Konrad Bergmeister DOI: 10.1002/geot.201900038

The Brenner Base Tunnel – geological, construction and logistical challenges and innovations at half time

Der Brenner Basistunnel – geologische, bautechnische, logistische Herausforderungen und Innovationen zur Halbzeit

The Brenner Base Tunnel with a total of 230 km of tunnels is a geological, structural and logistical challenge. The transnational project is an additional challenge, considering different planning, approval and construction rules and cultures. From the start of construction in 2007 to the present, today halftime is reached with 100 excavated tunnel kilometers. An overview of selected topics is given in this contribution, such as project optimizations of the emergency areas, geological/geotechnical knowledge transfer from the already driven exploratory tunnel to the following construction lots of the parallel main tunnels, reprocessing and use of Schists as aggregates for the inner lining and shotcrete production, logistics experience with wheel-bound transport vehicles, measurements during construction with laser tunnel scanners and the service life of the tunnel of 200 years with an increased safety concept defined in the guide conceptual design. Preparations and planning are already at an advanced state for the second half of the project, concerning the next excavation lots, secondary linings as well as interior work with the installation of the technical equipment. The construction work is expected to be completed in 2025 and the end of construction is expected at the end of 2028 (2030 in case of risk occurrence).

1 Project development

The Brenner Base Tunnel (BBT) with 64 km of alignment and altogether 230 km of tunnel is the longest underground tunnel system in the world. It is part of the 9,121 km long TEN-T Scan-Med (Scandinavian-Mediterranean) Corridor from Finland to Malta.

The first feasibility study was produced in 1987/89. An optimisation process between 1996 and 1997 included assessment and selection of possible alignment variants, detailed selection of tunnelling methods, decisions about the safety concept and the emergency stations, verification of the tunnel concept and verification of construction feasibility as well as essential cost optimisations. The preliminary design was produced between 1999 and 2002. After the signing of the state contract on 30 April 2004 and the founding of the BBT SE on 16 December 2004, the design for approval and the environmental impact study were processed from 2005 until February 2008. Finally the designs were handed in for approval in Austria and in Italy. The cross-border project was approved in Italy on 31 July 2009 and the final approval in Austria was issued on 31 August 2009 [1].

Der Brenner Basistunnel mit einer gesamten Länge von 230 Tunnelkilometern ist eine geologische, bautechnische und logistische Herausforderung. Unterschiedliche Planungs-, Genehmigungs- und Baukulturen des länderübergreifenden Bauwerks machen dieses Vorhaben noch komplexer. Vom Baubeginn 2007 bis zur heutigen Halbzeit mit über 100 vorgetriebenen Tunnelkilometern werden an dieser Stelle ausgewählte Themen vorgestellt, z. B. die Projektoptimierung der Nothaltestellen, der geologische und geotechnische Erkenntnistransfer der im vorauseilenden Erkundungsstollen gesammelten Erfahrungen auf die Hauptbaulose für die bereits durchörterten drei von vier Hauptlithologien, die Wiederaufbereitung und Verwendung des Bündner Schiefers im Innenschalen- und Spritzbeton, Logistikerfahrungen mit radgebundenen Transportfahrzeugen, baubegleitende Messungen mit Laser-Tunnelscanner und die Nutzungsdauer von 200 Jahren mit dem daraus folgenden erhöhten Sicherheitskonzept in der übergreifenden Regelplanung. Für die Herausforderungen der zweiten Halbzeit wie den weiteren Vortrieben, dem Innenausbau und dem bahntechnischen Ausbau sind die Vorbereitungen und Planungen bereits weit vorrangeschritten. Bei einem Abschluss der Rohbauarbeiten im Jahre 2025 ist mit einer Gesamtfertigstellung Ende 2028 (bei Eintreten von Risiken 2030) zu rechnen.

1 Projektentwicklung

Der Brenner Basistunnel (BBT) wird mit 64 km Streckenlänge und insgesamt 230 km Tunneln das längste unterirdische Tunnelsystem der Welt. Er ist Teil des 9.121 km langen TEN-T Scan-Med (Scandinavian-Mediterranen) Korridors von Finnland nach Malta.

Die erste Machbarkeitsstudie wurde 1987/89 erstellt. Von 1996 bis 1997 erfolgte im Rahmen einer Optimierung eine Bewertung und Auswahl der möglichen Trassenvarianten, eine detailliertere Auswahl der Tunnelbaumethode, Festlegungen zum Sicherheitskonzept und zu den Nothaltestellen, die Verifikation des Tunnelkonzepts und der Nachweis der bautechnischen Machbarkeit sowie entscheidende Kostenoptimierungen. Zwischen 1999 und 2002 wurde das Vorprojekt ausgearbeitet. Nach dem Staatsvertrag, unterzeichnet am 30. April 2004 und der Gründung der BBT SE am 16. Dezember 2004 wurde das Einreich- und UVP-Projekt von 2005 bis Februar 2008 ausgearbeitet. Anschließend erfolgte die Einreichung in Österreich und in Italien. Am 31. Juli 2009 wurde dieses grenzüberschreitende Infrastrukturprojekt in Italien genehmigt, am 31. August 2009 erfolgte die letzte Genehmigung in Österreich [1].

