

Putting numbers to geology am Beispiel Brenner Basis Tunnel

G. JUNG & D. FELLNER

Einleitung

In den vorangegangenen Beiträgen wurde auf die regionalen geologischen Verhältnisse und insbesondere auf die tektonische Situation eingegangen.

Der Fokus dieses Vortrages ist nur auf einen Teilaspekt der gesamten geotechnischen Bearbeitung des Brenner-Basistunnels gerichtet. Gegenstand dieses Berichtes ist es, den Weg aufzuzeigen, der zur Erlangung der Gebirgskennzahlen beschritten wurde, die eine Gebirgsart definieren. Man könnte dies als „Übersetzung“ der geologischen und tektonischen Beschreibung bezeichnen, wobei auf einzelne ausgewählte Kapitel exemplarisch eingegangen wird.

Der Titel des Vortrages wurde der gleichnamigen Publikation von HOEK entnommen, da er treffend und nüchtern die Kernaufgabe der Geotechniker beschreibt, nämlich dem Bauingenieur Zahlen zur Berechnung zu liefern. Diese Aufgabe ist Teil jeder technischen Projektbearbeitung, obwohl Kritiker davon ausgehen, dass sich die geologischen Verhältnisse nicht in Zahlen fassen lassen. Die Ermittlung dieser Werte erfolgt systematisch und nachvollziehbar. Bezüglich Nachvollziehbarkeit wurde auch in Österreich durch die Herausgabe der Richtlinie für die Geomechanische Planung ein wesentlicher Fortschritt erzielt.

Die geotechnischen Parameter dienen in erster Linie dazu, das Verformungsverhalten des Gebirges abzuschätzen und darauf aufbauend den zweckmäßigen Ausbauwiderstand und somit die Sicherungsmaßnahmen festzulegen. Auf dieser Basis lassen sich dann die Kosten für Ausbruch und Sicherung ermitteln, was auch Sinn dieser geotechnischen Bearbeitung war.

Die große Variabilität der geologischen Verhältnisse sowie die limitierten Informationen erschwerten die Kennwertermittlung. Die Unschärfe der Prognose wird sich mit zunehmendem Erkundungsfortschritt verkleinern.

Die Leitung des geotechnischen Teams bei der Erstellung der Studie erfolgte durch Dieter FELLNER.

Projektphase

Aufbauend auf dem geologischen Wissensstand der Machbarkeitsstudien 1978 und 1987 waren in dieser neuen Projektphase die geologischen Kenntnisse zu aktualisieren, so dass die Tunneltrasse östlich der Brennerfurche lage- und höhenmäßig optimiert werden konnte. In dieser bisher jüngsten Projektphase flossen auch die Ergebnisse der seit dem Jahr 2000 durchgeführten Erkundungsmaßnahmen ein:

Grundlagenermittlung, beteiligte Planungsteams

Im Folgenden werden kurz die Planungsteams genannt, die an der Erhebung der Grundlagen beteiligt waren, auf deren Ergebnissen die aktualisierte Machbarkeitsstudie aufbaut.

Geologische Kartierung

Innsbruck-Pfitschtal: Geologische Bundesanstalt Wien (Projektleitung ROCKENSCHAUB)

Pfitschtal-Franzensfeste: Consorzio CFR (Projektleitung DAL PIAZ)

Strukturgeologie

Institut für Geologie und Paläontologie der Universität Innsbruck (Projektleitung Prof. BRANDNER)

Hydrogeologische Voruntersuchungen

Arbeitsgemeinschaft Starni - ILF - Dierich (Projektleitung STARNI): Hydrogeologische Untersuchungen mit einer Erhebung der Quellvorkommen und Einrichten einer wasserwirtschaftlichen Beweissicherung

Geophysikalische Untersuchungen

Arbeitsgemeinschaft Geophysik GGD-ILF (Projektleitung SCHARF).

Universität Triest (Projektleiter Nicolich)

Ausführung seismischer und gravimetrischer Messungen im Bereich Navis - Pfons sowie in 3 Alpentälern vor allem zur Erkundung der Sedimentmächtigkeit und Beschaffenheit.

Geologische Betreuung der Erkundungsarbeiten

Amann Infutec Darmstadt (Projektleitung SASS)

Überblick über die Erkundungsmaßnahmen

Bisher wurden 9 Bohrungen mit ca. 4000 lfm Länge ausgeführt (Lage siehe Anlage 1), die tiefste Bohrung im Venntal erreichte eine Tiefe von 718 m. Teilweise wurden geophysikalische und hydrogeologische Bohrlochuntersuchungen ausgeführt.

Eine Bohrung in der Nähe von Franzensfeste diente hauptsächlich der Erkundung der Sedimentmächtigkeit im Eisacktal, was zur Beurteilung der Talquerung im Falle einer Westtrasse von Bedeutung ist.

Die anderen 8 Bohrungen waren Mehrzweckbohrungen. Drei Bohrungen wurden im Pfitschtal ausgeführt und erkundeten die Mächtigkeit der sedimentären Talfüllung sowie die unterlagernden Felsbereiche.

Bohrung Pfitsch 1 ergab, dass die Lockersedimente bis auf Tunnelniveau reichen, so dass eine Querung nur weiter östlich erfolgen sollte. In den beiden anderen Pfitschtal-Bohrungen reicht die Talfüllung nicht bis auf Tunnelniveau, so dass die Talquerung im Felsbereich möglich wäre. Dieser besteht hauptsächlich aus steil stehenden, kompakten Glimmerschiefern der Glocknerdecke sowie karbonatischen Gesteinen mit Anhydriteinschlüssen anderer Einheiten, die ein wenig durchlässiges Gebirge erwarten lassen.

2 weitere Bohrungen wurden bei Mauls ausgeführt ebenfalls mit grundsätzlichen Fragestellungen. Diese dienten der Erkundung der räumlichen Erstreckung der tunnelbautechnisch ungünstigen Maulser Trias sowie der periadriatischen Naht.

Die 2 Bohrungen im Venntal und Valsertal dienten der Erkundung der Ausdehnung des Zentralgneises und seiner überlagernden Schichten.

Die Schmirntal-Bohrung diente der Verfolgung der oberflächlich kartierten Schöberspitztrias in Richtung Westen.

Allgemeine Feststellung zum geologischen Kenntnisstand

Wie zuvor erläutert, dienten die bisher durchgeführten Untersuchungen in der Regel der Klärung des geologischen Aufbaues und wurden nicht exakt entlang einer Trasse abgeteuf.

Auch ist die Anzahl der Bohrungen bezogen auf die Tunnellänge von 57 km relativ gering.

Laborversuche an Gesteinen wurden bisher noch nicht durchgeführt.

Geologischer Überblick

Der geplante Brenner-Basistunnel durchfährt die ganze Zentralzone der Ostalpen mit dem sogenannten Tauernfenster. Zudem quert er die Grenzzone Ostalpen/Südalpen und auf 7 km Länge den südalpinen Brixner Granit. Die erwarteten Gesteine sind zu ca. 63% Schiefer und Phyllite, zu ca. 33% Gneise und Granite und zu ca. 4% Karbonate.

Die maximale Überlagerung beträgt ca. 1850 m, die mittlere Überlagerung liegt um 870 m.

