

# Ermittlung der geomechanischen Kennwerte von Störungszonen im Innsbrucker Quarzphyllit auf Basis der Erkundungsergebnisse beim Brenner Basistunnel

Determination of the geomechanical parameters from fault zones in the Innsbruck Quartzphyllite based on the exploration results of the Brenner Base Tunnel

Chris Reinhold<sup>1</sup>, Andreas Töchterle<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Galleria di Base del Brennero – Brenner Basistunnel BBT SE, [chris.reinhold@bbt-se.com](mailto:chris.reinhold@bbt-se.com) / [andreas.toechterle@bbt-se.com](mailto:andreas.toechterle@bbt-se.com)

## Zusammenfassung

Das Erkundungsprogramm für den Bau des Brenner Basistunnels umfasste mehrere Phasen. In diesem Beitrag wird das Erkundungsprogramm am Beispiel des nördlichen Teil des Brenner Basistunnels im Bereich der Innsbrucker Quarzphyllitzone vorgestellt. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Geologie und Geotechnik der Störungszonen. Im Zuge des Vortriebes des Erkundungsstollens Innsbruck-Ahrental wurde unter anderem die Störungszone ESI-f2088 durchörtert. Diese Störungszone ist dem regionalen Wipptal-Störungssystem mit nach W und nach E einfallenden Abschiebungen zuzuordnen. Die Störungszone zeigte ein drückendes Gebirge mit lang anhaltenden Verformungen, was schlussendlich auch zum Versagen des Ausbaus führte. Mit Hilfe des Erkundungsstollens konnte sowohl die Lage der Störungszone als auch deren geotechnische Eigenschaften ausreichend genau erfasst werden. Für die Planung der beiden Haupttunnel wurde das geologisch-geomechanische Modell auf Basis der im Erkundungsstollen gewonnen Daten aktualisiert. So kann das geologisch-geomechanische Risiko beim Bau der Hauptrohren erheblich reduziert werden.

**Schlüsselworte:** Brenner Basistunnel, Störungszone, Störungsgesteine, Rückrechnung

## Abstract

The exploration programme for the Brenner Base Tunnel was set up in several phases. This report presents the exploration programme, using the example of the northern part of the Brenner Base Tunnel in the Innsbruck Quartzphyllite area. The report focuses mainly on the geology and geotechnology of the fault zones and also describes the development of geological and geotechnical knowledge in the various exploration phases. During excavation of the Innsbruck-Ahrental exploratory tunnel, the ESI-f2088 fault zone was intersected. This fault zone is part of the Wipptal fault system. Squeezing rock with lasting deformations was present in the fault zone and this subsequently led to the collapse of the structure. Thanks to the exploratory tunnel, it was possible to determine the position of the fault zone and its geotechnical characteristics with sufficient precision and detail. The geological and geomechanical model for the planning of the main tunnels was modified on the basis of the data gained from the exploratory tunnel, thereby significantly reducing geological and geomechanical risks during construction of the main tunnel tubes. The report further presents the method used to obtain the geomechanical values for the fault zones by applying back calculations.

**Keywords:** Brenner Base Tunnel, fault zone, fault rocks, back analysis

## 1 Einleitung

Der Brenner Basistunnel (BBT) ist das Herzstück des neuen Trans European Network (TEN1) Korridors zwischen Berlin und Palermo. Der BBT besteht aus zwei 8,1 m breiten Tunnelröhren, die in einem Abstand von 70 m verlaufen. In Abständen von 333 m verbindet ein Querschlag die zwei Röhren. Die Querschläge dienen in Notfallsituationen als Fluchtweg. Eine Besonderheit des BBT ist der durchgehende Erkundungsstollen. Er befindet sich 12 m unterhalb, mittig zwischen den zwei Haupttunnelröhren und ist mit ca. 6 m Durchmesser kleiner als sie. Die derzeit laufenden Vortriebsarbeiten am Erkundungsstollen sollen Aufschluss über die Beschaffenheit des Gebirges geben und so Baukos-

ten und -zeiten minimieren. Sobald der BBT in Betrieb ist, wird der Erkundungsstollen eine Rolle für die Tunnelentwässerung spielen. Der BBT wird eine Gesamtlänge von 64 km aufweisen. In Innsbruck mündet der BBT in die bestehende unterirdische Eisenbahnumfahrung Innsbruck, die im Anschluss in die neue Unterinntaltrasse übergeht. Die Längsneigung des Basistunnels beträgt 6,7 ‰ auf der Nordseite und 4 ‰ auf der Südseite des Brenners. Derzeit erfolgt u. a. der Vortrieb des Erkundungsstollens Innsbruck-Ahrental welcher zur Erkundung der Innsbrucker Quarzphyllitzone dient. (s. BERGMEISTER 2011)