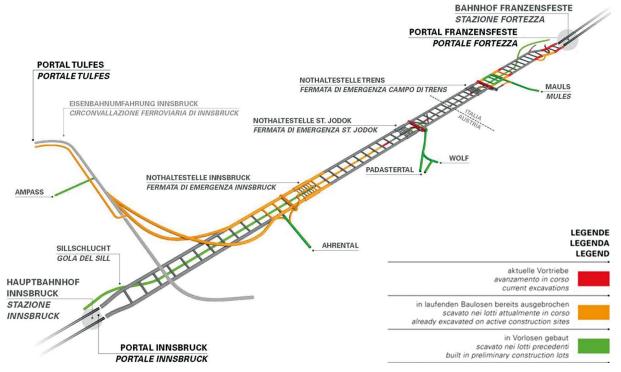


Fig. 1. Construction state of the BBT in April 2019 Bild 1. Bauzustand des BBTs im April 2019

2 The tunnel system

2.1 System

The maximum vertical gradient of the BBT is 6.7 ‰ from Tulfes to the Brenner and 3.9 ‰ from the Brenner to Franzenfeste. The maximum overburden is 1,800 m. The BBT will be travelled by passenger and freight trains, which will be able to cross the Alps without having to overcome the 1,371 m high Brenner Pass (Figure 1).

2.2. Emergency stations

Three emergency stations are being built along the tunnel route at a maximum distance of 20 km, located south of Innsbruck (km 6.5), under St. Jodok (km 25) and east of Trens (km 45). These emergency stations can be reached through the main tunnels and also accessed by emergency services vehicles and busses through directly connected access tunnels. At the emergency stations, a central tunnel is provided above the exploratory tunnel (EKS) to serve as a safe holding area in case of an incident. The holding area is about 0.5 km long with a direct connecting tunnel to the associated access tunnel. The two main tunnels are connected to the central tunnel with six connecting tunnels at a spacing of 90 m. Above the central tunnel is a separate extraction tunnel to deal with any smoke development in case of an incident (Figure 2).

2.3 Exploratory tunnel

The continuous exploratory tunnel (EKS) is more than 60 km long and runs about 12 m below the main tunnels to Aicha (cf. Figures 1 and 2). The EKS is being excavated ahead of the main tunnels in order to investigate the geology and rock mass behaviour. The results of this geologi-

2 Das Tunnelsystem

2.1 System

Die maximale Längsneigung des BBT beträgt von Tulfes bis zum Brenner 6,7 ‰ und vom Brenner bis Franzenfeste 3,9 ‰. Die maximale Überlagerung beträgt 1.800 m. Der BBT wird in Zukunft von Güter- und Personenzügen befahren, die ohne die Überwindung des 1.371 m hohen Brennerpasses die Alpen unterqueren können (Bild 1).

2.2. Nothaltestellen

Entlang der Tunnelstrecke werden in einem maximalen Abstand von 20 km drei Nothaltestellen gebaut. Diese Nothaltestellen befinden sich südlich von Innsbruck (km 6,5) unterhalb von St. Jodok (km 25) und östlich von Trens (km 45). Diese Nothaltestellen können über die Tunnelröhren als auch über direkt angebundene Zufahrtstunnel mit Einsatzfahrzeugen und Bussen angefahren werden. Im Bereich der Nothaltestelle wird mittig, oberhalb des Erkundungsstollens (EKS) ein Mittelstollen angeordnet, der als sicherer Warteraum in einem Ereignisfall dient. Dieser rund 0,5 km lange Warteraum ist mit einem Verbindungstunnel direkt mit dem jeweiligen Zufahrtstunnel verbunden. Die beiden Haupttunnel sind mit sechs Verbindungsstollen im Abstand von 90 m an den Mittelstollen angebunden. Oberhalb des Mittelstollens befindet sich abgetrennt ein Abluftstollen für eventuelle Rauchentwicklungen bei Ereignisfällen (Bild 2).

2.3 Erkundungsstollen

Der durchgehende, über 60 km lange Erkundungsstollen (EKS) beginnt im Norden in der Sillschlucht und führt mittig, etwa 12 m unterhalb der beiden Haupttunnel nach

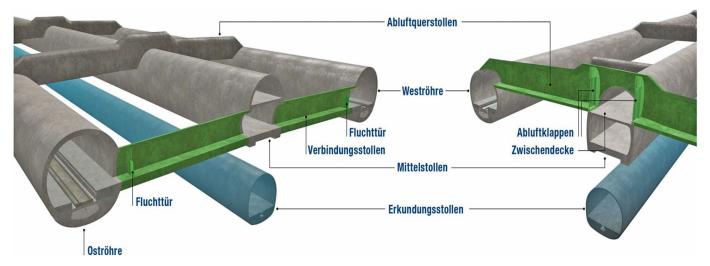


Fig. 2. Tunnel system at the emergency stations Bild 2. Tunnelsystem im Bereich der Nothaltestellen

cal and hydrogeological exploration are used for the construction of the main tunnels [2]. The continuous EKS enables ground improvement measures to be carried out for the main tunnels and reduces the extent of probing from the main tunnels. The geological, hydrogeological and geotechnical information is gained by means of in-situ observations, probe drilling, seismic testing and the evaluation of machine parameters [3].

