

# Vortrieb Gotthard-Basistunnel, Teilabschnitt Sedrun: geologisch-geotechnisch-hydrogeologische Verhältnisse im Tavetscher Zwischenmassiv und in der Urseren- Garvera-Zone

P. Guntli

*Sieber Cassina + Handke AG, Rätusstrasse 8, CH-7000 Chur*

**ABSTRACT:** After the excavation of the access tunnel (1996), the vertical shafts (2000, 2003) and the two shaft-caverns (2000 – 2002) the two single-track tunnels were driven to the north and south within the rocks of the Southern Tavetscher Zwischenmassiv (TZM). In July 2004 the excavation to the north reached the northern border of the Southern TZM at Tkm 120.040. In September 2005 400 m of the Northern TZM were excavated within the scheduled time. In November 2004 the attack to the south reached the southern border of the TZM at Tkm 122.382. Between November 2004 and May 2005 the sedimentary Urseren Garvera Zone (UGZ), following the TZM to the south, was excavated.

The main lithologies within the Northern TZM are mica-gneisses and schists that were strongly reworked during Alpine ductile deformation and subsequent brittle shearing. Due to the length of the 1145 m wide zone, the overburden and the predicted geotechnical properties of the rocks, the Northern TZM and the Clavaniev Zone north of it represent one of the most critical sections of the Gotthard Base Tunnel. The rocks of the Northern TZM were expected to show plastic behaviour resulting in considerable radial convergences in cross-section. The first considerable amount of deformations in the cross-section occurred in an approximately 20 m thick zone of white-mica schists with a strong cataclastic overprint (3-7 m of fault gouge material). The measured radial convergence in cross-section reached 5 – 40 cm in average and 80 cm in maximum. In this area, the rocks were considerably weak and, as a result, the excavation face was frequently instable.

In the Southern TZM the geologic units encountered during construction include biotite-white mica gneisses, muscovite gneisses (Quermuskovitgneis), garnet amphibolites and, locally, ultrabasic lenses and pegmatites. In the UGZ, the complete sedimentary record known from surface, i.e. (from north to south) the Liassic Spitzmeilen (quartz-rich dolomite-calcite marbles and quartzites) and Prodkamm Series (dark grey to black graphitic, partly carbonate-bearing schists and dolomites), the Triassic Quarten (chlorite-sericite schists) and Röti Series (heamatite-bearing calcite-dolomite marbles) and the Permocarboniferous (sericite schists and phyllites) were traversed. The petrography of the Southern TZM allowed the excavation in mainly geotechnical favourable rocks. In the UGZ, typically rigid and competent rocks were found and the use of steel support was restricted the Mesozoic metamorphic sediments, i.e. the rocks of the Prodkamm and Röti Series. A plastic behaviour of the rocks as originally expected for the schisteous and phyllitic rocks of the Permocarboniferous and Prodkamm Series was not observed.

After approximately 11 km of completed excavation the stationary total yield of water in the TZM and in the UGZ is less than 7 l/s (state September 2005).

ZUSAMMENFASSUNG: Für den Bau des Gotthard-Basistunnels wird ab Sedrun, Graubünden, ein Zwischenangriff aufgefahren. Dieser umfasst einen Zugangstollen sowie zwei Schächte auf die Achse des Basistunnels, von wo je zwei Tunnelvortriebe gegen Norden bzw. gegen Süden erfolgen. Die Ausbruchsarbeiten der Untertagebauwerke innerhalb des Südlichen Tavetscher Zwischenmassivs sind abgeschlossen und der Tunnelvortrieb Nord hat das Nördliche Tavetscher Zwischenmassiv erreicht. Der Tunnelvortrieb Süd ist nach erfolgreicher Durchörterung der Urseren-Garvera-Zone ins Gotthard-Massiv vorgestossen. Die Geologie der Tunnelvortriebe wird detailliert aufgenommen. Dadurch werden die geologisch-geotechnischen Grundlagen für die geologische Baubegleitung der Ausbruchsarbeiten sowie verfeinerte Kenntnisse der geologisch-tektonischen Kenntnisse im Gebiet von Sedrun geschaffen. Diese Resultate werden in vorliegendem Artikel vorgestellt und mit der Prognose verglichen.

## 1 EINLEITUNG

### 1.1 *Allgemeine Einführung zum Bauwerk*

Der Bau des 57 km langen Gotthard-Basistunnels erfolgt neben den Vortrieben ab den Portalen Erstfeld und Bodio auch von den drei Zwischenangriffen Amsteg, Sedrun und Faido aus. Mit dem Bau des Zwischenangriffes Sedrun wurde im Sommer 1996 begonnen. Das Portal zu den Untertagebauwerken des Zwischenangriffes Sedrun befindet sich unmittelbar südlich des Vorderrheins (Rein Anterior) auf dem Gebiet von Sedrun (Gemeinde Tujetsch, Schweiz) auf einer Höhe von 1335.5 m.ü.M. Der Zugang zum Basistunnel erfolgt ab dem Portal Sedrun über einen ungefähr N-S verlaufenden Zugangstollen (1 km) und dann über einen 784 m tiefen Vertikalschacht. Die Arbeiten im Vertikalschacht begannen 1998, der Schachtfuss wurde Anfangs 2000 erreicht. Ein zweiter Schacht wurde von 2002 bis 2003 abgeteuft. Ab dem Schachtfuss werden seit 2002 sowohl in nördlicher als auch in südlicher Richtung je zwei Tunnelvortriebe aufgefahren sowie Kavernen für eine Multifunktionsstelle (Kreuzungs- und Nothaltestelle, Entlüftung) ausgebrochen. Der Zwischenangriff Sedrun dient später via den Schrägschacht ins Val Nalps (400 m) der Entlüftung des Basistunnels.

Im vorliegenden Bericht werden Resultate der geologischen Aufzeichnungen aus den Tunnelvortrieben ab dem Schachtfuss (Tkm 121.000) in Richtung Nord und Süd vorgestellt. In Richtung Nord waren Ende September 2005 1415 m (Stand bei Tkm 119.585), in Richtung Süd 1980 m (Stand Tkm 122.980) aufgefahren.

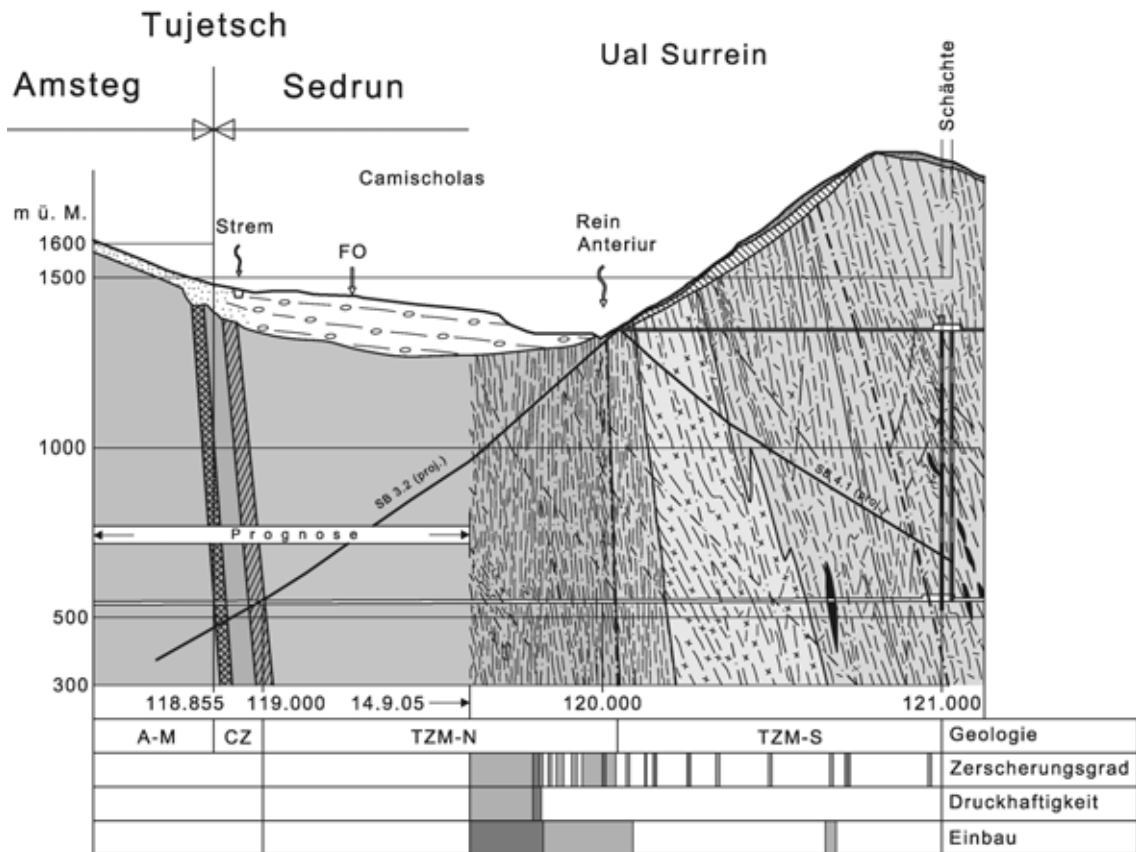
### 1.2 *Regionaltektonische Übersicht*

Der Gotthard Basistunnel durchquert von Süden nach Norden alpin überprägtes, voralpines Grundgebirge der penninischen Gneiszone, des Gotthard-Massivs (GM), des Tavetscher Zwischenmassivs (TZM) sowie des Aar-Massivs (A-M). Diese Kristallineinheiten werden getrennt durch mesozoische und z.T. jungpaläozoische Sedimentzüge der Piora-Zone, der Urseren-Garvera-Zone (UGZ) sowie durch die Clavaniev-Zone (CZ), welche strukturell als westliche Fortsetzung der mesozoischen Disentiser-Zone gilt.

