

ÜBERBLICK ZU DEN ERGEBNISSEN DER GEOLOGISCHEN VORERKUNDUNG FÜR DEN BRENNER-BASISTUNNEL

Rainer Brandner, Franz Reiter & Andreas Töchterle

Mit 4 Abbildungen

Institut für Geologie und Paläontologie, Universität Innsbruck, Innrain 52, 6020 Innsbruck, Österreich

Schlüsselwörter: Brenner-Basistunnel, Tauernfenster, Aigerbach-Formation

Zusammenfassung

Der Brenner-Basistunnel verläuft in der geologisch komplex gebauten Übergangszone zwischen Nord- und Südalpen. Er durchquert dabei alle tektonischen Groseinheiten der Alpen (Südalpin, Ostalpin, Penninikum, Subpenninikum) und erreicht in zwei antiformalen Aufwölbungen innerhalb des Tauernfensters auch deren tiefste Krustensegmente. Die mehrjährige geologische Erkundung mit einer möglichst detaillierten Aufnahme der Gesteinsformationen und Strukturen an der Oberfläche wurde durch ein umfangreiches Bohrprogramm ergänzt. Trotzdem weist das großteils gut abgesicherte geologische Modell an einigen Stellen noch Prognoseunsicherheiten auf, auf die im vorliegenden Beitrag hingewiesen wird. Die Darstellung der in Teilbereichen stark wechselnden Lithologien und der spröden Störungszonen im Prognoseprofil bilden den Hauptteil der Kurzdarstellung. Auf die geologischen Problemzonen und das Ausmaß seismischer Aktivität an Störungszonen wird gesondert hingewiesen. Mit den umfangreichen Untersuchungen wurde ein hoher Wissensstand erreicht. Die nun geplanten Erkundungen (u.a. Bohrungen, Erkundungsstollen) und Forschungsarbeiten werden das geologische Modell weiter verfeinern und die Prognoseunsicherheiten minimieren.

Abstract

The Brenner base tunnel crosses a complex crustal area in the transition zone between the Northern and Southern Alps. The tunnel intersects all main geological units of the Alps: the South Alpine, Austroalpine, and the Penninic and Subpenninic domains. Within the Tauern Window, the tunnel crosses two antiformalities containing the structurally deepest crustal segments of the Alps. Several years of geological reconnaissance with detailed analyses of lithologies and structures have been completed by an extensive drilling program. Some points of uncertainty, however, are left in the forecast section which are detailed in this paper. Areas of strongly varying lithologies and brittle fault zones along the tunnel section are highlighted, with additional emphasis on the possible occurrences of seismically active fault zones. Reconnaissance of the tunnel and additional deep drilling are planned for refinement of the geological model and for reduction of uncertainties in the forecast.

1. Einleitung

Nach dem Bau der Brennerbahn (1867) und der Brennerautobahn (1968) stehen Geologen und Bauingenieure neuerlich vor einer großen Herausforderung – der Planung und dem Bau des Brenner-Basistunnels (BBT). Der ca. 53 km lange Tunnel zwischen Innsbruck (Österreich) und Franzensfeste (Italien) unter dem Brenner, dem niedrigsten und kürzesten Alpenübergang, ist Teil des im Aufbau befindlichen Trans-europäischen Hochleistungs-Eisenbahnnetzes.

Für die Wahl der Trasse, Machbarkeit und möglichst kostengünstige Ausführung des Bauvorhabens ist zunächst die Prognose der Geologie entscheidend. Diese ist nach bestem Wissen und Stand der Technik zu erstellen. Die Tieflage des Tunnels (ca. 1690 m maximale Überlagerung) und der komplexe geologische und strukturelle Bau am Westrand des Tauernfensters stellen die Geologen dabei vor eine schwierige, aber höchst interessante Aufgabe.

Aufbauend auf dem Wissensstand der Machbarkeitstudien von 1978 und 1987 (Köhler, 1978; Ingenieurgesellschaft Lässer-Feizlmayr, 1989), anhand derer die generelle Lage des Trassenverlaufs östlich der Brennerfurche festgelegt wurde, folgte 2001 die Geologische Erkundung, Projektphase I, mit dem Ergebnis der „Vorschlagstrasse 2002“. In der Projektphase II, die 2004–2005 folgte, wurden von der Forschungsgemeinschaft Consorzio Ferrara Ricerche, Geologischer Bundesanstalt und Universität Innsbruck die Unterlagen für die Umweltverträglichkeitsprüfung erarbeitet (Arbeitsgruppe D0104, 2005). Die geologischen Erkundungen wurden durch ein ausgedehntes Bohrprogramm (über 25 km Bohrkern) samt geophysikalischen Bohrlochanalysen ergänzt. Es diente vor allem der Absicherung und Verfeinerung des geologischen Modells, sowie für hydrogeologische und geotechnische Fragestellungen. Nach Evaluierung und Homogenisierung der Ergebnisse und neuerlichen Erhebungen in Problemzonen durch die Arbeitsgruppe „GEOTEAM“ wurden 2006 eine Trassenoptimierung der „Vorschlagstrasse 2002“ ausgearbeitet, der geologische Längsschnitt 1:10.000 (Geologisches Prognoseprofil) justiert und eine geologische Übersichtskarte 1:50.000 des gesamten Trassenbereiches erstellt (GEOTEAM, 2008a, b).