By the end of June 2019, about 18 km of the EKS had been excavated south of the Brenner. The 10.5 km long section of the exploratory tunnel from Aicha to Mauls (Aicha-Mauls contract) was driven by a double shield tunnel boring machine (TBM) starting on 30 August 2008 until early 2010 [4] [5]. This section of the EKS is entirely located in the Brixner granite. The geological forecast included 18 faults, of which eight were actually encountered. Around chainage 2,560 m, an unforecast fault was encountered, which caused slight deformations and crack formation in the segments. The thickest fault is the Weissenbach fault, which was forecast at chainage 5,830 m with a thickness of 50 m. The fault actually occurred earlier at chainage 5,760 to 5,864 and was accompanied by numerous water ingress locations. This geologically rather insignificant fault did, however with its orientation parallel to the tunnel axis, caused high deformations of up to 60 cm, leading to a failure of the segments. This caused a stoppage of the TBM for almost four months.

The section 2 km long through the Periadriatic fault zone was constructed by drill and blast with a stiff lining (EKS Periadriatic fault zone contract). During tunnelling, great deviations were found in the dimensions of the fault zone with a grater overall thickness.

Further north, the altogether 14.5 km long EKS is being bored by a double shield machine to the Brenner.

North of the Brenner, about 22 km of the exploratory tunnel had been excavated by the end of June 2019, of which 15 km with an open gripper machine. This section passed through two major tectonic units, the Innsbrucker quartz phyllite zone in the northern part and the adjoining penninic Bündner schists adjoining to the south [6].

Work started on 4 December 2009 on the construction of the almost 6 km long EKS from the Sillschlucht Aicha (vgl. Bilder 1 und 2). Der EKS wird vorrauseilend vor dem Bau der Haupttunnel ausgebrochen, um die Geologie und das Gebirgsverhalten zu erkunden. Die Ergebnisse dieser geologischen und hydrogeologischen Erkundungen werden für den Bau der Haupttunnels genutzt [2]. Der durchgängige EKS ermöglicht die Durchführung gebirgsverbessernder Maßnahmen für die Haupttunnel und reduziert die Vorauserkundungsmaßnahmen in den Haupttunneln. Die geologischen, hydrogeologischen und geotechnischen Informationen werden mittels In-situ-Beobachtungen, Vorausbohrungen, seismischen Prüfungen und Auswertung von maschinentechnischen Parametern gewonnen [3].

Bis Ende Juni 2019 wurden südlich des Brenners ca. 18 km EKS ausgebrochen. Der 10,5 km lange Erkundungsstollenabschnitt von Aicha nach Mauls (Baulos Aicha-Mauls) wurde mit einer Doppelschildmaschine beginnend am 30. August 2008 bis Frühjahr 2010 aufgefahren [4] [5]. Dieser Abschnitt des EKS befindet sich zur Gänze im Brixner Granit. Die geologische Prognose sah 18 Störungen vor; davon wurden acht Störungen angetroffen. Im Bereich bei Tunnelmeter 2.560 wurde eine nicht prognostizierte Störung angetroffen, die geringe Deformationen und Rissbildungen in den Tübbingen verursachte. Die mächtigste Störung ist die Weissenbachstörung, die bei Tunnelmeter 5.830 mit einer Mächtigkeit von 50 m prognostiziert war. Diese Störung trat aber bereits bei Tunnelmeter 5.760 bis 5.864 auf. Sie war begleitet von zahlreichen Wasserzutritten. Bei Tunnelmeter 6.151 wurde eine ca. 5 m mächtige, zum Tunnel parallel verlaufende nicht prognostizierte Störung angetroffen. Diese geologisch eher unbedeutende Störung verursachte jedoch durch ihre parallele Orientierung zur Tunnelachse starke Deformationen bis zu 60 cm, was zu einem Versagen der Tübbinge führte. Es kam zu einem knapp viermonatigen Stillstand der Tunnelvortriebsmaschine.

Der 2 km lange Abschnitt durch die periadriaische Störungszone wurde mittels Sprengvortrieb und steifem Ausbau hergestellt (Baulos EKS periadriaische Störungszone). Beim Vortrieb traten größere Änderungen in den Abmessungen der Störungszone mit einer höheren Gesamtmächtigkeit als prognostiziert auf.

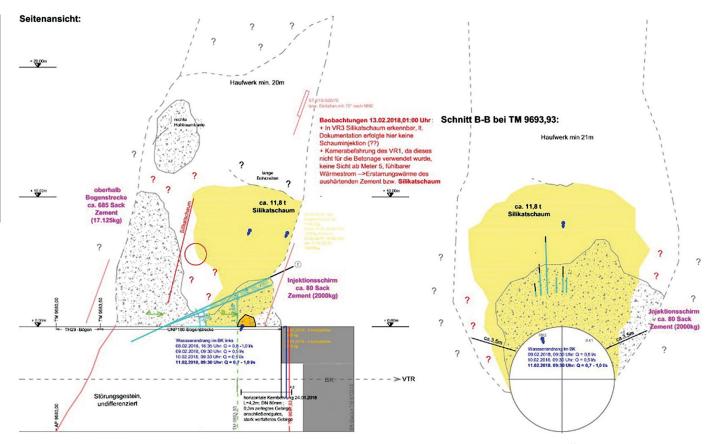


Fig. 3. Overbreak at TM 9.686 – Documentation of 4 the overbreak and executed measures (Source: ÖBA, Pini & Partner) Bild 3. Überbruch TM 9.686 – Dokumentation der Überbruchsituation und der durchgeführten Maßnahmen (Quelle: ÖBA, Pini & Partner)

gorge to the Ahrental (Innsbruck-Ahrental contract). This section has an excavated section of about 26 m². The maximum round lengths were up to 2.2 m. Along a few fault zones, the rock was fractured and ground by tectonic stressing in some places. The rock mass showed tectonic effects in some sections in the form of thick but shorter shear bands, along which the quartz phyllite had been converted into a clayey grinding residue. Passing under the area of the Lanser See, unfaulted rock mass was encountered against expectations. The total water ingress was about 1 l/s and thus much less than that forecast.