## 2 Übersicht und Inhalte der Erkundungsphasen in Hinblick auf die geologisch-geotechnische Planung

Die geologische Erkundung für den BBT erfolgte in mehreren Phasen. In diesem Beitrag sollen die wichtigsten Schritte in Hinblick auf die geologisch-geomechanische Planung dargestellt werden. Eine umfassende Beschreibung der geologischen Baugrunderkundung findet sich in BURGER et al. (2007). Aufbauend auf bestehenden Machbarkeitsstudien (u.a. KÖHLER 1978) folgte 1999 bis 2002 die Projektphase I der geologischen Erkundung für den BBT. In der Projektphase I wurde der Kenntnisstand des Projektgebietes in Bezug auf die allgemeine geologische Situation sowie auch hinsichtlich seiner Eigenschaften als Baugrund für einen tiefliegenden Tunnel erweitert. Darauf basierend wurde schließlich eine „Vorschlagstrasse“ festgelegt. 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 strukturgeologisch-geotechnische Geländedaten entlang der gesamten Trasse aufgenommen und einzelne Detailkartierungen durchgeführt. Wichtige Ergebnisse dieser Projektphase in Hinblick auf die geologisch-geotechnische Erkundung waren tektonische Karten über das gesamte Projektgebiet im Maßstab 1:10.000 und 1:25.000, ein geologisches Prognoseprofil entlang der Trasse des BBT, ein Horizontalschnitt, mehrere geologische Querprofile sowie die Erläuterung der Ergebnisse in verschiedenen Berichten. Ein besonderes Augenmerk wurde bereits in dieser Phase auf die Lokalisierung und die Ausbildung von Störzonen gelegt (BBT EWIV 2001). Dabei wurden alle großen Störungen entlang der Trasse beschrieben, alle wichtigen Störungssysteme charakterisiert, regionale Trennflächensysteme definiert und deren Auftreten lokalisiert.

In der Projektphase II (2004 bis 2006) wurden im Auftrag der BBT SE (anfangs noch BBT EWIV) die geologischen Erkenntnisse der vorhergehenden Untersuchungen weiter vertieft und eine weitere Korrektur der Trassenführung vorgenommen. Zahlreiche Tiefbohrungen wurden abgeteuft, geologische Kartierungen im Maßstab 1:10.000 und 1:5.000 durchgeführt und strukturgeologisch-geotechnische Detailaufnahmen in einer Vielzahl an Aufschlüssen sowie an ausgewählten Bohrkernstrecken durchgeführt. Ein wesentliches Ergebnis dieser Phase war die Untergliederung des Projektraumes in geologische Homogenbereiche (BBT SE 2006). Die detaillierte Aufnahme von Aufschlüssen im Bereich von Störungen, die bestimmten Systemen zugeordnet werden konnten, ergab zudem ein Bild zur generellen Ausbildungen von Störungen des jeweiligen Systems. Wichtige Informationen lieferten auch Bohrkern aus Störzonen, deren Orientierung durch bohrlochgeophysikalische Methoden (meist Akustik-Log) ermittelt werden konnte. An den gewonnenen Bohrkernen wurden lithologiebezogen eine große Anzahl geologischer und geotechnischer Laborversuche zur Gesteinscharakterisierung sowie zur Ermittlung der mechanischen Eigenschaften der Gesteine durchgeführt. Für die Ermittlung der mechanischen Eigenschaften der Störungszonen lagen keine ausreichenden Versuchsergebnisse vor, weshalb die geotechnischen Parameter der

Störungszonen in dieser Phase zunächst abgeschätzt werden mussten (vgl. JOHN 2007).

Basierend auf den Daten und Ergebnissen aus den Projektphasen I und II wurden im Zuge der Einreichplanung ab 2006 schließlich geotechnische Prognosen für den Baugrund der verschiedenen Bauwerke erstellt, so auch für den Erkundungstollen Innsbruck-Ahrental (BBT SE 2007). Die definierten Störungssysteme wurden dabei als Gebirgsarten ausgewiesen.

## 3 Geologisch-strukturgeologische Prognose für den Erkundungstollen Innsbruck-Ahrental

Der Erkundungstollen 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 Quarziten mit Einschaltungen von Grünschiefern, Marmoren, Orthogneisen und Graphitphylliten.

Im Einreichprojekt wurden für den Erkundungstollen Innsbruck-Ahrental Störungen folgender Störungssysteme prognostiziert (BBT SE 2007):

- (E)NE-(W)SW-streichende, steilstehende Störungen des Inntal-Störungssystems mit unterschiedlicher Mächtigkeit (SZ-IQP-IT-1 und SZ-IQP-IT-2);
- flach bis mittelsteil nach NNW einfallende Störungen des Ahrental-Störungssystems mit geringer Mächtigkeit (SZ-IQP-A-2);
- NW-SE-streichende, steilstehende Störungen des Halsl-Störungssystems (SZ-IQP-HS);
- nach W und nach E einfallende Abschiebungen des Wipptal-Störungssystems (SZ-IQP-AS) auf welches im Folgenden detaillierter eingegangen werden soll.