2. Geologischer Überblick

Der geplante Brenner-Basistunnel führt zwischen Innsbruck und Franzensfeste geographisch durch den

zentralen Bereich der Ostalpen. Geologisch durchfährt er hingegen das emporgewölbte Zentrum der Kollisionszone der europäischen und adriatischen kontinentalen Platten samt ihren metamorph gewordenen Sedimentstapeln und Resten der ehemals dazwischen gelegenen ozeanischen Krustengesteine und ihrer Sedimentbedeckung. Das postkollisionale Eindringen des rigiden Südalpen-Sporns mit der stärksten Konvergenz im Bereich der Maulser Zone verursachte im Jungtertiär nördlich davon eine Aufwölbungsstruktur (Antiform), welche als Tauernfenster bezeichnet wird. Im Westen wird diese Aufwölbung durch die Brenner-Abschiebung scharf begrenzt. Die zentralen Einheiten des Tauernfensters wurden ca. 35 km gehoben (Selverstone, 1985). Der BBT durchquert damit also auch die tiefsten Krustenabschnitte der Ostalpen. Sie liegen in Form übereinander gestapelter tektonischer Decken vor. In der Großgliederung der Deckensysteme unterscheiden wir (Abb. 1):

- Das Venediger-Deckensystem (Subpenninikum) im Innersten des Tauernfensters mit Zentralgneis (Metagranitoide permischen Alters), Altem Dach (metamorphe Gesteine, in die die Granitoide eindringen) und Gesteinen der „Unteren Schieferhülle“ (Permomesozoische Metasedimente), ehemals dem europäischen Kontinentalrand zugehörig.
- Nach außen folgt der Glockner-Deckenkomplex (Penninikum, „Obere Schieferhülle“) mit metamorphen Gesteinen des äußeren europäischen Kontinentalrandes und untergeordnet solchen mit ozeanischem Ursprung.
- Das Tauernfenster wird vom Deckenstapel des adriatischen Kontinentalrandes, dem Ostalpin, umrahmt. In der Tauernnordrandzone befindet sich zwischen Penninikum und Ostalpin die tektonische Mischzone („Mélange“) der Gesteinsformationen der Kontinent-Ozean-Übergangszone (Ultrapenninikum).
- Im Süden des Tauernfensters grenzt mit der bedeutenden Periadriatischen Störungszone das Südalpin mit dem Brixner Granit und Brixner Quarzphyllit (Gestein, in welches der Granit eindrang) an.

Im Zuge der tertiären Einengungstektonik entstanden auch die wichtigen großen Störungszonen südlich, westlich und nördlich des Tauernfensters (Abb. 1, 3): (1) das Periadriatische Störungssystem mit der Pustertalstörung an der Südalpen-Nordalpengrenze, (2) die duktile Brennerabschiebung mit ihrem spröden Anteil der Wipptal-Störung, und

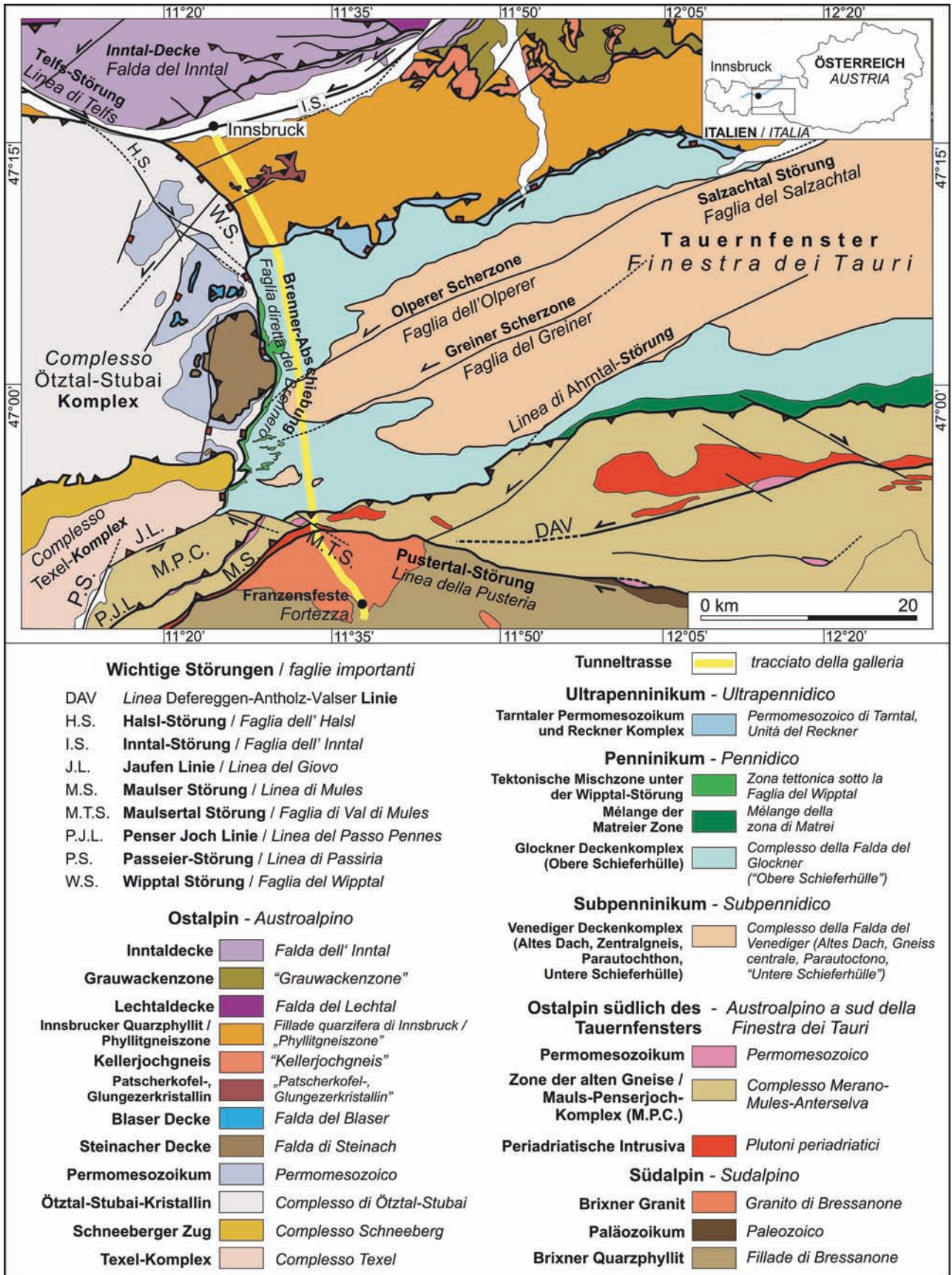


Abb. 1: Tektonische Übersichtskarte des BBT-Projektraums.