From km 6.9, a larger section (ca. 50 m²) was driven with an open gripper machine for logistical reasons (Tulfes-Pfons contract). In order to ensure the best possible geological investigation, an open TBM was chosen [3] [7] [8]. Altogether ten collapses with a maximum volume of more than 5,000 m³ occurred along the 15 km of EKS bored with the open gripper TBM (Table 1). The collapsed sections were supported with specially developed 20 cm wide expanding U-profiles (Bergmeister arches) designed for a radial loading of up to 1 MPa. Where this was exceeded, the joints slid together and enabled further deformation [9] (Figure 3).

Further to the south, about 2 km of EKS was excavated in the Bündner schist starting from the Wolf access tunnel. Thanks to the detection of a fault zone, the crossover at St. Jodok could be shifted to a better position.

An EKS excavated in advance offers enormous advantages regarding rock mass exploration, drainage of the rock mass, potential ground improvement measures, construction logistics and working safety. In the operating

Weiter nördlich wird derzeit der insgesamt 14,5 km lange EKS mit einer Doppelschildmaschine bis zum Brenner aufgefahren.

Nördlich des Brenners wurden bis Ende Juni 2019 ca. 22 km Erkundungstollen, davon 15 km mit einer offenen Gripper-TBM ausgebrochen. Dabei werden mit der Innsbrucker Quarzphyllitzone im Nordteil und den südlich anschließenden penninischen Bündnerschiefern zwei großtektonische Einheiten durchfahren [6].

Begonnen wurde am 4. Dezember 2009 mit dem Bau des knapp 6 km langen EKS von der Sillschlucht bis zum Fensterstollen Ahrental (Baulos Innsbruck-Ahrental). Dieser weist einen Ausbruchquerschnitt von etwa 26 m² auf. In diesem Abschnitt konnten maximale Abschlagslängen bis zu 2,2 m aufgefahren werden. Entlang einiger Störungszonen war das Gestein durch gebirgsbildende Prozesse zerbrochen und zerrieben. Das Gebirge zeigte abschnittsweise tektonische Beanspruchungen in Form von mächtigen, jedoch kürzeren Scherbändern, entlang derer der Quarzphyllit zu einem tonigen Zerreibsel aufgearbeitet war. Bei der Unterfahrung des Lanser See Gebiets wurde entgegen den Erwartungen ungestörtes Gebirge angetroffen. Die insgesamt anfallenden Bergwassermengen lagen bei etwa 1 l/s und waren damit deutlich geringer als die prognostizierten Bergwassermengen.

Ab km 6,9 wurde ein aus Baulogistikgründen größerer Querschnitt (ca. 50m²) mit einer offenen Gripper-TBM aufgefahren (Baulos Tulfes-Pfons). Um eine bestmögliche geologische Erkundung gewährleisten zu können, wurde eine offene TBM gewählt [3] [7] [8]. Insgesamt



Fig. 4. Mobile preparation plant for the tunnel spoil at the lot E52, Wolf II

Bild 4. Mobile Aufbereitungsanlage Vorlos E52, Wolf II

phase, there are further advantages of low-maintenance drainage, installations and shorter maintenance interventions in the main tunnel.

3 Landfills and reuse of excavated material

All the landfill sites for the BBT are located in the immediate vicinity of the access tunnels and the portals. The largest landfill site on the project, which is directly connected by a mucking tunnel, is in the Padastertal in Austria and has a volume of about 7.7 m. m³. At the Ahrental access tunnel, the Ahrental landfill site has been

traten beim maschinellen Vortrieb mit der offenen Gripper-TBM entlang des 15 km langen EKS zehn Überbrüche mit einem maximalen Ausbruchvolumen von über 5.000 m³ auf (Tabelle 1). Die Sicherung der verbrochenen Querschnitte erfolgte mit speziell entwickelten, 20 cm breiten spannbaren U-profilen (Bergmeister-Bögen). Diese waren auf eine Radialbelastung bis zu 1 MPa ausgelegt. Bei Überschreitung schoben sich die Verbindungen zusammen, sodass eine weitere Verformung ermöglicht wurde [9] (Bild 3).

Weiter südlich wurden, ausgehend vom Zufahrtstunnel Wolf, ca. 2 km EKS im Bündner Schiefer ausgebrochen. Aufgrund einer erkundeten Störzone konnte die Überleitstelle St. Jodok besser positioniert werden.

Ein vorauseilender EKS bietet enorme Vorteile sowohl hinsichtlich der Gebirgserkundung, der Dränage des Gebirges, möglicher gebirgsverbessernder Maßnahmen, der Baulogistik und der Arbeitssicherheit. In der Betriebsphase ergeben sich weitere Vorteile für eine wartungsarme Entwässerung, Installationen und kürzere Instandhaltungszugriffe in den Haupttunnel.