## 4 Das Wipptal-Störungssystem SZ-IQP-AS

Als Wipptal-Störung wird meist der spröde Anteil der Brenner-Abschiebung bezeichnet. Bei dieser handelt es sich um eine bedeutende nach Westen einfallende Großstörung am Westrand des Tauernfensters und des Innsbrucker Quarzphyllites mit mächtigen duktilen und spröden Störungsgesteinen. Die eigentliche Wipptal-Störung wird von den Bauwerken des BBT nicht durchörtert. In den angrenzenden geologischen Einheiten treten jedoch verbreitet west- sowie ostfallende Abschiebungen untergeordneter Größenordnungen auf, die kinematisch mit der Wipptal-Störung in Zusammenhang stehen und für den Erkundungstollen (und andere Bauwerke) prognostiziert wurden.

Im Innsbrucker Quarzphyllit sind zwei entsprechende westgerichtete Abschiebungen im Detail aufgenommen worden (BBT SE 2005). Es handelt sich dabei um Störungen mit

Core Zone-Mächtigkeiten von 0,5 bis 0,7 m, einmal ohne Damage Zone und einmal mit einer Damage Zone von 6 m im Hangenden und 2 m im Liegenden der Core Zone. Die Störungen wurden zusammenfassend charakterisiert mit „30 – 40 cm toniger Fault Gouge zwischen Bereichen mit engständigen Harnischflächen, keine Damage Zone ausgebildet“ sowie „Listrische Abschiebung mit 0,2 bis 0,3 m phyllitischem SC'-Scherbandgefüge und 3 cm Clay Gouge“; im zweiten Fall wird auch die Damage Zone mit einer erhöhten Trennflächendichte im Detail beschrieben.

Ergänzt durch weitere Geländebeobachtungen und den Bohrkernaufnahmen, die v.a. auch größere Mächtigkeiten annehmen ließen, wurde daraus das Modell der Störungszone SZ-IQP-AS abgeleitet (s. Abb. 1): Dargestellt wird eine nach Westen geneigte Störungszone im zentralen Bereich mit einer sich verzweigenden Core Zone bestehend aus ca. 2 bis 4 Scherbahnen mit einer Gesamtmächtigkeit von ca. 1 bis 2 m, beidseitig umgeben von Damage Zones mit Mächtigkeiten von jeweils ca. 10 m. Das Material der Damage Zone wird mit „Auflockerungszone“ beschrieben. Es zeigt eine deutlich erhöhte Trennflächendichte entsprechend den im Gelände aufgenommenen Parametern (Orientierung, Abstand, Länge). Das Material der Core Zone wird mit Kakirit (=kohäsionslose Störungsbreccie) und untergeordnet Fault Gouge (=bindiger Störungsletten) angegeben.

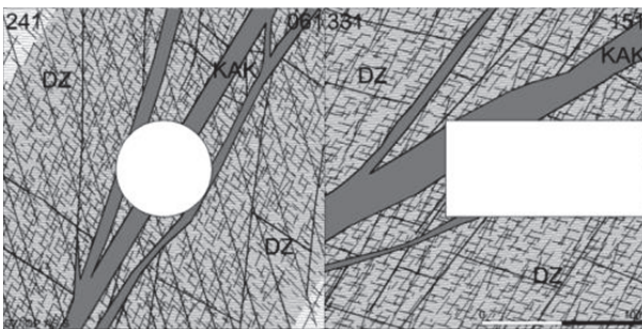


Abb. 1: Gebirgsmodell für die Störungszone SZ-IQP-AS (westfallend) aus den Einreichunterlagen (BBT SE 2007): DZ = Damage Zone, KAK = Kakirit.

Fig. 1: Rock mass model of the fault zone SZ-IQP-AS (west-dipping) from the submission document (BBT SE 2007): DZ = Damage Zone, KAK = kakirite.

## 5 Erkenntnisse aus dem Erkundungsstollen

### 5.1 Erkundungsprogramm

Seit Februar 2010 wird der Erkundungsstollen Innsbruck-Ahrental im Sprengvortrieb von Innsbruck aus nach SSE vorgetrieben. Der Vortrieb wird gemäß aktuellen Standards baueologisch dokumentiert, wobei mit der Aufnahme von mindestens jedem zweiten Abschlag eine große Dichte an Daten erhoben wird.

Geotechnische Verformungsmessungen werden nach dem Stand der Technik in definierten Messquerschnitten ausgeführt. In geotechnisch komplexen Bereichen werden zusätzliche Messquerschnitte zur Beobachtung des Verformungsverhaltens angeordnet.