Die zentrale ca. 31 km lange Tunnelstrecke liegt innerhalb der Gesteine des Tauernfensters, wobei vor allem zwischen kristallinen Gesteinen in Form von 2 Zentralgneiskernen und Schieferhüllen (Bündnerschiefern) unterschieden werden kann. Das penninische Tauernfenster wird zu beiden Seiten durch ostalpine Einheiten überlagert. Im Norden durch die ca. 15 km lange Quarzphyllitzone. Im Süden durch 2 km mächtige Paragneis-Serien des ostalpinen Kristallin.

Geologisch-tektonische Gliederung

Die wichtigsten tektonischen Einheiten von N nach S sind im Horizontalschnitt (Anlage 2, 3) dargestellt. Dazu nachfolgende ergänzende Bemerkungen:

Innsbrucker Quarzphyllitzone: Sie besteht hauptsächlich aus Phylliten mit wechselndem Quarzgehalt. Die Gesteine sind nördlich des Arztales (Tkm 12.5) deutlich geringer tektonisch durchbewegt als südlich davon. Auf der südlichen Innsbrucker Quarzphyllitzone liegen schüsselförmig die Karbonate des Tarentaler Mesozoikums, die auf Grund der Trassenführung im Tunnel nicht erwartet werden.

Südlich des Navistals verläuft der geplante Tunnel in den Decken des Tauernfensters. Im Liegenden des zunehmend intensiver tektonisch überprägten Südteiles der Innsbrucker Quarzphyllitzone folgt ab Tkm 15 eine komplizierte Schuppenzone, die Matreier Zone oder Nordrahmenzone. Diese Zone endet in den Hängen südlich des Navistales (Tkm 19).

Der Bau des Tauernfensters (Obere Schieferhülle) wird südlich der Nordrahmenzone homogener. Die Hauptmasse der Bündner Schiefer besteht aus nordfallenden Kalkphylliten, Kalkglimmerschiefer, Schwarzphylliten und wenigen Grünschiefern. Die Gesteine der Schieferhülle werden in verschiedene Decken untergliedert.

Im Bereich des Venntales (Tkm 30) dringt der Tunnel in die Zentralgneise des Tuxer Hauptkammes ein und durchfährt diesen auf ca. 6 km Länge. Hier nimmt die Überlagerung bis auf maximal 1850 m zu. Wesentlich hinsichtlich eventueller Wasserführung ist die karbonatische Bedeckung der Zentralgneise nördlich und südlich des Zentralgneiskörpers. Dies trifft auch auf den zweiten zwischen Tkm 41.3 und 42.3 zu durchfahrenden Zillertaler Zentralgneiskern zu. Zwischen beiden ist die Greiner Mulde als eine große von Scherzonen überprägte und verkomplizierte Synklinalform eingeschaltet. Der Gesteinsinhalt dieser Synform ist sehr heterogen und umfasst unter anderem Paragneise, Glimmerschiefer, Furtschagelschiefer, Amphibolite, Serpentine und Talkschiefer.

Die ostalpinen Paragneise im S des Tauernfensters (auch als Komplex Meran-Mauls-Antholz bezeichnet) werden zwischen Tkm 46 und 48 durchfahren und wurden am Südrand durch großtektonische Bewegungen entlang der Periadriatischen Naht stark tektonisch überprägt. Die auflagernde permotriassische Überlagerung - die sogenannte Maulser Trias, die im Bereich Mauls in eingeklemmter Position vorliegt - wird östlich umfahren.

Im Bereich des Maulser Tales grenzen im Bereich der Periadriatischen Naht Ostalpen und Südalpen aneinander und im Oligozän drangen tonalitische Intrusivkörper innerhalb und im Nahbereich dieser Grenzzone ein. Entlang dieser haben großtektonische blockartige Relativbewegungen stattgefunden. Dabei wurden die Gesteine auf eine Breite von ca. 1 km zum Teil intensiv tektonisiert (zerbrochen und zerschert).

Die tektonische Überprägung erfasste nicht nur den Südrand der ostalpinen Paragneise, sondern auch die Randbereiche der oligozänen Tonalitlamelle von Mauls. Gegen Osten zu fächert sich die Periadriatische Naht in 2 geringmächtigere Hauptäste auf.

Die Südalpen bestehen aus dem Brixner Granit permischen Alters, er wird auf eine Länge von ca. 7 km durchfahren.

Während die ostalpinen Gesteine durch die alpinen Gebirgsbildungsphasen in Decken gelegt, übereinander geschoben und dabei durch hohe Drücke und Temperaturen metamorphisiert wurden, trifft dies für den südalpinen Brixner Granit nicht zu

Ansätze der Gebirgsklassifikation

Die geotechnische Prognose basiert auf mehreren Ansätzen. Einerseits auf der Beurteilung von Gefährdungsbildern, andererseits auf via Klassifikationen und Rückrechnungen abgeleiteten Gebirgskennwerten.

Die geotechnische Prognose erfolgte bezogen auf sogenannte Prognoseeinheiten.

Bei der Beurteilung des Gebirges stehen das Erkennen und Bewerten von Gefährdungen, welche sich bei der Erstellung und Nutzung des Bauwerkes ergeben können im Vordergrund. Dies sind:

- Kluffkörperbildungen, vor allem in harten Gesteinen
- Plastische Deformationen vor allem in weicheren Gebirgseinheiten bei entsprechender Überlagerung
- Bergschlag vor allem bei hohen Überlagerungen in wenig geklüfteten Einheiten
- Sand- und Schlammbrüche vor allem in porösen wassergesättigten Gesteinen/Störungen
- Quellendes Gebirge bei Anhydrit oder Störzonen mit quellfähigen Tonmineralen
- Rezente Bewegungen ev. an Störungen

Da bei einem Basistunnel die Überlagerung und damit verbunden die Deformationen einen sehr hohen Stellenwert einnehmen, eignet sich das „Squeezing Potential“ als Schlüsselparameter. Es gibt das prozentuelle Ausmaß der Deformationen im unverkleideten Tunnel an.

Zur Berechnung dieses Deformationsparameters sind die geotechnischen Kennzahlen des Gebirges erforderlich, die teilweise nach standardisierten Klassifikationsmethoden abgeleitet wurden. Teilweise wurden Kennwerte aufgrund von Rückrechnungen von Vergleichsbauwerken festgelegt (Tauerntunnel etc.).

Methoden der Gebirgsklassifikation

Da sich die Methoden der Gebirgsklassifikation auch heute noch rasant weiterentwickeln, sind die gebräuchlichen Methoden weitgehend ähnlich, jedoch sind die Unterschiede in Abbildung 1 dargestellt. Auf geologische Sonderfälle wurde in der Graphik bewusst verzichtet, um das Wesentliche der Vorgangsweisen darzustellen.

Die Eingangsparameter für alle Methoden sind vergleichbar. Es handelt sich im Grunde um:

- Abstand der Trennflächen (= Blockgröße)
- Beschaffenheit der Trennflächen (= Kraftübertragung zwischen Blöcken)

Je nach Methode werden zu einem früheren oder späteren Zeitpunkt folgende Parameter ergänzt:

- Gestein und Gesteinsfestigkeit
- Trennflächenorientierung
- Bergwasser
- Spannungsverhältnisse

Zur Bestimmung der Gebirgskennwerte ist bei allen Methoden die Bestimmung des GSI-Wertes (nach HOEK & BROWN) erforderlich. Diesem kommt daher eine zentrale Bedeutung zu.