Die Bauwerke des Zwischenangriffes Sedrun (Zugangstollen mit Entlüftungsschrägschacht Val Nalps, Schacht Sedrun) und die Kavernen für die Multifunktionsstelle (Kreuzungs- und Nothaltestelle, Entlüftung, Tkm 120.320 – 122.040) liegen im Tavetscher Zwischenmassiv (TZM). Das TZM kann sowohl

tektonisch als auch bautechnisch in zwei unterschiedliche Einheiten unterteilt werden (Fig. 1):

- In ein nördlich gelegenes, alpin stark bis extrem duktil und später sprödetektonisch beanspruchtes und dabei verschiefertes bzw. kakiritisiertes Nördliches Tavetscher Zwischenmassiv (TZM-N)
- In ein alpin vorwiegend duktil beanspruchtes, von Gneisen und Schiefergneisen dominiertes Südliches Tavetscher Zwischenmassiv (TZM-S).



#### Aar-Massiv

Gneise und Schiefer

#### Clavaniev-Zone

Kakirite und phyllitische Schiefer

#### Tavetscher Zwischenmassiv Nord

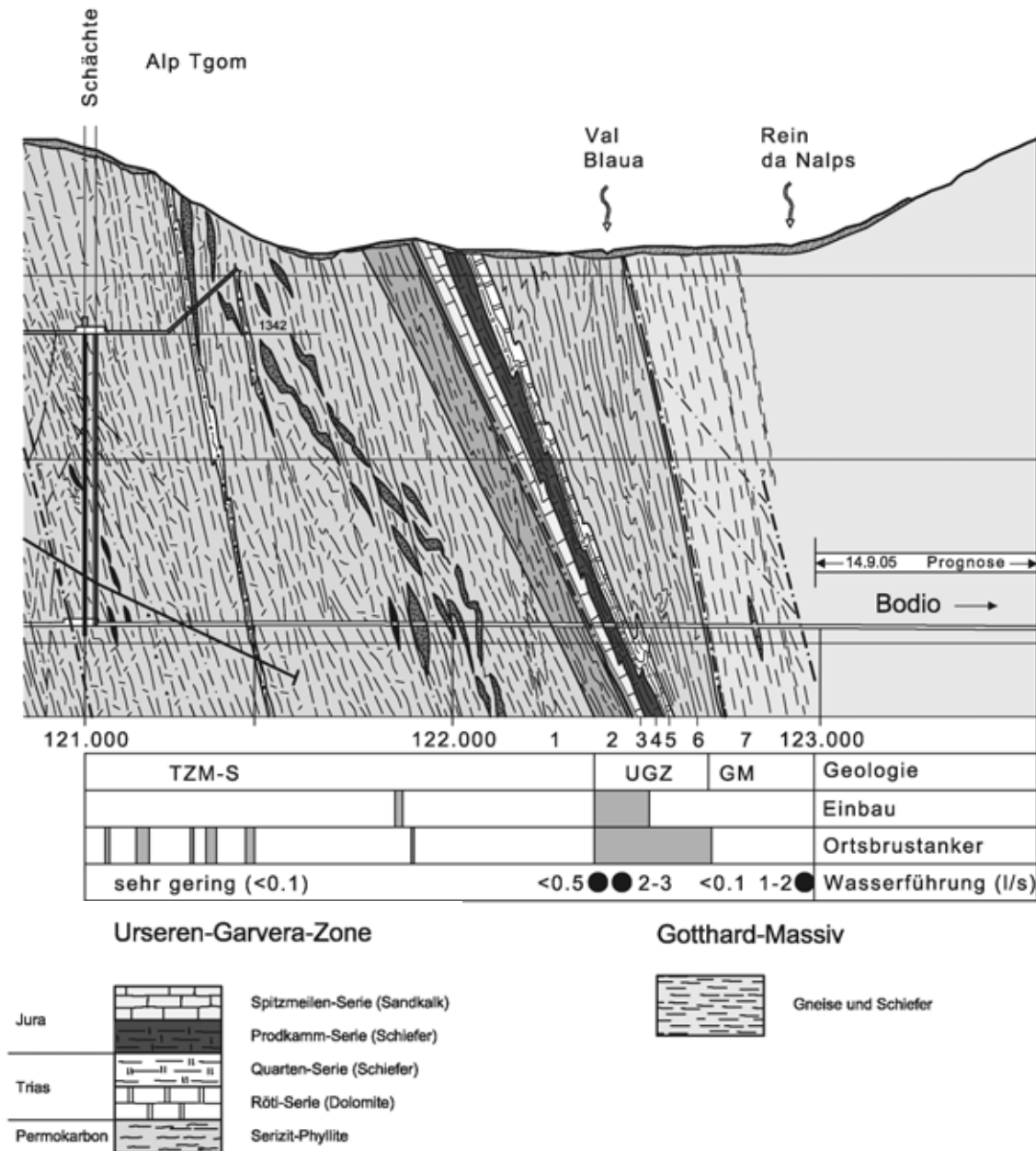
unterschiedlich tektonisierte Schiefer und schiefrige Gneise

#### Tavetscher Zwischenmassiv Süd

vorwiegend Quermuskovitgneise  
hornblendeführend, z.T. Fels  
Schiefer-Gneise  
Schiefer-Phyllite  
Pegmatite  
Ultrabasite (Talk-Serpentinitinseln)  
Quarzporphyre

Figur 1. Geologischer Befund Oströhre Tunnel Sedrun, Nordvortrieb: A-M = Aar-Massiv, CZ = Clavaniev-Zone, TZM-N = Nördliches Tavetscher Zwischenmassiv, TZM-S = Südliches Tavetscher Zwischenmassiv. Zerscherungsgrad: hellgrau = gering bis mässig sprödetektonisch beanspruchtes und dabei verschiefertes bzw. kakiritisiertes Nördliches Tavetscher Zwischenmassiv (TZM-N), dunkelgrau = stark sprödetektonisch beanspruchtes und dabei verschiefertes bzw. kakiritisiertes Nördliches Tavetscher Zwischenmassiv (TZM-N). Druckhaftigkeit: hellgrau = gering bis mässig druckhaft (< 20 cm radial), dunkelgrau = stark druckhaft (> 20 cm radial). Einbau: hellgrau = starrer Stahleinbau, dunkelgrau = einschiebbarer Stahleinbau.

Der Zwischenangriff und die Multifunktionsstelle Sedrun wurden in den südlichen Bereichen des TZM positioniert (Fig. 1, 2). Die Bauwerke liegen damit in einem bautechnisch relativ günstigen Bereich, von welchem zwei nahegelegene, in der Prognose als schwierig eingestufte Abschnitte des Gotthard Basistunnels in Angriff genommen werden können. Dies sind namentlich die nördlichen Teile des TZM und die CZ gegen Norden sowie die UGZ im Süden.



Figur 2. Geologischer Befund Oströhre Tunnel Sedrun, Südvortrieb: TZM-S=Südliches Tavetscher Zwischenmassiv, UGZ = Urseren-Garvera-Zone, GM = Gotthard-Massiv. Einbau: hellgrau = starrer Stahleinbau. Ortsbrustankerung: hellgrau = systematisch. Legende: 1 = Gneise, Pegmatit, Schiefer, 2 = Schiefer und Phyllite, 3 = Sandkalk, 4 = schwarze Schiefer, 5 = Dolomite, Schiefer, 6 = Schiefer und Phyllite, 7 = Gneis. Legende Geologie TZM-S siehe Figur 1

Die Tunnelvortriebe in Richtung Nord haben das TZM-N bei Tkm 120.040 erreicht. Bis September 2005 wurden 415 m ausgebrochen. Die Tunnelvortriebe in Richtung Süd sind bei Tkm 122.382 auf die permo-mesozoischen Sedimente der UGZ gestossen. Die

permo-mesozoischen Sedimente trennen das TZM vom GM und bilden die gotthardmassivische Sedimentbedeckung. Das UGZ erstreckt sich auf Tunnelniveau über 310 m und wurde bis September 2005 erfolgreich durchfahren. Der Vortrieb in Richtung Süd steht heute in den polymetamorphen Paragneisen des nördlichen GM.

### *1.3 Bisherige Untersuchungen Sedrun*

Die Kenntnisse zu den Gesteinen im Gebiet von Sedrun, deren Metamorphoseentwicklung sowie Mineralogie beruhen auf den Arbeiten u.a. von Niggli (1944), Jäger et al. (1967), Kramers (1973) sowie aus jüngerer Zeit Biino (1994). Mit den paläogeographischen Zusammenhängen sowie mit der tektonometamorphen Entwicklung befassten sich unter anderem Trümpy (1999) und Labhart (1999).

Im Rahmen der geologischen Untersuchungen zum Gotthard Basistunnel wurden Detailkartierungen entlang der Tunnelachse sowie mehrere Sondierbohrungen im Bereich des TZM-N bzw. TZM-S ausgeführt (Schneider 1999, Keller 1999). Eine detaillierte Auswertung der sprödetektonischen Entwicklung des TZM-N verfasste Wider & Mullis (1998).

## 2 GEOLOGISCHE VERHÄLTNISSE

### *2.1 Tavetscher Zwischenmassiv*

Im Tavetscher Zwischenmassiv lassen sich grob folgende Gesteinstypen unterscheiden:

- Paragneise
- Serizitschiefer und -phyllite
- Pegmatite
- Metaquarzporphyre
- Metaultrabasische Linsen
- Amphibolite
- Kakirite.