Des Weiteren werden im Zuge des Vortriebes fortlaufend Gesteinsproben (üblicherweise Haufwerksproben) entnom-

men und im Labor untersucht. Dazu wurden zwei Arten von Standardversuchsserien definiert. Die kleine Versuchsserie kommt bei gleichbleibender Lithologie alle 250 m zur Anwendung. Die große Versuchsserie kommt entweder bei Lithologiewechsel oder alle 1000 m zur Anwendung. Während im Rahmen der kleinen Versuchsserie nur Indexversuche zur Überprüfung der Eigenschaften (Punktlastversuche usw.) ausgeführt werden, werden bei der großen Versuchsserie sämtliche Versuche zur Ermittlung der geotechnischen Gesteinskennwerte (einaxiale Druckversuche, Triaxialversuche, Zugversuche usw.) durchgeführt.

Aufbauend auf der baueologisch-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. Sämtliche neu erkundeten Störungen erhalten eine eindeutige Bezeichnung. Diese besteht aus dem Bauwerkscode und dem Tunnelmeter. Der Störungskataster enthält zumindest Angaben zur Orientierung, Mächtigkeit, Störungsgesteinen, Trennflächensystemen und Hydrogeologie der Störung. Wichtiger Bestandteil sind auch Fotos, Skizzen und Diagramme. Zudem wird untersucht, ob die Störung einem der bekannten Störungssysteme zugeordnet werden kann. Für bautechnisch relevante Störzonen wird zusätzlich eine vertiefte geomechanische Auswertung vorgenommen. Diese umfasst die Auswertung der geotechnischen Messeinrichtungen, die Erarbeitung eines geomechanischen Modells der Störung sowie gegebenenfalls Rückrechnungen zur Verifizierung der geotechnischen Kennwerte.

### 5.2 Störungszone SZ-IQP-AS im EKS Innsbruck-Ahrental

Im nach SSE vorgetriebenen Erkundungsstollen Innsbruck-Ahrental wurden mehrere Störungen des Wipptal-Störungssystems (SZ-IQP-AS) durchörtert. Die bedeutendste davon war eine Anfang 2011 aufgefahrene, nahezu achsparallele mittelsteil nach ENE einfallende Störungszone. Die Störung trat ca. bei Tunnelmeter 1950 extrem schleifend vom linken (östlichen) Kämpfer in Form von relativ diskreten Scherbahnen in den Querschnitt. Sie begleitete dann den Vortrieb, die Scherbahnen wurden zunehmend mächtiger und erreichten ihre maximale Breite ca. zwischen Tunnelmeter 2080 und 2120. In diesem Abschnitt nahm die geneigte Core Zone nahezu die linke obere Hälfte der Ortsbrust ein (s. Abb. 2). Die Störung querte die Tunnelachse nicht, sondern wich wiederum nach links (Osten) zurück und strich schleifend im oberen Bereich des linken Ulms ca. bei Tunnelmeter 2170 aus dem Hohlraum.

Im Störungskataster erhielt die Störung die Bezeichnung ESI-f2088 (ESI = Kürzel für den Erkundungsstollen Innsbruck-Ahrental) und wurde dem Wipptal-Störungssystem zugewiesen. Ihre Orientierung liegt bei 060/55. Die Gesamtmächtigkeit wird mit ca. 12 m abgeschätzt, wobei 4 m davon als Core Zone bezeichnet werden. Da die Störung nur



„gestreift“ und nicht durchörtert wurde, ist die Abschätzung der Mächtigkeiten derzeit noch mit wesentlichen Unsicherheiten behaftet, die durch radiale Erkundungsbohrungen aus dem Hohlraum noch ausgeräumt werden sollen. Das Material der Damage Zone besteht aus tektonisch aufgelockertem Quarzphyllit mit zahlreichen geringmächtigen Scherbahnen und Harnischflächen, durchaus der geologisch-geotechnischen Prognose entsprechend. Deutlichere Abweichungen ergeben sich jedoch in Bezug auf den Aufbau der Core Zone. Entgegen der Darstellung aus den Prognose-Brustbildern (s. Abb. 1) wird die Core Zone zum überwiegenden Teil aus stark durchbewegtem Phyllit aufgebaut. Dieser ist geprägt durch engständige, meist intensiv und unregelmäßig verfaltete Schieferungs- und Scherflächen und einer deutlichen Entfestigung entlang dieser Trennflächen. Dieses Störungsgestein kann noch nicht als „lockergesteinsartig“ und damit auch nicht als Kakirit angesprochen werden. Es wird dafür die Bezeichnung „geschieferter Protokataklasit“ verwendet. Im Zuge der weiteren Vortriebe erwies sich dieses Material als typisches Störungsgestein in verschiedenen Störungen im Innsbrucker Quarzphyllit. Darin eingeschaltet treten mehrere Scherbahnen bestehend aus Fault Gouge mit Mächtigkeiten von jeweils bis ca. 0,1 m auf.

