

Semmering Base Tunnel – Excavation of the emergency station in complex ground conditions

Semmering-Basistunnel – Vortrieb der Nothaltestelle in komplexen Gebirgsverhältnissen

At the construction lot SBT 2.1 “Tunnel Fröschnitzgraben” of the Semmering Base Tunnel (SBT) in Austria caverns with a cross section up to 300 m² are excavated in a depth of approximately 400 m, which are the central part of the emergency station. The site arrangement results in a complex situation of large cross sections within a small area. Additionally, complex ground conditions exist, because the degree of fracturing of the rock mass differs frequently and the rock mass strength is occasionally very low. Especially at the intersection of the caverns displacements increase over a long period of time. The observed system behavior is described and analyzed based on the geotechnical design taking the encountered ground conditions into account. Sequences of rock mass sections with different stiffness and strength are of high geomechanical significance due to stress concentrations in the competent areas. This had particular impact on the observed system behavior. With regard to the stability of the overall system influences of various drives and the excavation of large cross sections in several steps must be considered. Moreover, an influence of the excavation size on the extension of the area with displacement increases or stress redistributions must be taken into account.

1 Introduction

The Semmering Base Tunnel (SBT) is located in the east of Austria. It is part of the Baltic-Adriatic Corridor and represents one of the most important cross-Alpine lines in Europe. The tunnel is 27.3 km long. The key elements are the two single-track running tunnels between the portals in Gloggnitz and Mürzzuschlag. The construction lot SBT2.1 “Tunnel Fröschnitzgraben” is the central section of the three main tunneling sections. Its construction started in 2014. The section comprises the excavation works of two shafts with a depth of about 400 m, of the emergency station and of about 13 km of the two running tunnels.

2 The emergency station

The emergency station (Figure 1) is a key element of the SBT. The layout is based on the requirements of the tunnel safety plan. It includes components for the operating phase and for the case of emergency. The dimensions of the caverns resulted from considerations at an early stage regarding construction operations, particularly the supply

Beim Baulos SBT 2.1 „Tunnel Fröschnitzgraben“ des Semmering-Basistunnels (SBT) in Österreich werden in etwa 400 m Tiefe Kavernen mit einem Querschnitt bis zu 300 m² ausgebrochen, die den zentralen Teil der Nothaltestelle darstellen. Aufgrund der Anlageverhältnisse ergibt sich eine komplexe Situation von großen Ausbruchquerschnitten auf engstem Raum. Da der Zerlegungsgrad des Gebirges sehr häufig wechselt und das Gebirge zum Teil nur eine geringe Festigkeit aufweist, stehen ebenfalls komplexe Gebirgsverhältnisse an. Vor allem in den Verschneidungsbereichen der Kavernen prägen langanhaltende Zunahmen die Verschiebungsverläufe. Im vorliegenden Beitrag wird das beobachtete Systemverhalten beschrieben und ausgehend von der geotechnischen Planung in Zusammenschau mit den angetroffenen Gebirgsverhältnissen analysiert. Dabei sind Abfolgen von Gebirgsabschnitten unterschiedlicher Steifigkeit und Festigkeit von besonderer geomechanischer Bedeutung, da sich dadurch Spannungskonzentrationen in den kompetenten Bereichen einstellen. Dies hatte besondere Auswirkungen auf das beobachtete Systemverhalten. In Hinblick auf die Stabilität des Gesamtsystems sind nicht nur die Einflüsse unterschiedlicher Vortriebe und das Auffahren großer Querschnitte in mehreren Phasen zu berücksichtigen sondern auch ein Einfluss der Hohlraumgröße auf die Ausdehnung der Bereiche mit Verschiebungszunahmen bzw. mit Spannungumlagerungen.

1 Einleitung

Der Semmering-Basistunnel (SBT) befindet sich im Osten Österreichs. Er ist ein Teil des Baltisch-Adriatischen Korridors und stellt eine der wichtigsten Alpenquerungen in Europa dar. Die Tunnelänge beträgt ca. 27,3 km. Die Kernelemente bilden die beiden eingleisigen Streckenröhren zwischen den Portalen in Gloggnitz und Mürzzuschlag. Das Baulos SBT2.1 „Tunnel Fröschnitzgraben“ ist das mittlere der drei Tunnelbaulose, der Baubeginn erfolgte 2014. Im Rahmen dieses Bauloses werden zwei Schächte mit einer Tiefe von ca. 400 m, eine Nothaltestelle und rund 13 km der beiden Streckenröhren ausgebrochen.