Der GSI-Wert wurde ursprünglich durch Korrekturfaktoren aus dem RMR-Wert (BIENIAWSKI) abgeleitet, in jüngeren Publikationen wurde eine Vorgangsweise eingeschlagen, die ausschließlich auf den Eigenschaften der Trennflächen beruht, wie dies in Abbildung 2 dargestellt ist.

Bestimmenden Einfluss auf den GSI-Kennwert haben die Trennflächenbeschaffenheit sowie die Größe, Form und Verband der Kluffkörper.

Gebirgsklassifikation

Schematischer Vergleich der Vorgangsweisen und Eingangsparameter

	Österreichische Richtlinie		BIENIAWSKI	HOEK-BROWN	BARTON
	2001		1989	1980-2002	1974, 2000
Eingangsparameter	Festigkeitskennwerte		Gesteinsfestigkeit		
	Gesteinsbeschreibung (Wechsellagerungen, Mineralbestand,..)		RQD	"structure" (Kluftkörperverband)	RQD
	Korngefüge		Trennflächenabstand	Trennflächenabstand	Trennflächen-scharen
	Gesteinszustand (Alteration, Verwitterung)		Trennflächeneigenschaften	Trennflächeneigenschaften	Trennflächenrauigkeit
	Trennflächenabstand				Trennflächenveränderung
	Trennflächeneigenschaften		Grundwasser		Grundwasser
			Trennflächenorientierung		Spannungsverhältnisse
Ergebnis	Tabelle		RMR	GSI	Q
	maßgebende Eigenschaften		0-100	10-100	0,001-1000
			Gebirgskennwerte c, φ		

GSI	
Laborwerte	Gesteinsdruckfestigkeit
	Gesteinsscherfestigkeit
Ergebnis	Gebirgsart (Gebirgskennwerte)
Zusätzliche Eingangsparameter	Orientierung der Trennflächen und des Bauwerkes
	Spannungsverhältnisse
	Bergwasser
Ergebnis	Gebirgsverhaltenstyp

Abb. 1: Schematischer Vergleich der Gebirgsklassifikation nach nationalen und internationalen Methoden.

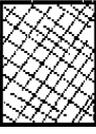
<p>GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS (Hoek and Marinos, 2000)</p> <p>From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Do not try to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than stating that GSI = 35. Note that the table does not apply to structurally controlled failures. Where weak planar structural planes are present in an unfavourable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behaviour. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced if water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis.</p>		SURFACE CONDITIONS				
		<p>VERY GOOD Very rough, fresh unweathered surfaces</p>	<p>GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces</p>	<p>FAIR Smooth, moderately weathered and altered surfaces</p>	<p>POOR Slackensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments</p>	<p>VERY POOR Slackensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings</p>
STRUCTURE		DECREASING SURFACE QUALITY →				
 <p>INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities</p>	90	80		N/A	N/A	
 <p>BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets</p>		70	60			
 <p>VERY BLOCKY- interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets</p>			50			
 <p>BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity</p>			40	30		
 <p>DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces</p>				20		
 <p>LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes</p>	N/A	N/A			10	

Abb. 2: GSI-(Geological strength index)Kennwert für geklüftetes Gebirge nach HOEK & MARINOS (2000)

Herausforderung für die geotechnische Bearbeitung

Aus den zur Verfügung stehenden Daten war das Verhalten des Gebirges mit allen Risiken zu beschreiben, um Grundlage für eine Kostenschätzung zu erhalten.

Im Folgenden soll die Vorgehensweise zur geotechnischen Beurteilung auszugsweise beschrieben werden, um darzulegen, wie auch aus sehr heterogenen Datengrundlagen eine geotechnisch nachvollziehbare Beurteilung der Tunneltrasse abgeleitet werden konnte.

Entscheidende Grundlage der Abschätzung ist dabei die geologische Beschreibung. Zwei entscheidende Fragen stellten sich sofort zu Beginn der Bearbeitung:

- Wie groß oder klein wird ein geologischer Homogenbereich definiert?
- Wie werden die maßgebenden Parameter dieses Bereiches ermittelt?

Abgrenzung der Homogenbereiche/Gliederung der Gesteinseinheiten

Die Definition von Homogenbereichen oder „Gebirgsarten“ im Sinne der Österreichischen „Richtlinie für die Geomechanische Planung“ erfolgte für den österreichischen Teil des Arbeitsgebietes in enger Zusammenarbeit mit der Geologischen Bundesanstalt, die hier die geologische Kartierung ausführte.

Die Gliederung erfolgte für jede geologische Einheit wie in Abbildung 3 exemplarisch (Innsbrucker Quarzphyllit-Einheit) dargestellt, und zwar getrennt für:

- Innsbrucker Quarzphyllit-Zone
- Glocknerdecke = Bündnerschiefer Nord
- Seidlwinkel-Modereckdecke = Schöberspitzen-Kalkwandstangen-Einheit
- Wolfendorndecke und Hochstegenzone mit Permotrias
- Zentralgneis und Altes Dach
- Glocknerdecke = Bündnerschiefer Süd (Italien)
- Ostalpin südlich des Tauernfensters (Permomesozoikum Mauls und Altkristallin)
- Oligozäne Intrusiva
- Brixner Granit

Es erwies sich als notwendig, in einer Gebirgsart (z.B. IQ3) auch mehrere Gesteinstypen zusammenzufassen, da eine genauere Unterteilung durch die Kartierung nicht gerechtfertigt wäre. Es konnte aber das prozentuelle Verhältnis der in dieser Gebirgsart vertretenen Gesteine abgeschätzt werden.

So wurden innerhalb der Innsbrucker Quarzphyllitzone 3 Gebirgsarten definiert, IQ1, IQ2 und IQ3. In der Gebirgsart IQ3 zum Beispiel treten 3 Gesteine mit unterschiedlichen Mengenanteilen und Eigenschaften auf. Dominierender Gesteinstyp ist der zerscherte Quarzphyllit, der zu mehr als 90% die Gebirgsart dominiert. Auf die Beschreibung der Gebirgsart wird im nächsten Abschnitt eingegangen, hier wird jedoch noch die Gebirgsart IQ3a erläutert:

Diese Gebirgsart wurde abgegrenzt, da auf Grund der strukturgeologischen Bearbeitung am Südrand der Quarzphyllitzone eine mächtige Störzone (Miskopf-Störungssystem) erhoben wurde.

tekton. Einheit	lithologisch, stratigraphische Einheit	Nr.in Legende des Horizontal schnittes	Gesteinstyp	Nr. Legende geologische Karte	Gesteinstyp in Gebirgsart %	Gebirgsart
Innsbrucker Quarzphyllit Zone	Innsbrucker Quarzphyllit	4	Quarzphyllit (im engeren Sinn)	52	100	
	hangende Serie mit Grünschiefern	5	Quarzphyllit (im engeren Sinn)	52	80	IQ 1
			Grünschiefer, Chloritschiefer, Amphibolit	48,49	5	
			Porphyroide	50	5	
			Kalkmarmor, Dolomitmarmor, Eisendolomit	45,46,47	10	
	höher metamorpher Anteil	6	Glimmerschiefer, Granatglimmerschiefer (diaphoritisch)	54	90	IQ 2
			Quarzitisch-gneisige Lagen	55	10	
	liegende Serie mit Grünschiefern	7	Quarzphyllit (im engeren Sinn)	52	80	IQ 1
			Grünschiefer, Chloritschiefer, Amphibolit	48,49	5	
			Porphyroide	50	5	
			Kalkmarmor, Dolomitmarmor, Eisendolomit	45,46,47	10	
	Quarzphyllitzone mit alpidisch-tertiärem Gefüge	36	Quarzphyllit zerschert	52	>90	IQ 3
			Marmor	45,46,47	5	
Graphitphyllit			51	<5		
Quarzphyllitzone mit alpidisch-tertiärem Gefüge	36	Quarzphyllit zerschert, Marmor und Graphitphyllit. Stark tektonisch beansprucht im Bereich Mskopf Störung	52	>90	IQ 3a	
			45,46,47	5		
			51	<5		

Abb. 3: Gliederung der Gesteinseinheiten in „Gebirgsarten“ am Beispiel der Innsbrucker Quarzphyllit Zone.

