

# Brenner Basistunnel - Geotechnische Prognose und Konzept für den TBM-Einsatz

Von Dieter Fellner, Markus Spiegl, Eckart Schneider,  
Remo Grandori und Wolfgang Leitner

Im Rahmen der Aktualisierung der Machbarkeitsstudie erfolgte in den Jahren 2001 und 2002 eine komplette geotechnisch-baugeologische Neubeurteilung für den Brenner Basistunnel. Die Schwerpunkte der Arbeiten der Gruppe Geologie/Geotechnik lagen in einem ersten Schritt in der begründeten und nachvollziehbaren Auswahl einer Vorschlagstrasse, gekoppelt mit der Erstellung einer dem Bearbeitungsstand entsprechenden detaillierten baugeologischen Prognose (klassische Unterteilung in geotechnische, hydrogeologische und geothermische Prognose). Zur Beseitigung von offen kommunizierten Prognoseunsicherheiten verschiedenster Art wurde ein umfangreiches Sondierprogramm vorgeschlagen.

## Brenner-Base Tunnel – Geotechnical Prognosis and Concept for TBM-Tunnelling

*In the course of updating the feasibility-studies of the Brenner-Base Tunnel from 1987 and 1993 a complete reassessment of the geological and geotechnical situation was undertaken. From the geological-geotechnical point of view the main tasks were: alignment, geological, hydrogeological and geothermal prognosis plus additional explorations. Based on this reassessment a concept for excavation was elaborated by a separate working group with the aim to excavate the highest possible portion of the tunnel by TBMs. This concept foresees that for more than 80 % of the total tunnel length the conditions shall be explored by pilot-tunnels. For this purpose it is recommended to utilize Double-shield TBMs of approximately 5 m diameter. For the excavation of the main-tunnels it is foreseen to utilize Single-shield TBMs with approximately 9 m diameter. With this innovative approach a completion time of 7.5 years except finishing works seems feasible.*

Im Rahmen der Aktualisierung der Machbarkeitsstudien aus den Jahren 1987 und 1993 wurde in den Jahren 2001/2002 eine komplette geotechnisch-baugeologische Neubeurteilung des Brenner Basistunnel vorgenommen. Die Hauptaufgaben waren aus geologisch geotechnischer Sicht: Trassenwahl, geologisch-hydrogeologische und geothermische Prognose sowie weitere Sondierungen. Basierend auf der geotechnisch-baugeologischen Neubeurteilung wurde von einer Arbeitsgruppe ein Vortriebskonzept entwickelt, das einen möglichst hohen Anteil an maschinellen Vortrieben mit TBM vorsieht. Dieses Konzept sieht vor, über mehr als 80 % der gesamten Tunnellänge Erkundungsstollen vorgängig zu den Haupttunneln vorzutreiben. Hierzu wird über den Großteil der Strecke der Einsatz von Doppelschild-TBM (TBM-DS) mit etwa 5 m Durchmesser empfohlen. Für den Vortrieb der beiden Röhren des Haupttunnels sind Schild-TBM (TBM-S) mit rund 9,6 m Durchmesser vorgesehen. Mit diesem Vortriebskonzept ist eine Rohbauzeit von knapp 7,5 Jahren realisierbar.

Da der Zeitrahmen zwischen Auftragserteilung und Ablieferung der Spezialberichte „Trassierung“ und „Sondiervorschläge“ einschließlich zugehöriger Planunterlagen mit neun Monaten limitiert war, musste vom Projektierungsteam praktisch ausschließlich auf vorhandene, im Zeitraum zwischen 1999 und 2001 verfeinerte und aktualisierte geologische Basisgrundlagen zurückgegriffen werden. Hervorzuheben sind:

- ◊ Flächige geologische Neukartierungen auf österreichischer und italienischer Seite unter der Leitung der Österreichischen Geologischen Bundesanstalt sowie der Universitäten Innsbruck und Ferrara,
- ◊ Begleitende Tiefbohrungen,
- ◊ Hydrogeologische Detailuntersuchungen,
- ◊ Begleitende geophysikalische Untersuchungen (reflexionsseismische Profile).

## Geologischer Überblick

Der geplante 55,5 km lange Brenner Basistunnel durchfährt zwischen Innsbruck und Franzensfeste die ganze Zentralzone der Ostalpen mit dem so genannten Tauernfenster. Zudem quert er die stark tektonisierte Grenzzone Ostalpen/Südalpen und auf 7 km Länge den südalpinen Brixner Granit. Die Geologie entlang der Vorschlagstrasse besteht zu rund 63 % aus Schiefen und Phylliten, zu etwa 33 % aus Gneisen und Graniten und zu etwa 4 % aus Karbonaten. Der geologische Horizontalschnitt (Bild 1) gibt einen Überblick über die Lage der Vorschlagstrasse, Bild 2 einen Überblick über Trassenverlauf, Zwischenangriffe und Multifunktionsstellen.

Die maximale Überlagerung beträgt rund 1 850 m, die mittlere Überlagerung liegt um 870 m. Der Brenner Basistunnel besitzt damit im Vergleich zu anderen Basistunneln (zum Beispiel Gotthard Basistunnel) eine vergleichsweise geringe Überlagerungshöhe. Durch die Vormacht von relativ weichen Gesteinen (Schiefen und Phylliten) weist er jedoch einen abschnittsweise hohen Schwierigkeitsgrad auf. Da über die sehr umfangreichen geologischen Untersuchungen und deren Resultate schon anderweitig berichtet wurde (Arbeitstagung „Brenner“ der Österreichischen Geologischen Bundesanstalt, September 2003), wird im vorliegenden Beitrag auf diesen Themenbereich nicht weiter eingegangen.

## Geotechnische Prognose

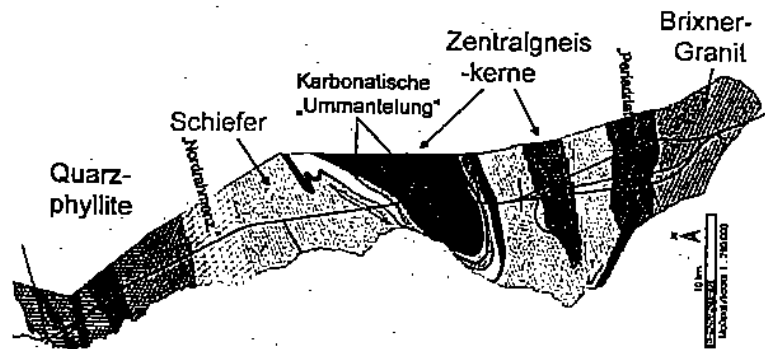
### Methodik

Die geotechnische Prognose basiert auf mehreren Ansätzen: Einerseits auf der Beurteilung von Gefährdungsbildern, andererseits auf abgeschätzten Gebirgskennwerten unter Verwendung von Gebirgsklassifikationen (RMR, GSI) und Erfahrungen/Rückrechnungen von vergleichbaren Untertageprojekten. Mittels qualitativer Ansätze wurden zuerst Hierarchien für Gesteins-, Gebirgsfestigkeiten oder Klüftigkeitsverhältnisse erstellt und anschließend unter Einbeziehung von Vergleichsinformationen weitestgehend quantifiziert. Die geotechnische Prognose erfolgte letztendlich bezogen auf 50 so genannte Prognoseeinheiten mit Mächtigkeiten zwischen 50 m und 6 km.