Abb. 2: Aigerbach-Formation an der Typ-Lokalität. Teilweise entfestigter Dolomit (weiß) in Wechselfolge mit dünnschichtigem Kalk-Glimmerquarzit (braun angewittert).

(3) das Inntalstörungssystem, das mit Teilästen auch noch weit südlich des Inntales anzutreffen ist. Mit gleichem Schersinn und etwa parallel dazu verlaufen innerhalb des Tauernfensters die Olperer- und Greiner-Scherzone. Die genannten Großstörungen stehen kinematisch im Zusammenhang und ermöglichen eventuell im Konnex mit einer anzunehmenden Überschiebung im Untergrund die noch heute andauernde Heraushebung des westlichen Tauernfensters (Höggerl, 2001).

3. Geologie auf Tunnelniveau

In der bekannt komplex gebauten Zone des westlichen Tauernfensters ist die Prognose der Geologie auf dem Niveau des BBT eine äußerst schwierige Aufgabe. Bei der gegebenen Tiefenlage des Tunnels ist eine metergenaue Prognose unmöglich. Die Prognoseunsicherheit des Gebirgsbaues auf Tunnelniveau muss deshalb für den jeweiligen Streckenabschnitt angegeben werden, genauso wie auch der Fehlerbereich bei der Projektion von Störungen. Einzige Fixpunkte sind Kernbohrungen, die das Trassenniveau erreichen. Mit der genauen Analyse der Bohrkerne und geophysikalischen Bohrlochdaten ist das an der Oberfläche erstellte geologische Modell zu justieren und bereichsweise auch zu revidieren.

Anhand der Tiefbohrungen konnte auch der wichtige Nachweis Anhydrit/Gips-führender Gesteine in der Unteren als auch Oberen Schieferhülle erbracht werden. Lösungsprozesse führen an der Oberfläche und örtlich auch tiefer zur Auflösung von Anhydrit und Gips. Die so gebildeten Rauhacken-Gesteine

sind schlecht aufgeschlossen und wurden in den bisherigen geologischen Analysen und Interpretationen stark vernachlässigt. Diese bilden aber die Leitgesteine für den Nachweis und die Entschlüsselung des ausgedehnten liegenden Falten- und Deckenbaues in den Schieferhüllen und sind wegen der Gipskarst-Phänomene und betonaggressiven Wässer auch für den Tunnelbau von Bedeutung.

Die Evaporit-führenden Gesteinsserien in der Oberen und der Unteren Schieferhülle gehören zur sogenannten „**Aigerbach-Formation**“. Dieser neue lithostratigraphische Begriff wurde bereits während der Erkundungsphase I, 2001, eingeführt und seither bei der Kartierung als auch bei der Bohrkernbeschreibung verwendet. Das Typprofil liegt im Aigerbach Graben, oberhalb von St. Jakob im Pfitschtal (Lokalität „A“ in Abb. 3). Hier befindet sich in der Unteren Schieferhülle der größte durchgehende Aufschluss der über 200 m mächtigen gemischt siliziklastischen, karbonatischen und evaporitischen Wechselfolge. Trotz amphibolitfazieller Metamorphose sind noch zusammenhängende sedimentäre Sequenzen von Quarziten, karbonatischen Glimmerquarziten, Kalkglimmerschiefern, Kalk- und Dolomitmarmoren und Rauhacken in mehrfacher, zyklischer Wiederholung erhalten (Abb. 2). Andernorts finden sich Rauhacken mit Chloritschiefern. Die $\delta^{34}\text{S}$ -Werte der Gipse und Anhydrite liegen in der Mehrzahl zwischen 14.5 und 19‰ VCDT (Arbeitsgruppe D0104, 2005). Im Vergleich mit der globalen Fraktionierungskurve ist damit ein Obertriasalter anzunehmen. Westlich von Kematen im Pfitschtal überlagert die Abfolge im Profil Kalkwandstange (hier in der Oberen Schieferhülle) mächtige Dolomitmarmore der Seidlwinkel-Formation. Gut erhaltene, bestimmbare Crinoidenstielglieder (det. W. Resch, Univ. Innsbruck und Frisch, 1975, det. Kristan-Tollmann) belegen ein Mitteltriasalter. Eine Korrelation mit der Keuperfazies der germanischen Trias ist daher naheliegend. Im selben Profil ist die sedimentäre Überlagerung der Aigerbach-Formation durch Bündnerschiefer erhalten geblieben.

3.1 Prognoseprofil

Der Basistunnel wird von Nord nach Süd folgende geologisch-tektonische Haupteinheiten durchörtert (Abb. 4 und Töchterle et al., 2007):

- Km 2.14: Portal Innsbruck. Bis km 14.00: Innsbrucker-Quarzphyllit-Decke (Ostalpin) mit vor-

