Brenner Basistunnel: Wichtigkeit der Vorerkundung

Die geologische Vorerkundung und die kontinuierliche Begleitung beim Tunnelbau sind von fundamentaler Bedeutung. Vom später durchgehenden ca. 60 km langen Erkundungsstollen beim Brenner Basistunnel wurden bis Jahresende 2012 über 16 km bereits ausgebrochen. Der folgende Beitrag gibt einen Überblick über den bisherigen Stand.

Brenner Base Tunnel: Importance of Preliminary Prospection

Preliminary geological prospection and constant prospection during construction are of fundamental importance. At the end of 2012, over 16 km of the exploratory tunnel of the Brenner Base Tunnel, which will run from one end to the other of the main tunnel route and will be 60 km long when it is completed, had been excavated.The following article gives an overview of the state of the art.

1 Einleitung

Die geologische Vorerkundung und die kontinuierliche Begleitung beim Tunnelbau sind von fundamentaler Bedeutung für einen verantwortbaren Vortrieb. Am Beispiel des Brenner Basistunnels werden die bisherigen Erfahrungen mit dem Vortrieb des Erkundungsstollens dargestellt und die neuen Erkenntnisse erklärt. Auch hat sich die Wichtigkeit einer kontinuierlichen Aufzeichnung der Geologie, deren Dokumentation und deren geotechnischen Klassifikation möglichst zeitnah mit dem Vortrieb gezeigt, um die sichtbaren Erkenntnisse in sogenannten Tunnelbändern zu dokumentieren [1].

Die Vortriebsarbeiten beim Brenner Basistunnel wurden im August 2007 begonnen. Zuerst mussten die seitlichen Fensterstollen mit den Baustellenzufahrten und Deponieflächen errichtet werden. Vom später durchgehenden ca. 60 km langen Erkundungsstollen wurden bis Jahresende 2012 über 16 km bereits ausgebrochen (Bild1). Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Dr. Konrad Bergmeister, Brenner Basistunnel BBT SE, Innsbruck/A, konrad.bergmeister@bbt-se.com, www.bbt-se.com Dr. Andreas Töchterle, Brenner Basistunnel BBT SE, Innsbruck/A, andreas. toechterle@bbt-se.com

2 Technische Kenndaten des Brenner Basistunnels

2.1 Verlauf des Brenner Basistunnels

Der Brenner Basistunnel verläuft zwischen Tulfes/Öster-

1 Introduction

Preliminary geological prospection and constant prospection during construction are of fundamental importance for proper excavation. Using the example of the Brenner Base Tunnel, this report describes the experience and the new knowledge obtained from the excavation of the exploratory tunnel. This case has also shown the importance of the constant recording and documentation of the geology and the pertinent geotechnical classifications as the excavation progresses, so as to chart the



Aktuelle Baustellen Current construction sites

reich und Franzensfeste/Italien und weist eine Gesamtlänge von 64 km auf. Die maximale Längsneigung beträgt in den Hauptabschnitten 6,7 ‰. Mittig unterhalb der beiden Haupttunnel wird abschnittsweise vorauseilend ein durchgehender Erkundungsstollen gebaut [2]. Dieser dient hauptsächlich dazu, das Gebirge zu erkunden, das Baurisiko zu vermindern und sowohl Baukosten als Bauzeiten zu optimieren [3]. Während der Betriebsphase dient dieser Erkundungsstollen als Entwässerungskanal, wo unabhängig von den Hauptstollen sowohl eine Überwachung als auch Erhaltungsarbeiten nahezu unabhängig vom Betrieb durchgeführt werden können (Bild 2).

Die wichtigsten Kenndaten des Brenner Basistunnels sind:

- Länge: 55 + 9 = 64 km
- Längsneigung: 5,0 bis 6,7 ‰
- Scheitelhöhe des Basistunnels: 795 m ü.d.M.
- Nettoquerschnitt der Hauptröhren: ca. 43 m²
- Abstand der Querschläge: 300 m

2.2 Wichtige geologische Zonen

Die Tunneltrasse führt durch den zentralen Teil der Ostalpen, die durch die Kollision der europäischen und der adriatischen Platte entstanden sind. Begleitet wird diese Gebirgsbildung von Störungen und Störungszonen. Mit der Periadriatischen Störungszone im südlichen Teil bei Mauls (Südtirol) kreuzt eine bedeutende tektonische Störungslinie der Alpen mit einer Gesamtlänge von 700 km und einer Breite von etwa 1300 m die Tunnelachse.



Regelquerschnitt des Haupttunnels mit Erkundungsstollen

Cross-section of the main tunnel with exploratory tunnel

Die wichtigsten geologischen Zonen mit den entsprechenden haupttektonischen Einheiten entlang des Brenner Basistunnels von Innsbruck bis nach Franzensfeste sind (Bild 3): • Innsbrucker Quarzphyllit

- (Ostalpin) • Bündnerschiefer (Pennini-
- kum Tauernfenster)
- Untere Schieferhülle (Subpenninikum – Tauernfenster)
- Zentralgneis Brennermassiv (Subpenninikum – Tauernfenster)
- Untere Schieferhülle und Bündnerschiefer wechselnd (Tauernfenster)
- Glimmerschiefer (Ostalpin)
- Maulser Tonalitlamelle/Periadriatische Störungszone
- Brixner Granit (Südalpin)

Vereinfacht liegen damit von Nord nach Süd 4 Haupt-Gesteinstypen vor.

 Quarzphyllit: Der Innsbrucker Quarzphyllit ist ein metamorphes, geschiefertes Gestein, das sich hauptsächlich aus visible information in so-called "tunnel tapes" [1].

The excavation work for the Brenner Base Tunnel began in August of 2007. First of all, it was necessary to build the lateral access tunnels with the entrances to the construction sites and disposal areas. At the end of 2012, over 16 km of the exploratory tunnel, which will run from one end to the other of the main tunnel route and will be 60 km long when it is completed, had been excavated (Fig. 1).