Die Überlagerung nimmt bei tief liegenden Untertagebauwerken einen sehr hohen Stellenwert ein. Um den maßgebenden Einfluss der Überlagerung in Relation zu den vorhandenen Gebirgsfestigkeiten zu stellen, eignet sich für Basistunnel das im vorliegenden Bericht als Schlüsselparameter verwendete „Squeezing Potenzial“ (SQP) (2). Als „Squeezing Potenzial“ wird das prozentuale Verhältnis zwischen deformiertem Tunneldurchmesser und Ausgangsdurchmesser verstanden. Dabei werden fünf Klassen unterschieden: no, minor, severe, very severe, extreme squeezing.

Eine derartige Beurteilung setzt eine Deformationsprognose „ohne Ausbau“ voraus. Zur Anwendung gelangten vorwiegend Kennlinienberechnungen sowie FE-/FD-Berechnungen. In Abhängigkeit von der Größe des Squeezing Potentials lassen sich empirische Grundsätze zur Ausbruchdimensionierung ableiten oder selbst festlegen. Gemäß Hoek (2) gilt:

- ◊ Leichtere Stahlbögen für Squeezing Potenzial 1 bis 2,5 %,
- ◊ Schwere Stahlbögen ab Squeezing Potenzial 2,5 bis 5 %,
- ◊ Ortsbrustsicherung ab Squeezing Potenzial 5 bis 10 %.



Wenngleich der Begriff „Squeezing“ sehr generell und zum Beispiel als „no Squeezing“ für sehr harte granitoide Gesteine (Brixner Granit, Zentralgneis) verwendet wird, rückt – bezogen auf das „Denken in Gefährdungsbildern“ – zwangsläufig das Gefährdungsbild „plastische Deformationen“ in das Zentrum der Betrachtungen.

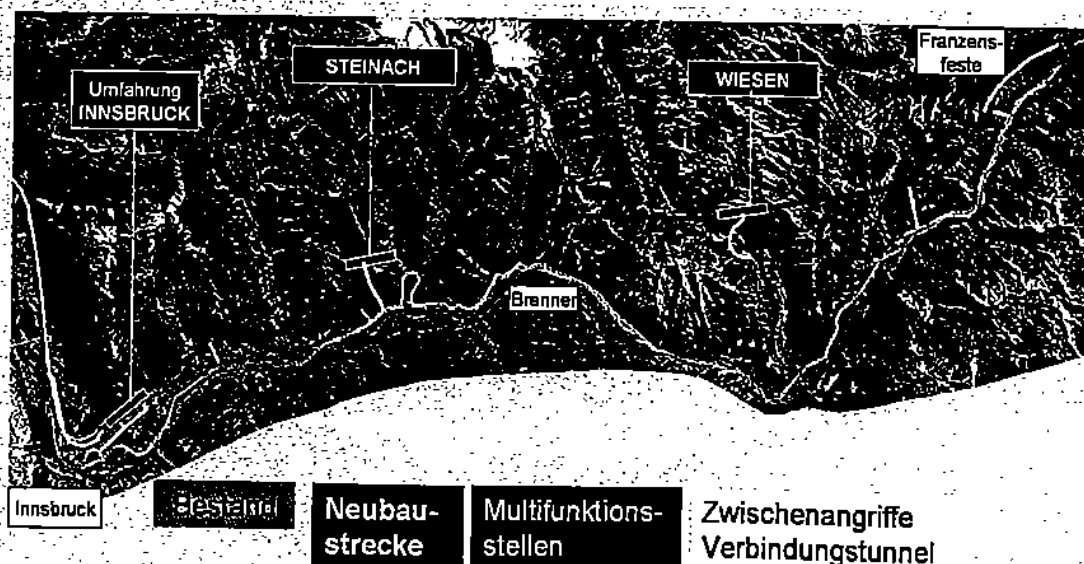
### GSI-Ansatz

Mittels GSI (Geological Strength Index) – hergeleitet via RMR Klassifikation – wurde bei der Bearbeitung zuerst versucht, einen „ersten Gebirgsparametersatz“ abzuleiten. Eine Überprüfung mit Erfahrungen/Deformationen aus anderen Untertageprojekten (Tauern Tunnel) zeigte jedoch, dass die GSI-Werte vielfach optimistische, das heißt zu günstige Prognosen ergeben. Die Designkennwerte wurden deshalb fallweise abgemindert. Ein Teil dieser Diskrepanz wird auf die Nichtberücksichtigung von zwei wesentlichen Punkten im GSI-Ansatz zurückgeführt: Anisotropie und Festigkeitsabfall.

### Ausgewählte Resultate

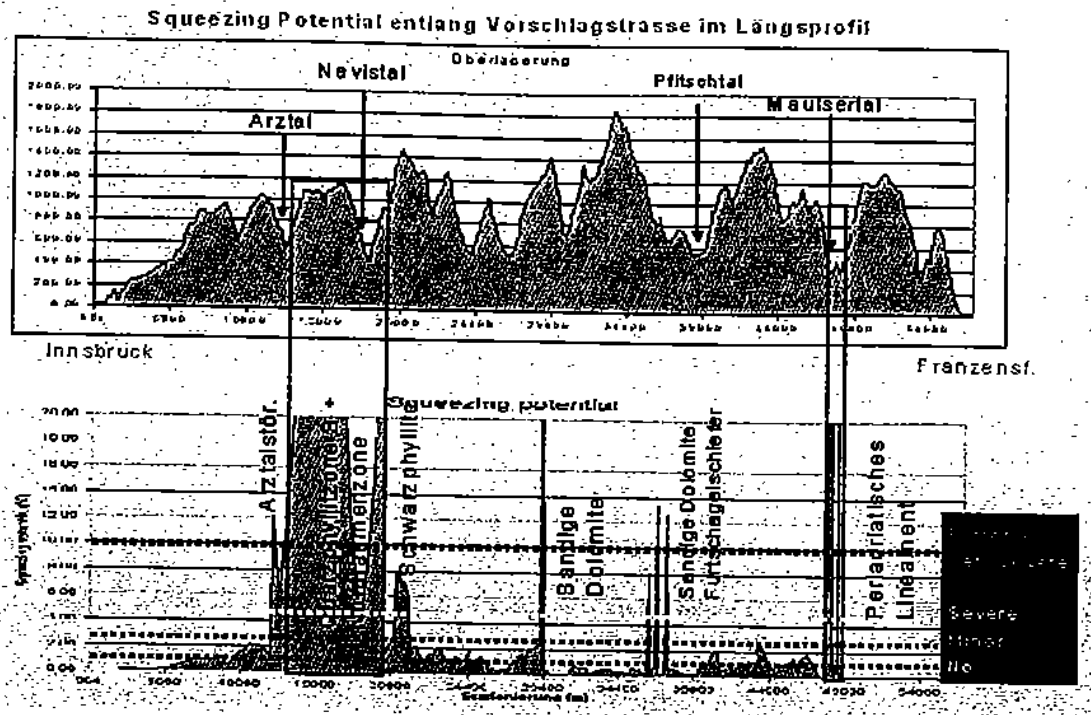
Die Berechnungsergebnisse für das Squeezing Potenzial entlang der Vorschlagstrasse sind in Bild 3 und Tabelle 1 dargestellt. Sehr auffällig sind die Bereiche mit extremem Squeezing (Quarzphyllitzone-Südrand übergehend in Nordrahmenzone, Schwarzphyllite, desintegrierte

**Bild 1** Geologie im Horizontalschnitt (3).  
**Fig. 1** Geology in horizontal section.



**Bild 2** Projektgebiet.  
**Fig. 2** Project area.

TBM-VORTRIEBE



**Bild 3** Squeezing Potenzial entlang der Vorschlagstrasse.  
**Fig. 3** Squeezing potential along proposed alignment.

Rauwacken (pessimistische Annahmen), Talkschiefer (Furtschagelschiefer), Periadriatisches Lineament). Hinzu kommen noch Bereiche mit Störzonen, die in dieser Übersicht nicht dargestellt sind. Die Gefährdungen aus diesem Phänomen liegen konkret in unzulässigen Konvergenzen des Gebirges sowie in der Zerstörung beziehungsweise Überbeanspruchung der Ausbruchsicherung oder des endgültigen Innengewölbes.