Beschreibung der Gebirgsart und Suche nach maßgebenden Parametern

Um eine Gebirgsart umfassend zu definieren, wurden in einem ersten Schritt die Eigenschaften jedes Gesteinstyps einzeln erhoben, wie dies exemplarisch für den Gesteinstyp „Quarzphyllit zerschert“ in Abbildung 4 dargestellt ist. Im Falle der Gebirgsart IQ3 wurden somit 3 Gesteinstypen analog ausgewertet. Für jeden Gesteinstyp wurden separat die Gesteinseigenschaften im Sinne der Österreichischen Richtlinie dargestellt und zusätzlich die Kennwerte nach BIENIAWSKI (RMR-Wert) und HOEK und BROWN ermittelt.

Im Falle der Gebirgsart IQ3 zeigte sich, dass der Marmor günstigere Eigenschaften als die beiden anderen Gesteinstypen (zerscherter Quarzphyllit und Graphitphyllit) aufwies. Auf Grund des geringen geschätzten Mengenanteils von weniger als 5% wurden die Parameter der dominierenden Gesteinseinheiten zur Definition von IQ3 herangezogen.

In einem anderen Fall, wie zum Beispiel in der Wolfendorndecke, treten in der Kaserer Serie neben den dominierenden Schiefen und Sandsteinen auch die im Tunnelbau sehr schwer zu beherrschenden zuckerkörnigen Dolomite und Rauhwacken auf. In diesem Fall wurden zwei unterschiedliche Gebirgsarten (KA1 und KA2) definiert.

Die in Abbildung 4 dargestellten Gesteinseigenschaften wurden zum Teil aus der geologischen Beschreibung der Gesteine (GBA) und - wo vorhanden - aus Untersuchungsergebnissen abgeleitet, wie dies im nachstehenden Abschnitt dargestellt wird.

All gemeines	tektonische Einheit	Unterostalpin/ Innsbrucker Quarzphyllitzone	
	lithologische und /oder stratigraphische Einheit (entsprechend der Legende des Horizontalschnitts)	Zone mit alpidischem Gefüge und Schollen von Tarntaler Mesozoikum	
	Gesteinstypen (Nummer entsprechend der Legende der Oberflächenkarte)	Quarzphyllit zerschert (52)	
	Prozentsatz % von Gesteinstypen im Gebirgstyp	95	
	Gebirgstyp	IQ 3	
	Länge (m)	2700	
	Überlagerung	550-1100	
	Tunnel orientierung, azimut (°)	330	
Gesteins typ	geologische Beschreibung:	Phyllit, feinkörnig, linsig-flatschig	RMR
	Gesteinstyp	Quarzphyllit zerschert	
	Mineralbestand (Härteskala nach MOHS)	Qz, Sericit, Ab, Chl, ev. Sulfides	
	Wassereinfluß auf Festigkeit	ja	
	tektonische oder hydrothermale Veränderung	nein	
Trenn flächen	Vorhandensein von Schieferung, Klüften und Tektonisierung	2 Schieferungen, Klüfte, tw. tekton.	
	Schieferung/Schichtung: Orientierung	320/45	
	Schieferung/Schichtung: Trennflächenabstand mm	<60 mm	3
	Schieferung/Schichtung: Beläge, Füllungen	weiche Füllung	2
	Schieferung/Schichtung: Form	wellig	
	Klüfte: Zahl der wichtigen Scharen die gleichzeitig vorhanden sind	viele Scharen -gestört	
	Klüfte: Orientierung (main set)	Streichrichtung N-S, Einfallrichtung 60- 75° Ost oder West oder subvertikal	
	Klüfte: Form (eben, wellig...)	glatt	
	Klüfte: Trennflächenabstand (m) gemäß RMR	2-3cm	
	Klüfte: Länge (m) gemäß RMR	1-3m	4
	Klüfte: Öffnung (mm) gemäß RMR	no	6
	Klüfte: Rauheit gemäß RMR	smooth	1
	Klüfte: Beläge, Füllungen	nein	
	Klüfte/ Schieferung: Verwitterung	nein	6
	Orientierung der Haupttrennflächen relativ zu Tunnelorientierung	Schieferung sehr günstig bis günstig (Vortriebsrichtung?)	-3
Bedeutung Schieferung zu Klüften	Schieferung dominant		
Oberflächenbeschaffenheit gemäß HOEKS GSI Tabelle	poor		
Klüftigkeit/ Zerlegung	RQD	0-17	3
	Blockform (Müller)	zerschert, säulig	
	Blocklänge (m) des typischen Blocks (min/max)	<10cm	
	geologische Struktur nach HOEK (blocky, very blocky,...)	blocky -disturbed (> 3 sets)	
Klassi fikation	GSI Schätzung entsprechend Feldbeobachtungen gemäß HOEK's Tabelle für Festigkeitsschätzungen	35	
	GSI calculated: (RMR' -5)	37	
	RMR' (Grundwasser: trocken =15, keine Korrektur für Trennflächenorientierung)	42	
	RMR (Bewertung nach BIENIAWSKI 1989)	poor (IV)	28
Gesteins parameter (Labor, Literatur)	einachsiale Druckfestigkeit [MPa] geschätzt nach Feldbeobachtungen (andere Projekte)	<25 (15 Inntal tunnel)	2
	Festigkeitsanisotropie	hoch	
	Reibungswinkel (°)		
	Kohäsion (MPa)	4-3 (Inntaltunnel)	
	mi (geschätzt) HOEK und MARINOS 2000	7	

Abb. 4: Beschreibung des Gesteinstyp „Quarzphyllit zerschert“

Ableitung der maßgeblichen Parameter aus den Untersuchungsergebnissen

Im Folgenden werden Beispiele für die Ermittlung einiger ausgewählter Gebirgseigenschaften präsentiert. Auf die Beschreibung der hydrogeologischen und geothermischen Untersuchungen wird im Rahmen dieser Publikation verzichtet. Allerdings ist eine Übersicht der hydrogeologischen Verhältnisse in Abbildung 4 und 5 dargestellt.

Im Fall des Innsbrucker Quarzphyllits standen keine Bohrungen zur Verfügung, so dass vor allem auf die Gesteinsbeschreibung der Kartierung zurückgegriffen wurde. Zusätzlich flossen aber auch die Erfahrungen aus anderen Projekten (Inntaltunnel) ein, die in der gleichen geologischen Einheit ausgeführt wurden.