- wiegend Quarzphyllit und Einschaltungen von Kalk-/Dolomitmarmor, Grünschiefer, Orthogneis, Quarzit und Schwarzphyllit, im zentralen Teil höhermetamorphe Glimmerschiefer. Das Portal liegt in einer tiefgründigen Massenbewegung. Etwa die ersten 100 m verlaufen in stark zerlegtem Quarzphyllit, vermischt mit Lockergestein.
- Km 14.00–19.00: Nordrahmenzone des Tauernfensters. Gefaltete Grenzfläche Innsbrucker Quarzphyllit/Bündnerschiefer (Glockner-Deckenkomplex, Penninikum) mit z.T. gehäuft exotischen Schollen (Karbonat, Gips, Anhydrit), die auch kartenmaßstäbliche Größe erreichen können.
 - Km 19.00–28.50: Vorwiegend Bündnerschiefer mit Resten von Triasgesteinen in Keuperfazies (Aigerbach-Formation) an der Basis des Glockner-Deckenkomplexes (Chloritphyllit, Gips, Anhydrit, Dolomitmarmor). Die Deckenbasis wird aufgrund isoklinaler Faltung und/oder Stapelung von Teildecken mehrfach durchörtert.
 - Km 28.50–29.80: Schuppen- und Faltenbau an der Grenze Glockner-Deckenkomplex (Obere Schieferhülle)/Untere Schieferhülle. Abwechselnd Untere Bündnerschiefer (Kalkphyllite, Schwarzphyllite, Karbonatquarzite) mit Gips-, Anhydrit- und Dolomiteinschaltungen (Aigerbach-Formation) und Gesteine der Kaserer-Formation (Schwarzphyllite, Glimmerschiefer, Meta-Arkosen).
 - Km 29.80–30.35: Untere Schieferhülle (Subpeninikum, Venediger-Deckensystem) mit Hochstegen-Kalkmarmor (z. T. verkarstet) und Basisquarzit.
 - Km 30.35–35.90 (Staatsgrenze bei km 32,0875): Zentralgneis der Tuxer Antiform („Tuxer Kern“) mit möglichen Vorkommen von Metasedimentlamellen im zentralen bis nördlichen Bereich der Aufwölbung. Vorwiegend Orthogneis (Biotit-Metagranit) mit untergeordnet Paragneisen, Glimmerschiefern und Amphiboliten des Alten Daches.
 - Km 35.90–37.30: Untere Schieferhülle und Trias des Glockner-Deckenkomplexes in der Pfitscher Synform. Komplex gebauter Stapel von durchgescherten Isoklinalfalten mit einer wechselhaften Abfolge von Metasedimenten: Quarzite, graphitführende Quarzite und Phyllite, Kalkmarmor der Hochstegen-Fm., Glimmerschiefer, Arkosegneise und Metakonglomerate der Kaserer-Fm., sowie die gefalteten, mächtig entwickelten Triasabfolgen an der Basis des Glockner-Deckenkomplexes mit Kalk- und Dolomitmarmoren der Seidlwinkl-Fm. und der bunten Wechselfolge von Serizitphylliten, Quarziten, Chloritschiefern und Dolomiten mit Anhydrit/Gips der Aigerbach-Fm. In Lösungszonen Mikrokarst und Dolomitsandlagen.
 - Km 37.30–40.50: Glockner-Deckenkomplex mit vorwiegend Bündnerschiefern. Kalkreiche Bündnerschiefer, Kalkglimmerschiefer, unreine Kalkmarmore, untergeordnet Einschaltungen von Metabasalten, Prasiniten und Chloritschiefern.
 - Km 40.50–42.80: Zillertaler Antiform mit Zillertaler Zentralgneiskern. Aufgrund der hohen Überlagerung und des Fehlens von Tiefbohrungen im Trassenbereich ist diese Zone mit einer hohen Prognoseunsicherheit behaftet. Metasedimente im Liegenden der Bündnerschiefer ohne nähere lithostratigraphische Zuordnung („Tulfer-Senges-Einheit“): arenitische Gneise, Quarzglimmerschiefer, vereinzelt dünne Dolomitlagen, Phyllite und mögliche Anhydrit/Gips-Einschaltungen. Die gesamte Abfolge bildet vermutlich den Kern einer liegenden Faltenstruktur, sodass darunter nochmals Bündnerschiefer erwartet werden. Untere Schieferhüllgesteine (u.a. Hochstegen-Marmor) und Zentralgneis werden im Kern der Antiform vermutet, ihr Auftreten im Tunnelniveau ist unsicher.
 - Km 42.80–45.00: Bündnerschiefer des Glockner-Deckenkomplexes. Untere Bündnerschiefer mit Schuppen von Triasgesteinen (Anhydrit/Gipsführende Chloritschiefer und Dolomite der Aigerbach-Formation), Kalkreiche Bündnerschiefer mit Einschaltungen von metamorphen Ophiolithen (Serpentinite, Metagabbros, Prasinite).
 - Km 45.00–47.30: Polymetamorphes ostalpines Grundgebirge mit Paragneisen, granatführenden Zweiglimmerschiefern mit Amphiboliten und Orthogneisen. Phyllonitische Glimmerschiefer und Schwarzphyllite unsicherer tektonischer Stellung im Grenzbereich zur Maulser Tonalitlamelle.
 - Km 47.30 – 48.30: Periadriatische Störungszone bei Mauls. Stark kataklastisch geprägte Zone im Übergang von ostalpinen Gneisen und Phylloniten über die Maulser Tonalitlamelle zum südalpinen Brixner Granit. Im Grenzbereich vom Ostalpin zur Tonalitlamelle herrschen als Störungsgesteine Phyllonite, Kataklastite und Kakirite vor. Im Übergang vom Maulser Tonalit zum Brixner Granit wurden Kataklastite und Kakirite beobachtet.
 - Km 48.30–54.44: Brixner Granit. Mittel- bis feinkörnige Biotitgranite bis Granodiorite mit