2 Die Nothaltestelle

Die Nothaltestelle (Bild 1) stellt ein zentrales Element des SBT dar. Die grundsätzliche Gestaltung basiert auf den Vorgaben des Tunnelsicherheitskonzeptes und umfasst für die Betriebsphase und den Ereignisfall notwendige

to and disposal of materials from the tunneling works, the assembly of the two tunnel boring machines and the inner lining. The supply of the construction works is only possible through these caverns, which are only accessible via the shafts.

2.1 Site arrangement

The central part of the emergency station are caverns with heights up to about 16 m (without inverts) and widths up to about 20 m. Therefore, the excavated cross sections amount up to 300 m². The excavation of the longitudinal cavern (LC) and the three cross caverns (CC1, 2 and 3) started at the two shafts. The shaft Fröschnitz 1 (SF1) intersects the longitudinal cavern in the crown; the two cross caverns 1 and 2 cross the longitudinal cavern near the shaft with an axial distance of about 20 m (CC2) and 26 m (CC1) to the shaft centerline. Therefore, the distance between the excavation edges of these cross caverns and the intersection of the shaft with the longitudinal cavern is a few meters only. The shaft Fröschnitz 2 (SF2) intersects the cross cavern 2 with a distance of about 40 m to the longitudinal cavern. Therefore, the site arrangement results in a complex situation of large cross sections within a small area (Figure 1 and Figure 2).

2.2 Geological conditions

The emergency station is located in the geological unit of the Wechsel crystalline complex, which is composed of a sequence of gneisses and schists (Albit gneisses and Albit schists) [1].

For the central part of the emergency station favorable ground conditions were predicted. The prognosis predicted slightly to moderately fractured Albit gneiss mainly (rock mass type RT 6d-1 and RT 6d-2) with intercalations of Albit schist, mainly moderately to heavily fractured (RT 6e) as well as locally tectonically strongly sheared (RT 6f). The main geological structures are defined by the foliation

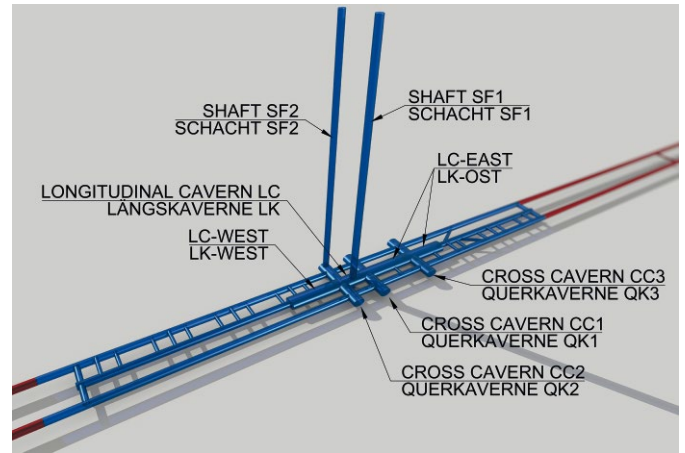


Fig. 1. Overview of the emergency station
Bild 1. Übersicht Nothaltestelle

Anlagenteile. Die Abmessungen der Kavernenbauwerke ergaben sich aus frühzeitig angestellten baubetrieblichen Überlegungen, insbesondere zur Materialver- und entsorgung, zur Montage der beiden Tunnelvortriebsmaschinen und zum Innenausbau. Die baulegitische Versorgung der Bauarbeiten erfolgt ausschließlich über diese Kavernenbauwerke, welche nur über die Schächte erreichbar sind.