Dass herkömmliche Klassifikationen wie das RMR-Klassifizierungssystem den Überlagerungseffekt für Basistunnel nicht adäquat berücksichtigen, spiegelt sich in der Diskrepanz zwischen der statistischen Verteilung des Squeezing Potentials und der RMR-Werte deutlich wider (Bild 4).

Wie in Bild 5 ersichtlich, wurde eine flächige Deformationsprognose über den untersuchten Korridor erarbeitet und entlang dem Längsprofil der Vorschlagstrasse weiter verfeinert. Während bis dato das Squeezing Potenzial für einzelne Längsprofile als Hilfsmittel zur Bewertung für Untertagebauwerke zur Anwendung gelangte (3), kann die gewählte flächige Beurteilung eines gesamten Korridors als durchaus innovativ beurteilt werden.

Zur Kalibrierung der geotechnischen und der hydrogeologischen Prognose wurden Quervergleiche mit folgenden Untertagebauwerken erstellt: Tauern-, Katschberg-, Inntaltunnel, Kaponig Pilotstollen, Kraftwerksstollen der Verbundplan: Schlegeis, Zillergründl, Tuxbachüberlei-

**Tabelle 1** Squeezing Potenzial.  
**Table 1** Squeezing potential.

Klasse/Bezeichnung	Prozentuale Verengung des Tunnels		Radiäre Deformation für einen 9 m Tunnel [cm]		Typisch für folgende Gebirgstypen	Anteil an Gesamtlänge Brenner Basistunnel	
	von	bis	von	bis		[%]	[m]
Kein Squeezing .....	0	0	0	4,5	Brixner Granit, Zentralgneise Hochstegenkalk, Quarzphyllit bei sehr geringer Überlagerung und Tektonisierung	39,2	21 400
Leichtere Squeezing-Probleme ....	1	2,5	4,5	11,3	Karbonatischer Bündnerschiefer, Quarzphyllite bei geringer Überlagerung und geringer Tektonisierung, Kaserer-Serie	42,1	22 966
Ernste Squeezing-Probleme .....	2,5	5	11,3	22,5	Karbonatischer Bündnerschiefer bei hoher Überlagerung	3	1 350
Sehr ernste Squeezing-Probleme	5	10	22,5	45	Phyllitische Glimmerschiefer bei hoher Überlagerung und starker Tektonisierung	2,2	1 210
Extremes Squeezing .....	10	>10	45	>45	Periadriatisches Lineament, Quarzphyllitzone Südteil, Nordrahmenzone, Schwarzphyllite bei hoher Überlagerung (tektonisiert)	14	7 654

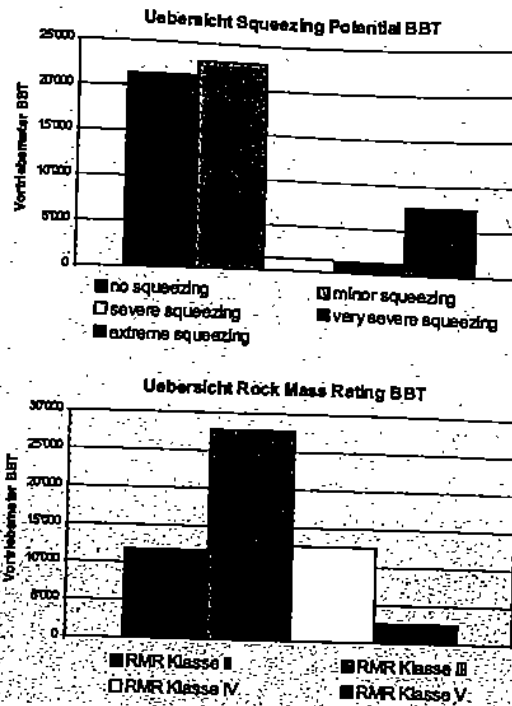
tung, Gerlos, Zembachüberleitung sowie Tunnel Frejus, Exilles, Tanze.

### Hydrogeologische Prognose

Unter Berücksichtigung aller zur Verfügung stehenden Informationen und deren Interpretation wurde eine Zuflussprognose durchgeführt. Diese berücksichtigt Fixpotenziale, basiert auf einer Durchlässigkeitshierarchie der Gesteine und Störzonen und verwendet die Resultate von Hydrotests in Bohrungen und Vergleichsbauwerken zur Kalibrierung der Kennwerte.

Vergleichsinformationen aus Untertagebauwerken in ähnlicher Geologie (Tauernunnel, Katschbergtunnel, Frejus) zeigen, dass in den Schieferhüllgesteinen sehr geringe Wasserzutritte zu erwarten sind. Ausgenommen sind Störzonen. Vereinzelt stärkere Quellzutritte lassen sich im Bereich der Zentralgneise erwarten (Kraftwerksstollen der Verbundplan). Durch die Wahl der Trasse wurde ein genügender Abstand zu den großen Fixpotenzialen wie Eisack- und Silltal gewahrt. Die durch mehrere 100 m mächtige Lockergesteine bedeckte Talsohle der querenden glazial stark übertieften Täler (Valstal, Pfitschtal) wird im vertikalen Abstand von mindestens 300 m unterquert.

Analog zum Squeezing Potenzial wurde das Wassereintruchsrisko als zweiter „Schlüsselparameter“ ausgewertet und flächig dargestellt (Bild 6). Aus hydrogeologischer Sicht sind folgen-