3 Deponien und Wiederverwertung von Ausbruchmaterial

Alle Deponiestandorte beim BBT befinden sich in unmittelbarer Nähe zu den Zufahrtsstollen und den Portalen. Die größte Deponie des Projekts, die direkt durch einen Schutterstollen angebunden ist, befindet sich auf österreichischem Gebiet im Padastertal mit einem Volumen von ca. 7,7 Mio. m³. Beim Zufahrtstollen Ahrental wurde die Deponie Ahrental mit einem Fassungsvermögen von

Table 1. Summary of the overbreaks at the 15 km long exploratory tunnel Ahrental-Pfons Tabelle 1. Zusammenfassung der Überbrüche beim 15 km langen EKS Ahrental-Pfons

Chainage m Tunnelmeter	km km	Collapse Überbruch	Cavity volume [m ³] Hohlraumvolumen [m ³]	Remarks Bemerkungen
1.084	8.007	San Francisco	760	ca. 250 m ³ filled; stable concrete frame ca. 250 m ³ verfüllt; stabiler Betonrahmen
2.094	9.017	Anna	490	ca. 160 m ³ filled; ca. 10 m concrete frame ca. 160 m ³ verfüllt; ca. 10 m Betonrahmen
2.318	9.241	Helga	190	ca. 140 m ³ filled; ca. 140 m ³ verfüllt;
3.823	10.746	Silvia	1.100	ca. 800 m ³ filled; ca. 800 m ³ verfüllt;
7.170	14.093	Werner	260	ca. 160 m ³ filled; ca. 160 m ³ verfüllt;
8.015	14.938	Uli	680	ca. 350 m ³ filled; ca. 350 m ³ verfüllt;
8.472	15.395	Alex	350	ca. 230 m ³ filled; ca. 230 m ³ verfüllt;
9.685	16.608	Iris	5.500	ca. 650 m ³ filled; ca. 650 m ³ verfüllt;
10.299	17.222	Jana	66-105	ca. 105 m ³ filled; ca. 105 m ³ verfüllt;
11.751	18.674	Heidi	870	ca. 400 m ³ filled; ca. 400 m ³ verfüllt;

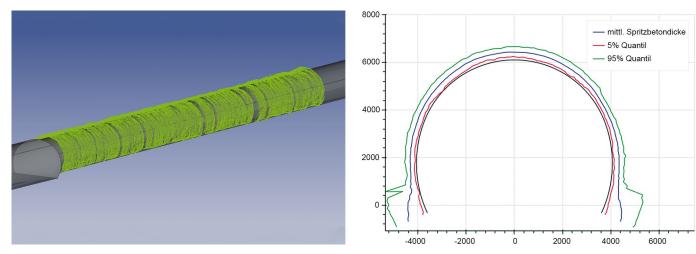


Fig. 5. Left 3D-CAD model with scanned point could (green) at the stretch of the cavern, right statistical evaluation of the scanned profiles [13]
Bild 5. Links 3D-CAD Modell mit gescannter Punktwolke (grün) im Bereich der Lüfterkaverne, rechts statistische Auswer-

set up with a capacity of about 2.7 m. m³. In the Riggertal south of the portal of the EKS Aicha is another landfill site with a volume of about 4 m. m³. Near Ampass (north and south), landfill sites with a capacity of 0.8 m. m³ have already been filled and landscaped.

tung der gescannten Profile [13]

It has always been the objective at the BBT to reuse as much excavated material as possible. Aggregates can be produced for any type of concrete from the Brixner granite and the Brenner gneiss. For the Bündner schist (about 2/3 of the entire rock production), a method of processing it as concrete aggregate (aggregate > 4 mm) was found based on several scientific works and technological optimisations, with the use of the sand component with carbonate aggregate being found technically favourable for higher-strength concretes [10].

The material is processed on site at the Padastertal landfill site. The material excavated in the tunnel is transported on a conveyor belt through the mucking tunnel and immediately screened for the first time in order to separate unusable fines. The processing requires several crushing stages and a wet sorting plant, with the necessary functional flexibility and plant equipment being essential requirements to achieve a favourable grain shape. In order to produce a good grain shape, a vertical mill has been found successful for the last crushing stage.

A mobile processing plant was already successfully used for the production of aggregate for 144,000 m³ of concrete o the preliminary contract E52, Wolf II – which corresponds to 78% of the entire requirement on the contract (Figure 4).

4 Innovations in design and construction

4.1 Design for a lifetime of 200 years

The starting point for the consideration of a longer service lifetime and lifecycle management was the various standards and design codes in Austria and Italy. Then it was laid down in the guide design that the design and detailing of the tunnel structure should be based on a service lifetime of 200 years [11].

ca. 2,7 Mio. m³ errichtet. Im Riggertal südlich des Portals des EKS Aicha befindet sich eine Deponie mit ca. 4 Mio. m³. Im Bereich von Ampass (Nord und Süd) wurden die Deponien mit einem Fassungsvermögen von insgesamt ca. 0,8 Mio. m³ bereits verfüllt und begrünt.