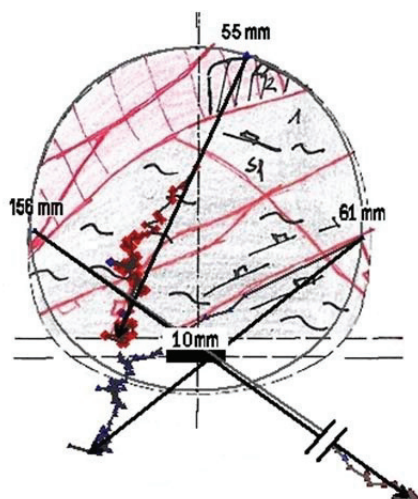


Abb. 2: Geologische Ortsbrustdokumentation und Verformungen im Bereich der Störungszone ESI-f2088 (ostfallend).

Fig. 2: geological face documentation and deformations within the fault zone ESI-f2088 (east-dipping)

Die Überlagerung im Bereich der Störzone ESI-f2088 liegt bei ca. 300 m. Das Gebirge wurde planmäßig mit 18 cm Spritzbeton, einlagig bewehrt, sowie 6,5 Stück/lfm SN-Anker 200 kN mit 3 m Länge gesichert. Die Ortsbrustversiegelung erfolgte mit 5 cm Spritzbeton. Aufgrund der lang anhaltenden, kriechenden Verformungen kam es nach ca. drei Monaten zum Versagen der Spritzbetonschale. Daraufhin wurde im Bereich der Störungszone nachprofiliert, die Anker neu versetzt und die Spritzbetonschale neu aufgebaut. Zusätzlich wurde in diesem Bereich ein Spritzbetonsohlgewölbe eingebaut. Mit diesen Maßnahmen konnten schließlich die Verformungen zum Abklingen gebracht werden. Aufgrund der geologischen-geotechnischen Situation wurde unmittelbar in diesem Bereich ein geotechnischer Messquerschnitt angeordnet (MQ2088). Die Verfor-

mungen bis zum Versagen des Ausbaus im Bereich der Störungszone lagen bei 16 cm am linken Ulm, 5,5 cm in der Firste und 6,1 cm am linken Ulmenmesspunkt. Aus der Verformungsverteilung ist damit deutlich die Lage der Störungszone im Querschnitt zu erkennen (s. Abb. 2).

## 6 Aktualisierung des geologisch-geotechnischen Modells der Störungszone SZ-IQP-AS

Auf Basis der Daten aus dem Erkundungstollen wurde das Modell für die Störungen des Wipptal-Störungssystems aktualisiert. Aufgrund der großen Mächtigkeitsunterschiede der aufgefahrenen Störungen mussten 2 Gebirgsmodelle SZ-IQP-AS-1 und SZ-IQP-AS-2 mit unterschiedlichen Mächtigkeiten entwickelt werden. Das Modell SZ-IQP-AS-1 entspricht dabei der mächtigeren Störungszone und orientiert sich im Wesentlichen an der Ausbildung der Störung ESI-f2088. Während die Gesamtmächtigkeit mit ca. 12 m sogar geringer ausfällt als im ursprünglichen Modell, zeigt nun die Core Zone mit ca. 4 m deutlich größere Mächtigkeiten. Zudem besteht die Core Zone im aktualisierten Modell zum größten Teil aus geschiefertem Protokataklasit, der von geringmächtigen Scherbahnen mit Fault Gouge durchschlagen wird. Kakirit scheint im neuen Prognosemodell nicht mehr auf. Die graphische Darstellung (Abb. 3) zeigt weiterhin eine in westlicher Richtung einfallende Störung mit dem ausdrücklichen Hinweis, dass sowohl west- als auch ostfallende Störungen auftreten.

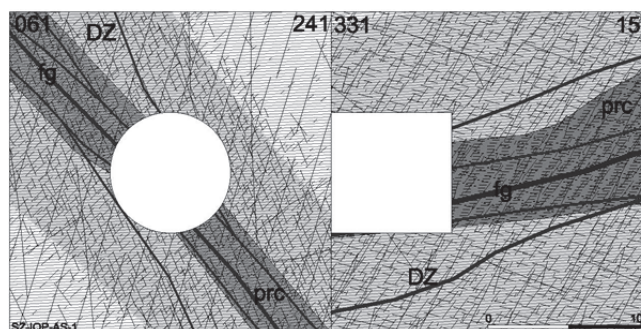


Abb. 3: Gebirgsmodell für die aktualisierte Störungszone SZ-IQP-AS-1 (westfallend): DZ = Damage Zone, fg = Fault Gouge, prc = Protokataklasit. (entgegengesetzte Blickrichtung in Abb. 1)

Fig. 3: Rock mass model of the revised fault zone SZ-IQP-AS-1 (west-dipping). : DZ = Damage Zone, fg = Fault Gouge, prc = Protocataclasite. (opposite viewing direction in fig. 1)

Die geotechnischen Kennwerte wurden an das aktualisierte geologische Modell angepasst. Auf dessen Basis wurden die Verhältnisse im Bereich der Störungszone mit verschiedenen gängigen Berechnungsverfahren nachgerechnet, um schließlich die Gebirgskennwerte zu aktualisieren (Back Analysis). Dazu wurden sowohl Berechnungen mit der Kennlinie als auch 2- und 3-dimensionale numerische Berechnungen durchgeführt. Abbildung 4 zeigt die Kennlinien für die drei Messpunkte im Messquerschnitt MQ2088 sowie die für diesen Querschnitt zugehörige Ausbaukennlinie. Aus den Kennlinien ist sowohl die Verformungsverteilung als auch die Verteilung der Gebirgsqualitäten ersichtlich.