2 Technical data on the Brenner Base Tunnel 2.1 The route of the Brenner Base Tunnel

The Brenner Base Tunnel runs between Tulfers/Austria and Fortezza/Italy and has a total length of 64 km. The maximum gradient in the main sections of the tunnel amounts to 6.7 ‰. Below the 2 main tunnels and centred between them, a preliminary prospection and exploratory tunnel is being built section by section [2]. The main objective is the prospection of the rock mass, so as to reduce construction risk and optimize construction costs and time [3]. During the operational phase, this tunnel will act as a drainage channel in which supervision and maintenance work can be carried out independent of operations in the main tunnels (Fig. 2).

The most important basic features of the Brenner Base Tunnel are:

- Length: 55 + 9 = 64 km
- Gradient: 5.0 to 6.7 ‰
- Apex height of the base tunnel: 795 a.s.l.
- Net cross section of the main tunnels: about 43 m²
- Distance between the connecting side tunnels: 300 m

2.2 Important geological areas

The tunnel route runs through the central part of the Eastern Alps which arose when the European and the Adriatic tectonic





Geologie entlang des Brenner Basistunnels

Geology of the Brenner Base Tunnel

den Mineralen Quarz und Glimmer zusammensetzt.

- Schiefer: Bei den Bündnerschiefern und der Unteren Schieferhülle handelt es sich marine Sedimente und untergeordnet magmatische Gesteine, die im Zuge der Alpenbildung eine Metamorphose erfahren haben. Ein charakteristisches Merkmal stellen die ausgeprägten Schieferungsflächen dar. Die wichtigsten Gesteine sind Kalkglimmerschiefer, Kalkphyllite, Schwarzphyllite und Grünschiefer. Die volumetrisch wichtigsten Minerale sind Kalzit, Glimmer und Quarz sowie Amphibole in den Grünschiefern. Die Schwarzphyllite beinhalten immer auch Graphit.
- Gneis ist ein grob geschiefertes, kristallines Gestein, das durch die Metamorphose während der Alpenbildung

aus granitischen Gesteinstypen entstanden ist. Die sogenannten "Zentralgneise" bestehen hauptsächlich aus den Mineralien Feldspat, Quarz und leicht untergeordnet Glimmer.

• Granit ist ein massiges, kristallines, magmatisches Gestein. Der mittel- bis feinkörnige Brixner Granit besteht ähnlich dem Gneis aus Feldspat, Quarz und untergeordnet Glimmer, ist jedoch nicht geschiefert.

3 Übersicht und Inhalte der Erkundungsphasen im Hinblick auf die geologisch-geotechnische Planung

Die geologische Erkundung für den Brenner Basistunnel erfolgte in mehreren Phasen. Aufbauend auf bestehende Machbarkeitsstudien (u.a. [4]) folgte 1999 bis 2002 (Vorpro-

plates collided. This rock formation is accompanied by faults and fault zones. In the southern part of the tunnel near Mules -Alto Adige, the tunnel axis crosses the Periadriatic Fault System, an important tectonic fault line in the Alps which is 700 km long and about 1300 m wide.

The most important geological areas and the corresponding tectonic units along the Brenner Base Tunnel from Innsbruck to Fortezza are, as follows (Fig. 3):

- Innsbruck Quartzphyllite (Austroalpine)
- Bündner schist area (Penninic - Tauern Window)
- Lower Schieferhülle (Subpenninic - Tauern Window)
- Central Gneiss Brenner Massif (Subpenninic - Tauern Window)
- Alternating Lower Schieferhülle and Bündner schists (Tauern Window)

- Mica schists (Austroalpine)
- Mules tonalitic "lamella"/Periadriatic fault system
- Brixner Granite (Southern Alps)

To simplify, there are 4 main rock types running from north to south

- Innsbruck Quartzphyllite: Innsbruck Quartzphyllite is a metamorphic rock in layers consisting mainly of minerals such as quartz, mica and feldspar.
- Schist: The Bündner schists and the Lower Schieferhülle are marine sediments and, to a lesser degree, magmatic rock that has undergone a metamorphosis during the rise of the Alps. A typical feature of this rock is its pronounced schistosity. The most important rocks are limestone mica, limestone phyllite, black phyllite and green schists. From a volumetric point of view, the most important minerals are

jektphase I) die wesentliche geologische Erkundung. In dieser Phase wurde der Kenntnisstand des Projektgebietes in Bezug auf die allgemeine geologische Situation sowie auch hinsichtlich seiner Eigenschaften als Baugrund für einen tiefliegenden Tunnel erweitert. Es wurden sämtliche verfügbaren geologischen Bestandsdaten erhoben und zusammengeführt. Eine erste Kampagne von Tiefbohrungen entlang der Trasse gab Aufschluss über die geologischen Verhältnisse in der Tiefe. Zudem wurden strukturgeologischgeotechnische Geländedaten entlang der gesamten Trasse aufgenommen und einzelne Detailkartierungen durchgeführt. Ein besonderes Augenmerk wurde bereits in dieser Phase auf die Lokalisierung und die Ausbildung von Störzonen gelegt [5]. In der Projektphase II, der eigentlichen Planungsphase für das Genehmigungsprojekt, wurden zwischen 2004 und 2006 zahlreiche Tiefbohrungen abgeteuft, geologische Kartierungen durchgeführt und strukturgeologisch-geotechnische Detailaufnahmen in einer Vielzahl an Aufschlüssen sowie an ausgewählten Bohrkernstrecken durchgeführt. Zudem wurde auch die baugeologische Dokumentation aus dem 1990 bis 1994 ausgebrochenen Umfahrungstunnel bei Innsbruck, welcher Teil des gesamten Brenner Basistunnelsystems wird, ausgewertet. Ein wesentliches Ergebnis dieser Phase war die Untergliederung des Projektraumes in geologische Homogenbereiche [6]. Die detaillierte Aufnahme von Aufschlüssen im Bereich von Störungen, die bestimmten Systemen zugeordnet werden

konnten, ergab zudem ein Bild zur generellen Ausbildung von Störungen des jeweiligen Systems [7]. Basierend auf den Daten und Ergebnissen aus den Projektphasen I und II wurden im Zuge der Einreich- und Genehmigungsplanung die wesentlichen geotechnischen Prognosen für den Baugrund der verschiedenen Bauwerke erstellt.