#### *2.1.1 Paragneise*

Der grösste Anteil des Südlichen Tavetscher Zwischenmassivs besteht aus fein- und mittelkörnigen, plattig bis grob gebankten Hellglimmer-, Biotit- und Chlorit-Plagioklasgneisen, welche aufgrund einer meist deutlichen Stoffbänderung eine ursprünglich sedimentäre Herkunft haben müssen. Sie sind im Allgemeinen durch die Einregelung von Biotit, Muskovit, Serizit oder Chlorit deutlich paralleltexturiert. Stark schiefrige Gneise wurden speziell als Schiefergneise ausgeschieden. Die am weitesten verbreiteten (Biotit)-Hellglimmergneise führen zudem häufig grobblättrige, quer zur Schieferung orientierte Muskovitplättchen, und wurden deshalb als Quermuskovitgneis ausgeschieden. Die Paralleltextur verläuft subparallel zur älteren stofflichen Bänderung. Neben den vorwiegend gebänderten Gneisen treten im speziellen bei den Quermuskovitgneisen Varietäten mit augig-flaserigen bis schlierig-lagigen Quarz-Feldspat-Mobilisationen auf. Die Quarz-Feldspat-Mobilisationen sind vermutlich durch eine hochmetamorphe Überprägung entstanden und höchstwahrscheinlich migmatischen Ursprungs. Im bisher aufgefahrenen TZM-N waren grünschieferfaziell überprägte, feinkörnige, plattige Chlorit-Hellglimmergneise bis -schiefer die Hauptgesteinstypen. Die sprödetektonische Beanspruchung erfasste die Gneise bis Schiefer mit unterschiedlichem Grad (siehe auch Kapitel Störzonen).

### 2.1.2 *Serizitschiefer und -phyllite*

Dunkle Serizitschiefer und -phyllite schalten sich meter- bis zehnermetermächtig zwischen den Paragneisen ein. Sie führen hauptsächlich feinschuppigen Serizit, Biotit, Chlorit, einen grossen Anteil an Quarz und Feldspat sowie zonal schieferungsparallele Pyrit-, Chalkopyrit oder Arsenopyrit-Vererzungen. Teilweise sind Relikte von Texturen wie Bänderung, Feldspat-Augen und -flasern oder Quermuskovitplättchen, welche für die Gneise typisch sind, als Klasten noch erhalten. Die Schieferereinschaltungen können deshalb als duktile Scherzonen innerhalb des TZM gedeutet werden. Im Bereich dieser Scherzonen wurden die Gneise zu Serizitschiefern oder untergeordnet Serizitphylliten (Phylloniten) überprägt. Über 100 m mächtige, graue Serizitschiefer und -phyllite bilden den Südrand des TZM. Im Gegensatz zu den duktilen Scherzonen innerhalb des TZM wurden in der ganzen Zone keine Relikte von Altkristallin gefunden. Die Serizitschiefer und -phyllite sind deshalb als eigenständige, lithologische Zone ausgeschieden. Die südlichsten 18 m am unmittelbaren Kontakt zur UGZ sind extrem mylonitisiert (Phyllonite).

### 2.1.3 *Pegmatite*

Pegmatite treten in den Paragneisen auf. Sie sind eindeutig diskordant zur stofflichen Bänderung und vermutlich auch zur voralpinen Schieferung der Gneise. In den Schiefer- und Phyllitzonen sind die Pegmatite von den alpinen Deformationen zerrissen und teilweise stark zerbrochen. Das Intrusionsalter der Pegmatite wird mit ca.  $295 \pm 14$  my als herzynisch angenommen (Jäger et al. 1967).

### 2.1.4 *Metaquarzporphyre (Quarzreiche Gneise, Serizit-Quarzschiefer)*

Metaquarzporphyre – im Feld petrographisch als Serizit-Quarzschiefer angesprochen – wurden an mehreren Stellen durchfahren. Der Feldbefund zeigt bei mächtigeren Vorkommen (3 – 8 m) einen diskordanten Kontakt zwischen dem Serizit-Quarzschiefer und den voralpinen Strukturen (Bänderung, Schieferung) in den angrenzenden Gneisen. Im Dünnschliff sind Relikte eines magmatischen Mineralbestandes und Gefüges in Form von 1 – 2 mm grossen Quarz-Phänokristallen und 0.1 – 0.3 mm langen Feldspatleisten in einer sehr feinkörnigen granoblastischen Grundmasse erhalten. Das Gestein wird deshalb als Ganggestein interpretiert. Kleinere Serizit-Quarzschieferlagen sind intensiv mit den Gneisen verfalt und alpin vollkommen überprägt.

### 2.1.5 *Amphibolite*

In den Nordvortrieben wurde ein mehrerer 100 m mächtiger, granatführender Amphibolit in Wechsellagerung mit feinkörnigen Chlorit-Serizitgneisen durchörtert. Der voralpine Mineralbestand mit Granat und Amphibol ist alpin retrograd chloritisiert.

### 2.1.6 *Ultrabasite*

Die ultrabasischen Gesteine treten als mehr oder weniger isolierte Linsen oder als perlschnurartig aufgereihte, boudinierte Einschaltungen auf. Die Linsen haben in Regel Mächtigkeiten von 1 – 3 m, maximal bis 15 m. Der Kern der grösseren Linsen besteht vielfach aus Serpentin, der 0.2 bis 0.5 m dicke Rand aus hellen (Magnesit)-Talk-, Tremolit/Aktinolith-Talkschiefern oder Aktinolithfels. Am Kontakt zwischen Serpentinikern bzw. Talkschieferstrand zum Gneis hat sich typischerweise ein dunkler Biotitschiefersaum (ca. 0.1 – 0.2 m) gebildet. Kleinere Linsen sind vollständig vertalkt.

## 2.2 *Urseren-Garvera-Zone*

Die metamorph überprägte Sedimentabfolge der Urseren-Garvera-Zone (Tab. 1) beginnt in Vortriebsrichtung von Nord nach Süd im Lias (Jura) mit gebankten, hellen, quarzführenden Dolomit-Kalzitmarmoren und Quarziten mit zwischengeschalteten,

dunkelgrauen bis schwarzen Kalkschieferlagen (Spitzmeilenserie). Der Übergang zum schiefrigen Lias (Prodkammserie) mit dunklen, graphitischen, pyritführenden Kalkschiefern ist mit einer kontinuierlichen Abnahme im Anteil von sandig-kalkigen Lagen verbunden.

Die jüngsten triassischen Sedimente bestehen aus feinkörnigen, grünlich bis violetten Chlorit-Serizitschiefern und -phylliten (Quartenserie). Aufgrund der feinen Farbwechsel ist eine feine, cm-dünne Bänderung in diesen Schiefern sehr gut erkennbar. Die darunter liegenden, ebenfalls triassischen Dolomitmarmore (Rötiserie) heben sich aufgrund der markanten rötlichen Farbe aus dem Mesozoikum hervor. Zwischen die Marmore der Rötiserie sind lokal dünnmächtige, grau-grüne und rote Phyllitlagen eingeschaltet. Stellenweise ist das Gefüge des Marmors brekziiert und durch Kalzit wieder verheilt. In einzelnen Bänken wurde ein leicht kavernoöses Gefüge und teilweise mehrere dm-grosse, rötliche Lehmfüllungen beobachtet. Es wurden jedoch keine Rauhdecken oder Karstsysteme angefahren sowie kein Gips oder Anhydrit nachgewiesen. Die Basis der Trias bildet eine dm-m mächtige, helle Metaarkose, welche an Schichten des Melsersandsteins erinnert. Beide Tunnelröhren durchfuhren die Rötiserie zuerst in normaler Schichtfolge und dann vermutlich in einem Faltenkern einer Grossfalte.

Das Permokarbon besteht mehrheitlich aus grauen, seltener bläulichen Chlorit-Serizitschiefern bis -phylliten. Im südlichen Teil nehmen helle Quarz-Feldspat- und Kalzitanteile in Form von cm-grossen, unregelmässigen Lagen, Schlieren oder auch Knoten zu. Die feinkörnigen Schieferungsflächen mit Serizit ist zwar immer sehr ausgeprägt, jedoch stark gewellt. Das Gestein ist oft intensiv verfaltet, es hat dadurch streckenweise einen gneisigen Charakter.

Tabelle 1. Übersicht Sedimentfolge der Urseren-Garvera-Zone von N nach S auf Tunnelniveau (Oströhre).

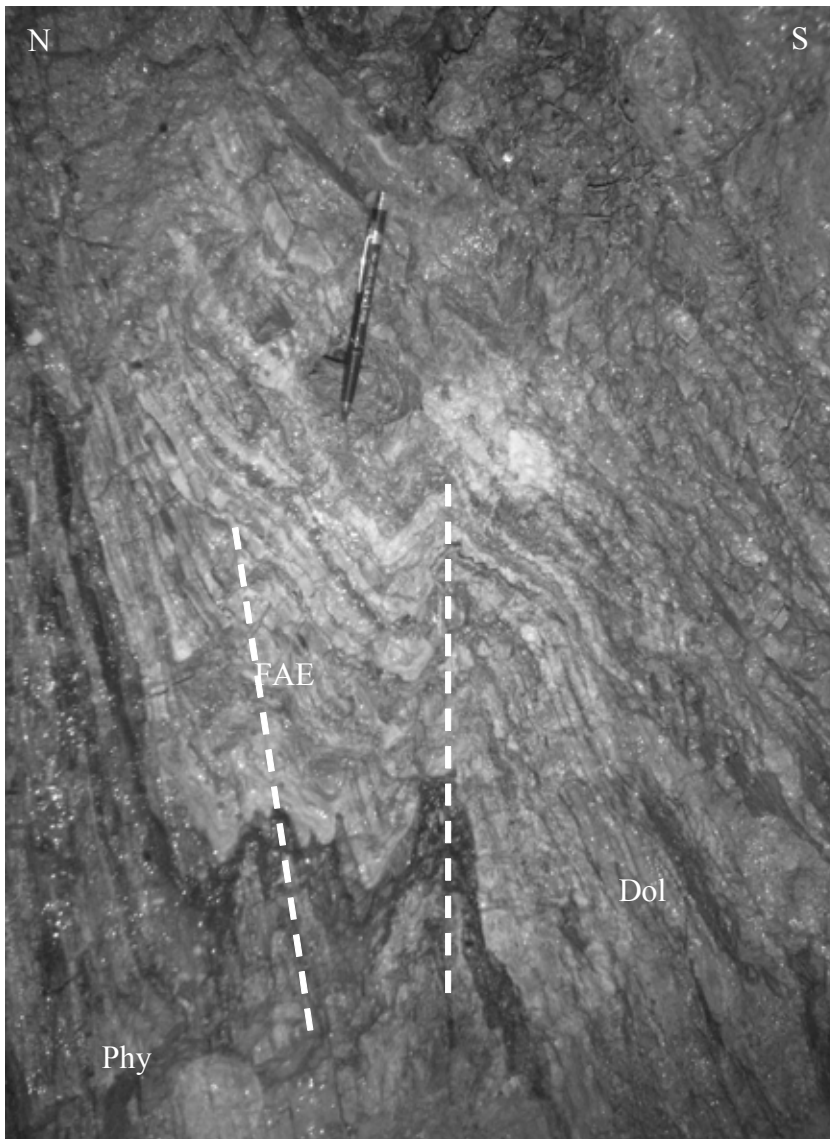
		Lithologie	Mächtigkeit
Jura (Lias)	Spitzmeilenserie	quarzreiche Dolomit-Kalzitmarmore (Sandkalke) mit dunklen Kalkschieferzwischenlagen	23 m
	Prodkammserie	graphitische, karbonathaltige Schiefer (Kalkschiefer) mit Sandkalkbänken	45 m
Trias	Quartenserie	Chlorit-Serizitschiefer bis -phyllite	22 m
	Rötiserie	Kalzit-Dolomitmarmore mit Phyllitlagen, stellenweise kavernoös, hämatitführend	6 m
Permokarbon		Metaarkose	27 m
Trias	Rötiserie	Chlorit-Serizitschiefer bis -phyllit	13 m (Faltenkern)
		Metaarkose	
		Kalzit-Dolomitmarmore mit Phyllitlagen, stellenweise kavernoös, hämatitführend	
		Metaarkose	
Permokarbon		Chlorit-Serizitschiefer bis -phyllit	174 m