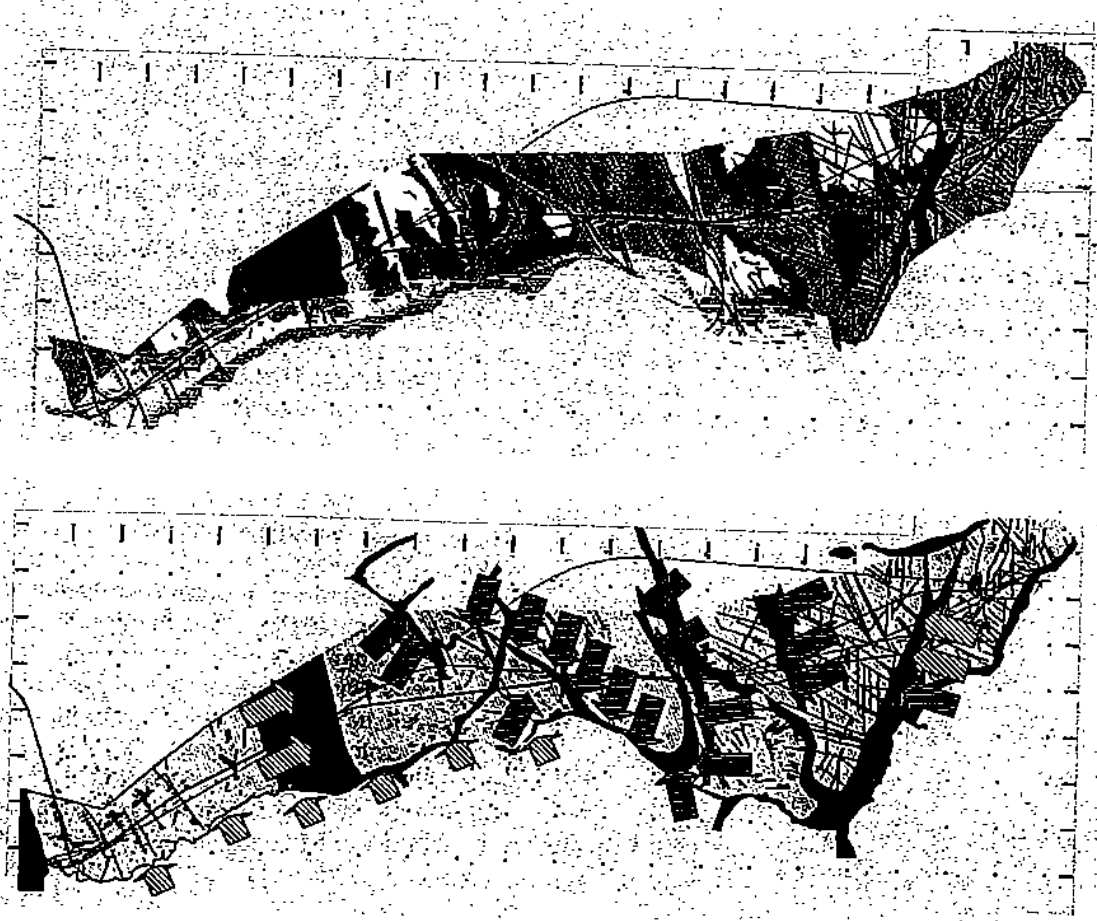


**Bild 4** Gegenüberstellung der Prognosen für das SQP und RMR entlang der Vorschlagstrasse des Brenner Basistunnels.

**Fig. 4** Comparison of distribution of squeezing potential and RMR classes.

de Gesteine entlang der Vorschlagstrasse als potenzielle Hauptproblemzonen anzusehen:

- o Pfitschtal für den Fall eines Tiefgangs der Dolomite bis auf Basistunnelniveau in vergleichbarer Form wie über Tage aufgeschlossen.
- o Hochstegenkalke und Kalkwandstangentrias nördlich und südlich der Zentralgneiskerne (zum Beispiel im Bereich des Venntals) für den



**Bild 5** Flächige Prognose des Squeezing Potenzials (grau = no sq., grün=minor sq., gelb=severe sq., orange= v. severe sq., rot=extreme sq.)

**Fig. 5** Areal prognosis of squeezing potential.

**Bild 6** Wassereintruchsrisko (grün = geringes, blau-türkis = erhöhtes Wassereintruchsrisko, Schraffuren: gelb/rot = erhöht durch starke Tektonisierung, schwarz/welss = durch Verkarslungsgefahr; schwarz/orange = Gefahr durch Wassereintruch in Kombination mit Sand/ Schlamm.)

**Fig. 6** risk of water inflow (green=low, blue= increased, yellow/red lines = risk due to heavy tectonisation, black/white lines = risk due to carstification observed at surface, black/ orange = water inflow in combination with high sand/mud content not excluded.

**Tabelle 2** Ausgewichene Problemzonen.  
**Table 2** Problematic zones avoided.

Problemzone	Maßnahme
Breite lockergesteinsähnliche Störzonen im Nahbereich der Brennerabschiebung auf österreichischer Seite Druckhaftes Gebirge	Problemzone wird im Osten ausgewichen (angestrebter durchschnittlicher Mindestabstand beträgt 1000 m)
Stark geklüftete und eventuell tiefgreifend verkarstete Schöberspiztrias Wassereintrichsrisiko	Dieser vermutlich auf Tunnelniveau auftretenden potenziell stark wasserführenden Zone wird nach Westen ausgewichen (Befund Bohrung Schmirntal)
Pflitschtal: an der Oberfläche sandig-zerfallende Rauwacken Wassereintrichsrisiko	Gemäß unsicherer geologischer Prognose wird diesen Gesteinen durch eine Trassenwahl im Bereich Kematen/Grube weitgehend ausgewichen; eine Alternative wäre eine Trassenwahl im Bereich Stein im östlichen hinteren Pflitschtal
Pflitschtal: Stark tektonisierte und geringfeste Furt-schagelschiefer: Druckhaftes Gebirge	Wird durch eine Trassenwahl im Bereich Kematen/Grube weitgehend ausgewichen
Maulser Trias: (teilweise starke tektonisiert, Mikrokast): Wassereintrichsrisiko	Dieser auf Tunnelniveau auftretenden potenziell stark wasserführenden Zone wird nach Osten ausgewichen
Talgrundwasseraquifere des Eisack, Wipp-, Valsertals auf italienischer Seite Wassereintrichsrisiko	Wahrung großer Abstände

Fall einer sehr tief greifenden Verkarstung bis auf Basistunnelniveau.

- ◊ Bereich Navistal (Schöfner Berg) für den Fall des Auftretens von Schuppen in Quarzphylliten beziehungsweise innerhalb der Nordrahmenzone,
- ◊ Maulser Tal, falls die Maulser Trias – entgegen der geologischen Prognose – bis auf Basistunnelniveau hinabreichen sollte und stark durchlässig ist.

Die Unsicherheiten sind durch die vorgesehenen weiteren Erkundungsmaßnahmen soweit wie möglich zu eliminieren. Wesentlich ist, dass sich allfällig erhöhte Zuflüsse durch Abdichtungs- und Injektionsmaßnahmen bemerkbar reduzieren lassen.

### Anmerkung zur Trassenwahl

Es wurde versucht, eine möglichst transparente und an die speziellen geologischen Verhältnisse des Projektgebiets angepasste Methode zur Trassenfindung anzuwenden. Diese Methode geht einerseits von Vorgaben aus (Portale, Bearbeitungsgebiet), konzentriert sich andererseits auf baugelogeologische Problemzonen und ist entscheidend beeinflusst durch die begrenzte Auswahl an Zwischenangriffsmöglichkeiten sowie günstigen Abschnitten für die Positionierung von bautechnisch anspruchsvollen Multifunktionsstellen. Durch die besonderen geologisch-geotechnisch-hydrogeolo-

gischen Verhältnisse des Brenner Basistunnels ist die Festlegung von Zwangspunkten möglich, die den Trassenkorridor im Westen und im Osten begrenzen beziehungsweise denen seitlich ausgewichen werden kann. In Tabelle 2 werden einige Problemzonen angeführt, denen durch die Trassenwahl ausgewichen werden konnte. Die nicht aufgeführten Problemzonen, welchen nicht ausgewichen werden konnte, werden auf möglichst kurzer Distanz durchfahren.