4 Geologischer Rahmen für den Erkundungsstollen Innsbruck-Ahrental

Der Erkundungsstollen Innsbruck-Ahrental verläuft zur Gänze im Innsbrucker Quarzphyllit. Dieser ist eine intern verfaltete und vermutlich auch verschuppte ostalpine Einheit am Nordrand des westlichen Tauernfensters. Er grenzt im Süden über eine duktile Scherzone an die Gesteine des Tauernfensters und im Westen über die Brenner-Abschiebung an das Ötztal-Stubai-Kristallin. Im Norden taucht der Quarzphyllit unter die quartären Sedimente des Inntals ab, in dem die Inntal-Störung verläuft. Der Innsbrucker Quarzphyllit besteht zum überwiegenden Teil aus quarzreichen Phylliten (Quarzphylliten), Glimmerschiefern und Quarzitschiefern mit Einschaltungen von Grünschiefern, Marmoren, Orthogneisen und Graphitphylliten. Die volumetrisch weitaus wichtigsten Mineralbestandteile sind Quarz, Glimmer und Chlorit in wechselnden Verhältnissen mit Beimengungen von Feldspat. Daraus ergeben sich die Gesteinstypen Phyllit, Quarzphyllit, Glimmerschiefer und Quarzitschiefer. Im Fall der untergeordnet auftretenden Gesteinstypen treten weitere

calcite, mica and quartz and amphibolites in the green schists. Black phyllites also always contain graphite.

- Gneiss is a coarsely layered crystalline metamorphic rock which was created during the formation of the Alps as a granitic rock mass. The so-called "Central Gneiss" mainly consists of the minerals feldspar, quartz and to a lesser degree mica.
- Granite is a massive crystalline magmatic rock. The finegrained to middle-grained Brixner granite, like gneiss, also consists of feldspar, quartz and to a lesser degree mica, but its structure is not layered.

3 Overview and content of the prospection phases with respect to the geological and geotechnical planning

The geological prospection for the Brenner Base Tunnel took place in several phases. On the basis of existing feasibility studies (including [4]) the most important phase of geological prospection took place from 1999 to 2002 (pre-project phase I). In this phase, more information was obtained concerning the general geology of the project area and its characteristics as a construction site for a deep tunnel. All available existing geological data was gathered and combined. A first deep drilling campaign along the route yielded information on the geological conditions in the deep rock, Structural geological and geotechnical data was recorded on the terrain along the entire route and individual detailed mapping was carried out. Special attention was paid even in this early phase to the location and structure of fault areas [4]. In Project Phase

II, which was the actual planning phase for the final project, numerous deep boreholes were sunk between 2004 and 2006, geological mapping was carried out and structural and geotechnical detailed photographs were made at multiple outcroppings and selected borehole sites [5]. The geological construction documentation from the Innsbruck bypass tunnel, which had been excavated from 1990 to 1994 and is to become part of the entire Brenner Base Tunnel system, was evaluated. An important result of this phase was the subdivision of the project areas in geologically homogeneous areas [6]. The detailed images of outcroppings in the vicinity of faults that can be attributed to certain systems also provided a picture of the general structure of the faults in the various systems [7]. On the basis of the data and the results from project phases I and II, the fundamental geotechnical forecasts for the underground conditions at the sites for the various structures were drawn up during planning for the final and authorization projects.

4 Geology of the Innsbruck-Ahrental exploratory tunnel

The Innsbruck-Ahrental exploratory tunnel runs entirely through the Innsbruck Quartzphyllite rock formation. This is an internally folded and presumably also cracked and chipped eastern Alpine rock mass unit on the northern edge of the western Tauern Window, bordering on the rock masses of the Tauern Window to the south through a ductile shear zone and, to the west, on the Ötztal-Stubai Crystalline complex through the Brenner Fault. To the north, the Minerale hinzu bzw. in den Vordergrund. Es sind dies Kalzit und Dolomit bei den Marmoren, Amphibole bei den Grünschiefern und Graphit bei den Graphitphylliten. Die relevanten Störungssysteme im Innsbrucker Quarzphyllit lassen sich gliedern in das Inntal-, Wipptal-, Halsl- und Ahrental-Störungssystem. Diese Systeme waren bereits aus den Erkundungsphasen bekannt.

5 Geologisch-Geotechnische Dokumentation und Erkenntnisgewinn beim Erkundungsstollen Innsbruck-Ahrental 5.1 Geologisch-geotechnische Dokumentation

Seit Februar 2010 wird der Erkundungsstollen Innsbruck-Ahrental im Sprengvortrieb von Innsbruck aus nach SSE vorgetrieben. Mit derzeitigem Stand (Jänner 2013) sind ca. 4150 Tunnelmeter ausgebrochen. Das entspricht dem Projektkilometer 6+250. Von Juli 2010 bis Oktober 2012 wurde auch der ca. 2400 m lange Zugangstunnel Ahrental in ENE-Richtung vorgetrieben. Der Zugangstunnel Ahrental trifft bei Tunnelmeter 3630 auf den Erkundungsstollen und gehört ebenso zum Erkundungslos Innsbruck-Ahrental.

Der Vortrieb wird gemäß aktuellen Standards baugeologisch dokumentiert, wobei mit der Aufnahme von mindestens jedem zweiten Abschlag eine große Dichte an Daten erhoben wird.

Basierend auf der baugeologisch-geotechnischen Dokumentation (Fotodokumentation, Abschlagsberichte, periodische Berichte, Schlussberichte, Tunnelbänder und Schnitte) wird das bestehende geologische Modell aus der Einreichplanung laufend aktualisiert. Die grundlegenden Dokumente sind in diesem Fall ein horizontaler Schnitt auf Tunnelniveau, auf dem das Streichen der Strukturen und lithologischen Einheiten eingetragen werden und ein Störungskataster. In diesem wird jede relevante Störung erfasst und im Detail beschrieben.