Es war beim BBT stets das Ziel, möglichst viel Ausbruchmaterial wiederzuverwerten. Mit dem Brixner Granit und dem Brenner Gneis können Zuschläge für jede Betonart hergestellt werden. Für den Bündner Schiefer (ca. 2/3 der gesamten Gesteinsvorkommen) wurde aufgrund von mehreren wissenschaftlichen Arbeiten und technologischen Optimierungen ein Weg zur Wiederverwertung als Betonzuschlag (Zuschläge > 4 mm) gefunden, wobei sich ein Ersatz des Sandanteils mit karbonatischer Gesteinskörnung für höherfeste Betone als technisch günstig erweist [10].

Die Aufbereitung erfolgt vor Ort im Bereich der Deponie Padastertal. Das Tunnelausbruchmaterial wird per Förderbänder über den Schutterstollen aus dem Tunnel transportiert und gleich vorabgesiebt, um die nicht brauchbaren Feinanteile abzutrennen. Die Aufbereitung benötigt mehrere Brechstufen sowie eine Nassklassierungsanlage, wobei wesentliche Anforderungen in der notwendigen funktionstechnischen Flexibilität und der erforderlichen anlagentechnischen Ausstattung für ein Erreichen einer für die Betonherstellung günstigen Kornform liegen. Als eine qualitativ gute kornformgebende, letzte Brechstufe hat sich eine Vertikalmühle bewährt.

Bereits im Vor-Baulos E52, Wolf II wurde eine mobile Aufbereitungsanlage für die Herstellung von Gesteinskörnung für 144.000 m³ Beton – dies entspricht 78% des gesamten Betonbedarfs dieses Bauloses – erfolgreich umgesetzt (Bild 4).

4 Innovationen bei der Bemessung und der Konstruktion

4.1 Bemessung für eine Nutzungsdauer von 200 Jahren

Der Ausgangpunkt zur Überlegung einer längeren Nutzungsdauer und eines Life-Cycle-Managaments waren die unterschiedlichen Normen und Bemessungsregeln in Österreich und Italien. Im Rahmen einer sogenannten



Fig. 6. Configuration of the Multi Service Vehicle MSV [15] Bild 6. Zusammensetzung Multi Service Vehicle MSV [15]

The essential factors for a long technical service lifetime are good quality of the building materials, excellent construction and regular supervision. The decisive features for the concrete are the quality of the raw materials and good processing. The evaluation of the lifetime of tunnels is decisively influenced by the lifetime of the concrete. Based on modelling of ageing processing and durability, the following constructional specifications and partial safety factors were laid down for the design for a technical lifetime of 200 years:

- Concrete cover: $c_{nom} = 50 \text{ mm},$
- Partial safety factor on concrete strength:
- $$\begin{split} \gamma_c &= 1.6, \\ \gamma_s &= 1.2. \end{split}$$
 - Partial safety factor on reinforcing steel:

Comprehensive quality assurance during construction and periodic checks and maintenance measures should ensure this service lifetime.

4.2 Optimisation of the excavated profile of drill and blast tunnelling

Systematic checks of the specified oversize, recording of the geological overbreak and documentation of the as-built state are carried out with a laser tunnel scanner and/or digital photogrammetry and are intended to ensure the geometry and thus the quality. Systematic tunnel scan images of each round enable optimisation of the blasting pattern [12] and continuous determination of the thickness of the shotcrete lining and its geometry. The evaluation is performed by importing point clouds from the scanned images of the excavated geometry and the shotcrete surfaces into a 3D-CAD model.

By comparing this with the design geometry, the overprofile and the shotcrete geometry can be determined. The high density of measured points enables statistical evaluations of the over-profile and the shotcrete thickness. The statistical evaluation of tunnel scan data was investigated in a pilot project. Figure 5 shows an example of the curve of the average shotcrete thickness as well as the 5% and 95% quantile values around the perimeter.

5 **Innovative construction logistics**

In order to improve the construction logistics, the faces on the Tulfes-Pfons contract are supplied using newly de-

Regelplanung (guide design) wurde festgelegt, dass die Bemessung und konstruktive Durchbildung der Tunnelstruktur für eine Nutzungsdauer von 200 Jahren erfolgen

Maßgebend für eine lange technische Lebensdauer sind die gute Qualität der Baustoffe, eine ausgezeichnete Bauausführung und eine regelmäßige Bauüberwachung. Entscheidend für den Beton ist die Qualität der Ausgangsstoffe und die gute Verarbeitung. Die Bewertung der Lebensdauer von Tunneln wird entscheidend von der Lebensdauer des Betons geprägt. Auf der Grundlage der Alterungsmodellierung und der Modellierung der Dauerhaftigkeit wurden für eine technische Lebensdauer von 200 Jahren und einem Sicherheitsindex von $\beta = 5.8$ pro Jahr folgende konstruktive Kenndaten und Teilsicherheitsfaktoren für die Bemessung festgelegt:

- $c_{nom} = 50 \text{ mm},$ - Betondeckung:
- Teilsicherheitsfaktor Betondruckfestigkeit: $\gamma_{\rm c} = 1.6$,
- Teilsicherheitsfaktor Betonstahl: $\gamma_{\rm s} = 1,2.$

Eine umfassende Qualitätssicherung während des Bauens und periodische Kontrollen sowie Instandhaltungsmaßnahmen sollen diese Nutzungsdauer gewährleisten.