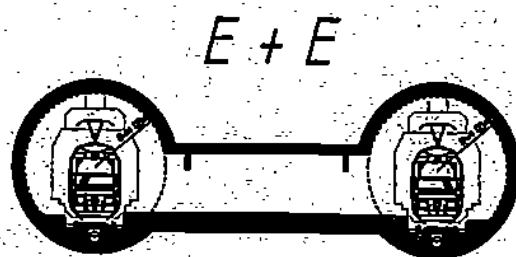
### Konzept für TBM-Einsatz

Aufbauend auf den vorhin erwähnten Untersuchungen der Gruppe Geologie/Geotechnik wurden vom Planungsteam Untersuchungen zur Baudurchführung vorgenommen und ein Vortriebskonzept erstellt, das überwiegend konventionelle Vortriebe vorsah.

Zusätzlich wurden von BBT EWIV die TBM-Spezialisten Studio Grandori & Associati, Rom, und SSP BauConsult GmbH, Innsbruck, mit der Ausarbeitung eines Konzepts für einen umfassenden Einsatz von TBM beauftragt. Die Beauftragung erfolgte nicht zuletzt, weil der Auftraggeber neben dem Know-how der Planer auch das Know-how bauausführender Unternehmungen und anderer TBM-Experten insbesondere hinsichtlich des Entwicklungspotenzials maschineller Vortriebe in die Planung einbeziehen wollte.

Die Studie wurde in dieser frühen Planungsphase in Auftrag gegeben, weil fundierte Aussagen zur Machbarkeit von maschinellen Vortrieben einen wesentlichen Einfluss auf Baukosten und Bauzeit haben. Dies ist ganz im Sinn der neuen österreichischen Entwurfsrichtlinie „Kontinuierlicher Vortrieb von Eisenbahntunneln mit TVM“ (9), die vorsieht, dass in der Planungsphase I – Vorstudie – neben der Wahl der Trassenvarianten und des Tunnelsystems (Einspurntunnel oder Doppelspurntunnel) auch die Machbarkeit

**Bild 7** Evaluiertes Tunnel-system E+E (4).  
**Fig. 7** Tunnel-system E+E.



eines TBM-Einsatzes auf Basis der zu diesem Zeitpunkt vorhandenen geologischen und geotechnischen Unterlagen beurteilt werden soll.

Das von BBT EWIV evaluierte Tunnelsystem E+E (Bild 7) bietet optimale Voraussetzung für einen TBM-Einsatz (Durchmesserbereich 9 bis 10 m). Das von der BBT internen Planungsgruppe ausgearbeitete Vortriebskonzept mit überwiegend konventionellem Vortrieb und nur drei kürzeren Pilotstollenabschnitten hat im Endbericht unter dem Stichwort „Konservativer Ansatz“ Eingang gefunden, während für das hier ausgeführte Konzept mit vorrangiger Verwendung von TBMs der Begriff „Innovativer Ansatz“ verwendet wurde.

Die Beurteilung, welche Abschnitte des Brenner Basistunnels mit TBM aufgefahren werden können, hat entscheidenden Einfluss auf Bauzeit, Baukosten und über die Bauzeit auch auf die Finanzierungskosten. Die Entscheidung über die Wahl der Vortriebsmaschine beeinflusst auch den Ausbau.

Der erarbeitete Bericht basiert auf dem gegenwärtigen Erkundungs- und Planungsstand, der zwischen Vorstudie und Vorprojekt anzusiedeln ist. Die für die Beurteilung der Einsatzmöglichkeiten von TBM erforderlichen Angaben lagen im Wesentlichen vor.

Aufgrund des frühen Projektstands sind die Werte mit erheblichen Unsicherheiten behaftet – die Genauigkeit der geologischen Prognose ist als mäßig bis niedrig einzustufen (4) –, was entsprechende Auswirkungen auf die daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen hat. Die für die Studie zur Verfügung gestellten Unterlagen beziehen sich auf die im Plan dargestellte Trasse. Überlegungen zur Wahl der Trasse waren nicht Gegenstand der Untersuchung zur Einsatzmöglichkeit von TBM.

Anhand der vorgegebenen Linienführung, den geotechnischen und hydrogeologischen Prognosen wurden nachfolgende Fragestellungen untersucht:

- Pilotstollen:
  - Ja, nein, in ausgewählten Abschnitten,
  - TBM-Typ, Auskleidungstyp, Durchmesser,
  - Lage im Querschnitt,
- Haupttunnel:
  - Mögliche Vortriebsbereiche für TBMs,
  - Störzonen, Überwindung, Maßnahmen, Zeitreserven,
  - Penetration, Ausnutzungsgrad, Vortriebsleistungen,
  - Einzusetzende TBM-Typen und Gesamtanzahl beziehungsweise Baulostteilung,
  - Vortriebsrichtungen, Abschnittslängen, eventuelle zusätzliche Angriffspunkte, Schutterkonzept (wegen Auswirkungen auf Materialmanagement beziehungsweise Deponiestandorte, Baustellenverkehr),
  - Bergwassermanagement (möglichst keine Abschnitte ohne freien Abfluss),
  - Bauzeit,
  - Abstimmung zwischen „konventionellem“ und „innovativem“ Konzept sofern in Teilbereichen gleich,

○ Weitere Erkundungsmaßnahmen.

Die geologisch/geotechnische Prognose stellt eine auf mehreren Ansätzen basierende Grundlage zur Verfügung:

- Gefährdungsbilder,
- Gebirgskennwerte (primär aus Rückrechnung):
  - Gesteins- und Gebirgsfestigkeiten,
  - Klüftigkeitsverhältnisse,
  - RMR,
  - GSI,
- Squeezing Potenzial (SQP) für 9 m Durchmesser Hohlräume ohne Ausbau,
- Hydrogeologie, Gebirgstemperaturen.

Das Squeezing Potenzial lieferte neben den RMR-Werten die Hauptinformation für den möglichen TBM-Einsatz.

Ziel der TBM-Einsatzplanung war es, möglichst Bereiche mit SQP < 5 % maschinell aufzufahren. Für die Pilotstollen mit wesentlich kleinerem Durchmesser (4,8 bis 5,2 m), die unter Verwendung von TBM-DS und Tübbingausbau aufgefahren werden sollen, konnte diese Grenze höher angesetzt werden. Von den Pilotstollen aus bietet sich die Möglichkeit, begrenzte Bereiche für den Haupttunnelvortrieb im Sinn gebirgsverbessernder Maßnahmen vorzubehandeln und so das Risiko für den Haupttunnelvortrieb zu minimieren. Diese Lösung ist einer unsicheren Vorerkundung vom Hauptvortrieb aus risiko- und bauzeitmäßig vorzuziehen.

### Pilotstollen

Untersucht wurden die Vor- und Nachteile eines Pilotstollens, wobei der Pilotstollen im späteren Rettungskonzept keine Rolle spielen soll (E+E Tunnelsystem). Zur Erfüllung verschiedenster Funktionen sowohl in der Erkundungs- als auch in der Bauphase wurde der Bau von Pilotstollen über etwa 80 % der Tunnellänge vorgeschlagen (davon rund 75 % mit TBM). Als Entscheidungskriterien dienen vor allem:

- Erkundung allgemein/Erkundung für nachfolgenden Hauptvortrieb mit TBM,
- Freie Wasserabfuhr mit ausreichendem Gefälle,
- Bauzeit/Bauzeitrisiko,
- Baubetrieb,
- Mögliche Nachnutzungen.

