear deformation. The transition between ductile and brittle conditions presumably took place while deformation continued. The brittle fault zones are characterised by strike slip faulting, being probably dextral. Mineralogical observations suggest, that the temperatures present must have been around 300°C or slightly higher during the onset of brittle deformation, and higher than 190-200°C during faulting. The main brittle deformation already had ceased, when temperatures fell below 190°C due to the regional uplifting. The deformation activity for the time span between the time marked by this temperature and today is considered very low.

Brittle fault zones in the study area can be described by typical structural components: an intensely fractured and deformed fault core, where most of the shear strain is localised, is enclosed by a damage zone, which is characterised by a network of subsid-

iary fractures. Fault rock like fault breccia, cataclasite and fault gouge are most abundant in the fault core. The close structural relation between ductile and brittle structures can also be shown on this outcrop scale, because the fault core is pre-dominantly situated in ductile shear zones.

A classification scheme is proposed based on the relationship between brittle and ductile structures and the thickness ratio of fault core and damage zone, differentiating ductile shear zones, brittle-ductile fault zones and brittle fault zones. This classification is used to identify critical structures in fault zones and potentially highly permeable fault types. Permeable features are predominantly found in fault zone classes characterised by the abundance of brittle shear fractures outside the domain of ductile shear zones.

By means of double packer tests carried out in a research borehole it is shown, that the intensely deformed fault rock in fault cores is consistently less permeable than the fractured rock of damage zones. This permeability structure coincides with clearly different pressure responses types observed during these tests, corroborating the findings outlined above, that fractures in damage zones are the most permeable structural features. Depending on the scale of observation, flow through the damage zone can be described by fracture flow, whereas flow through the intensely deformed fault core can be better approximated by an effective porous media.

Large-scale hydraulic properties of fault zones, estimated based on initial inflow rates to tunnels, and physico-hydrochemical parameters allowed for a comprehensive analysis of the processes governing regional flow to deep lying tunnels, exemplified by the Gotthard highway tunnel. The transmissivities of the three most permeable shear fractures in fault zones exceed  $T=1 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$ . Highly permeable structures have only been observed in competent granitoid rock, whereas in schistous paragneisses the transmissivities of respective permeable structures is lower by several orders of magnitude.

Permeable fault zones with relatively uniform orientation in the area of the Gotthard tunnel give rise to a pronounced hydraulic anisotropy. Hydrochemical, isotopic, and temperature data measured in the tunnel suggest regional flow systems, which are governed by the pronounced topography, the regional hydraulic anisotropy, and highly permeable fault zones. As observed in the central section of the Gotthard highway tunnel, a specific coincidence of these factors give rise to a regional geothermal anomaly. This thermal anomaly, indicated by warm and hydrochemically evolved waters, is

characterised by advective heat transport. The average residence time of these waters is thereby at least 50 years, but is thought to be considerable higher than 50 years for some of the thermal waters.

---

## Zusammenfassung

Diese Dissertation ist Teil des ETH-Projektes (Spätalpine Störzonen im östlichen Aar- und Gotthard Massiv), dessen Zielsetzung die Verbesserung des Verständnisses der Wechselwirkungen zwischen strukturellen, mechanischen und hydraulischen Eigenschaften spröder Störzonen ist. Die vorliegende Arbeit geht im Besonderen auf hydrogeologische Fragestellungen ein, welche anhand von Störzonen im Gotthard Massiv in den Schweizer Zentralalpen bearbeitet und diskutiert werden. Grundwasserfluss in kristallinen Gesteinen stellt ein komplexes Thema dar, in dessen Kontext vor allem spröde Strukturen von Bedeutung sind. Von diesen Strukturen bestimmen hauptsächlich potenziell permeable spröde Störzonen die Wasserwegsamkeit. Von besonderer Bedeutung für die Beschreibung der hydrogeologischen Eigenschaften ist die Strukturgeologie von Störzonen, welche die jüngere regionale Deformationsgeschichte widerspiegelt, sowie die Bestimmung kritischer Strukturen, die entscheidend für die Fliessprozesse in kleinen Skalenbereichen sind. Die hydrogeologischen Eigenschaften von Störzonen auf grösseren Skalenbereichen können für den regionalen Grundwasserfluss eine entscheidende Rolle spielen.