Für manche geologische Einheiten standen Bohrergebnisse zur Verfügung (Abbildung 5), die auch statistisch ausgewertet wurden (Abbildung 6). Aus den geophysikalischen Bohrlochversuchen konnten neben zahlreichen anderen Gebirgseigenschaften auch die Trennflächenabstände (Abbildung 7) mittels akustischem Bohrloch Televiever bestimmt werden.

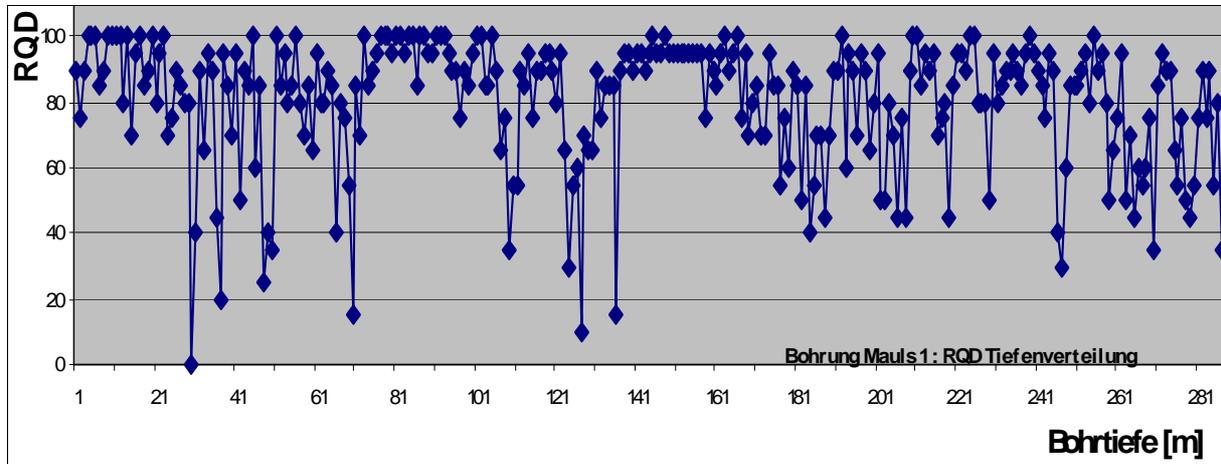


Abb. 5: RQD-(Rock quality designation Index)Tiefenverteilung der Bohrung Mauls 1

Bohrung	Geologische Einheit	RQD		Verwitterungsklassen					Karst
		Durchschnitt	Standard Abweich.	1	2	3	4	5	
				unverwittert	unverwittert-angewittert	an-gewittert	mäßig-stark verwittert	vollständig verwittert	
				%	%	%	%	%	%
Pfitsch 2	Glocknerdecke, Bündnerschiefer und Ophiolit	81	24	79	12	9	0	0	
Pfitsch 1	Glocknerdecke, Seidlwinkel Modereckdecke	75	20	60	33	7	0	0	
Vals 1	Kaserer Serie, Untere Schieferhülle	84	21	89	6	4	1	0	
Mauls 2	Zone:Meran-Mauls-Antholz	45	26	58	0	16	5	21	
Mauls 1	Trias von Mauls	80	20	65	16	19	0	0	38
Schmirntal	Bündnerschiefer	91	4						
Venntal	Zentralgneis und Altes Dach	86	17						

Abb. 6: Übersichtstabelle der Bohrkernauswertung

Bohrung	Nummer	Tiefe	Trennflächenabstand	Geologische Einheit
		[m]	[cm]	
Venntal	Ve-B-01/00	080-154	20-50	Hochstegen (verkarstet, Spülverluste)
Venntal	Ve-B-01/00	154-256	ca. 50	Zentralgneis
Venntal	Ve-B-01/00	256-430	60-200	Zentralgneis und Amph. = Altes Dach
Venntal	Ve-B-01/00	430-480	20-50	Zentralgneis und Amph. = Altes Dach gestört
Venntal	Ve-B-01/00	480-582	60-200	Zentralgneis und Amph. = Altes Dach
Venntal	Ve-B-01/00	582-718	60-200	Zentralgneis

Abb. 7: Trennflächenabstand in der Bohrung Venntal, dokumentiert mit dem akustischem Bohrloch Televiever.

Klassifikation ohne direkte Aufschlüsse

In diesem Abschnitt soll kurz beleuchtet werden, dass auch ohne dem Vorhandensein von direkten Aufschlüssen eine relative Klassifikation erstellt werden kann.

In Abbildung 8 ist ein Ausschnitt der Legende des geologisch-geotechnischen Längsschnittes gezeigt, wobei farblich hervorgehoben ist, welche Arbeitsgruppe die Daten dafür erarbeitet hat.

GEOLOGIE	Lithologie, Gesteine	4	Tektonische Haupteinheit	Geologische Bundesanstalt		
		5	Tektonische Einheit			
		6	Tektonische Untereinheit			
		7	Lithologische und/oder stratigraphische Einheit			
		8	Lithologischer Kontakt [Tunnelmeter]:			
		9	Vorkommende Gesteine [Legendennummer]			
		10	Vorkommen von - bis Tunnelmeter (Streubereich)			
		11	Verschnittlänge im Tunnel (m) wahrscheinlich			
		12	Schieferung Typ/Orientierung (Fallrichtung/Neigung)			
		13	Prognoseunsicherheit des Gebirgsbaues			
		Störungen und Störungszonen	14		Störzonenmitte mit Prognoseunsicherheit	Universität Innsbruck / Institut für Geologie und Paläontologie
			15		Tunnelkilometer	
			16		Störungsnummer entsprechend den tektonischen Karten	
	17		Störungsname			
	18		Störzonenmitte bei Tunnelmeter (Weströhre)			
	19		Charakterisierung der Störungsgesteine			
	20		Orientierung: Fallrichtung / Neigung			
	21		Gesamtmächtigkeit / Verschnittlänge im Tunnel (m)			
	22		Anteil Störungsgesteine in %			
	23		Neotektonische Aktivität <small>active=a</small>			

Abb. 8: Ausschnitt aus der Legende des geologisch-geotechnischen Längsschnittes mit Darstellung der Herkunft der Eingangsdaten.

Aus diesen Daten war in einem weiteren Schritt die geotechnische Relevanz der Störungen zu bestimmen, also bei welchen Störungen mit Schwierigkeiten beim Tunnelvortrieb zu rechnen ist. Zu diesem Zweck wurden den in der strukturgeologischen Bearbeitung verwendeten Störungsbezeichnungen geotechnische Begriffe zugeordnet (Abbildung 9).

unbekannt	0
Zone erhöhter Klüftigkeit	1
Zerrüttungszone	2
Kakirit	3
Karsterweiterung der Störung möglich	4
Störungslehm	5
Kataklasit	6
Mylonit	7
Scherbandgefüge	8
stark verfaltete Zone	9
Locker - Gestein	
Zone erhöhter Klüftigkeit	
Fest - Gestein	

Abb. 9: Legende zur näheren Bestimmung der Störungsgesteine (Zeile 19 des geologisch-geotechnischen Längsschnittes) sowie Zuordnung zu Fest- oder Lockergestein.