### 3 STRUKTURGEOLOGIE

#### 3.1 Gefüge und Dichttrennung

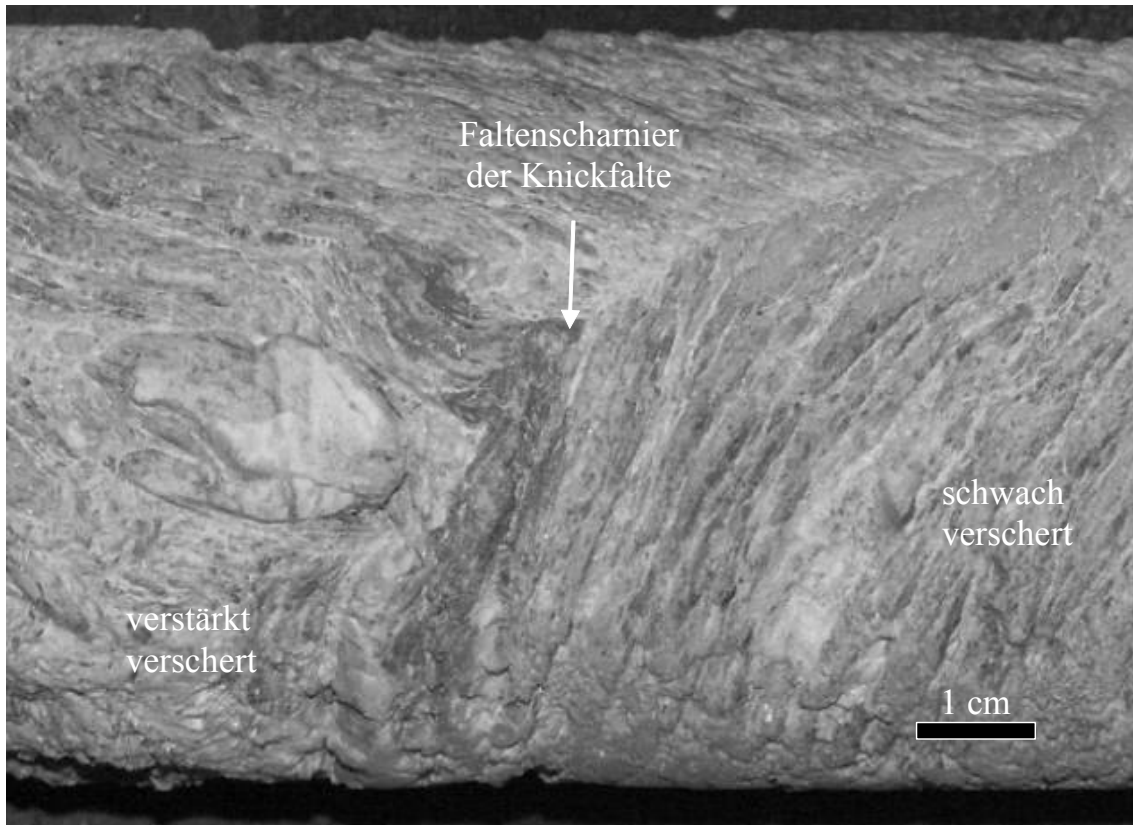
Die alpine Überprägung hat sowohl das TZM als auch die UGZ stark erfasst. Wie bereits aus den Oberflächenbefunden bekannt, kann allerdings auch auf Tunnelniveau das voralpine Gefüge in den Gneisen und Amphiboliten noch erkannt werden. Diese amphibolitfazielle, voralpine Schieferung hat meist keinen penetrativen Charakter und verläuft parallel bis subparallel zur stofflichen Bänderung der Gneise. Sie weicht in ihrer Orientierung um ca. 10°–25° gegen E vom alpinen Streichen ab. Die alpine Hauptschieferung ist hingegen in der Regel penetrativ mit grünschieferfaziellen

Mineralbildungen. Sie fällt in allen durchfahrenen Einheiten mit einem mittleren Azimut von  $150^{\circ}$ – $160^{\circ}$  und mit einem mittleren Fallen von  $70^{\circ}$ – $80^{\circ}$  ein und steht damit steiler als die tektonische Grenze zwischen TZM und der UGZ. Innerhalb der UGZ ist die alpine Hauptschieferung eine Achsenebenenschieferung von Klein- und Grossfalten (Fig. 3). In den feingebänderten, schiefrig-phyllitischen Sedimenten (zum Beispiel der Quartenserie) sind sehr schön isoklinale Kleinfaltenstrukturen zu erkennen. Mittels Schieferungs-Schichtungsintersektion und aufgrund der Schichtwiederholungen von Dolomit-Metaarkose-Permokarbon kann eine Verdoppelung der Rötiserie als Grossfalte belegt werden. Sowohl die voralpine als auch die alpine Schieferung, sowie die Gesteinsschichtung im Permo-Mesozoikum, verlaufen querschlägig bis stumpfwinklig und damit tunnelbautechnisch günstig zum Vortrieb.



Figur 3. Rötiserie der UGZ: gefalteter Kontakt zwischen Kalzit-Dolomitmarmor (Dol) und Phyllit (Phy), Faltenachsebene (FAE) steil südfallend, Grössenmassstab Bleistift.





Figur 4. Gneise und Schiefer des TZM-N: Knickfalte in Hellglimmergneis bis -schiefer, im Bereich des Faltenscharniers mit verstärkter spröder Verscherung.

In den gneisigen Gebirgsabschnitten dominieren bei den Klüften zwei steil nordfallende Systeme (Azimut 320-040/70-90) und ein südostfallendes System (Azimut 180-240/70-90). Sie durchtrennen das Gebirge mit Kluftabständen von 0.6 bis 2 m im Mittel, jedoch mit unregelmässigen Kluftlängen von 1 bis > 10 m. Flach westfallende Klüfte bilden in festeren, schwach texturierten Gneisen ein weiteres Hauptkluftsystem. In Gesteinen mit starker Ausbildung der Schieferung (Phyllite, Schiefer und verschieferte Gneise) sind vorwiegend Kleinklüfte zu beobachten.

## 3.2 Störzonen

### 3.2.1 Störzonen innerhalb des TZM-S und der UGZ

Bei den meisten Störzonen innerhalb des TZM-S und der UGZ handelt es sich um geringmächtige Strukturen von weniger als 0.5 m bis maximal 40 m Mächtigkeit unmittelbar südlich des Beginns des TZM-N. Es handelt sich dabei um Scherzonen, die hauptsächlich aufgrund später alpiner Sprödbbeanspruchung entstanden sind. Als Störzonen wurden mürbe, verlehnte Schiefer/Phyllite sowie Kakirite ausgeschieden. Die Störzonen sind oftmals an Bereiche gebunden, in denen die Gneise schon alpin duktil beansprucht und verschiefert waren. Der Anteil der Störzonen in beiden Gebirgsabschnitten ist kleiner als 5%. Der eigentliche tektonische Kontakt vom TZM zur UGZ ist ein messerscharfer, rein mylonitisch-duktil ausgebildeter Horizont. Der tektonische Kontakt ist nicht verschuppt.