Da mit dem Kennlinienverfahren jedoch verfahrensbedingt das geomechanische Verhalten einer solchen Situation nicht

ausreichend genau nachvollzogen werden kann, wurde das Hauptaugenmerk auf ebene, numerische Berechnungen gelegt (s. Abb. 5 und 6). Dabei wurden verschiedene Materialmodelle zur Abbildung des Gebirges verwendet. Die Core Zone und Damage Zone wurde mit dem Materialmodell nach Mohr Coulomb und isotrop elastoplastischem Materialverhalten abgebildet. Das „intakte“ Gebirge (Innsbrucker Quarzphyllit IQP-1QP-1a) wurde auf verschiedenen Detailierungsebenen modelliert:

- Isotrop elastoplastisches Materialverhalten mit Ansatz der Gebirgsparameter nach Mohr Coulomb, ohne explizite Modellierung der Trennflächen.
- Anisotrop elastoplastisches Materialverhalten mit Ansatz der Gebirgsparameter nach Hoek-Brown, ohne explizite Modellierung der Trennflächen.
- Isotrop / anisotrop elastoplastisches Materialverhalten mit Ansatz der Gesteinsparameter (einschließlich Schieferung) und explizite Modellierung des Trennflächengefüges.

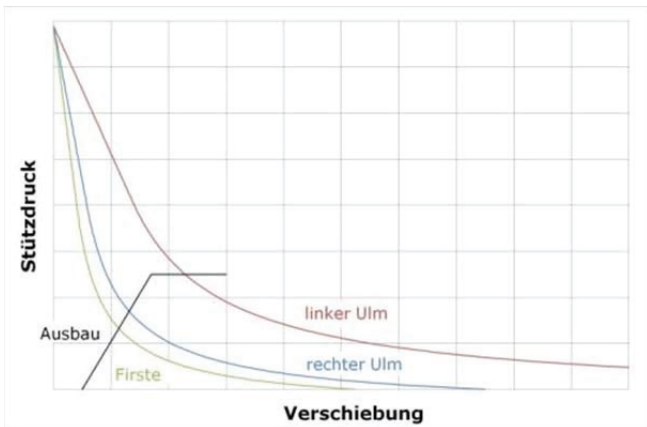


Abb. 4: Kennlinien für die Rückrechnung der Störungzone ESI-f2088

Fig. 4: Support-capacity plots for the back analysis of the fault zone ESI-f2088

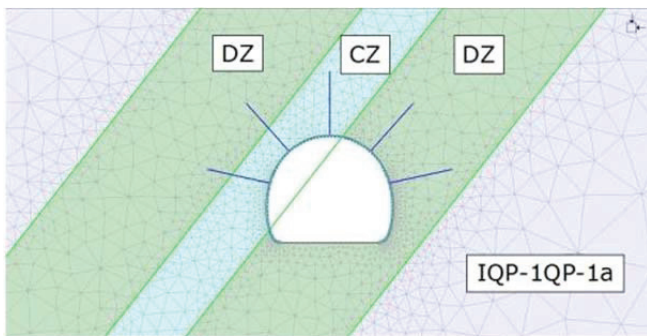


Abb. 5: Ausschnitt aus dem zweidimensionalen numerischen Berechnungsmodell für die Rückrechnung der Störungzone ESI-f2088

Fig. 5: Detail from the two dimensional numerical model for the back analysis of the fault zone ESI-f2088

Die räumlich-numerischen Berechnungen wurden hauptsächlich zur Verifizierung der der Ortsbrust vorausseilenden Verformungen bzw. des Vorentspannungsfaktors für die zweidimensionalen Berechnungen verwendet. Mit den nu-

merischen Berechnungsmodellen konnten die im Erkundungstollen angetroffenen Verhältnisse sehr gut abgebildet werden. Auf Basis der Berechnungen wurden schließlich die geotechnischen Kennwerte der Störungzone adaptiert. Sowohl die Verformungsverteilung, als auch das Versagen des Ausbaus konnten in der Rechnung nachvollzogen werden.