Hinsichtlich der Relevanz von Störungen beim Tunnelbau ist neben den geotechnischen Eigenschaften vor allem die Mächtigkeit der Störzone und die Länge des Auftretens dieser Zone im Tunnel (bestimmt durch Streichrichtung) maßgebend. Daher wurden zur Beurteilung der geotechnischen Relevanz von Störungen diese Faktoren kombiniert und 4 Klassen gebildet, die auch im Längsschnitt, Zeile 34, dargestellt wurden. Die Definition der Klassen ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

Störungen: Geotechnische Relevanz	Z 34
gering, lässt sich durch einen leicht bis mäßig erhöhten Sicherheitsaufwand beherrschen	
mittel, die Störzone erhöht vermutlich den Sicherheitsaufwand	
hoch, die Störzone erhöht vermutlich den Sicherheitsaufwand und führt zu kurzen Vortriebsunterbrechungen	
sehr hoch, die Störzone bedingt vermutlich eine längere Unterbrechung des Vortriebes, um das Gebirge zu verfestigen/dränieren. Sondermaßnahmen erforderlich	

Abb. 10: Geotechnische Relevanz von Störungen

Prognoseeinheiten

Die Gliederung des Gebirges erfolgte in Gebirgsarten (z.B.: IQ1, IQ2, ...), die die kleinste sinnvoll unterscheidbare Einheit bei der Tunnelklassifikation darstellen. In der Regel entspricht daher eine Gebirgsart einer Prognoseeinheit im Tunnel. Im Nordabschnitt wurden die Prognoseabschnitte mit N1-N19 und im Südabschnitt mit S1-S25 bezeichnet.

Gebirgsart und Gebirgskennwerte

Für jede Gebirgsart (Abbildung 11) wurde die Bandbreite der RMR- und GSI-Werte ermittelt, wobei letztere sowohl nach der Graphik in Abbildung 2 ($GSI_{estim.}$) geschätzt als auch nach BIENIAWSKI ($GSI_{calc.}$) berechnet wurden.

Bezüglich Gesteins-Druckfestigkeit (UCS_{rock}) und -Scherfestigkeit (m_i) lagen nur wenige Laborwerte vor, sodass vorwiegend Vergleichsdaten verwendet wurden. Es wurden Referenzprojekte in vergleichbaren geologischen Einheiten ausgewertet und mit Literaturdaten verglichen.

In einer nächsten Erkundungsphase werden Laborwerte die getroffenen Annahmen präzisieren.

Nachdem aus der Bandbreite der Gesteinskennwerte die Planungskennwerte („design parameter“) definiert wurden, können daraus die Gebirgskennwerte (c, ϕ , E-Modul und Gebirgsdruckfestigkeit UCS) nach HOEK berechnet werden, wie dies exemplarisch in Abbildung 12 zu sehen ist.

Die dargestellten Gebirgsparameter sind ihrerseits wieder Grundlage für weiterführende Berechnungen, wie zu Beispiel das Deformationsverhalten des Gebirges unter den gegebenen Spannungs- und Grundwasserverhältnissen. Diese Berechnungen wurden gemeinsam von Dieter FELLNER und Miroslav MARENCE ausgeführt. Die Deformationsprognosen wurden mit Erfahrungswerten aus Vergleichsbauten verglichen und gegebenenfalls angepasst. Bei stark anisotropem Gebirgsverhalten zeigte sich, dass die via GSI-Ansatz hergeleiteten Kennwerte teilweise zu günstige „optimistische“ Parametersätze ergaben. Auf diese weiterführenden Berechnungen wird im Rahmen dieses Vortrages nicht näher eingegangen.

Prog. einheit	Start	Ende	Länge (m)	tektonische und geologische Einheit		Gebirgsart	Anteil an Prognose einheit %	RMR	GSI calc.	GSI estim.	mi	UCS rock [MPa]
N1	1.320	3.200	1.880	Innsbrucker Quarzphyllit	Hängende und liegende Serie	IQ1	100	53-60	63-71	65	10-12	30-50
N2	3.200	9.200	6.000	Innsbrucker Quarzphyllit	Hoher metamorpher Anteil	IQ2	100	48-57	57-66	65	12-15	30
N3	9.200	12.000	2.800	Innsbrucker Quarzphyllit	Hängende und liegende Serie	IQ1	100	53-60	63-71	65	10-12	30-50
N4	12.000	14.700	2.700	Innsbrucker Quarzphyllit	Zone mit alpidischem Gefüge	IQ3	100	15-28	36-37	25-35	7	15
N4b	14.700	15.200	500	Innsbrucker Quarzphyllit	Zone mit alpidischem Gefüge im Bereich Miskopfstörung und Basis Unterostalpin	IQ3a	100	15		25	7	10
N5b	15.200	16.100	900	Glockner Decke Nordteil	Nordrahmenzone; / Bereich Miskopfstörungssystem und Grenze zu Unterostalpin	GN3a	100	15		25	7	10
N5	16.100	19.400	3.300	Glockner Decke Nordteil	Nordrahmenzone	GN3	100	15-33	42	35	7	1-10
N6	19.400	20.250	850	Glockner Decke Nordteil	Bündnerschiefer	GN1	100	44-48	55-66	45-65	10-12	30-50
N7	20.250	20.850	600	Glockner Decke Nordteil	Schwarzphyllite	GN2	100	25	35	25	7	1
N8	20.850	23.930	3.080	Glockner Decke Nordteil	Bündnerschiefer	GN1	100	44-48	55-66	45-65	10-12	30-50
N9	23.930	24.600	670	Glockner Decke Nordteil	Schwarzphyllite	GN2	100	25	35	25	7	1
N10	24.600	25.870	1.270	Glockner Decke Nordteil	Bündnerschiefer	GN1	100	44-48	55-66	45-65	10-12	30-50
N11	25.870	25.970	100	Seidwinkel-Modereckdecke	Dolomit, Marmor, Quarzit, Sandsteine, Rohwacke (<5%)	SM1	100	52-57	66-72	50-70	12-17	100-150
N12	25.970	27.000	1.030	Glockner Decke Nordteil	Bündnerschiefer	GN1	100	44-48	55-66	45-65	10-12	30-50
N13	27.000	27.050	50	Seidwinkel-Modereckdecke	Dolomit, Marmor, Quarzit, Sandsteine, Rohwacke (<5%)	SM1	100	52-57	66-72	50-70	12-17	100-150
N14	27.050	28.250	1.200	Glockner Decke Nordteil	Bündnerschiefer	GN1	100	44-48	55-66	45-65	10-12	30-50
N15	28.250	28.300	50	Seidwinkel-Modereckdecke	Dolomit, Marmor, Quarzit, Sandsteine, Rohwacke (<5%)	SM1	100	52-57	66-72	50-70	12-17	100-150

Abb. 11: Gebirgsarten und ermittelte Gebirgskennzahlen.

		Gestein						Gebirge					
		BIENIAWSKI	HOEK & BROWN	HOEK & MARINOS	Literatur (HOEK)	Literatur (divers)	ausgewählte Berechnungsannahmen			Gebirgskennwerte ermittelt von GSI- Ansatz			
Prog. Einheit	Gebirgsart	RMR	GSI calc.	GSI estim.	mi	UCS rock [MPa]	UCSi design	mi design	GSI design	c [Mpa]	phi [°]	UCS [MPa]	E [GPa]
N1	IQ1	53-60	63-71	65	10-12	30-50	35	10	65	2,1	35	8,0	14,0
N2	IQ2	48-57	57-66	65	12-15	30	40	12	65	2,5	37	10,0	15,0

Abb. 12: Mittels GSI-Ansatz ermittelte Gebirgskennwerte

Schlussbemerkungen

Die bisher beschriebene Vorgehensweise zeigte den Schritt von der Feldaufnahme und der Dokumentation verschiedener Aufschlussmethoden bis zur Definition von Gebirgsparametern.