5.2 Erkenntnisgewinn durch den Erkundungsstollen 5.2.1 Geologie

Hinsichtlich des Aufbaus sowie der generellen Position und Lagerung der lithostratigraphischen Einheiten hat sich das Bild aus der Prognose in seinen wesentlichen Zügen bisher bestätigt. Dies gilt auch für das grundsätzliche Auftreten von Störungen der prognostizierten Störungssysteme. Das bedeutet, dass Störungen aller 4 aus den Erkundungsphasen bekannten Systeme im Innsbrucker Quarzphyllit bereits aufgetreten sind. Umgekehrt konnte ein wesentlicher Teil der aufgefahrenen Störungen den Systemen aus der Prognose zugeordnet werden. Dennoch lassen sich inzwischen in mancher Hinsicht auch Abweichungen vom Prognosemodell wie nachfolgend beschrieben erkennen.

a) Lokalisierung konkreter Störungen

In den geologischen Prognoselängsschnitten für den Erkundungsstollen Innsbruck-Ahrental und für den Zugangstunnel Ahrental waren zahlreiche Störungen auf Tunnelniveau prognostiziert worden. Neben der Verschnittposition samt ihrem Schwankungsbereich werden weitere maßgebliche Parameter wie Orientierung,

Quartzphyllite formation folds under the quaternary sediments of the Inn valley, through which the Inn valley fault system runs. Innsbruck Quartzphyllite consists mainly of quartz-rich phyllites (quartzphyllites), mica and quartzite schists with green schist, marble, orthogneiss and graphite phyllite inclusions. From a volumetric point of view, the most important minerals are guartzite, mica and chlorite in varying proportions with the addition of feldspar, resulting in phyllite, quartz phyllite, mica schists and quartzite schists. As for the less frequently encountered types of rock, other minerals may be present or come to the fore. This applies for example to calcite and dolomite in the case of marble, amphibolites in the case of green schists and graphite for the graphite phyllites. The relevant fault systems in the Innsbrucker Quartzphyllite rock mass can be divided into the Inn valley, the Wipp valley, the Halsl and the Ahrental fault system. These systems were already known from the prospection phases.

5 Geological and geotechnical documentation and new information obtained from the Innsbruck-Ahrental exploratory tunnel 5.1 Geological and geotechnical documentation

Excavation of the Innsbruck-Ahrental exploratory tunnel, using blasting, has been moving south-southeast from Innsbruck as of February 2010. At present (January 2013) about 4150 m of tunnel have been excavated, corresponding to km 6+250. The 2400 m long access tunnel in Ahrental was excavated, moving east-northeast, from July 2010 to October 2012. The Ahrental access tunnel meets the exploratory tunnel at TM 3630 and is also part of the Innsbruck-Ahrental prospection lot.

The excavation work is being documented according to current standards from a geological point of view, gathering a large amount of data with images of at least every second volley.

On the basis of the geological and geotechnical documentation (photos, volley reports, periodic reports, final reports, tunnel tapes and profiles) the current geological model from the final project is under constant revision. The basic documents are, in this case, a horizontal profile at tunnel level on which the extent of the structures and the lithological units are recorded, and a fault registry. This document includes every relevant fault with a detailed description.

5.2 Knowledge obtained from the exploratory tunnel 5.2.1 Geology

As regards the structure and the general location and position of the lithostratigraphic units, the main points of the forecast have proven to be correct. This also goes for the faults in the expected fault systems, meaning that faults from all 4 systems mapped during the prospection phase have been encountered in the Innsbruck Quartzphyllite and that a large part of the faults could be assigned to the known and expected systems. However, there have been certain departures from the predicted model.

a) Localisation of specific faults

The longitudinal geological profiles of the forecast for the Innsbruck-Ahrental exploratory tunnel and the Ahrental access



Gegenüberstellung von Prognoselängsschnitt (unten, [8]) und aktualisiertem Längsschnitt nach Ausbruch des 2400 m langen in ENE-Richtung vorgetriebenen Zugangstunnels Ahrental (oben, [9])

Comparison of the longitudinal profile in the forecast (below, [8]) and the updated profile after excavation of the 2400 m long Ahrental access tunnel (above, [9])

Mächtigkeit, Störungsgesteine etc. angegeben.

Für den bereits ausgebrochenen Teil des Erkundungsstollen Innsbruck-Ahrental ist dabei festzustellen, dass - die angegebene Prognose-Unschärfe mitberücksichtigt - nur ein geringer Teil der prognostizierten Störungen an den vorhergesagten Stellen aufgetreten sind. Für den Zugangstunnel Ahrental hingegen konnten einige steil nach W einfallende Störungen des Wipptal-Störungssystems relativ exakt prognostiziert werden (Bild 4). Neben den Störungen, die von der Oberfläche auf Tunnelniveau extrapoliert worden waren, ist hier auch die Störung Pa01-054 zu erwähnen. Diese wurde aus der ca. 300 m entfernten Bohrung Pa-B-01/04s in den Längsschnitt projiziert. Die Orientierung der Störung wurde dabei mittels bohrlochgeophysikalischer Methoden

(Akustik-Log) bestimmt. Die Prognose sah richtigerweise auch vor, dass - neben den vorhergesagten Strukturen - vor allem im westlichen Abschnitt des Tunnels noch weitere Störungen des Wipptal-Systems auftreten werden, die nicht exakt lokalisierbar sind. Abweichungen zwischen der Prognose und den angetroffenen Verhältnissen ergeben sich aus den nicht dokumentierten steilstehenden Störungen im östlichen (rechten) Teil des Prognose-Längsschnitts und nicht aus vorhergesagten flachliegenden Störungszonen. Die beiden Tunnel liegen unter dem östlichen Mittelgebirge südlich von Innsbruck. Das Gebiet weist größtenteils ein sanftes Oberflächenrelief auf. Der Untergrund besteht über weite Bereiche aus quartären Lockersedimenten. Eine intensive anthropogene Überprägung ist im gesamten Bereich

tunnel had predicted the presence of numerous faults at tunnel level, giving the position and inclination of the faults and other important parameters such as orientation, breadth, types of rock in the faults etc.