Optimierung des Ausbruchprofils beim konventionellen Sprengvortrieb

Durch eine systematische Kontrolle der einzuhaltenden Übermaße, Erfassung des geologisch bedingten Mehrausbruchs, Bestandsdokumentation (Geometrie, Bauteilstärken) mittels Laser-Tunnelscanner und/oder digitaler Fotogrammetrie soll die Geometrie und damit auch die Qualität gewährleistet werden. Systematische Tunnelscan-Aufnahmen von jedem Abschlag ermöglichen Optimierungen des Sprengschemas [12] und die durchgehende Ermittlung der Dicke der Spritzbetonschale und deren Geometrie. Für die Auswertung werden Punktwolken von Scanaufnahmen der Ausbruchgeometrie und der Spritzbetonoberflächen in ein 3D-CAD-Modell importiert.

Durch Vergleich mit der Soll-Geometrie kann das Überprofil und die Spritzbetondicke ermittelt werden. Die hohe Messpunktdichte ermöglicht statistische Auswertungen des Überprofils und der Spritzbetondicke. In einem Pilotprojekt wurde die statistische Auswertung von Tunnelscandaten untersucht. Bild 5 zeigt exemplarisch veloped multi-service vehicles (MSV). The 2.4 km long access tunnel with a gradient of 10% and a structure gauge of about 92 m² joins the north-south EKS at a right angle at its deepest point. The multi-service vehicles have now been in use for more than four years to transport construction materials to the backup of the TBM. They consist of five transport vehicles with pneumatic tyres coupled mechanically and can carry 95 t without tracks (Figure 6) [14]. All 14 axles are steered automatically and independently, with any following errors being detected by sensors at the sides and the control program and compensated. The minimum curve radius is 30 m.

For the purpose of escape, a special MSV has been developed with an autonomous rescue container for 25 people for 8 hours. This vehicle is parked about 50 to 100 m behind the TBM. For external rescue, a fire service MSV has been developed, which can transport 27 people in two rescue containers with integrated driver's cab and autonomous air supply. This is designed for ten hours. The rescue vehicle is held ready at the Ahrental tunnel portal.

The MSVs had covered altogether 120,000 km by the end of January 2019 with an availability of 99%. An automatic MSV (quasi-autonomous driving underground) was used for the first time on the Tulfes-Pfons contract. This uses a dense network of sensors using lasers, ultrasound and radar to produce an electronic map of position and distance information.

Outlook

Construction of the 64 km long BBT is making good progress. At half time, 100 km of tunnel (45%) has been excavated and more than 90% of the contracts have been tendered. The next step is the design of the railway equipment and the operation plant.

Valuable findings could be gained from the exploratory tunnel, which is now 2/3 (40 km) excavated. This provides valuable, sustainable services during construction for exploration and logistics and also during the later service period for drainage, housing technical plant and maintenance since it can be accessed all through independent of operation [16]. The structural works should be completed by 2025, with overall completion by the end of 2028 (in case of occurrence of risks by 2030).

References

- [1] Bergmeister, K.: Brenner Basistunnel Der Tunnel kommt. Lana: Tappeinerverlag, 2011.
- [2] Reinhold, C., Cordes, T., Bergmeister, K.: Geotechnische Klassifizierung und Charakterisierung des Gebirges beim Brenner Basistunnel. Geomechanics and Tunnelling 12 (2019), No. 5, pp. 564–574.
- [3] Bergmeister, K., Reinhold, C.: Learning and optimization from the exploratory tunnel – Brenner Base Tunnel / Lernen und Optimieren vom Erkundungsstollen - Brenner Basistunnel. Geomechanics and Tunneling 10 (2017), No. 5, pp. 467-476. https://doi.org/10.1002/geot.201700039
- [4] Quick, H., Bergmeister, K., Facchin, E., Michael, J.: Aicha-Mauls on the Brenner Base Tunnel - status of the works and results / Aicha-Mauls am Brenner Basistunnel - Stand der Arbeiten und Ergebnisse. Geomechanics and Tunnelling 3 (2010), No. 5, pp. 520-533. https://doi.org/10.1002/ geot.201000044

den Verlauf der mittleren Spritzbetondicke sowie des 5-% bzw. 95-%-Quantilwerts über die Abwicklung.

Innovative Baulogistik

Zur Verbesserung der Baulogistik wurde beim Baulos Tulfes-Pfons die Versorgung der Vortriebe mit neu entwickelten Multi-Service-Vehicle (MSV) durchgeführt. Der 2,4 km lange Zugangstunnel mit einem Gefälle von 10% sowie einen Lichtraum von ca. 92 m² mündet am Tiefpunkt senkrecht in den Nord-Süd verlaufenden EKS. Die Multi-Service-Vehicle wurden über vier Jahre zum Antransport des Baumaterials bis zum Nachläufer der TBM verwendet. Diese aus fünf mechanisch miteinander gekoppelten und luftbereiften Transportfahrzeuge können gleislos 95 t transportieren (Bild 6) [14]. Alle 14 Achsen werden automatisch und unabhängig voneinander gelenkt, wodurch auftretende Nachfahrfehler durch eine Steuerungssoftware und seitliche Sensoren erkannt und ausgeglichen werden. Der minimal Kurvenradius beträgt

Für die Selbstrettung wurde ein eigenes MSV mit einem autonomen Rettungscontainer für 25 Personen mit 8 h Verweildauer entwickelt. Dieses Fahrzeug wird ca. 50 bis 100 m hinter der TBM geparkt. Für die Fremdrettung wurde ein Feuerwehr-MSV entwickelt, das 27 Personen in zwei Rettungscontainer mit integrierter Fahrerkabine und autarker Atemluftversorgung befördern kann. Diese wurde für über zehn Stunden ausgelegt. Das Rettungsfahrzeug befindet sich einsatzbereit am Tunnelportal Ahrental.