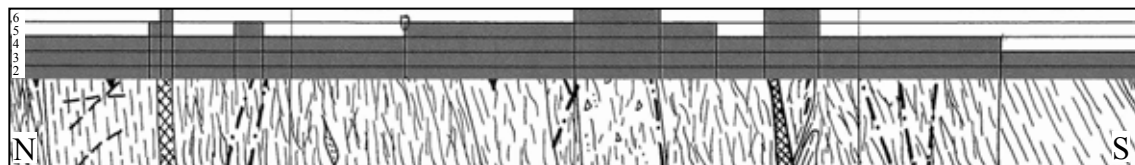
### 3.2.2 Störzonen des TZM-N

Im TZM-N führten die anhaltenden Bewegungen nach dem Maximum der alpinen Regionalmetamorphose und Exhumation des Gebirges zu einer nahezu vollständig sprödetektonischen Zerschierung der Gesteine (Fig. 1). Die Gesteine der bis September 2005 ausgebrochenen Strecke von 415 m werden nach ihrem Zerschierungsgrad folgendermassen unterteilt:

- Mehr oder weniger intakte bis gering zerscherte Gesteine (hauptsächlich Chlorit-Hellglimmergneisen bis -schiefer) sind regelmässig von feinen, kataklastischen Bruchstrukturen (Haarrissen, Harnischflächen) sowie einzelnen cm- bis dm-mächtigen Lehmkakiriten durchsetzt. Sie sind jedoch mehrheitlich kohäsiv und weisen eine gewisse Festigkeit auf. Die Schieferungsflächen sind vielfach verlehmt. Der Gesteinsmehlanteil in diesen Gneisen und Schiefen ist sehr gering und wird maximal auf weniger als 10% eingeschätzt. 60% der Gesteine in der bisher aufgefahrenen Tunnelstrecke sind mehr oder weniger intakt bis gering zerschert. Eine typische Strecke von 40 m (Weströhre Tm 1080 bis 1120) ist in Figur 5a exemplarisch dargestellt.
- Mässig zerscherte Gesteine sind kakiritisierte, d.h. zerbrochene oder verscherte, verstärkt verlehnte Hellglimmergneise bis -schiefer (lehmhaltiger Kataklastit, kataklastische Brekzie). Der Gesteinsmehlanteil dieser Gesteine schwankt zwischen 10 und 30%. Zonenweise schwimmen einzelne Gesteinbruchstücke in einer Gesteinsmehlmatrix. Das metamorphe Gesteinsgefüge ist jedoch immer noch erkennbar. Die Schieferungsflächen sind nahezu immer verlehmt. Die schwach kohäsiven, kakiritisierten Hellglimmergneise bis -schiefer sind mürbe, leicht mit dem Hammer zu zerklopfen oder von Hand leicht zu zerbrechen. Hellglimmerschiefer sind häufig in dm- bis m-Skala geknickt. Entlang der Faltenscharniere der Knickfalten (Fig. 4) zeigen sich immer wieder Bruchstrukturen mit einer starker Verlehmung und spröder Verscherung. 35% der bisher aufgefahrenen Tunnelstrecke bestehen aus mässig zerscherten Gesteinen. Eine typische Strecke von 40 m (Weströhre Tm 1160 bis 1200) ist in Figur 5b exemplarisch dargestellt.
- Der untergeordnete Anteil der Gesteine (5%) ist mit einer umfassenden Kakikritisierung zu stark zerbrochenen, kohäsionslosen Kataklastiten und Lehmkakiriten (kataklastische Brekzie und fault gouge) umgewandelt. Die bisher aufgetretenen Lehmkakirite sind in der Regel < 1 m und maximal 3 – 7 m mächtig.



a) Nordvortrieb Weströhre Tm 1080 bis 1120: Strecke mit intakt bis gering zerscherten Gesteinen



b) Nordvortrieb Weströhre Tm 1160 bis 1200: Strecke mit mässig bis stark zerscherten Gesteinen

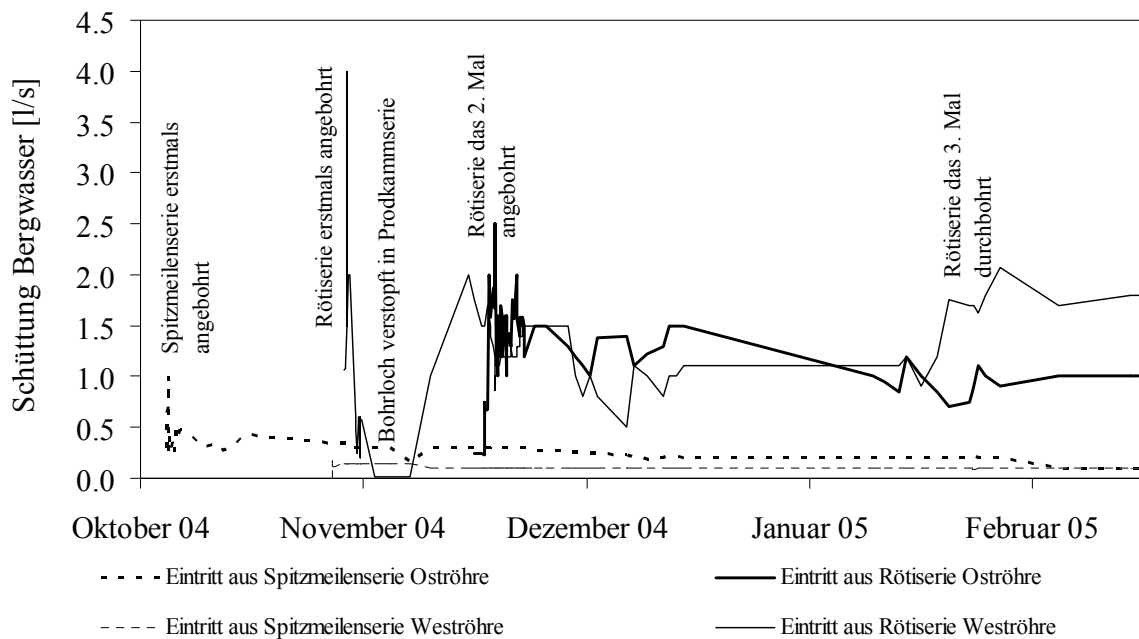
Figur 5. Beispiele der geologischen Verhältnisse aus dem TZM N: dargestellt ist die geologische Aufnahme im Aufriss der Firste (westlichen Hälfte, jeweils unten) und der Zerschierungsgrad der Gneise und Schiefer (jeweils oben). Legende Zerschierungsgrad: 2=einzelne Scherflächen, Harnischflächen, 3=verschiefert, mit Haarrissen, Harnischflächen, verlehnten Schieferungsflächen, einzelne cm-mächtige Lehmkakirite 4=zerschert, zerbrochen, Gesteinsmehlanteil < 10%, einzelne cm- bis dm-mächtige Lehmkakirite, 5= zerschert, Gesteinsmehlanteil 10-30%, mürbe, von Hand zu zerbrechen/zerreibbar, 6=Gesteinsmehlanteil >30%, plastisch, von Hand verformbar, Gestein durchwegs gestört

In allen verlehnten Gesteinen sind die Tonminerale Illit, Smektit und seltener Kaolinit röntgenographisch nachgewiesen. Die Kakiritzonen verlaufen (sub)parallel zur generell WSW – NNE streichenden Schieferungsorientierung. Die steil mit 70°–90°, meist südfallende Schieferung ist durch die ebenfalls steilen, aber auch flach orientierten Bruchstrukturen überprägt. Die Störzonen verlaufen bisher mehrheitlich querschlägig bis stumpfwinklig und damit tunnelbautechnisch günstig zum Vortrieb.

#### 4 HYDROGEOLOGISCHE VERHÄLTNISSE

Die hydrogeologischen Verhältnisse werden sowohl durch Aufzeichnung der Quellaustritte, deren Schüttung und Chemismus im Vortriebsbereich, als auch durch Beobachtung der stationären Abflüsse zum Schachtfuss, sowie abschnittsweise auf der Tunnelstrecke erfasst.

Während des Vortriebs in den kristallinen Gesteinen wurden bisher keine Kluftquellen angefahren, welche sowohl initial als auch stationär bedeutende Wassermengen lieferten. Die Wasseranfälle zeigen sich nur als Tropfstellen und untergeordnet als Quellen < 0.1 l/s in zerklüfteten Gneisen und entlang von kakiritischen Störzonen. In den intensiv geklüfteten Gneisen und Schiefen des TZM-N kann ein leicht verstärkt auftretender Tropf beobachtet werden. Die lehmigen Kakirite sind erwartungsgemäss wenig durchlässig, jedoch oft bergfeucht mit Wassergehalten von im Mittel unter 4 Gew.-%. Der gesamte Wasseranfall aus dem TZM auf Tunnelniveau ist mit ca. 2 l/s sehr gering.



Figur 6. Bergwasseranfall in der Urseren-Garvera-Zone während der Durchörterung (aus Vorauserkundung und Vortrieb).

Die Hauptmenge an Bergwasser auf Tunnelniveau entspringt Quellen aus den (quarzitischen) Karbonatgesteinen der Spitzmeilen- und der Rötiserie. Die Gesteinsserien der UGZ wurden unter anderem aufgrund des Karstrisikos in vorausseilend ausgeführten Kernbohrungen erkundet. Unmittelbar nach Erbohren wurde eine initiale Wassermenge von maximal ca. 1 l/s (Spitzmeilenserie) bzw. 4 l/s (Rötiserie) gemessen (Fig. 6). Nach Durchörterung in den Tunnelvortrieben stellte sich ein Zufluss von ca. < 0.5 l/s bzw. 2 – 3 l/s ein. Beide wasserführenden Gesteinszonen

sind nur wenige Meter mächtig und schichtparallel geklüftet. Das schiefrig-phyllitische Permokarbon ist vollkommen trocken. Im Übergang zu den Paragneisen des GM treten entlang der ersten aufgefahrenen Störzone wieder Kluftquellen (1 – 2 l/s, tendenziell abnehmend) auf. Der nahezu stationäre Wasseranfall aus allen Vortrieben beträgt im September 2005 7 l/s.

Die Analysen der Wasserzutritte divergieren bezüglich ihrer hydrochemischen Charakteristika (Tab. 2). Diejenigen aus dem TZM-N weisen eine erhöhte Mineralisation auf, die insbesondere auf einen erhöhten Sulfat- (bis 969 mg SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/l), Natrium- (bis 673 mg Na<sup>+</sup>/l) und Chloridgehalt (bis 85 mg Cl<sup>-</sup>/l) zurückzuführen ist. Das Bergwasser aus dem TZM-S ist meist gering mineralisiert mit erhöhten Natrium-Gehalten (bis 146 mg Na<sup>+</sup>/l). Hydrochemisch unauffällig blieben die Quellen in der UGZ mit Kalzium-, Magnesium-, und Natrium-Gehalten von jeweils unter 33 mg/l sowie mit einem Sulfatgehalt von maximal 76 mg SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>/l.

Tabelle 2. Bandbreite des Bergwasserchemismus in den einzelnen tektonischen Einheiten.