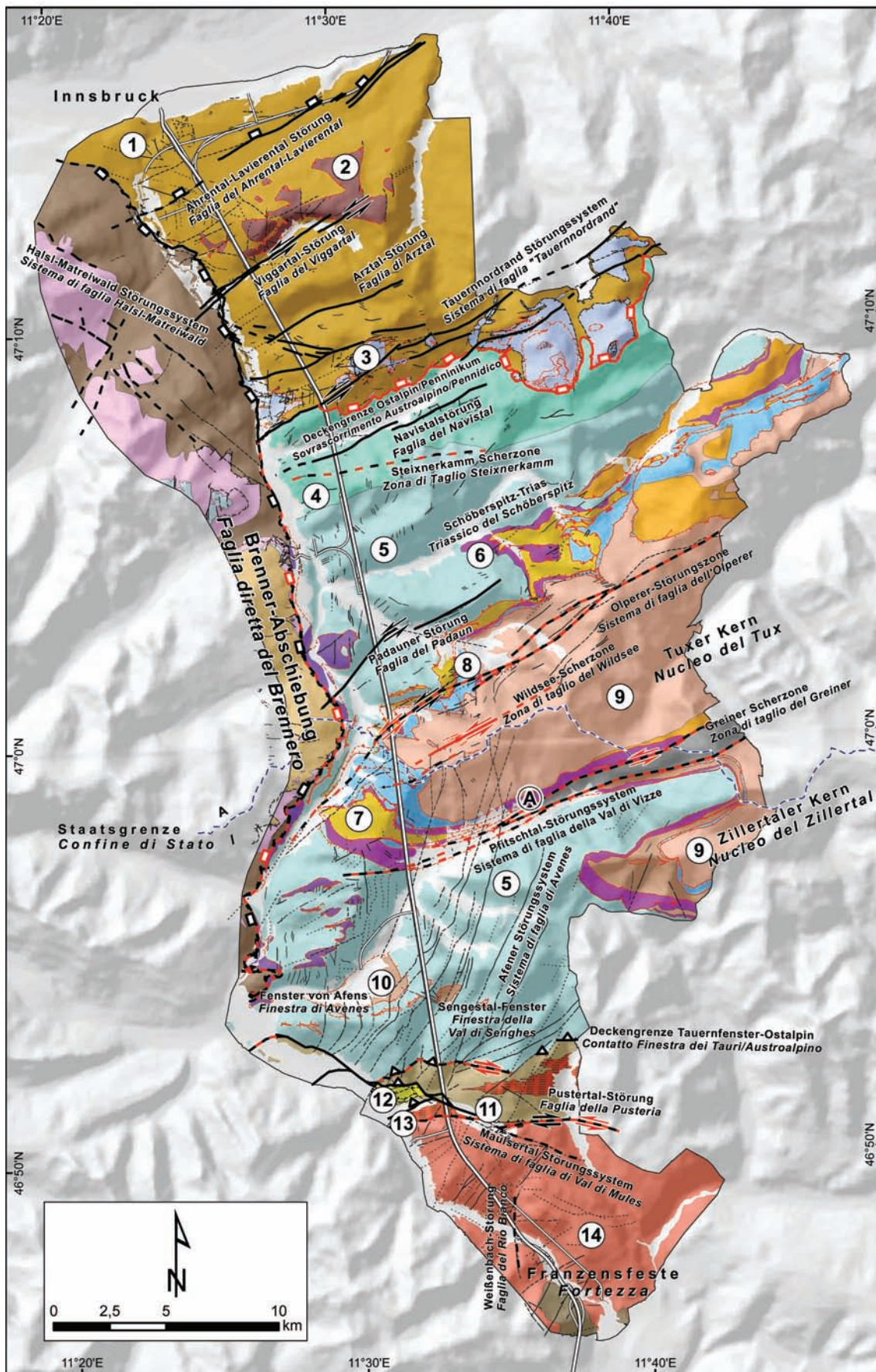


Abb. 3: Übersicht über die wichtigsten geologisch-tektonischen Einheiten und Großstörungen entlang dem Brenner-Basistunnel. Ostalpin nördlich des Tauernfensters: (1) Innsbrucker Quarzphyllit; (2) Patscherkofel-Glungezer-Kristallin. Ultrapenninikum: (3) Tarntaler Permomesozoikum und Reckner-Komplex. Tauernfenster (Penninikum, Subpenninikum): (4) Obere Bündnerschiefer; (5) Bündnerschiefer; (6) Trias an der Basis der Glocknerdecke und in der Unteren Schieferhülle; (7) Kaserer-Formation; (8) Hochstegen-Kalkmarmor; (9) Zentralgneis des Tuxer und Zillertaler Kerns; (10) Tullner-Senges-Einheit. Ostalpin südlich des Tauernfensters: (11) Kristallines Grundgebirge; (12) „Maulser Trias“. Periadriatische Intrusiva: (13) Maulser Tonitlamelle. Südalpin: (14) Brixner Granit.