For the already excavated stretch of the Innsbruck-Ahrental exploratory tunnel, it should be said that - considering the uncertainty of the prediction - only a small part of the predicted faults have occurred where they had been expected. In the Ahrental access tunnel, on the other hand, several faults dipping steeply to the west and belonging to the Wipp valley fault systems were predicted with a fair level of precision (see Fig. 4). Among the faults predicted at tunnel level on the basis of surface data, we should mention fault Pa01-054 which was projected in the longitudinal profile from borehole Pa-B-01/04s at a distance of about 300 m. The direction of the fault was determined using geophysical tests from the borehole (acoustic log). It was also correctly predicted that besides the other structures in the forecast, further faults belonging to the Wipp valley system would appear, especially in the western stretch of the tunnel, for which no precise location could be obtained. Differences between the forecast and the actual conditions occurred with the undocumented steeply dipping faults in the east (right-hand) side of the longitudinal profile and with unexpected flat-lying fault zones.

Both tunnels lie under the eastern Mittelgebirge range south of Innsbruck. On the surface, the area mainly consists of gentle hills. Large parts of the underground consist of quaternary loose sediment. The entire area is intensely anthropized and in the area of the exploratory tunnel it is, in part, densely populated.



Gegenüberstellung von prognostiziertem (links) und aktualisiertem (rechts) Modell der Störungszone SZ-IQP-AS-1. Es bedeuten DZ = Damage Zone, fg = Fault Gouge und prc = Protokataklasit (In beiden Fällen wird eine in westlicher Richtung einfallende Störung dargestellt; die Blickrichtung parallel zum Vortrieb ist in den Darstellungen entgegengesetzt.)

Comparison of predicted (on the left) and updated (on the right) models of the fault zone SZ-IQP-AS-1. Here means DZ = Damage Zone, fg = Fault Gouge and prc = Protokataklasit (Both cases show a west-dipping fault; the point of view parallel to the direction of excavation is reversed)

festzustellen und im Fall des Erkundungsstollens liegt an der Oberfläche teilweise eine dichte Besiedlung vor. All diese Eigenschaften machen eine "möglichst lückenlose" Kartierung der Störungen an der Oberfläche unmöglich.

b) Flache Störungen

Wie bereits erwähnt, wurden im Zugangstunnel Ahrental flach in nordwestlicher Richtung einfallende Störungszonen aufgefahren, die nicht in dieser Art und Weise prognostiziert waren. Die Störungen werden aufgrund der Streichrichtung dem Ahrental-Störungssystem zugerechnet. In der Prognose sieht dieses jedoch mittelsteil bis steil einfallende Strukturen vor. Die mehrfach auftretenden Störungen hatten Core Zone-Mächtigkeiten von annähernd 10 m. Die Störungen des Ahrental-Störungssystems werden von den steilstehenden Störungen des Wipptal-Störungssystems versetzt und lateral abgeschnitten.

Die Prognose flachliegender Störzonen in der Tiefe stellt ein bekanntes Problem bei der Planung von Tunnelbauwerken dar [10]. Wenn an ihnen nicht gerade 2 unterschiedliche tektonische Einheiten aneinander-

grenzen, so sind diese Strukturen an der Oberfläche schwer auszumachen. Der Hauptgrund liegt wohl darin, dass sie im Gegensatz zu den Lineamenten entlang von steilstehenden Sprödstörungen kaum morphologisch in Erscheinung treten. Ihr Ausbiss an der Oberfläche würde bestenfalls eine von Lockermaterial überlagerte, terrassenförmige Verflachung bilden. Im Bereich des äußeren Wipptales mit seinen zahlreichen guartären Terrassen und Geländestufen stellt dies eine nicht identifizierbare Oberflächenform dar. Hinzu kommt der vermutliche Versatz durch die Störungen des Wipptal-Störungssystems. Dadurch werden die flachliegenden Störungen lateral begrenzt und stellen keine markant durchgängigen Strukturen dar.

c) Ausbildung von Störungen und Störungsgesteinen

Die prognostizierten Gebirgsmodelle für die verschiedenen Störungssysteme im Innsbrucker Quarzphyllit sehen abgesehen von den Mächtigkeiten und den Orientierungen alle einen vergleichbaren Aufbau der Störungszonen vor (siehe auch [1]): Sie bestehen aus einer sich verzweigenden Core Zone im For all these reasons, continuous fault mapping from the surface is not possible.

b) Flat-lying faults

As already mentioned, the excavation of the Ahrental access tunnel intersected fault areas that dip gently in a northwest direction and that had not been predicted as such. Due to direction and orientation, the faults were attributed to the Ahrental fault system, in which however structures with a medium to steep dip had been predicted. The core zones of these multiple fault systems were almost 10 m thick. The faults in the Ahrental system are displaced and cut off laterally by the steeply dipping faults of the Wipp valley system.

The prediction of deep flatlying fault zones is a well-known problem in tunnel construction [10]. If 2 different tectonic units do not actually meet in them, then these structures are difficult to predict from the surface. The main reason for this is that in contrast to the outcroppings that appear along steeply dipping brittle faults, there is hardly any apparent morphology. The surface appearance might, at best, be a flattened, terracelike area with loose sediment layers. In the outer Wipp valley, with its many quaternary terraces and different levels of terrain, these structures are unidentifiable from the surface. To this we may add the presumed displacement by the Wipp valley fault system, which border laterally on the flat-lying faults and do not create any marked continuous structures.

c) Structure of faults and fault rock mass

The predicted rock mass models for the various fault systems in the Innsbruck Quartzphyllite all show, besides breadth and orientation, comparable structures of the fault areas (see also [1]). They consist of a branching core zone in the central area, surrounded by damage zones on both sides (Fig. 5). The material of the core zone is given as kakiritic (loose fault breccia) and, to a lesser degree, fault gouges (cohesive fault material). The material in the damage zones is described as "loosened". This shows a markedly increased joint density corresponding to the parameters recorded for the terrain (orientation, distance, length).