		TZM-N	TZM-S	UGZ	GM
L	[μS/cm 20°C]	1120 - 2510	327 - 1130	204 - 353	367 - 576
Ca <sup>2+</sup>	[mg/l]	1 - 5	0.6 - 57	24 - 33	1 - 2
Mg <sup>2+</sup>	[mg/l]	< 1	0.1 - 12	12 - 19	< 1
Na <sup>+</sup>	[mg/l]	249 - 673	13 - 263	3 - 24	79 - 122
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	[mg/l]	158 - 969	0.1 - 265	25 - 76	2 - 112
Cl <sup>-</sup>	[mg/l]	53 - 85	1 - 77	< 1	42 - 58

## 5 GEOTECHNIK

### 5.1 Geotechnische Verhältnisse im Südlichen Tavetscher Zwischenmassiv und in der Urseren-Garvera-Zone

Aufgrund der bereits ausgeführten Zugangsbauwerke (Zugangsstollen, Schacht) sowie der Sondierbohrung SB 4.1 war bekannt, dass innerhalb des TZM-S mit mehrheitlich festen Gesteinen und damit mit bautechnisch relativ günstigen Verhältnissen zu rechnen ist. Die UGZ (bzw. die Urseren Zone im Urserental) wurde bereits mehrfach von Untertagebauwerken durchfahren (Gotthard Strassentunnel, Gotthard Bahntunnel, Druckstollen der Kraftwerke Vorderrhein). Im Gotthard Strassentunnel und auch im Bahntunnel erwiesen sich die wenig festen Schiefer und Phyllite des Permokarbons und in den liasischen Schiefer bei einer Überlagerung von 300 m über grössere Strecken als druckhaft.

Die verschiedenen Gesteine besitzen unterschiedliche, durch Laborversuche bestimmte und im Handstück mittels Geologenhammer abgeschätzte Festigkeiten. Die Festigkeit der Gneise und Schiefergneise ist mittel bis hoch und nimmt mit zunehmender Verschieferung ab. Schiefer weisen noch eine mittlere bis geringe, während die Kakirite eine sehr geringe Festigkeit aufweisen.

Im Hinblick auf die Stabilität des Ausbruchsprofils und auf die Beanspruchung des Einbaus spielt vor allem das Trennflächengefüge, bestehend aus Schieferungs- und Kluftelementen, eine massgebende Rolle.

Die alpine Schieferung ist in der Regel penetrativ und stellt eine tatsächliche Festigkeitsanisotropie dar und ist tunnelbautechnisch massgebend. Die variszische Schieferung hingegen hat nur teilweise penetrativen Charakter. Die Festigkeitsanisotropie aufgrund der Schieferungen ist daher in alpin schwach überprägten Gebirgszonen in der Regel wesentlich kleiner als in Bereichen mit alpiner Schieferung. Die Schieferungsflächen sind generell mehrheitlich uneben und rau. Insbesondere zeigt sich auch die Schieferung im schiefrig-phyllitischen Permokarbon

als eine – aufgrund von Quarz-Feldspatknotten und -schlieren – sehr unregelmässige Trennfläche, die damit eine sehr hohe Rauigkeit aufweist. Die hohe Rauigkeit verbunden mit guten Festigkeitseigenschaften senkrecht zur Schieferung, sowie die günstige Orientierung derselben bezüglich des Tunnelvortriebes, lässt die geringe, gemessene Verformung in der Grössenordnung  $< 20$  mm erklären. Selbst in den grossen Ausbruchsquerschnitten der Kavernen für die Tunnelwechsel im Bereich der Multifunktionsstelle konnten mit der angewendeten Felsicherung und dem nachfolgenden Ausbau die Verformungen gering gehalten werden. Aufgrund der Verschneidung der Schieferung und der Hauptklüftung ergab sich eine Gefährdung durch Niederbruch von Klüftkörpern aus dem Profil und der Ortsbrust. Mehrheitlich wurde dafür eine systematische Radialankerung und Spritzbeton angewendet (Ausbruchsklassen III und IV nach SIA-Norm 198). In den Störzonen und in der UGZ waren Ortsbrustanker durchgehend notwendig. Ein Stahleinbau beschränkte sich auf das Mesozoikum und auf Serpentinlinsen. Die Serpentinlinsen, welche im Zuge der alpinen Überprägung zum Teil lokal, aber meist durchdringend vertalkt sind, wiesen eine sehr geringe Haftreibung an sämtlichen talkig-seifigen Scher- und Klüftflächen auf. Dies führte zu einem sehr starken nachbrüchigen Verhalten, was beim Anfahren der ersten grösseren Talkschieferlinse innerhalb der Multifunktionsstelle zu einem Niederbruch aus dem vorderen Firstbereich führte (Fig. 7). Nach diesem Ereignis wurden alle folgenden ultrabasischen Linsen mit einem Spiessschirm und einer systematischen Ortsbrustankerung, beides vorausseilend, sowie mit starrem Stahleinbau im Profil gesichert. Die geringmächtigen Störzonen führten zu keinen weiteren nennenswerten Erschwernissen.



Figur 7. Südliches Tavetscher Zwischenmassiv, Multifunktionsstelle (Seitenstollen Nord): Niederbruch von Talkschiefern aus der Ortsbrust und der Firste.

## 5.2 *Geotechnische Verhältnisse im Nördlichen Tavetscher Zwischenmassiv*

Das TZM-N und die nördlich angrenzende CZ wird aufgrund der grossen Verbreitung von weichen, lockergesteinsähnlichen kohäsionslosen Kakiriten als stark druckhaft erwartet. Ein Teil der Kerne aus der Sondierbohrung SB 3.2 verhielt sich plastisch. Um die stark wechselhaften, heterogenen Gesteinsserien mit unterschiedlicher lithologischer

Zusammensetzung und spröder Zerschering vereinfachter darzustellen, wurden für die Prognose auf Tunnelniveau ausgedehnte bautechnische Homogenbereiche definiert, für die ein Wechsel der Ausbruchssicherung aufgrund unterschiedlicher geologisch-geotechnischer Gefährdungsbilder gerechtfertigt erschien.

Bei den Homogenbereichen wurde in drei Stufen der Kakiritisierung unterschieden (Tab. 3). Den einzelnen Stufen wurden mögliche Gefährdungsbilder zugeordnet. Im Vordergrund standen natürlich immer die radialen, plastischen Deformationen von 20 – 70 cm. Als weitere massgebende Gefährdungen sind die Nachbrüchigkeit, die Instabilität der Ortsbrust (Extrusion) und aufgrund der Überlagerung ein möglicherweise festigkeitsreduzierender Einfluss durch hohe Porenwasserdrücke vorausgesagt.

Sämtliche bautechnischen Massnahmen wurden entsprechend den erwarteten Gefährdungsbildern ausgelegt. Für die Ausführung vor Ort war es wichtig, die geologisch-geotechnische Ansprache der Gesteine mit jener der Sondierbohrung SB 3.2 abzugleichen und in den 40–200 m langen, vorausseilend ausgeführten Vorauserkundungsbohrungen ab der Tunnelbrust ebenfalls bautechnische Homogenbereiche festzulegen. So war es möglich, mit dem Projektverfasser, Projektingenieur und der Bauleitung zu diskutieren und die bautechnischen Massnahmen richtig festzulegen.

Tabelle 3. Bautechnische Homogenbereiche und geologisch-geotechnische Ansprache.

Homogenbereiche Kakiritisierungsgrad	Dominierende Lithologien/Zerschering	Gefährdungsbilder
±intakt bis schwach kakiritisiert	Gneise und Schiefer, schwach zerbrochen bis kataklastisch überprägt (gering zerschert), mit geringem (< 10 %) bis fehlendem Gesteinsmehlanteil, fest bis mässig fest, lokal mürbe, meist trocken, stellenweise mit Tropfstellen und Nässe (Kluftwasser)	geringe und nur lokale Druckhaftigkeit (radiale Konvergenzen bis 20 cm) Nachbrüchigkeit, Ortsbrustinstabilität durch Ausknicken
mässig bis stark kakiritisiert	kakiritisierte Schiefer und Gneise, zerbrochen (mässig zerschert), mit geringem (< 10 %) bis mässigem (30 %) Gesteinsmehlanteil, wenig fest, mürbe bis weich, meist „trocken“ oder erdfeucht (Wassergehalt meist weniger als 4 Gew.-%), mit Tonanteil (Illit, Smektit)	starke Druckhaftigkeit (bis 50 cm radial), Nachbrüchigkeit, v.a. aus der Ortsbrust
extrem kakiritisiert	Lehmkakirit, stark zerbrochen und zerschert (kataklastische Brekzie und fault gouge), mit Gesteinsbruchstücken in Gesteinsmehl (> 30 %) schwimmend, weich, von Hand verformbar, plastisch, erdfeucht (Wassergehalt meist weniger als 4 Gew.-%), mit Tonanteil (Illit, Smektit, Kaolinit) bis 30 Gew.-%	extreme Druckhaftigkeit (bis 70 cm radial), Nachbrüchigkeit, v.a. aus der Ortsbrust zusätzlich erwartet: Einfluss von Porenwasserdruck auf Festigkeit (?)

Der Befund zeigte sehr grosse Unterschiede bei den Festigkeiten sowohl zwischen gering und stark zerscherten Gesteinen als auch parallel und senkrecht zum tunnelbautechnisch massgebenden Trennflächengefüge. Für letzteres war die penetrative alpine Schieferung zusammen mit den spröde entstandenen Gefügeelementen wie Haarrissen, Bruchflächen und Kakiritlagen wichtig. Im Falle einer geringen Zerschering ist die Festigkeit der verschieferten Gneise senkrecht zu den Trennflächen immer noch mittel bis teilweise hoch, parallel dazu jedoch klein. Die gering zerscherten Gesteine sind schlecht verformbar. Die Festigkeit und die Anisotropie nehmen natürlich mit zunehmender Zerschering ab. Die stark zerscherten Lehmkakirite weisen eine kleine Festigkeit auf und verhalten sich isotrop.