Hohe Priorität wurde dabei einem freien Bergwasserabfluss in den Vortrieben gegenüber einer Pumpförderung eingeräumt, insbesondere vor dem Antreffen der potenziell stark wasserführenden Hochstegenzone und der karbonatischen Bedeckung der Zentralgneise. Diese Bedingung ist nur beim „Innovativen Ansatz“ voll erfüllt.

Die Pilotstollen sollen überwiegend maschinell mit TBM-DS hergestellt werden. Einzelne Bereiche – insbesondere im Anschluss an die konventionell herzustellenden Zufahrtstunnel (ZFT) und Zwischenangriffe – sollen konventionell hergestellt werden. Zeitkritisch einzustufen ist der

Abschnitt zwischen Pfons und Steinach. In diesem Bereich ergaben die Untersuchungen die Notwendigkeit eines zusätzlichen Zwischenangriffs, um ein zeit- und risikomäßig plausibles Bauzeitprogramm darstellen zu können. Dieser zusätzliche Zwischenangriff bringt bauzeit- und risikomäßig entscheidende Vorteile, die auch in die Planung für den „Konventionellen Ansatz“ Eingang gefunden haben.

Der Pilotstollen im Süden beginnt mit dem Servicetunnel Aicha, dieser wird zur Erreichung der Ebene im Riggertal errichtet, wo der Großteil der Baustelleneinrichtung des Südvortriebs konzentriert werden kann. Durch diese Maßnahme kann der Baustellenverkehr auf dem bestehenden Verkehrsnetz im Abschnitt Franzensfeste-Sterzing reduziert werden.

Die Pilotstollen sollen mit Ausnahme der folgenden geologisch schwierigen Abschnitte maschinell vorgetrieben werden:

- ◊ Nordrahmenzone (km 12,0 bis 22,05),
- ◊ Periadriatische Naht (Mauls) (km 47,7 bis 48,7),
- ◊ Eventuell der nördliche und südliche Übergang zum Zentralgneis (km 29,9 bis 31,0 und 35,9 bis 37,5).

Dem Bau der Pilotstollen muss jedoch ein umfangreiches Erkundungs- und Bohrprogramm vorangehen, vor allem um die Grenzen zwischen maschinellen und konventionellen Vortrieben zuverlässiger festlegen zu können.

Als Vortriebssystem wurde in den maschinell vorzutreibenden Abschnitten der Pilotstollen ausnahmslos teleskopierbare Doppelschild-TBMs (TBM-DS) mit etwa 5 m Bohrdurchmesser und einer Tübbingauskleidung vorgeschlagen. In diesem Durchmesserbereich sind mit diesem Vortriebssystem auch unter schwierigen Gebirgsverhältnissen erfahrungsgemäß relativ hohe Vortriebsgeschwindigkeiten zu erreichen.

Im ersten südlichen Abschnitt des Pilotstollens ist aus jetziger Sicht auch der Einsatz einer offenen Hartgesteins-TBM denkbar. Diese Möglichkeit kann nach der nächsten Erkundungsphase mittels einer Risikoanalyse zuverlässiger abgeklärt werden.

Die Lage des Pilotstollens soll zwischen den Haupttunnelröhren, aber unterhalb deren Niveau erfolgen. Diese Anordnung bringt Vorteile für die Entwässerung, ermöglicht die vorauseilende Behandlung schwieriger Gebirgsbereiche für die Haupttunnelauffahrung, bietet Vorteile für den Baubetrieb und das Materialmanagement. Darüber hinaus entfallen unerwünschte Kreuzungen des Pilotstollens mit den Querschlägen.

Die Weiterverwendung beziehungsweise Fertigstellung (Durchschlag) des Pilotstollens kann einem späteren Nutzer überlassen werden. Insbesondere von italienischer Seite gibt es Überlegungen für eine Nachnutzung des Pilotstollens, zum Beispiel für eine zusätzliche Netzverknüpfung im Hochspannungsnetz zwischen Westösterreich und Italien.

In den erarbeiteten Bauzeitprogrammen wurde eine Verknüpfung zwischen Pilotstollen und Haupttunnelarbeiten mit einem zeitlichen Abstand von etwa sechs Monaten in den jeweiligen Bauplänen angenommen. Die sich daraus ergebende Rohbauzeit ist gesamt betrachtet sicher als untere Grenze anzusehen.

Nachdem die Realisierungsform des Brenner Basistunnels als rein öffentliches oder PPP/BOT-Projekt noch einer politischen Entscheidung bedarf, ist die im Bauablaufplan vorgesehene Verknüpfung der Pilotstollenerstellung mit der Haupttunnelerrichtung unter Umständen nicht realisierbar. Die Lösung dieser Frage ist abhängig von der Vertragsform und anderen offenen Punkten wie Konzessionsmodell, Risikotragung, Bauzeit, Finanzierungskosten und Fertigstellungsrisiko.

## Haupttunnel

Für den TBM-Vortrieb in den Haupttunneln werden in der Untersuchung grundsätzlich Schildmaschinen empfohlen (TBM-S). Ob Einfach- oder Doppelschild-TBM verwendet werden sollen, ist vorerst von untergeordneter Bedeutung und kann zu einem späteren Zeitpunkt entschieden werden. In diese Entscheidung sollten nach Möglichkeit ausführende Firmen einbezogen werden. Insbesondere weil bisher noch wenig Erfahrungen mit Doppelschildmaschinen im Durchmesserbereich von 8 bis 10 m vorliegen, geht die vorliegende Untersuchung von Maschinen mit Einfachschild aus. Der Einsatz zweier baugleicher, innovativer 10 m Doppelschildmaschinen ist für 2003 in Spanien geplant (5).

In Anbetracht des größeren Durchmessers (9,4 bis 9,6 m) empfiehlt sich aus mehreren Gründen die Verwendung von Einfachschilden:

- ◊ Kurzer Schild,
- ◊ Variabler Durchmesser einfacher zu realisieren als bei TBM-DS,
- ◊ Geringere Anschaffungskosten als TBM-DS,
- ◊ Aus heutiger Sicht in diesem Durchmesserbereich mehr Erfahrung mit TBM-S als mit TBM-DS vorhanden.

Die für den Haupttunnel vorgesehenen Maschinen sollten grundsätzlich über durchmesserstellbare Frontschilde und weitere Zusatzeinrichtungen wie Überbohr- und Vorbohrreinrichtungen verfügen. Darüber hinaus wäre zu untersuchen, ob nicht durch eine Bohr- und Versetzeinrichtung für lange Brustanker aus GFK die in druckhaften Zonen auftretenden Verformungen reduziert werden können. Auf den streckenweise sinnvollen Einsatz von nachgiebigen Auskleidungssystemen wurde hingewiesen.

Beim „Innovativen Konzept“ sollen neben den Multi-Funktionsstellen (MFS) und dem Multifunktionsbahnhof (MFB) nur folgende Abschnitte konventionell ausgebrochen werden (Bild 8):

- ◊ Bauabschnitt Pfons (km 12,0 bis 17,0),
- ◊ Bauabschnitt Steinach Nord (km 17,0 bis 20,35),



- ◊ Bauabschnitt Wiesen Nord (km 39,5 bis 35,9),
  - ◊ Bauabschnitt Mauls Nord (km 48,7 bis 47,7).
- Der geplante Anteil der maschinellen Vortriebe an den Haupttunneln (ohne Anteile in MFS, MFB) beträgt demnach etwa 62 %.