Die MSV haben mit einer Verfügbarkeit von 99 % bis Ende Juni 2019 insgesamt ca. 120.000 km Fahrtstrecke erfolgreich zurückgelegt. Erstmalig wurde 2018 beim Baulos Tulfes-Pfons ein selbststeuerndes MSV (quasi autonomes Fahren Untertage) eingesetzt. Dabei kam ein dichtes Netz an Sensoren mit Laser-, Ultraschall- und Radarmessverfahren zur Erstellung einer elektronischen Karte aus Positions- und Distanzinformationen zum Einsatz.

Ausblick 6

Der Bau des 64 km langen BBT schreitet gut voran. Zur Halbzeit sind über 100 km Tunnel (45%) ausgebrochen und über 90% der Baulose ausgeschrieben. Der nächste Schritt ist die Planung der bahntechnischen Ausrüstung und der betrieblichen Anlagen.

Wertvolle Erkenntnisse konnten aus dem mittlerweile zu 2/3 (40 km) ausgebrochenen EKS gewonnen werden. Dieser leistet während des Baus für die Erkundung und Baulogistik als auch für den späteren Betrieb für die Entwässerung, die Aufnahme von technischen Anlagen und die Instandhaltung durch seine durchgehende vom Betrieb unabhängige Befahrbarkeit wertvolle, nachhaltige Dienste [16]. Mit einem Abschluss der Rohbauarbeiten ist aus heutiger Sicht im Jahre 2025, mit einer Gesamtfertigstellung Ende 2028 - bei Eintritt von Risiken mit 2030 - zu rechnen.

- [5] *Gaspari*, *G.*, *Bergmeister*, *K.*: The Brenner Base Tunnel: back-analyses of excavation data and TBM parameters in the Aicha-Mules exploratory tunnel. ITA-AITES World Tunnel Congress 2019, Naples, 2019).
- [6] *Töchterle, A., Reinhold, C.*: Ermittlung der geomechanischen Kennwerte von Störungszonen im Innsbrucker Quarzphyllit auf Basis der Erkundungsergebnisse beim Brenner Basistunnel. 19. Tagung für Ingenieurgeologie, München, 2013.
- [7] Schwarz, C., Schierl, H.: Integration of reflection seismic data into the documentation during the construction of the Brenner Base Tunnel / Einbindung von Reflexionsseismik in die Dokumentation beim Bau des Brenner Basistunnels. Geomechanics and Tunneling 10 (2017), No. 5, pp. 552–560. https://doi.org/10.1002/geot.201700031.
- [8] Lussu, A., Grüllich, S., Kaiser, C., Fontana, A.:15 km TBM Vortrieb im Los H33 Erfahrungen und Erkenntnistransfer auf das Hauptbaulos. Geomechanics and Tunneling 12 (2019), No. 5, pp. 595–603.
- [9] *Bergmeister*, K.: Geotechnische und menschliche Herausforderungen beim maschinellen Vortrieb des 15 km langen Erkundungsstollens des Bauloses Tulfes-Pfons. Swiss Tunnel Congress 2019, Luzern, pp. 100–119.
- [10] Voit, K.: Einsatz und Optimierung von Tunnelausbruchmaterial des Brenner Basistunnels. Dissertation, Universität für Bodenkultur Wien, 2013.
- [11] *Bergmeister, K.*: Life Cycle Design for the world longest tunnel project. In Strauss, Frangopol, Bergmeister (eds): IAALCE. Vienna, 2012.
- [12] Voit, K., Amvrazis, S., Cordes, T., Bergmeister, K.: Drill and blast excavation forecasting using 3D laser scanning /

- Ausbruchprognose beim Sprengvortrieb mittels 3D-Laser-scanning. Geomechanik and Tunnelling 10 (2017), No. 3, pp. 298–316. https://doi.org/10.1002/geot.201600057.
- [13] Bergmeister, K.: Anwendung von maßgeschneidertem Spritzbeton beim Brenner Basistunnel. 4. Grazer Betonkolloquium. Universität Graz, 2018.
- [14] Lussu, A., Kaiser, C., Grüllich, S., Fontana, A.: Innovative TBM transport logistics in the constructive lot H33 Brenner Base Tunnel. ITA-AITES World Tunnel Congress 2019, Naples, 2019.
- [15] Rowa: Rowa Tunnelling Logistics AG, Wangen, 2018.
- [16] Eckbauer, W., Insam, R., Zierl, D.: Planning optimisation for the Brenner Base Tunnel considering both maintenance and sustainability / Planungsoptimierungen beim Brenner-Basistunnel aus Sicht der Instandhaltung und Nachhaltigkeit Geomechanics and Tunnelling 7 (2014), No. 5, pp. 601–609. https://doi.org/10.1002/geot.201400030.



o. Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.phil. Dr.techn. Konrad Bergmeister MSc. Ph.D. Brenner Basistunnel BBT SE Amraser Str. 8 6020 Innsbruck Austria Konrad.Bergmeister@bbt-se.com