Die Standfestigkeit des Hohlraumes wird dadurch günstig beeinflusst, dass die Gesteinsserien querschlägig zum steilstehenden Trennflächengefüge durchfahren

werden. Massgebend ist zudem die anteilmässige Verteilung von steifen und weichen Gesteinspaketen bei diesem geschichteten Gebirgsaufbau. Auf den ersten 170 m im TZM-N dominieren gering zerscherte Gneise und Schiefer. Der Abschnitt wurde mehrheitlich dem bautechnischen Homogenbereich  $\pm$  intakt bis schwach kakiritisiert zugeordnet. Die gemessenen Verformungen betragen weniger als  $< 5$  cm. Die geringmächtigen, mässig bis stark zerscherten Strecken hatten auf das Verformungsverhalten keinen Einfluss. Es konnte deshalb ein starrer Stahleinbau eingesetzt werden.

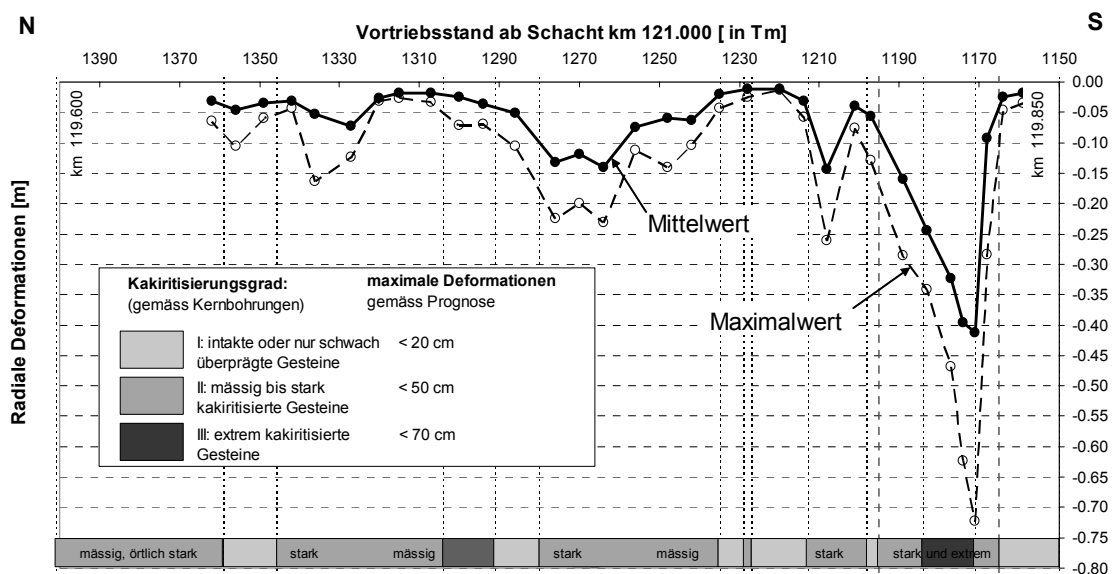
Nach 170 m wurde in den Kernbohrungen eine längere Strecke mit Lehmkakirit erbohrt (Fig. 8), der Anteil an  $\pm$  intakten bis schwach kakiritisierten Bereichen ging stark zurück und es wurde druckhaftes Gebirge erwartet. Es wurde auf einen grösseren Ausbruchquerschnitt und einschiebbaren Stahleinbau umgestellt. Tatsächlich stellten sich ab diesem Zeitpunkt deutliche Verformungen ein. Die Verformungen im druckhaften Gebirge werden alle 5 – 10 m mittels einem optischen 3D-Messquerschnitt bestehend aus jeweils 5 Messpunkten gemessen. In Figur 9 ist jeweils die mittlere und die maximale Verschiebung in einem Messquerschnitt aufgetragen. Die dargestellte Verschiebung in den vortriebsnahen Messquerschnitten ist natürlich noch nicht vollständig abgeschlossen. Im Mittel schwanken die Werte zwischen 5-40 cm. Die Schwankungen stehen in engen Bezug zu den geologisch-geotechnischen Verhältnissen bzw. zu den bautechnischen Homogenbereichen. Die schwächsten Konvergenzen sind an die wenig überprägten Gesteine ( $\pm$  intakt bis schwach und mässig kakiritisiert), die stärksten Konvergenzen sind an die Lehmkakirite (stark und extrem kakiritisiert) geknüpft. Die Grafik zeigt weiter, dass es sich nicht um rein symmetrische radiale Verformungen handelt. Der Maximalwert weicht bei allen Messquerschnitten deutlich vom Mittelwert ab. Für eine weiterführende Interpretation der felsmechanischen Messergebnisse wird auf den Artikel von Kovari et al. (2006) verwiesen.



Figur 8. Bohrkern aus der Vorauserkundung in der Weströhre (Tm 1161 – 1177). Tm 1161 – 1171.8 mit einer Wechselfolge von schwach und mässig, z.T. stark zerscherten, zu Kies zerfallenen Schiefen (bautechnisch als mässig bis stark kakiritisierte Zone ausgeschieden), ab Tm 1171.8 mit einem Lehmkakirit (bautechnisch als extrem kakiritisiert ausgeschieden). Der dargestellte Übergang stellt den Beginn des druckhaften Gebirges dar.

Neben den Verformungen bildet die Nachbrüchigkeit eine weitere Hauptgefährdung, da der Vortrieb im Vollausschub mit einer Ortsbrusthöhe bis zu 13 m ausgeführt wird. In der hohen Ortsbrust wirkt sich die Orientierung der Haupttrennflächen, die weichen Lagen und auch der Knickfaltung sehr ungünstig aus, denn das stark durchtrennte Gebirge bricht leicht nach. Für das Lösen des Gesteins reicht in den stark bis extrem kakiritisierten Homogenbereichen ein Kratzen mit dem Bohrhammer, in schwach bis mässig kakiritisierten Homogenbereichen sind teilweise Lockerungssprengungen notwendig. Das Material zerfällt vielfach schon ohne grosse mechanische Bearbeitung sofort zu Sand, Kies und Steinen. Der Abschlag kann in einzelnen Gebirgsstrecken nur etappenweise erfolgen, d.h. die Brust muss von oben nach unten in mehreren Schritten mit Spritzbeton und Netzen gesichert werden. Vorseilend müssen ein Spiessschirm und eine systematische Ortsbrustankerung versetzt werden.

Ein festigkeitsreduzierender Einfluss des Porenwasserdruckes wurde bisher nicht beobachtet, bzw. nicht erkannt.



Figur 9. Radialverformungen entlang der Tunnelachse in der Weströhre (Tm 1150 – 1370).

## 6 ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Durch den Bau des Zwischenangriffs Sedrun (Zugangsstollen, Schächte) und der Vortriebe im Basistunnel werden neue Kenntnisse in den tiefliegenden Gebirgstteilen im Gebiet von Sedrun dazu gewonnen.

Der geologische Befund in den Tunnelvortrieben innerhalb des TZM-S hat die Kenntnisse aus dem Zwischenangriff Sedrun und der Sondierbohrung SB 4.1 bestätigt. Es wurden hauptsächlich gebänderte Gneise angetroffen, wobei (Biotit)-Hellglimmergneise mit grobblättrigem Muskovit (Quermuskovitgneise) vorherrschend waren. Innerhalb der Gneise traten Granat-Amphibolite, sporadisch Pegmatit-Gänge sowie ultrabasische Linsen (Serpentinite, Talkschiefer) auf. Die Bewegungen der alpinen Gebirgsbildung führte unter grünschieferfaziellen Metamorphosebedingungen zu duktilen Scherzonen mit Serizitschiefern oder untergeordnet Serizitphylliten und während alpinen Sprödeformationsphasen zu einigen Meter bis Zehnermeter mächtigen, kakiritischen Störzonen und zu mehreren Kluftsystemen. Obwohl die alpine 70°–80° S- bis SE-fallende Schieferung meist stark ausgeprägt ist, sind voralpin gebildete Gefüge und Mineralbestände erhalten. Zu diesen gehören schlierig-lagige Texturen in Gneisen, möglicherweise Relikte einer migmatischen Überprägung, Granat-



Amphibolite, eine voralpine variszische Schieferung sowie die Pegmatit-Gänge. In Übereinstimmung mit anderen Autoren (Jäger et al. 1967 oder Biino 1994) wird eine variszische und kaledonische Metamorphose-Vorgeschichte ähnlich dem nördlichen GM vermutet. Im TZM-S waren die bautechnischen Verhältnisse insgesamt wie erwartet relativ günstig. Die gewählte Lage des Schachtstandortes und der Multifunktionsstelle erwies sich als richtig.