### MFS, MFB und Zufahrtstunnel

Aus heutiger Sicht wird empfohlen, sämtliche Zufahrtstunnel und die Multifunktionsstellen (MFS) beziehungsweise den Multifunktionsbahnhof (MFB) konventionell auszubrechen. Eine weitere Optimierung mit dem Ziel, Teile der Haupttunnel im MFS-Bereich und eventuell im MFB-Bereich mit TBM aufzufahren, kann in einer späteren Planungsphase erfolgen.

### Auskleidungssystem

Bei der Erstellung dieser Studie wurde davon ausgegangen, dass im Endausbau auf die gesamte Tunnellänge eine zweischalige Auskleidung mit dazwischenliegender Abdichtung ausgeführt wird. Die Ausbildung der Innenschale ist im Wesentlichen unabhängig von der Vortriebsmethode.

Bei den für den Brenner Basistunnel vorgeschlagenen Schild-TBM werden grundsätzlich Tübbinge eingebaut. Aufgrund der zu erwartenden Verhältnisse wird empfohlen, den Tübbingausbau in druckhaften Zonen nachgiebig zu gestalten. Für die mit TBM-DS aufgefahrenen Pilotstollen ist der nachgiebige Ausbau nicht erforderlich, es wäre jedoch zu überlegen, ob der von der MFS-Patsch in Richtung Süden aufzufahrende Pilotstollen-Abschnitt nicht als Teststrecke mit einer nachgiebigen Tübbingauskleidung ausgeführt werden sollte.

## Vortriebsleistung

Aufgrund der in dieser frühen Phase zur Verfügung stehenden geologisch/geotechnischen Datenbasis war es am zweckmäßigsten, die Penetration anhand des Prognosemodells von Gehring (6, 7) zu ermitteln. Die dazu benötigten Daten, im Wesentlichen einaxiale Druckfestigkeit, Trennflächenabstand und Trennflächenorientierung waren weitgehend vorhanden. Maschinenparameter wie Diskendurchmesser (17 Zoll) und Anpresskraft (200 kN) mussten definiert werden. Eine höhere Anpresskraft beziehungsweise ein größerer Diskendurchmesser sind heute durchaus möglich, jedoch für die zu erwartenden Gesteinsfestigkeiten von maximal 170 MPa nicht sinnvoll.

Der Einfluss der hohen Überlagerung wurde insofern berücksichtigt, dass ab einer Überdeckung von 1000 m die Penetration mit einem Abminderungsfaktor reduziert wurde. Die aufgrund der geringen Gesteinsdruckfestigkeit in den meisten Prognoseeinheiten ermittelten sehr hohen Penetrationswerte können in der Praxis nicht erreicht werden, da die Diskengeometrie den maximalen Wert der Penetration definiert. Hier wurde eine praktisch erreichbare mittlere Penetration von 15 mm/min<sup>-1</sup> angesetzt.

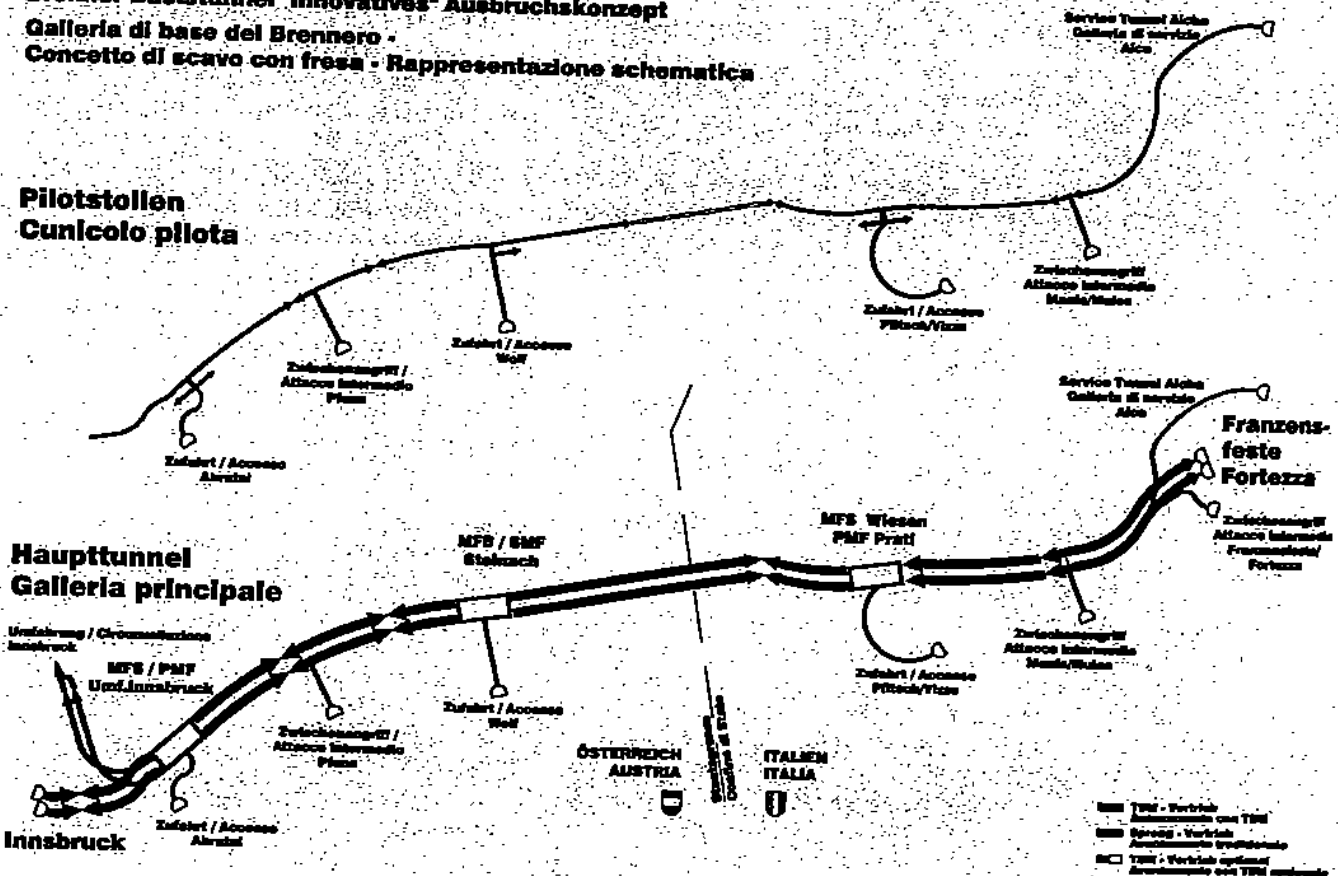
Für den Haupttunnel wurde eine Maschine mit 9,4 m Durchmesser, einer Drehzahl von 5,4 min<sup>-1</sup> (entspricht einer Umfangsgeschwindigkeit von rund 160 m/min) angenommen, für den Pilotstollen eine Maschine mit 5 m Durchmesser und Drehzahl von 9 min<sup>-1</sup> (Umfangsgeschwindigkeit etwa 141 m/min). Die ermittelte Nettovortriebs-

**Bild 8** Schematische Darstellung Vortriebsverfahren beim "Innovativen Konzept" (4).  
**Fig. 8** Brenner Base Tunnel-Excavation "innovative concept".