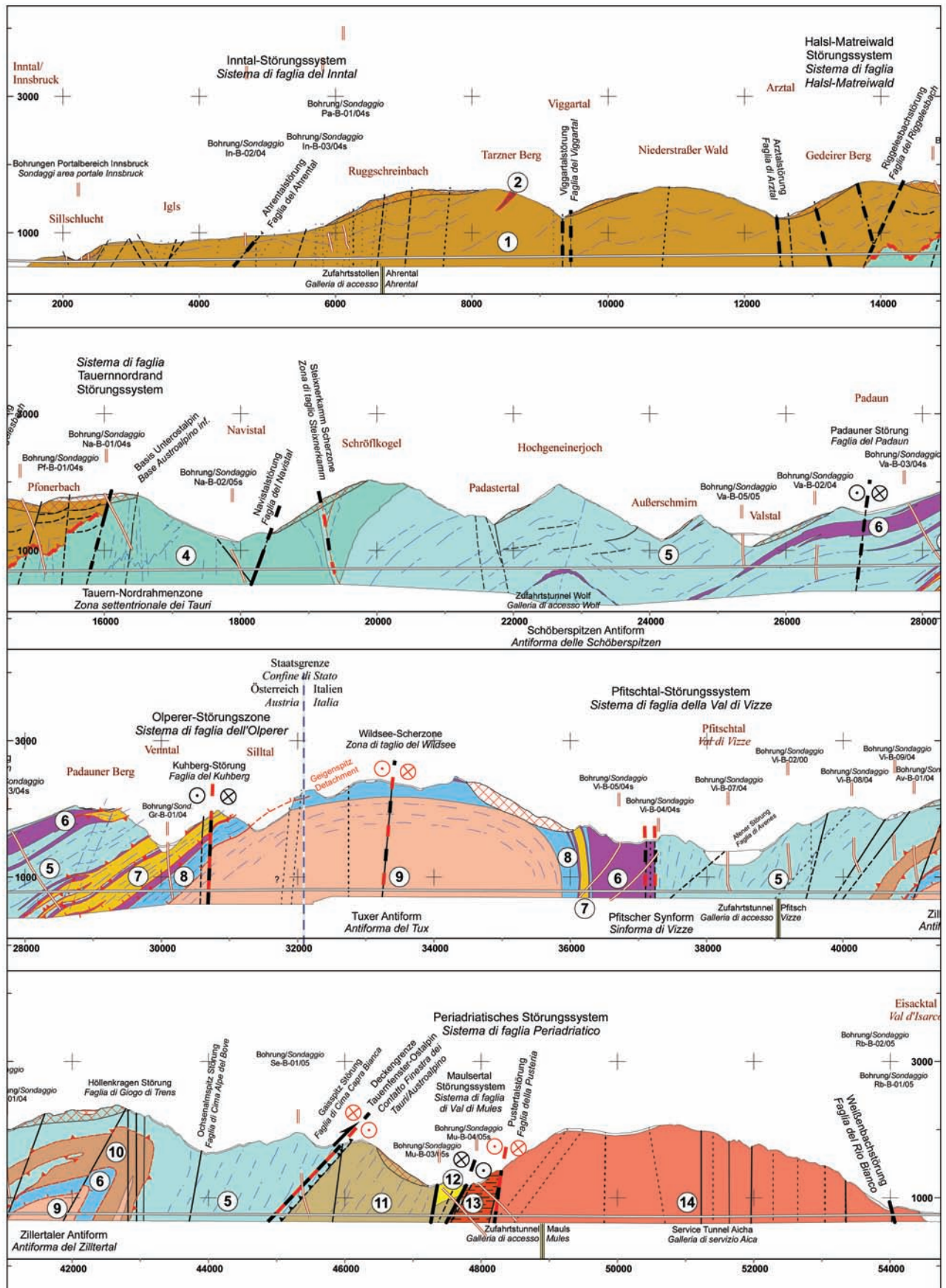


Abb. 4: Vereinfachter geologischer Längsschnitt des Brenner-Basistunnels, nicht überhöht. Für Erläuterungen siehe Text zu Abb. 3.

pegmatitischen und aplitischen Gängen. Lokal Alterationserscheinungen mit Kaolinitisierung der Kalifeldspäte. Störungen mit kohäsionslosen Störungsgesteinen und Alterationsprodukten unterschiedlicher Mächtigkeit.

3.2 Wichtige Störungen

Im Trassenkorridor treten zahlreiche Störungszonen auf, die technische und hydrogeologische Risikobereiche darstellen. Die wichtigsten spröden Großstörungen sind aus den Abb. 3 und 4 ersichtlich.

- Im Norden das Inntal-Störungssystem mit mehreren NE-streichenden subvertikalen Störungen. Das Paschberg(Wipptal-Inntal-)-Störungssystem (NW-streichende, flach bis mittelsteil SW- oder NE-fallende Abschiebungen) tritt nur im Übergangsbereich von der Inntal- zur Wipptal-Störung auf.
- Ahrental-Störungssystem: WSW-streichende, NNW-fallende (untergeordnet auch SSE-fallende) Abschiebungen; mehrere Störungen zwischen ca. km 1.57 und km 5.00.
- Wipptal-Störungssystem mit N-NW-streichenden Abschiebungen im gesamten Trassenbereich bis zum Pfitschtal. Im Tuxer Gneiskern sind N-NNE streichende Megaklüfte und Sprödstörungen zu erwarten.
- Halsl-Matreiwald-Störungssystem: NW-streichende subvertikale Störungen; mehrere Störungen zwischen km 1.57 und 29.8 gehäuft, zwischen km 4.8 und 6.8, sowie v. a. zwischen km 12.6 und 14.0.
- Miskopf-Tauernnordrand-Störungssystem: ENE-streichende, subvertikale, sinistrale Störungen; zwischen km 12.5 und 19.5).
- Olperer- und Wildsee-Störungssysteme: ENE-streichende, subvertikale sinistrale Seitenverschiebungen; zwischen km 30.5 und Staatsgrenze bzw. zwischen km 33 und 33.5).
- Pfitschtal-Störungssystem: subvertikale NE- bis ENE-streichende Störungen, zwischen km 36 und 37.3.
- Afener Störungssystem, NNE-streichende Schräg-abschiebungen im äußeren Pfitschtal und südlich davon.
- Periadriatische Störungszone mit dextraler Pušttertal-Störung und Maulsertal-Störung, zwischen km 47.2 und 48.2.

Die Ausbildung der Störungen, ihre Störungsgesteine (kohäsionslose Kakirite oder kohäsive Störungsgesteine, „Störungsletten“) und deren Mächtigkeit hängen weitgehend vom Ausmaß der Bewegung und der Lithologie des betreffenden Gesteins ab. In speziellen Zonen werden Störungen auch von Lösungsphänomenen leicht löslicher Minerale (z.B. Gips) begleitet (siehe Pfitschtal-Zone).

3.3 Bereiche größter Prognoseunsicherheit

Die größte Prognoseunsicherheit herrscht naturgemäß in jenen beiden Zonen, die die größte Überlagerung aufweisen:

- Tuxer Antiform: Weitgehende Bedeckung des Zentralgneiskerns über der Trasse durch die Schieferhülle, eine tiefgründige Massenbewegung an der gesamten Nordflanke des Pfitschtals und das Fehlen tiefreichender Bohrungen erschweren die Prognose. Tiefliegende, im Zentralgneis eingefaltete Metasedimente (ähnlich jenen im Tuxer Tal) oder offene tiefreichende Kluftsysteme mit Wasserführung können hier daher lediglich vermutet werden.
- Zillertaler Antiform: Die geologischen und strukturellen Verhältnisse müssen hier sehr weit von Osten (Zillertaler Kern) hereinprojiziert werden. So sind der lithologische Aufbau der Antiform und die Tiefenlage des Zentralgneiskerns mit großen Prognoseunsicherheiten behaftet.