Umfangreiche Kartierungen und Untersuchungen in Tunnels und an Oberflächenaufschlüssen im zentralen und östlichen Gotthard Massiv und angrenzenden Gebieten zeigen regionale Unterschiede in der Orientierung von im allgemeinen steil einfallenden Störzonen: Im westlichen Gebiet um den Gotthard-Pass streichen sie vorwiegend zwischen SW-NO und WSW, wohingegen sie im östlichen Gebiet zwischen Unteralpreuss und Lukmanierpass W-O bis WNW-OSO streichen. Diese Unterschiede können zum grossen Teil auf die allgemein enge strukturelle und deformationsgeschichtliche Beziehung zwischen spröden Störzonen und duktilen Scherzonen zurückgeführt werden. Hierbei zeigt sich, dass sich die Orientierung der spröden Strukturen weitgehend nach der Orientierung der duktilen Strukturen richtet. Duktile Scherzonen stellen bei anhaltender Deformation auf einem retrograden Pfad Schwächezonen dar, was dazu führt, dass nachfolgende spröde Deformationsprozesse vorzugsweise dort stattfinden. Die Spröddeformation im Gotthard Massiv ist gekennzeichnet durch Transversalstörungen, welche im SW-NO bis WSW-ONO-streichenden System einen wahrscheinlich dextralen Versatz zeigen. Aufgrund mineralogischer Untersuchungen an Störzonengesteinen kann die Temperatur, die beim Übergang von duktiler zu spröder Deformation herrschte, auf ungefähr 300°C oder etwas höher eingegrenzt werden. Während der Spröddeformation

herrschten Temperaturen höher als 190-200°C. Der Hauptdeformationsphase war beendet, bevor die Formationstemperaturen unter 190°C gefallen sind. Die tektonischen Aktivitäten zwischen dem durch diese Temperatur markierten Zeitpunkt und heute wird als gering eingeschätzt.

Die angetroffenen Störzongesteine können durch typische strukturelle Hauptbereiche beschrieben werden. Der Störzonenkern, welcher am stärksten deformiert wurde, zeigt intensiv tektonisiertes, zerbrochenes und zerriebenes Gestein. Er ist umgeben von einer Bruchzone, welche durch ein Netzwerk von wenigen Hauptbrüchen und Verbindungsstrukturen gekennzeichnet ist. Die enge Beziehung zwischen duktilen und spröden Strukturen zeigt sich weiterhin in Aufschlüssen von Störzonen, da der Störungskern meist in einem von einer duktilen Scherzone vorgeprägtem Bereich liegt.

Ein vorgeschlagenes einfaches Klassifikationsschema für spröde Störzonen trägt diesen Zusammenhängen Rechnung. Es basiert im wesentlichen auf dem relativen Verhältnis von duktilen und spröden Bereichen innerhalb einer Störzone. Mit seiner Hilfe werden kritische Strukturen in Störzonen identifiziert und potenziell hochpermeable Störzonentypen unterschieden. Hochdurchlässige Einzelstrukturen zeigen sich vorwiegend in Störzonentypen und Störzonenbereichen, die durch das Fehlen duktiler Strukturen gekennzeichnet sind.

Diese Beobachtungen werden durch hydraulische Doppelpackertests in einer Forschungsbohrung bestätigt. Diese Versuche zeigen, dass stark deformierte Störungsgesteine in Störzonenkernen eine konsistent geringere Durchlässigkeit aufweisen als die angrenzenden Bereiche von Bruchzonen. Neben diesem Parameter zeigt sich der Unterschied in den hydraulischen Eigenschaften auch im Verlauf der Packertests, bei denen charakteristische Druckverläufe das unterschiedliche Fliessverhalten durch einzelne Brüche einerseits, und durch ein quasi-poröses Medium von intensiv deformierten Störungsgesteinen andererseits anzeigen.

Grossräumige hydraulische Eigenschaften von Störzonen können aufgrund von initialen Zuflüssen zu Tunnels in der Region abgeschätzt werden. Anhand des Beispiels des Gotthard-Strassentunnels konnten mit Hilfe der Wasserchemie und weiterer Daten zu Isotopen und Wassertemperaturen die wesentlichen Bedingungen, die diese regionalen Fliesssysteme zu tiefliegenden Tunnels beeinflussen, gezeigt werden. Die Transmissivitäten der höchstdpermeablen Scherzonen als Teilstruktur von Störzonen über-

steigen  $T=1 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$ . Hochpermeable Strukturen werden ausschliesslich in kompetenten (granitischen) Gesteinen angetroffen, wohingegen in schiefrigen Paragneisen die Transmissivitäten durchweg mehrere Größenordnungen niedriger liegen.

Permeable Störzonen mit relativ uniformer Orientierung im Bereich des Gotthard-Strassentunnels verursachen eine starke regionale hydraulische Anisotropie. Die Hydrochemie der dem Tunnel zufließenden Wässer, und ihre Temperatur- und Isotopendaten zeigen Fließsysteme an, die im wesentlichen von der stark reliefierten Topografie, der hydraulischen Anisotropie und von hochdurchlässigen Störzonen geprägt werden. Im mittleren Abschnitt des Gotthard Strassentunnels führt eine spezielle Konfiguration dieser Faktoren zu einer regional begrenzten geothermischen Anomalie, welche von warmen aufsteigenden Wässern mit vergleichsweise hohem Lösungsinhalt angezeigt wird. Diese Anomalie ist im wesentlichen Folge eines advektiven Wärmetransportes. Aufgrund der Isotopendaten wird das Alter dieser thermalen Wässer auf 50 Jahre und zum Teil wesentlich älter geschätzt.