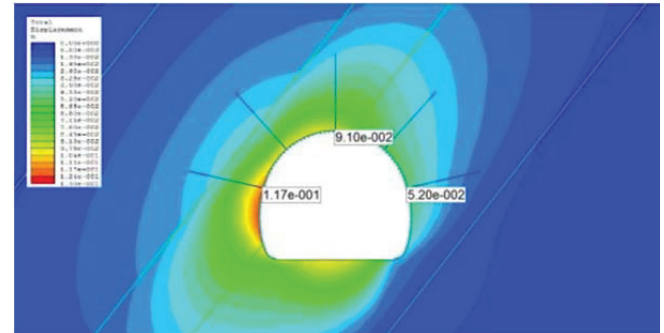


Abb. 6: Plot der Verformungen nach Ausbruch des Hohlraumes im zweidimensionalen numerischen Berechnungsmodell für die Rückrechnung der Störungzone ESI-f2088 (ostfallend)

Fig. 6: Plot of the deformations after excavation of the exploratory tunnel within the two dimensional numerical model for the back analysis of the fault zone ESI-f2088 (east-dipping)

Die Kennwerte für die Störungzone SZ-IQP-AS-1 wurden auf Basis des aktualisierten geologischen Modells und der Rückrechnungen wie folgt angepasst: Die Kennwerte der Damage Zone mussten nach unten korrigiert werden (s. Tab. 1). Dies ist im Wesentlichen im geologischen Aufbau begründet. Während die Damage Zone gemäß Einreichprojekt lediglich als stark geklüftetes Gestein beschrieben wurde, wird diese im aktualisierten geologischen Modell als ausgeprägt gestörtes Gebirge mit zahlreichen Zweigstörungen, erhöhter Klüftigkeit und schieferungsparalleler Entfestigung sowie dem Auftreten von maßgeblichen Anteilen an Störungsgesteinen (Protokataklastit und fault gouge) beschrieben. Das geomechanische Modell der Core Zone wurde dahingehend weiterentwickelt, dass sowohl die Steifigkeiten als auch die Festigkeiten (Kohäsionen) der Störungsgesteine spannungs- bzw. teufenabhängig definiert wurden. Bei geringen Überlagerungen (< 300 m) mussten insbesondere die E-Moduli und die Kohäsionen im Vergleich zum Modell aus dem Einreichprojekt nach unten korrigiert werden, um die gemessenen Verformungen nachvollziehen zu können (s. Tab. 1). Bei der Bewertung des Gebirgsverhaltens mussten nur geringfügige Anpassungen vorgenommen werden. Während im Einreichprojekt die Störungzone SZ-QP-AS in Abhängigkeit vom Gebirgsverhalten des umgebenden Gebirges als GVT3 oder GVT4 eingestuft wurde, wurde die Störungzone SZ-QP-AS-1 nun durchwegs als GVT4 definiert.

Abgesehen von den aus der Kartierung und den Bohrkernaufnahmen bekannten Störungen wurden im Einreichprojekt die zu erwartenden Störungen mit einer Stückzahl einschließlich Streubereich pro definiertem Abschnitt angegeben. Aufgrund der Erkenntnisse aus dem Erkundungstollen kann nun für einen Großteil der Störungen eine exakte Lokalisierung angegeben werden oder zumindest die Stückzahl pro Abschnitt wesentlich genauer abgeschätzt werden.



Tab. 1: Daten und Kennwerte der Störungszone SZ-IQP-AS (gemäß Einreichprojekt) sowie SZ-IQP-AS-1 (nach Aktualisierung anhand der aus dem Erkundungsstollen gewonnenen Erkenntnisse)  
Tab. 1: Specifications and parameters of the fault zone SZ-IQP-AS (according to submission project) and SZ-IQP-AS-1 (after actualisation on the basis of the knowledge gained from the exploratory tunnel)

SZ-IQP-AS gemäß Einreichprojekt		
	Damage Zone	Core Zone
Material	Auflockerungszone, stark geklüftet	Kakirit, (fault gouge)
Mächtigkeit	2 x 10 m	1 m
Orientierung	260 & 80 ± 30 / 55 ± 30	
Verschnittlänge	20 m	
E-Modul	2500 – 5000 MPa	500 – 1000 MPa
Kohäsion	0,5 -1,0 MPa	0,2 – 0,4 MPa
Reibungswinkel	28 -32°	25-28°
GVT	3 bzw. 4	
Erkenntnisse aus dem Erkundungsstollen ↓		
SZ-IQP-AS-1 nach Aktualisierung Anhand der Daten aus dem Erkundungsstollen		
	Damage Zone	Core Zone
Material	Ausgeprägt gestörtes Gebirge mit zahlreichen Zweigstörungen, erhöhter Klüftigkeit und schieferungsparalleler Entfestigung (80%), geschieferter Protokataklasit (15-19%), fault gouge (1-5%)	Geschieferter Protokataklasit, stark entfestigt (80-90%), fault gouge (10-20%)
Mächtigkeit	2 x 4 m	4 m
Orientierung	260 & 80 ± 30 / 55 ± 30	
Verschnittlänge	20 -150 m	
E-Modul bei $h_0$	1500 MPa	400 – 1200 MPa
Kohäsion bei $h_0$	0,5 MPa	0,15 – 0,35 MPa
Reibungswinkel	28°	25°
GVT	4	