In the fault zones intersected during excavation in quartz phyllite, the material in the damage zones is tectonically loosened zentralen Bereich umgeben von Damage Zones zu beiden Seiten (Bild 5). Das Material der Core Zone wird mit Kakirit (= kohäsionslose Störungsbreccie) und untergeordnet Fault Gouge (= bindiger Störungsletten) angegeben. Das Material der Damage Zone wird mit "Auflockerungszone" beschrieben. Dieses zeigt eine deutlich erhöhte Trennflächendichte entsprechend den im Gelände aufgenommenen Parametern (Orientierung, Abstand, Länge).

In den im Quarzphyllit zwischenzeitlich aufgefahrenen Störungszonen besteht das Material der Damage Zones aus tektonisch aufgelockertem Quarzphyllit mit zahlreichen

geringmächtigen Scherbahnen und Harnischflächen. Dies entspricht durchaus der geologisch-geotechnischen Prognose. Deutlichere Abweichungen ergeben sich jedoch in Bezug auf den Aufbau der Core Zones. Diese werden zum überwiegenden Teil aus stark durchbewegtem Phyllit aufgebaut, der geprägt ist durch engständige, meist intensiv und unregelmäßig verfaltete Schieferungs- und Scherflächen und einer deutlichen Entfestigung entlang dieser Flächen. Dieses für den Quarzphyllit typische Störungsgestein kann noch nicht als "lockergesteinsartig" und damit auch nicht als Kakirit angesprochen werden. quartz phyllite with numerous shallow shear traces and slickensides, all of which matches the geological and geotechnical predictions. There are more marked differences however as regards the structure of the core zones. These consist mostly of heavily disturbed phyllite, characterized by close-set, mainly intensely and irregularly folded layer and shear planes with marked loosening along these surfaces. This typical fault rock for guartz phyllite cannot yet be defined "loose rock" and cannot therefore be described as kakiritic. The term "layered protocataclastic rock" is used. It frequently includes several shallow shear traces consisting of fault gouges.

5.2.2 Characteristic rock lines

When taking into consideration the ranges of geotechnical characteristics, several characteristic rock lines result from the calculations, as is shown for the section of the Innsbruck-Ahrental exploratory tunnel. With a rock pressure (supporting pressure) of 1 Mpa, radial displacements of the tunnel wall occur ranging from 2 mm (higher values) to 8 mm (lower values) (Fig. 6).

The deformations measured in the exploratory tunnel are compared to those calculated using the characteristic line method or numerical simulations (Flac 2D and/or 3D). With this approach, the rock mass can be described by model-



6 8,0 7,0 6,0 5,0 Stützdruck [MPa] 4,0 3,0 2.0 1,0 0,0 2,0 0.0 20.0 4,0 6.0 8.0 10.0 12,0 14.0 16,0 18,0 Verformung [mm] -Gebirgskennlinie "niedrige Werte" -Gebirgskennlinie "hohe Werte"

Bandbreite der Gebirgskennlinien beim Innsbrucker Quarzphyllit Range of the characteristic rock line in the Innsbruck Quartzphyllite

Es wird dafür die Bezeichnung "geschieferter Protokataklasit" verwendet. Darin eingeschaltet treten meist mehrere geringmächtige Scherbahnen bestehend aus Fault Gouge auf.

5.2.2 Gebirgskennlinien

Unter Berücksichtigung der Bandbreiten der geotechnischen Kenndaten ergeben sich ganz unterschiedliche Gebirgskennlinien, wie dies beim

Erkundungsstollen Innsbruck-Ahrental aufgezeigt wird. So entstehen bei einem Gebirgsdruck (Ausbaustützdruck) von 1 Mpa radiale Hohlraumverformungen zwischen 2 mm (höhere Werte) und 8 mm (tiefere Werte) (Bild 6).

Die gemessenen Verformungen im Erkundungsstollen werden den durch das Kennlinienverfahren bzw. durch numerische Simulationen (Flac ling and simulation and better evaluated for the main tunnel construction.

6 Knowledge gained from the Aica-Mules exploratory tunnel

The Aica-Mules exploratory tunnel, which is over 10 km long, runs entirely through Brixner granite. Geologically, 18 fault zones were expected but only 8 of these were actually encoun-

tered. Around TM 2560 an unexpected fault was intersected which caused slight deformation and cracks in the segmental lining. The largest fault is the Rio Bianco fault which had been predicted at TM 5830 with a breadth of 50 m. This fault appeared much earlier, between 5760 and 5864 m and was accompanied by numerous water inflows. At TM 6151 an unexpected, roughly 5 m thick fault was encountered running parallel to the tunnel. This fault, though geologically rather unimportant, caused heavy deformation of up to 60 cm in the segmental lining, due to its orientation parallel to the tunnel axis. This brought the TBM to a stillstand for just under 4 months

As for water inflows, the prediction for the Aica-Mules exploratory tunnel was 150 l/s (stabilized) and 290 l/s (maximum). In fact, the trend shows stabilized inflows of 70 l/s The maximum inflows were about 200 l/s.

The prediction for the total water flow from the Mules access tunnel was 25 l/s (stabilized) and 230 l/s (maximum). In fact, the stabilized flow is about 6 l/s and the maximum is about 10 l/s. 180 samples from the Aica ex-



Störzone beim Erkundungsstollen Aicha – Mauls [11] Fault area in the Aica-Mules exploratory tunnel [11]

2D bzw. 3D) berechneten Größen gegenübergestellt. Damit gelingt es ansatzweise durch Modellsimulationen das Gebirge zu beschreiben und für den Haupttunnel gezielter zu bewerten.

6 Erkenntnisgewinn beim Erkundungsstollen Aicha – Mauls

Der über 10 km lange Erkundungsstollen Aicha - Mauls befindet sich zur Gänze im Brixner Granit. Die geologische Prognose sah 18 Störungen vor; davon wurden 8 Störungen angetroffen. Im Bereich bei Tunnelmeter 2560 wurde eine nicht prognostizierte Störung angetroffen, welche geringe Deformationen und Rissbildungen in den Tübbingen verursachte. Die mächtigste Störung ist die Weissenbachstörung, welche bei Tunnelmeter 5830 mit einer Mächtigkeit von 50 m prognostiziert war. Diese Störung trat früher, also bereits bei Tunnelmeter 5760 bis 5864 auf. Sie war begleitet von zahlreichen Wasserzutritten. Bei Tunnelmeter 6151 wurde eine ca. 5 m mächtige zum Tunnel parallel verlaufende nicht prognostizierte Störung angetroffen. Diese geologisch eher unbedeutende Störung verursachte jedoch durch ihre parallele Orientierung zur Tunnelachse starke Deformationen bis zu 60 cm der Tübbinge. Es kam zu einem knapp 4-monatigen Stillstand der Tunnelbohrmaschine.