3.4 Problembereiche

Geologisch gesehen sind folgende Tunnelabschnitte als kritische Zonen anzusehen:

- Portal Sillschlucht (Km 2.143–ca. 2.23). Die Talflanke der Sill ist hier von einer aktiven, tiefgründigen Massenbewegung mit stark aufgelockerten Quarzphyllit-Gesteinsmassen betroffen. Durch Bohrungen ist nachgewiesen, dass unter Tunnelniveau der Talzuschub Siltschotter überlagert und somit die Sill in Richtung W abgedrängt hat. Die Portale der Ost- und Weströhre, sowie des Zugangstunnels liegen innerhalb dieser Rutschung.
- Tauernnordrahmenzone. Im Bereich von km ca. 14.00–16.00 wird der stark sprödetektonisch überprägte Übergang vom penninischen zum ostalpinen Deckensystem erwartet. Diese Zone wurde daher bereits in der Erkundungsphase I als „Problembereich“ bezeichnet. Die eigentliche Decken-

überschiebung liegt als gefaltete duktile Abscheurungsfläche vor (also ohne geotechnische Bedeutung), eine steilstehende penetrative Achsenebenschieferung überprägt den gesamten Bereich. Das Tauernnordrand-Störungssystem durchsetzt mit steil stehenden spröden Störungen diese Zone. Geotechnisch schwierige Bedingungen sind daher zu erwarten. Auch eine Verlagerung der Trasse würde wegen des querschlägigen Verlaufs dieser Zone keine Verbesserung bringen. Grenze Glocknerdecke/Untere Schieferhülle/Zentralgneis (ca. km 28.50–31.00). Die tektonische Mischzone an der Basis der Glocknerdecke enthält gips- und anhydritführende Gesteine der Trias (Aigerbach-Formation) und ist in komplexer Weise mit der Kaserer-Formation verfaltet. Bei Annäherung an den verkarstungsfähigen Hochstegen-Kalkmarmor der Unteren Schieferhülle kann die Auslaugung der gips-/anhydritführenden Gesteine nicht ausgeschlossen werden. Es könnten damit mehrere Meter mächtige, schwach kohäsive Lösungsrückstände auftreten (Sande mit Gesteinsbruchstücken). Karstlösung wurde im Hochstegen-Kalkmarmor in der Bohrung Gr-B-01/04 bis etwa 100 m oberhalb der Trasse angetroffen. Die nachgewiesene Verkarstung liegt damit unter dem heutigen Vorflutniveau, ein Tieferreichen bis auf das Tunnelniveau ist möglich. Ebenso muss auch im Bereich der Olperer-Störungszone mit den auf Tunnelniveau anzunehmenden Kataklasten und Kakiriten mit verstärkten Wasserzutritten gerechnet werden (Perello et al., 2007a, b).

- Pfitscher Synform (km 35.9–37.3). Ähnlich wie im Norden, hier jedoch steil gestellt, findet sich auch hier eine Wechselfolge von Gesteinen der Unteren Schieferhülle mit Hochstegen-Kalkmarmor, Quarziten und Phylliten der Kaserer-Formation und den gips-/anhydritführenden Dolomiten und Quarziten der Trias an der Basis des Glockner-Deckenkomplexes. Durch drei Schrägbohrungen ist der Aufbau der Zone gut bekannt. Tiefreichende Lösungsprozesse führten in diskreten Störungszonen zur Auslaugung von lagig angeordnetem Gips und Anhydrit. In der Bohrung Vi-B-04/04s wurden auf Tunnelniveau mehrere Dezimeter dünne Lagen von kohäsionslosem Dolomitsand durchörtert.
- Maulser Zone (km 47.0–48.5). Im Bereich Mails muss der BBT die Periadriatische Störungszone an der Nordalpen-/Südalpengrenze durchörtert. Hier

treffen Brixner Granit, die Maulser Tonalitlamelle und Phyllonite des ostalpinen Kristallins aufeinander. Zahlreiche Sprödstörungen durchsetzen diese Zone und verursachen Auflockerungszonen in teilweise unregelmäßiger Verteilung. Die Kakirite sind stark wasserführend. Der Bereich ist mit 4 Erkundungsbohrungen erschlossen.

4. Seismizität und aktive Störungen

Erdbeben- und Vermessungsdaten belegen, dass aufgrund des Andauerns der alpinen Gebirgsbildung innerhalb der Alpen mit aktiven Störungszonen zu rechnen ist (Reiter et al., 2005; GEOTEAM, 2006).

Der nördliche BBT-Planungsraum befindet sich in der Erdbebenzone des Inntals (erdbebenreichstes Gebiet Österreichs mit Maximalintensitäten von $I_0=8$). Die Beben-Epizentren reichen einige km in die Tuxer Alpen hinein. Das westliche Tauerngebiet (Abschnitt unmittelbar östlich des Tunnels) zeichnet sich durch fast vollständiges Fehlen von Erdbeben aus. Im westlichen Pustertal sind nur sehr vereinzelt Erdbeben dokumentiert. Westlich des Wipptals erstreckt sich eine Zone mit Beben ca. 15 km in die Stubai Alpen. Untergeordnet kommen Beben auch westlich des Eisacktals vor.

Im Projektraum ist daher mit potenziell aktiven Störungen zu rechnen. Deren Versatz liegt mit großer Wahrscheinlichkeit jedoch unter 1 mm pro Jahr. Als potenziell aktiv werden die Inntalstörung und assoziierte Störungen südlich des Inntals, die Wipptal-Störung (inkl. der Störungen des Wipptal-Inntal-Systems), die Halsstörung und damit assoziierte östlich des Wipptals, die Afener Störung und die Maulser-talstörung und damit assoziierte Störungen zwischen dem Pfitschtal und Mails eingestuft (Geoteam, 2006).