Es wird ersichtlich, dass je nach Projektstatus nicht immer nur auf Messwerte, sondern oft auch auf Vergleichswerte der Literatur zurückgegriffen werden muss.

Es wird auch deutlich, dass schematisiertes Beschreiben und Klassifizieren des Gebirges einen erfahrenen Geologen nicht ersetzt, sondern diesen nur unterstützt. Insbesondere für sehr tief liegende Tunnel - wie den Brenner Basis Tunnel - ist die Ermittlung von Gebirgskennwerten nicht durch Erfahrung zu kompensieren, sondern der einzige Weg zu einer nachvollziehbaren Planung.

Wenngleich im Rahmen der neuen geotechnischen, hydrogeologischen und geothermischen Prognose der Schritt zur Quantifizierung vollzogen wurde, bestehen aufgrund von Informationsdefiziten lokal erhebliche Unsicherheiten. Zu deren Behebung wurde ein umfangreiches Untersuchungsprogramm vorgeschlagen, über das in einem separaten Beitrag informiert wird.

Referenzen

- BIENIAWSKI, Z.T. (1989): Engineering rock mass classification. - Wiley, New York, 1989.
HOEK, E. (1998): "Putting numbers to geology - an engineer's viewpoint". - The second Glossop Lecture.
HOEK, E. & MARINOS P. (2000): Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogenous rock masses. - Tunnels and Tunnelling, Nov. & Dez. 2000.
Richtlinie für die Geomechanische Planung von Untertagebauarbeiten. Österreichische Gesellschaft für Geomechanik 2001.

Anlagen

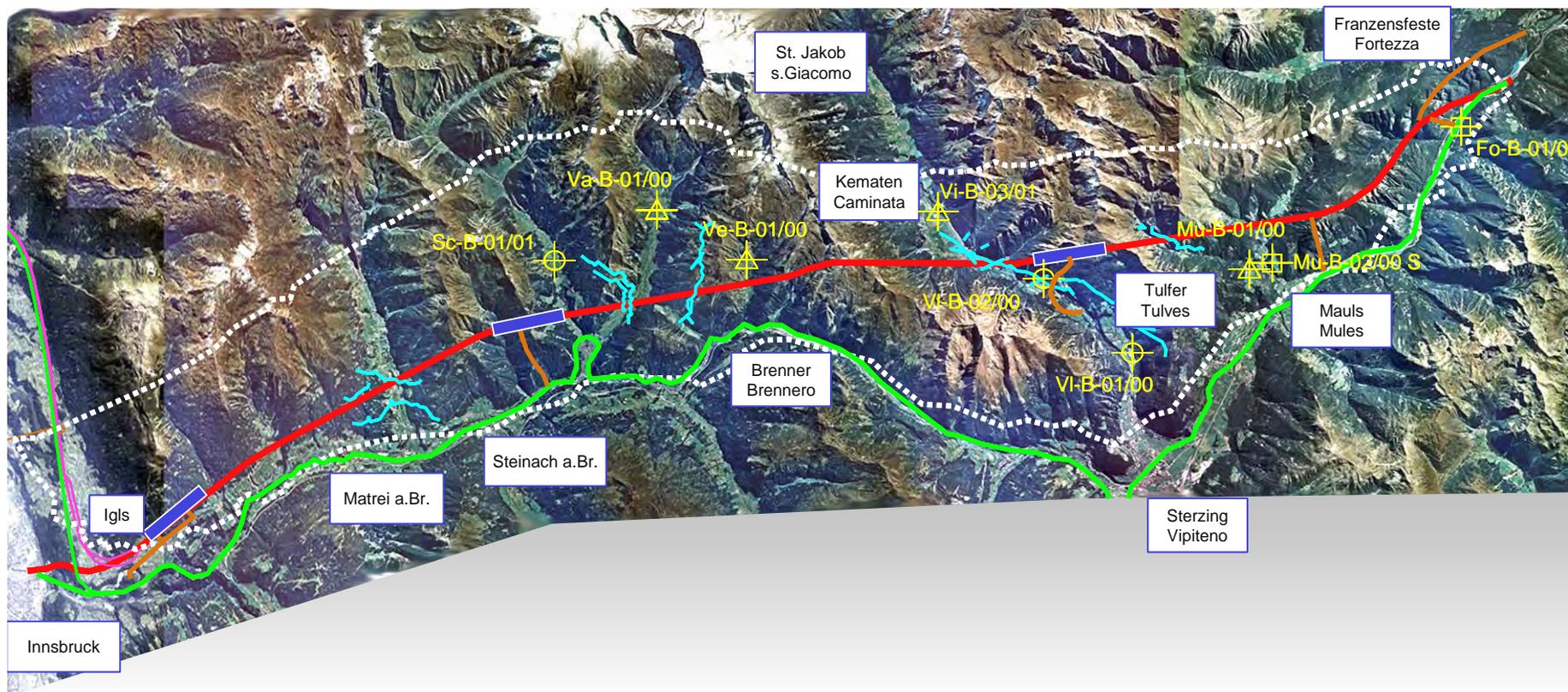
- Anlage 1: Lageplan der Erkundungsbohrungen
Anlage 2: Geologischer Horizontalschnitt auf Tunnelniveau (als Beilage)
Anlage 3: Geologischer Längsschnitt
Anlage 4: Hydrogeologischer Lageplan
Anlage 5: Hydrogeologischer Lageplan mit Wassereintrichsrisiko

Anschrift der Verfasser

Dr. Gerald JUNG: Verbundplan/ Leiter der Gruppe Geologie, Rainerstraße 29, A-5020 Salzburg.
Mag. Dieter FELLNER: Electrowatt Infra AG/Geotechniker Alptransitteam, CH-Zürich.