Für den Erkundungsstollen Aicha - Mauls gab die Prognose 150 l/s (stabilisiert) und 290 l/s (maximal) an. Tatsächlich zeigt der Trend eine stabilisierte Schüttung von 70 l/s. Die maximalen Schüttungen lagen bei ca. 200 l/s.



Verformungen in Abhängigkeit der Zeit Time-dependent deformation

Die Prognosen für den Gesamtwasserabfluss aus dem Fensterstollen Mauls waren 25 l/s (stabilisierte Schüttung) und 230 l/s (maximale Schüttung). Tatsächlich liegt die stabilisierte Schüttung bei ca. 6 l/s und die maximale Schüttung bei ca. 10 l/s.

Aus 180 Proben aus dem Erkundungstunnel Aicha wurde eine Wichte des Gesteins von 2,67 kN/m³ ermittelt. Die einaxiale mittlere Druckfestigkeit beträgt dabei 142 MPa (Standardabweichung 33 MPa). Die Prognose war mit einer mittleploratory tunnel resulted in a specific weight for the rock of 2,67 kN/m³. The medium uniaxial compression resistance was 142 MPa (standard deviation was 33 MPa). and 133 MPa was the predicted value. Medium abrasivity according to Cerchar was 3,87 (standard deviation 0,67).

The Brixner granite showed solid rock mass behaviour. In individual cases, events similar to rock bursts occurred. In the damage zone area of the faults, the rock face was unstable due to additional unfavourable fractured systems. In the core zone areas of the faults there were individual occurrences of heavy overstressing of the rock mass (Fig. 7).

7 Determining rock mass behaviour

With excavation using conventional methods, deformation occurs depending on geological conditions in a first phase after blasting until the first stabilisation measures are put in place. This volumetric deformation and its extent are part of an analysis aimed at improved evaluation of the mechanical behaviour of the lining.

Predictions of rock behaviour (concerning the system as well) are made for an area up to 20 m in front of the current rock face. The tunnel excavation causes the rock to lose tension before the rock face. With measurements in situ (extensometer, inclinometer) the deformations and the pertinent time factors are recorded and compared with the theoretically obtained or predicted values (Fig. 8).



Gemessene Verformungen beim Tunnelvortrieb Richtung Bestandskaverne Deformations measured during tunnel excavation towards the existing cavern ren einaxialen Druckfestigkeit von 133 MPa angegeben. Die mittlere Abrasivität nach Cerchar ergab 3,87 (Standardabweichung 0,67).

Der Brixner Granit zeigt ein standfestes Gebirgsverhalten. In einzelnen Fällen kam es zu bergschlag-ähnlichen Phänomenen. Im Bereich der Damage Zone von Störungen kam es zu instabilen Ortsbrüsten. Diese wurden durch zusätzliche ungünstige Kluftsysteme hervorgerufen. Im Bereich der Core Zone der Störungen kam es vereinzelt zur tiefgreifenden Überbeanspruchung des Gebirges (Bild 7).

7 Erfassung des Gebirgsverhaltens

Beim konventionellen Tunnelausbruch verformt sich das Gebirge je nach geologischer Formation in einer ersten Phase nach der Sprengung bis zur Aufbringung der Erstsicherung. Diese volumetrische Verformung und deren Ausmaß ist Teil einer Untersuchung, um verbessert das mechanische Verhalten des Ausbaues zu definieren.

Die Prognose des Gebirgsverhaltens (auch des Systemverhaltens) wird für einen Bereich bis zu 20 m vor der aktuellen Ortsbrust vorgenommen. Durch den Ausbruch des Tunnels entspannt sich vor der Ortsbrust das Gebirge. Durch in-situ Messungen (Extensometer, Inklinometer etc.) werden die Verformungen und deren zeitliche Komponente erfasst und mit theoretisch ermittelten bzw. prognostizierten Werten verglichen (Bild 8).

Die ersten durchgeführten Messungen ergaben zwar noch nicht wesentliche neue Erkenntnisse; sie helfen jedoch vertiefende sowohl experimentelle in-situ Versuche als auch numerische Vergleichsrechnungen durchzuführen. Es zeigte sich, dass unmittelbar nach der Sprengung die Verformungen sich im Millimeter-Bereich bewegen (Bild 9).

Theoretisch kann die radiale Verformung des Gebirges mit verschiedenen Theorien

Formel 1

$$u_0 = \left(1 + e^{\frac{-L}{1,1 \cdot r_0}}\right)^{-1,7} \cdot u_{max}$$

Dabei bedeuten

- L ungestützte Länge hinter der Ortsbrust [m]
- $u_{_{max}}$ maximale Radialverformung der Gebirgskennlinie [m]

Formel 2

$$u_{(x)} = u_0 + (u_{GG} - u_0) \left(1 - \left(\frac{0.84 \text{ R}_{\text{pl,GG}}}{x + 0.84 \text{ R}_{\text{pl,GG}}} \right)^2 \right)$$

Dabei bedeuten

- u_{GG} Verformung im Zustand des Gleichgewichtes, beim
 Schnittpunkt der Gebirgskennlinie mit der errechneten
 Ausbaukennlinie [m]
- R_{pl,GG} Plastischer Radius im Zustand des Gleichgewichtes [m]

The first measurements did not provide new information; they did however help in carrying out in-depth and experimental tests in situ as well as numerous comparative calculations. It was shown that immediately after blasting deformation was close to a millimetre (Fig. 9).

The radial deformation of the rock mass can be explained by several theories. The u_0 predeformation can be estimated according to Panet by using the formula 1.

The decrease in radial deformation as distance from the rock face increases was estimated with formula 2 by Sulem, Panet, Guenot, 1987.