Die UGZ erstreckt sich bis auf Tunnelniveau. Es wurden sämtliche, von der Oberfläche bekannten Sedimente des Permokarbons (Schiefer und Phyllite), der Trias (Röti-/Quartenserie) und des Lias (Prodkamm-/Spitzmeilenserie) angetroffen. Die Sedimente sind grünschieferfaziell überprägt und stark verschiefert. Sie liegen in stratigraphisch normaler Lage, jedoch überkippt auf den Gneisen des GM. Die Schiefer und Phyllite am Südrand des TZM gleichen – wie Niggli (1944) schon feststellte – mehr dem Permokarbon als einem stark verschiefertem Kristallin. Im Gegensatz zu seinen Beobachtungen ist der Kontakt zwischen dem TZM und der UGZ auf Tunnelniveau nicht verschuppt. Die Schiefer und Phyllite zeigten eine zunehmende Mylonitisierung, das heisst eine duktile, intensivierete Schieferung am Südrand des TZM. Der darauf folgende eigentliche, tektonische Kontakt ist eine messerscharfe, ungestörte Fuge zwischen einem Phyllonit des TZM und dem Sandkalk (Lias) der UGZ. Verschuppte Reste von Mesozoikum in Phyllonit wurden keine gefunden. Entgegen den Projekterwartungen fällt die UGZ nicht steil mit  $85^{\circ}$ – $90^{\circ}$ , sondern nur mit  $65^{\circ}$ – $70^{\circ}$  gegen Süden, die Mächtigkeit nimmt mit der Tiefe ab. Diese keilartige Form der UGZ hat Leu & Wyss (1992) als Interpretationsmöglichkeit aufgezeichnet. Für das Projekt erwies sich diese Abweichung als günstig, da damit die südlichsten Bauwerke der Multifunktionsstelle nicht in die UGZ zu liegen kamen. Wegen wiederholt erhöhtem nachbrüchigem Verhalten musste nämlich der Ausbruch im ganzen Mesozoikum mit einem starren Stahlausbau gesichert werden, im Permokarbon konnte die Sicherung auf Spritzbeton und Radialanker reduziert werden. Das erwartete druckhafte Verhalten, welches vom Mesozoikum und Permokarbon der Garvera Zone im Gotthard Eisenbahn- und Strassentunnel bekannt war (Keller et al. 1987), blieb aus. Es fragt sich, wie es in derselben geologischen Einheit zu einem solch unterschiedlichen Gebirgsverhalten kommen kann. Der unmittelbare Grund dafür liegt darin, dass beinahe die gesamte UGZ intakt und ungestört angetroffen wurde. Die Gesteine der Urseren Zone im Strassentunnel hingegen sind nach Keller et al. (1987) nicht intakt, sondern vermutlich von einer jungen, spröde-tektonischen Störungslinie erfasst. Da die Urseren Zone mit der Garvera Zone (Urseren-Garvera-Zone gemäss Projekt) am Pazolastock nicht verbunden ist (Wyss 1986), sondern nördlich versetzt, legt nun den Schluss nahe, dass diese Störungslinie nicht der weicheren Sedimentzone folgend am Oberalppass abrupt nach Süden umbiegt, sondern geradlinig über die Passfurche in Richtung Disentiser Zone zieht. Folgerichtig würde die druckhafte Zone im Strassen- und Eisenbahntunnel im Bereich von Sedrun der CZ entsprechen. Diese spröde-tektonische Schwächung des Gesteinsgefüges führte zum druckhaften Verhalten in der Urseren Zone des Strassentunnels, bzw. wird nun im Gotthard Basistunnel in der CZ erwartet.

Die verstärkte spröde-tektonische Überprägung des TZM setzt unmittelbar unter dem Vorderrhein (Rein Anterior) ein und damit am erwarteten Beginn des TZM-N auf Tunnelniveau. Ab dieser Stelle musste auf einer Länge von 1145 m mit bautechnisch schwierigen, druckhaften Verhältnissen gerechnet werden. Bis September 2005 sind etwas über 400 m im TZM-N erfolgreich aufgefahren, weitere 100 m sind erkundet. Es fehlen noch etwas mehr als 700 m Vortrieb bis ans Ende der CZ. 95% der angetroffenen Tunnelabschnitte bestehen aus gering bis mässig zerscherten, verlehnten Hellglimmergneisen bis -schiefern (mehrheitlich stark durchtrennte, kohäsive Gesteine, untergeordnet schwach kohäsive Kataklastite, kataklastische Brekzien). In den restlichen Tunnelabschnitten treten stark zerbrochene Kataklastite und Lehmkakirite

(kataklastische Brekzien und fault gouge) auf, deren Mächtigkeiten maximal 7 m betragen. Die meist südfallende Schieferung ist steil mit 70°–90° geneigt, die spröden Bruchstrukturen verlaufen subparallel, mehrheitlich ebenfalls steil. Der geologische Befund stimmt mit den geologischen Aufzeichnungen in der Sondierbohrung SB 3.2 überein. Die extrem zerscherten Zonen sind gegenüber dem bisherigen Befund allerdings anteilmässig überbewertet. Der Grund liegt darin, dass zerbohrte Strecken mit Sand und Kies oder mit Kernverlusten in der Sondierbohrung SB 3.2 grundsätzlich konservativ interpretiert wurden. Diese Vermutung haben schon die Verfasser des Schlussberichtes der Sondierbohrung SB 3.2 geäussert. Die bisherigen Erfahrungen zeigten immer, dass eher günstige Strecken mit hart – weich Wechsellagerungen zu Kernverlusten neigen und nicht jene mit – aufgrund des hohen Tonanteils – leicht bindigen Lehmkakiritzonen. Die erwartete Druckhaftigkeit hat sich nach 170 m in TZM-N mit Radialverformungen bis zu 80 cm eingestellt. Massgebend waren das vermehrte Auftreten von verstärkt zerscherten Gneisen bis Schiefen und von Lehmkakiriten mit geringer Festigkeit. Das gewählte Ausbaukonzept im druckhaftem Gebirge hat sich bewährt (Ehrbar & Pfenninger 1999, Kovari et al. 2006).

Während des Vortriebes wurden bisher nur kleine Kluftquellen angefahren, welche sowohl initial als auch stationär unbedeutende Wassermengen liefern. Der stationäre Wasseranfall aus der ganzen Tunnelstrecke liegt Ende September 2005 bei 7 l/s. Die Bergwassermenge im tiefliegenden Tunnel ist damit wesentlich geringer als in den darüber liegenden Zugangsbauwerken, wo der stationäre Wasseranfall zwischen ca. 15 – 25 l/s schwankt. (Guntli & Berchtold 1999). Der einzige grössere Quellhorizont (2 – 3 l/s) wurde in den karbonatischen Trias der UGZ angefahren. Aus dem Wechsel von chemisch unterschiedlichen Bergwässern entlang der Tunnelachse lässt sich folgern, dass die Bergwasserbewegung vorwiegend parallel zum Streichen der steil einfallenden Gesteinspakete stattfindet.

## REFERENZEN

- Biino, G.G. 1994. The pre Late Ordovician metamorphic evolution of the Gotthard-Tavetsch massifs (Central Alps): from lawsonite to kyanite eclogites to granulite retrogression. *Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt.* 74:87-104.
- Ehrbar, H. & Pfenninger, I. 1999. Umsetzung der Geologie in technische Massnahmen im Tavetscher Zwischenmassiv Nord. In: Löw, S. & Wyss, R. (eds.), *Vorerkundung und Prognose der Basistunnels am Gotthard und am Lötschberg*, Proc. intern. symp. Geologie AlpTransit 1999, Zürich. Rotterdam: Balkema.
- Guntli, P. & Berchtold, P. 1999. Geologisch-geotechnische Verhältnisse im Zugangsstollen Sedrun (Tavetscher Zwischenmassiv). In: Löw, S. & Wyss, R. (eds.), *Vorerkundung und Prognose der Basistunnels am Gotthard und am Lötschberg*, Proc. intern. symp. Geologie AlpTransit 1999, Zürich. Rotterdam: Balkema.
- Jäger, E., Niggli, E. & Wenk, E. 1967. Rb-Sr Altersbestimmung an Glimmern der Zentralalpen. *Beitr. Geol. Karte Schweiz N.F.* 143.
- Keller, F., Wanner, H. & Schneider, T.R. 1987. Geologischer Schlussbericht Gotthard-Strassentunnel. *Beitr. Geol. Schweiz, Geotechn. Serie* 53.
- Keller, F. 1999. Geologie und Geotechnik im Aar- und Tavetscher Zwischenmassiv Nord. In: Löw, S. & Wyss, R. (eds.), *Vorerkundung und Prognose der Basistunnels am Gotthard und am Lötschberg*, Proc. intern. symp. Geologie AlpTransit 1999, Zürich. Rotterdam: Balkema.
- Kovari, K., Ehrbar, H. & Theiler, A. 2006. Druckhafte Strecken im TZM Nord: Projekt und bisherige Erfahrungen. In: Löw, S. et al. (eds.), *Geologie und Geotechnik der Basistunnels am Gotthard und am Lötschberg*, Proc. intern. symp. Geologie AlpTransit 2005, Zürich. Zürich/Singen: vdf Hochschulverlag AG.
- Kramers, J.D. 1973. Zur Mineralogie, Entstehung und alpinen Metamorphose der Uranvorkommen bei Trun, Graubünden. *Beitr. Geol. Schweiz, Geotechn. Serie* 52.
- Labhart, T.P. 1999. Aarmassiv, Gotthardmassiv und Tavetscher Zwischenmassiv: Aufbau und Entstehungsgeschichte. In: Löw, S. & Wyss, R. (eds.), *Vorerkundung und Prognose der Basistunnels*

- am Gotthard und am Lötschberg, Proc. intern. symp. Geologie AlpTransit 1999, Zürich. Rotterdam: Balkema.
- Leu, W. & Wyss, R. 1992. Geologische Aufnahmen und Prognoseprofil im Gebiet von Sedrun, Vorderrheintal (AlpTransit/Gotthard-Basistunnel). Bull. Ver. Schweiz. Petroleum-geol. u.-Ing. 59/135:81-92.
- Niggli, E. 1944. Tavetscher Zwischenmassiv und Nordrand des Gotthardmassivs. Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt. 28:165-300.
- Schneider, T.R. 1999. Gotthard Basistunnel: Strategie der geologischen Untersuchungen. In: Löw, S. & Wyss, R. (eds.), Vorerkundung und Prognose der Basistunnels am Gotthard und am Lötschberg, Proc. intern. symp. Geologie AlpTransit 1999, Zürich. Rotterdam: Balkema.
- Trümpy, R. 1999. Die tektonischen Grosseinheiten im Bereich AlpTransit. In: Löw, S. & Wyss, R. (eds.), Vorerkundung und Prognose der Basistunnels am Gotthard und am Lötschberg, Proc. intern. symp. Geologie AlpTransit 1999, Zürich. Rotterdam: Balkema.
- Wider, F. & Mullis, J. 1998. Geologische Resultate der NEAT Sondierbohrung SB3 – Tujetsch (Sedrun/GR). Bull. Angew. Geol. VSP/SFIG 3/2: 205-228.
- Wyss, R. 1986. Die Urseren Zone – Lithostratigraphie und Tektonik. Eclogae. geol. Helv. 79/3: 731-767.