Im Folgenden soll noch auf einige Punkte, welche sich im Zuge der Rückrechnungen ergeben haben, eingegangen werden: Die wesentlichen, mit Unsicherheiten behafteten, Einflussfaktoren auf die Rückrechnungen lagen in der richtigen Abbildung des Ausbaus sowie der Erfassung der Vorverformungen. Den maßgeblichen Anteil am Ausbauwiderstand liefert die Spritzbetonschale. Zur genauen Erfassung des Ausbauwiderstandes wurden sämtliche zur Verfügung stehenden Daten ausgewertet. Dabei hat sich gezeigt, dass die gebräuchlichen Ansätze zur Erfassung der Eigenschaften sowohl des jungen als auch des erhärteten Spritzbetons nicht anwendbar waren. Sowohl die Festigkeits- als auch die Steifigkeitsentwicklung des Spritzbetons entsprach kei-

nesfalls bekannter Theorie. Die Festigkeiten des Spritzbetons waren maßgeblich höher als in der Planungsphase angenommen. Gemäß Ausbaufestlegung war ein Spritzbeton SpC20/25 vorgesehen. Die Druckversuche haben Festigkeiten von bis zu 60 MPa ergeben. Gleiches gilt für die Entwicklung des E-Moduls des Spritzbetons. Bereits nach sieben Tagen wurden E-Moduli von ca. 32 GPa und nach 28 Tagen 36 GPa gemessen. Daraus wird ersichtlich, dass die genaue Auswertung der Eigenschaften der Ausbaumittel für die Rückrechnungen von maßgeblicher Bedeutung ist. Dies wurde in den Rückrechnungen entsprechend berücksichtigt.

## 7 Resümee

Auf Basis der intensiven Vorerkundung mit einer hohen Dichte an Detailinformationen wurde ein strukturgeologisches Modell des Gebirges erstellt. Für den bisher aufgefahrenen Teil des Erkundungsstollens hat sich dieses als allgemein richtig erwiesen. Allerdings ergibt sich aus Kartierung und Bohrungen kein lückenloses Modell für den Baugrund in der Tiefe. Insbesondere hinsichtlich der Prognose konkreter Störungen bestehen bei entsprechender Überlagerung große Prognoseunsicherheiten. Durch den Bau des Erkundungsstollens können nun die exakte Lage, die Ausbildung und das geomechanische Verhalten einzelner Störungen wesentlich genauer erfasst werden. Als sehr wertvoll stellte sich in hier die zeitnahe Verschränkung von baueologischer Dokumentation und strukturgeologisch-geotechnischer Modellierung heraus. Durch die Aktualisierung des geologisch-geomechanischen Modells kann das Baugrundrisiko für die Haupttunnel erheblich reduziert werden.

## Literatur

- BBT EWIV (2001): Geologie, Erkundung, Strukturtektonik, Schlussbericht. – Unveröffentl. Bericht von Brandner, R., Decker, K., Ortner, H., Reiter, F., Bistacchi, A. & Massironi, M., 82 S.
- BBT SE (2005): CHARAKTERISIERUNG VON STÖRUNGSZONEN, ÖSTERREICHISCHER ABSCHNITT. – UNVERÖFFENTL. BERICHT VON Decker, K., Reiter, F. & Brandner, R, 293 S.
- BBT SE (2006): Geologie, D0104, Endbericht. – Unveröffentl. Bericht von Brandner, R. & Dal Piaz, G.V., 898 S.
- BBT SE (2007): Gebirgsarten, Gebirgsverhaltenstypen, Störzonen, Erkundungsstollen Innsbruck-Ahrental. – Unveröffentl. Bericht von John, M., 37 S.
- BERGMEISTER, K. (2011): Brenner Basistunnel „Der Tunnel kommt“, 263 S., Lana (Tappeiner AG).
- BÜRGER, U., LOMBARDI, A., MOSHEIMER, H. & SKUK, S. (2007): Brenner Basistunnel – Untersuchungskonzept und Erkundungsmaßnahmen. – BBT 2007, Internationales Symposium Brenner Basistunnel und Zulaufstrecken, Tagungsbeiträge 1. März 2007, 33-43.
- JOHN, M., REITER, F., SKUK, S. & VENTURINI, G. (2007): Geotechnische Aspekte für den Bau des Brenner Basistunnels. – BBT 2007, Internationales Symposium Brenner Basistunnel und Zulaufstrecken, Tagungsbeiträge 1. März 2007, 183-192.
- KÖHLER, M. (1978): Brennerflachbahn, Projekt 1978, Ergebnisse der geologischen Untersuchungen. – Geol. Paläont. Mitt. Innsbruck, 8: 1-99.