8 Conclusions

The multiple-phase prospection based on geological surface imaging on the most diverse scales and numerous deep boreholes along the route provided geological models of the rock mass that have so far proven to be correct. In the immediate area of the boreholes, predictions were made with highly precise

details of the conditions deep underground. However, along the route the prediction models have shown highly varying levels of certainty, especially concerning the prediction of specific faults at tunnel level.

For deep-lying long tunnels it is crucially important not only to carry out good surface mapping and prospection drilling but also if possible to excavate an exploratory tunnel. In the case of the Brenner Base Tunnel, this importance has already been demonstrated, as it significantly improves the evaluation of the rock mass and thereby reduces the risk in the further excavation of the main tunnel tubes.

Formula 1

$$\boldsymbol{u}_{0} = \left(1 + e^{\frac{-L}{1,1 \cdot \boldsymbol{r}_{0}}}\right)^{-1,7} \cdot \boldsymbol{u}_{max}$$

Here means

- L unsupported length behind the rock face [m]
- u_{max} maximum radial deformation of the characteristic rock line [m]

Formula 2

$$u_{(x)} = u_0 + (u_{GG} - u_0) \left(1 - \left(\frac{0.84 \text{ R}_{pl,GG}}{x + 0.84 \text{ R}_{pl,GG}} \right)^2 \right)$$

Here means

- u_{GG} deformation in equilibrium where the characteristic rock line meets the calculated characteristic line of the lining [m]
- R_{pl,GG} plastic radius in equilibrium [m]

beschrieben werden. Die Vorverformung u_o kann nach Panet mit Formel 1 abgeschätzt werden.

Die Abnahme der Radialverformung mit zunehmender Entfernung x von der Ortsbrust wurde von Sulem, Panet, Guenot, 1987 mit Formel 2 abgeschätzt.

8 Schlussfolgerungen

Die mehrphasige Erkundung basierend auf geologischen Oberflächenaufnahmen in den verschiedensten Maßstäben und zahlreichen Tiefenbohrungen entlang der Trasse ergab geologische Modelle des Gebirges, die sich bisher als allgemein richtig erwiesen haben. Im Nahbereich der Bohrungen konnten für die Tiefe punktuell sogar Prognosen mit hoher Detailschärfe erstellt werden. Allerdings weisen diese Prognosemodelle entlang der Trasse große Schwankungen hinsichtlich der Prognosesicherheit auf. Dies betrifft besonders die Vorhersage konkreter Störungen auf Tunnelniveau.

Für tiefliegende, lange Tunnel ist es von ausschlaggebender Bedeutung, dass neben einer guten Oberflächenkartierung und Erkundungsbohrungen soweit möglich auch Erkundungsstollen ausgebrochen werden sollten. Beim Brenner Basistunnel hat sich diese Wichtigkeit bereits jetzt bestätigt, da damit eine wesentlich bessere Erfassung des Gebirges und damit ein risikoärmerer weiterer Ausbruch der Haupttunnelröhren möglich ist. \bigcirc

Literatur/References

- Töchterle, A.: Reinhold, C. (in Druck): Ermittlung der geomechanischen Kennwerte von Störungszonen im Innsbrucker Quarzphyllit auf Basis der Erkundungsergebnisse beim Brenner Basistunnel. 19. Tagung für Ingenieurgeologie, 13.-16. März 2013, München
- [2] Bergmeister, K. (2011): Brenner Basistunnel, Der Tunnel kommt. Tappeiner AG, Lana
- [3] Bergmeister, K. (2011): Brenner Basistunnel, Der Tunnel kommt. Tappeiner AG, Lana
- [4] Köhler, M. (1978): Brennerflachbahn, Projekt 1978, Ergebnisse der geologischen Untersuchungen. – Geol. Paläont. Mitt. Innsbruck, 8: 1-99
- [5] BBT EWIV (2001): Geologie, Erkundung, Strukturtektonik, Schlußbericht BBT EWIV. Unveröffentl. Bericht von Brandner, R., Decker, K., Ortner, H., Reiter, F., Bistacchi, A. & Massironi, M., 82 S
- [6] BBT SE (2006): Geologie, D0104, Endbericht. Unveröffentl. Bericht von Brandner, R. & Dal Piaz, G.V., 898 S
- [7] BBT SE (2005): Charakterisierung von Störungszonen, Österreichischer Abschnitt. Unveröffentl. Bericht von Decker, K., Reiter, F. & Brandner, R, 293 S
- [8] BBT SE (2008): Geologischer Längsschnitt, Zufahrtsstollen Ahrental / Blatt E.4.1. Unveröffentl. Plan von Brandner, R., Reiter, F. & Töchterle, A.
- [9] BBT SE (2012): Geologischer Längsschnitt, Zufahrtstunnel Ahrental. Unveröffentl. Plan von Schierl H.
- [10] Bonzanigi, L. & Oppizzi (2006): Low angle fault zones and TBM excavation in Bodio section of Gotthard Base Tunnel. In Simon Löw (Hrsg.), Geologie und Geotechnik der Basistunnels am Lötschberg. vdf Hochshulverlag AG an der ETH Zürich, Zürich
- [11] BBT SE (2009): Erkundungsstollen Aicha, km 6+000 bis km 6+151, Monitoring Bau, Aufhalten TBM pk 6+151, Geologisches Modell. Unveröffentl. Plan von Martinotti, G. & Perello, P.



Wir können es besser. Und wirtschaftlicher.



Rowa vereint hohe Kompetenz im Anlagenbau und langjährige Erfahrung im Untertagebau. Intelligente Gesamtlösungen vom Vortrieb bis zur Deponie sind unser Markenzeichen: Sie garantieren eine überdurchschnittliche Betriebssicherheit und eine hohe Wirtschaftlichkeit.

Wir können es besser – weltweit. Das Vertrauen unserer Kunden beweist es.

Rowa Tunnelling Logistics AG, Leuholz 15, CH-8855 Wangen SZ Telefon +41 (0)55 450 20 30, Fax +41 (0)55 450 20 35 rowa@rowa-ag.ch, www.rowa-ag.ch