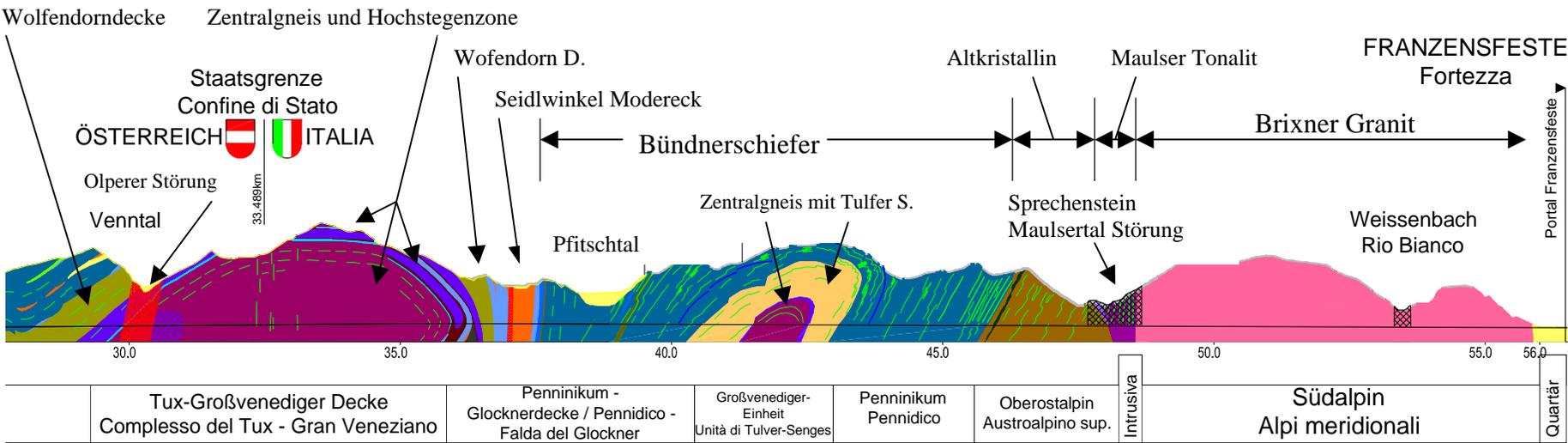
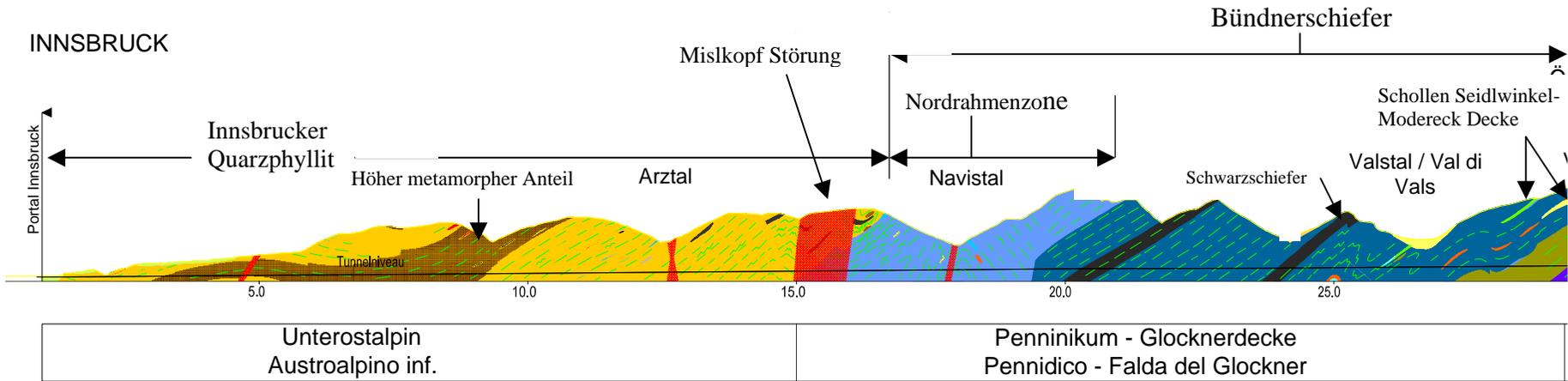
Geologische Erkundungen Indagini geognostiche

- Bestand / Linea esistente
- Neubaustrecke / Linea nuova
- MFS u. MFB / PMF e SMF
- Verbindungstunnel Innsbruck
- Collegamento circonvallazione di Innsbruck
- Zufahrtstunnel u. Zwischenangriff
- Galleria d'accesso e attacco intermedio



Brenner Basis Tunnel: Geologischer Längsschnitt

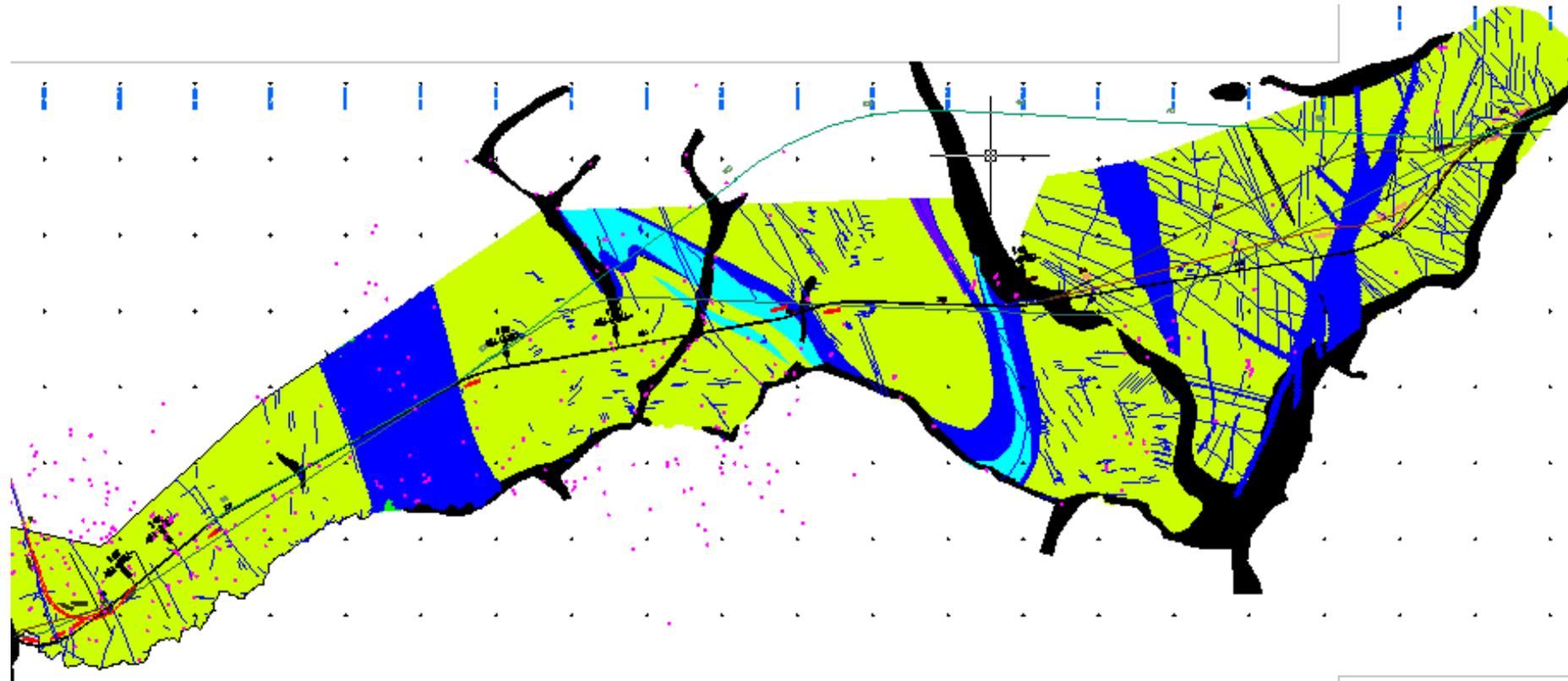
Anlage 3



Brenner Basistunnel Hydrogeologischer Lageplan

Anlage 4

-  Gering durchlässige Gesteine
-  Gesteine mit erhöhter Durchlässigkeit und Störungszonen
-  Wassergefüllte Sedimentgesteine



Brenner Basistunnel Hydrogeologischer Lageplan mit Wassereinbruch-Risiko

Pfeile:

- Rot-gelb: Wassereinbruchrisiko erhöht durch starke Tektonisierung
- Schwarz-weiss: Wassereinbruchrisiko erhöht durch Verkarstungsgefahr
- Schwarz-orange: Wassereinbruchrisiko erhöht durch Kombination mit Sand und Schlamm