Schlussfolgerungen

Das Konzept der mehrphasigen Erkundung in geologisch kompliziert gebauten Gebirgsabschnitten hat sich bewährt. Die geologische Prognose konnte damit gerade in den Risikozonen wie der Periadriatische Störungszone oder der Tauernnordrandzone wesentlich verbessert und verfeinert werden. Dabei halfen vor allem das gezielte Bohrprogramm und die detaillierte Auswertung der Bohrkerne und der Bohrlochgeophysik durch jene Geologen, die auch mit der Geländeaufnahme betraut waren.

Für tiefliegende Abschnitte des Bauwerkes gilt jedoch nach wie vor, dass eine exakte Lagegenauigkeit, z.B. von Störungen (besonders relevant für die hydrogeologische und ingenieurgeologische Prognose), auf dem Tunnelniveau nicht angegeben werden kann. Störungen haben die Eigenschaft, lateral aufzufiedern, zu enden oder versetzt weiterzulaufen, sodass die einfache Projektion einer Störungsfläche von der Oberfläche zu kurz greift.

Mit der Herausarbeitung der Leitgesteine der Aigerbach-Formation konnte der komplexe Faltenbau im Übergangsbereich Untere Schieferhülle/Obere Schieferhülle entschlüsselt werden. Das bessere Verständnis des Aufbaus dieses Krustenabschnitts erlaubte die verbesserte detaillierte Prognose auf Tunnelniveau. Dies unterstreicht einmal mehr den Nutzen der lithostratigraphischen Arbeitsmethodik auch in hochmetamorphen Metasedimenten.

Die größte Prognoseunsicherheit herrscht im Aufbau der Zillertaler Antiform südlich des Pfitschtals. Die für das Tunnelniveau ausschlaggebenden Strukturen und Gesteinsformationen liegen an der Oberfläche weitab im Osten der Trasse und müssen über große Entfernung hereinprojiziert werden. Nur geringe Abweichungen im Winkel des Abtauchens der Faltenachsen führen zu drastischen Änderungen der Prognose auf Tunnelniveau. Im Jahr 2008 ist die Abteufung einer Tiefbohrung geplant, um diesbezüglich mehr Sicherheit zu gewinnen.

Dank

Die Autoren bedanken sich bei der Brenner Basistunnel BBT SE für die Genehmigung zur Veröffentlichung der bisher unpublizierten Erkundungsergebnisse. Vielen Dank auch Herrn DI Dr. Max John, Innsbruck, für die aufmerksame und kritische Durchsicht einer früheren Version des Manuskripts.

Literatur

Arbeitsgruppe D0104 Consorzio Ferrara Ricerche, Geologische Bundesanstalt und Universität Innsbruck (2005): Endbericht „Strukturgeologische Kartierung und ergänzende geologische Studien“. – Unveröffentlichter Bericht für die Brenner-Basistunnel Gesellschaft, BBT-SE, Innsbruck-Bozen, 1117 S., mit zahlreichen Planbeilagen.
Frisch, W. (1975): Ein Typ-Profil durch die Schieferhülle des Tauernfensters: Das Profil am Wolfendorn (westlicher

Tuxer Hauptkamm, Tirol). – Verh. Geol. B.-A., 1974: 201–221, Wien, 1975.

GEOTEAM (2008a): Projektgebiet Italien, Progetto Definitivo, Geologie. – Unveröffentlichter Bericht für die BBT-SE, 69 S., mit zahlreichen Planbeilagen.

GEOTEAM (2008b): Projektgebiet Österreich, Geologie. – Unveröffentlichter Bericht für die BBT-SE, Innsbruck-Bozen, 102 S., mit zahlreichen Planbeilagen.

GEOTEAM (2006): Neotektonik. – Unveröffentlichter Bericht für die BBT-SE, Innsbruck-Bozen, 45 S.

Höggerl, N. (2001): Bestimmung von rezenten Höhenänderungen durch wiederholte geodätische Messungen. – In: Hammerl, C., Lenhardt, W.A., Steinacker R. & Steinhauser P. (Hrsg.): Die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik 1851–2001, 150 Jahre Meteorologie und Geophysik in Österreich, 630–644, Leykam Verlag, Graz.

Ingenieurgesellschaft Lässer-Feizlmayr (1989): Brenner-Machbarkeitsstudie 1987. – Unveröffentlichter Schlussbericht. Kapitel 3, Geologie, und Kapitel 5.4, Tunnel Innsbruck, Internationales Brenner Konsortium, 176 S.

Köhler, M. (1978): Brennerflachbahn, Projekt 1978, Ergebnisse der geologischen Untersuchungen. – Geologisch-Paläontologische Mitteilungen Innsbruck, 8: 1–99.

Perello, P., Burger, U., Marini, M. & Torri, R. (2007a): Hydrogeological characterisation and forecast of water inflow for the Brenner Base Tunnel. – Tagungsband Internationales Symposium Brenner Basistunnel und Zulaufstrecken, 25–31.

Perello, P., Marini, M. Torri, R. & Burger, U. (2007b): Brenner-Basistunnel – hydrologisches Längsprofil / Tunnel di base del Brennero – sezione idrogeologica longitudinale. – Posterbeilage im Tagungsband „BBT 2007“, Internationales Symposium Brenner Basistunnel und Zulaufstrecken, 1. März 2007, Innsbruck.

Reiter, F., Lenhardt, W.A., & Brandner, R. (2005): Indications for activity of the Brenner Normal Fault zone (Tyrol, Austria) from seismological and GPS data. – Austrian Journal of Earth Sciences, 97: 16–23.

Selverstone, J., (1985): Petrologic constraints on imbrication, metamorphism and uplift in the SW Tauern window, eastern Alps. Tectonics, 4(7): 687–704.

Töchterle, A., Brandner, R. & Reiter, F. (2007): Geologisches Tiefenprofil 1:100.000 entlang der Trasse des geplanten Brenner-Basistunnels. Posterbeilage im Tagungsband „BBT 2007“, Internationales Symposium Brenner Basistunnel und Zulaufstrecken, 1. März 2007, Innsbruck.

Manuskript eingereicht: 10.4.2008

Überarbeitetes Manuskript angenommen: 23.5.2008