### Brenner Basistunnel "Innovatives" Ausbruchskonzept Galleria di base del Brennero - Concetto di scavo con fresa - Rappresentazione schematica

#### Pilotstollen Cunicolo pilota

#### Haupttunnel Galleria principale





**Tabelle 3** Rohbauzeit „Innovatives Konzept“ (4).**Table 3** Schedule „innovative concept“.

Bauphasen	Haupttätigkeiten	Dauer in Jahren	Dauer in Jahren im zeitkritischen Bereich (km 24 - 39,5)
Baustelleneinrichtung	Baustelleneinrichtung	0,33 - 0,66	0,33
Zufahrtstunnel und Pilotstollen	Vortrieb und Ausbau	2,66	2,66
Mobilisierung Haupttunnel		0,2 - 0,5	0,5
Haupttunnel	Vortrieb und Ausbau	1,8 - 3,2	3,9
	Innenauskleidung	0,4 - 2,5	
<b>Gesamt Rohbauzeit</b>			<b>7,4</b>

leistung wurde aus logistischen Gründen (Förder- und Transportkapazität und Methode) für den Haupttunnel mit 4,5 m/h, für den Pilotstollen mit 6 m/h begrenzt.

Für die tägliche Arbeitszeit wurden trotz geplanten Durchlaufbetriebs nur 18 h/d angesetzt (restliche 6 h/d Wartung für TBM-S, Nachlauf und Versorgungslogistik). Für die Berechnung der tatsächlichen Vortriebsleistung wurden in Abhängigkeit von den gegebenen RMR-Werten je nach Maschinentyp für Haupttunnel und Pilotstollen unterschiedliche Ausnutzungsgrade angesetzt. Diese wurden aus abgewickelten Projekten beziehungsweise Untersuchung der Autoren abgeleitet (8). Aus den so ermittelten Leistungswerten je Prognoseeinheit wurden in weiterer Folge längengewichtete und auf die baupraktischen Einheiten zusammengefasste Durchschnittswerte ermittelt. Störzonen und andere geologische Problembereiche in den Prognoseeinheiten wurden auf ihren möglichen Einfluss auf den maschinellen Vortrieb hin untersucht. Aufgrund des derzeitigen Prognosestands wurden nicht die einzelnen Störzonen berücksichtigt, sondern jedem TBM-Vortriebsabschnitt Stillstandstage zugeschlagen und darauf aufbauend die Monatsleistung beziehungsweise die Vortriebsdauer ermittelt.

### Bauzeit

Aus den ermittelten Vortriebsdauern sowie dem detaillierten Bauprogramm ergibt sich die in der Tabelle 3 zusammengefasste Rohbauzeit für Pilotstollen und Haupttunnel. Dazu kommen noch die Zeiten für Oberbau und Bahntechnik. Die relativ kurze Rohbauzeit ist nur realisierbar, wenn – ausgenommen für die Strecke im Zentralgneis – auf der gesamten Länge des Brennerbasistunnel Pilotstollen vorab aufgefahren werden.

Zur Entscheidungsfindung, welche Strecken konventionell und welche maschinell aufgefahren werden können, sollte nach der nächsten Bohr- und Erkundungsphase eine Risikoanalyse für jeden Teilabschnitt beziehungsweise des gesamten Tunnels durchgeführt werden.

### Fazit

Im Rahmen der Aktualisierung der Machbarkeitsstudien aus den Jahren 1987 und 1993 wurde in den Jahren 2001/02 eine komplette geotechnisch-geologische Neubeurteilung des Brennerbasistunnels vorgenommen. Die Hauptaufgaben waren aus geologisch geotechnischer Sicht: Trassenwahl, geologisch-hydrogeologische und geothermische Prognose sowie weitere Sondierungen.

Basierend auf dieser Prognose wurde von einer anderen Arbeitsgruppe ein Vortriebskonzept entwickelt, das einen möglichst hohen Anteil an maschinellen Vortrieben mit TBM vorsieht. Dieses Konzept sieht vor, über mehr als 80 % der gesamten Tunnellänge Erkundungsstollen vorgängig zu den Haupttunneln herzustellen. Hierzu wird der Einsatz von Doppelschild-TBM (TBM-DS) mit 5 m Durchmesser empfohlen. Für den Vortrieb der beiden Röhren des Haupttunnels sind Schild-TBM (TBM-S) mit etwa 9,6 m Durchmesser vorgesehen. Mit diesem Vortriebskonzept ist eine Rohbauzeit von knapp 7,5 Jahren realisierbar.

Nachdem die Politik inzwischen der Gründung einer Errichtungsgesellschaft zur weiteren Projektaufbereitung ihre Zustimmung erteilt hat, können die nächsten Schritte zur erfolgreichen Umsetzung des Brenner Basistunnels in die Wege geleitet werden.

### Quellennachweis

1. N.N.: *Brenner Basistunnel – Technische Projektaufbereitung 2002*. BBT EWIV, Innsbruck 2002.
2. Hoek, E.: *Practical rock engineering*. www.rockscience.com/hoek. 2000.
3. Barla, G.: *Tunnelling Mechanics*. D. Kolymbas (ed.): Eurosummerschool Innsbruck 2001, Berlin: Logos Verlag, 2001.
4. N.N.: *Report 2002/Technisches Projekt – Brenner Basistunnel*. BBT EWIV, Innsbruck 2002.
5. Götter, W.: *Layout einer neuen 10-m-Universal-Doppelschild-TBM für den Hochgeschwindigkeitsbahntunnelbau*. Tagungsband Österreichischer Tunnellag 2002, S. 81-91. Essen: Verlag Glückauf, 2002.
6. Gehring, K.: *Leistungs- und Verschleißprognosen im maschinellen Tunnelbau*. In: *Felsbau* 13 (1995), Nr. 6.
7. Gehring, K.: *Classification of Drillability, Cuttability, Boreability and Abrasivity in Tunnelling*. In: *Felsbau* 15 (1997), Nr. 3.
8. Spiegl, M.: *Mechanischer Stollenvortrieb: Vergleich zwischen einer offenen beziehungsweise geschlossenen Tunnelbohrmaschine; Fallbeispiel: Evinos-Mornos Projekt Griechenland*. Diplomarbeit, Innsbruck 1995.
9. ÖBB: *Entwurfsrichtlinie – kontinuierlicher Vortrieb von Eisenbahntunneln mit TVM*. In Ausarbeitung.

### Autoren

Mag. Dieter Fellner, Elektrowatt Infra AG, Zürich, Schweiz, E-Mail dieter.fellner@ewi.ch; Dipl.-Ing. Dr.techn. Markus Spiegl, SSP BauConsult GmbH, Ingenieurbüro für Baubetrieb und Bauwirtschaft, Innsbruck, Österreich, E-Mail m.spiegl@sspbaucanult.at; o.Univ.-Professor Dipl.-Ing. Eckart Schneider, Institut für Baubetrieb, Bauwirtschaft und Baumanagement, Universität Innsbruck, Innsbruck, Österreich, E-Mail eckart.schneider@uibk.ac.at; Dott. Remo Grandori, Studio Grandori & Associati, Rom, Italien, E-Mail selispa@selitunnel.com; Univ.Ass. Dipl.-Ing. Wolfgang Leitner, Institut für Baubetrieb, Bauwirtschaft und Baumanagement, Universität Innsbruck, Innsbruck, Österreich, E-Mail w.leitner@uibk.ac.at