2.1 Anlageverhältnisse

Den zentralen Bereich der Nothaltestelle bilden die Kavernen mit Höhen bis zu ca. 16 m (ohne Sohlen) und Breiten bis zu ca. 20 m. Somit ergeben sich Ausbruchflächen bis zu ca. 300 m². Die Längskaverne (LK) und die 3 Querkavernen (QK1, 2 und 3) wurden ausgehend von zwei Schächten vorgetrieben. Der Schacht Fröschnitz 1 (SF1) mündet in der Firste der Längskaverne, die beiden Querkavernen QK1 und QK2 kreuzen die Längskaverne in unmittelbarer Schachtnähe mit einem Achsabstand von ca. 20 und 26 m zur Schachtachse. Der Ausbruchrand dieser Querkavernen reicht daher wenige Meter an die Verschneidung des

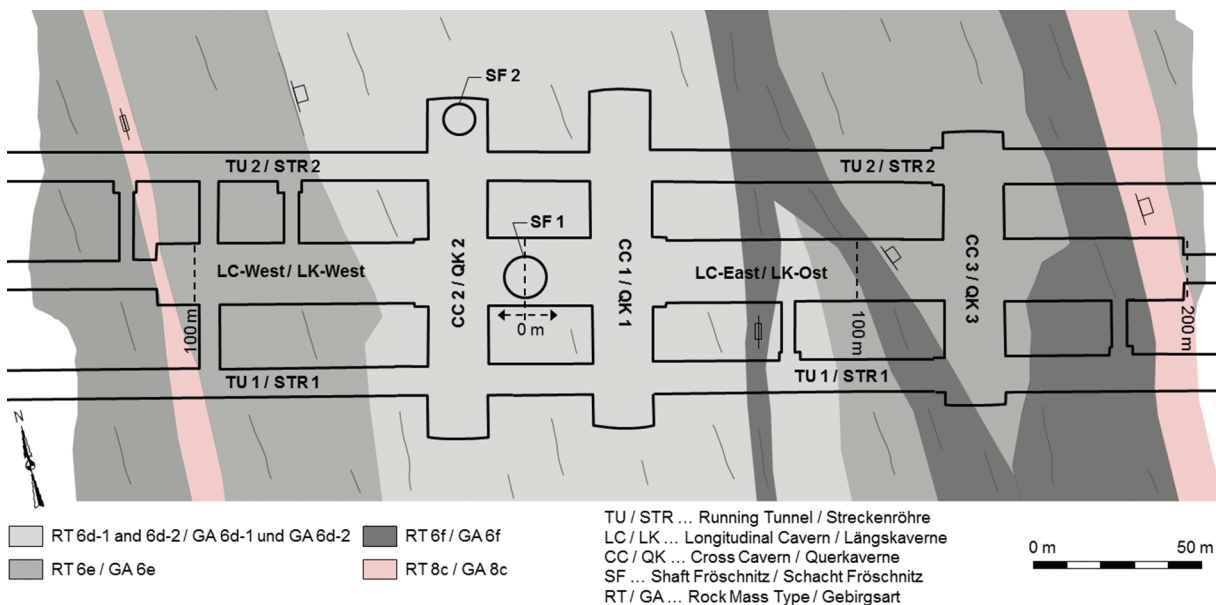


Fig. 2. Geological setting of the emergency station, geological units as encountered
Bild 2. Baugeologischer Horizontalschnitt der angetroffenen Baugrundverhältnisse in der Nothaltestelle

dipping slightly to the west, and by medium steeply to steeply west dipping tectonic structure elements.

During the excavation works, the expected favorable ground conditions of Albit gneiss were encountered in the intersection area of the longitudinal cavern with the cross cavern 1 and cross cavern 2 (mainly RT 6d-2, Figure 2). To the west and east of this area, rock mass of lower strength was encountered, comprising mainly Albit schist of RT 6e. In the eastern drives some heavily fractured sections corresponding to RT 6f were met additionally. Both at the western and at the eastern end of the longitudinal cavern, tectonic fault zones with thicknesses of several meters were encountered (RT 8c).

The hydrogeological conditions were mainly dry to damp with few locations of dripping water ingress.

Regarding the geotechnical design, rock mass parameters were specified for the rock mass types using the GSI concept as well as values based on experience.

2.3 Geotechnical design

In the design phase numerical calculations were carried out in 3D due to the complex intersection area and the mutual influences of the different excavations. In the model, a simplified, homogeneous rock mass with isotropic material properties based on the Mohr-Coulomb failure criterion was chosen. The calculation parameters were set according to RT 6e based on the geotechnical prognosis. In accordance with the results of borehole tests the highest in-situ stress was set 1.22 times the vertical stress in horizontal direction normal to the centerline of the longitudinal cavern. Assuming symmetry, only half of the system was modelled. An overburden of 100 m over the tunnel crown was modelled with FE-elements, 300 m through an equivalent surface load (Figure 3).

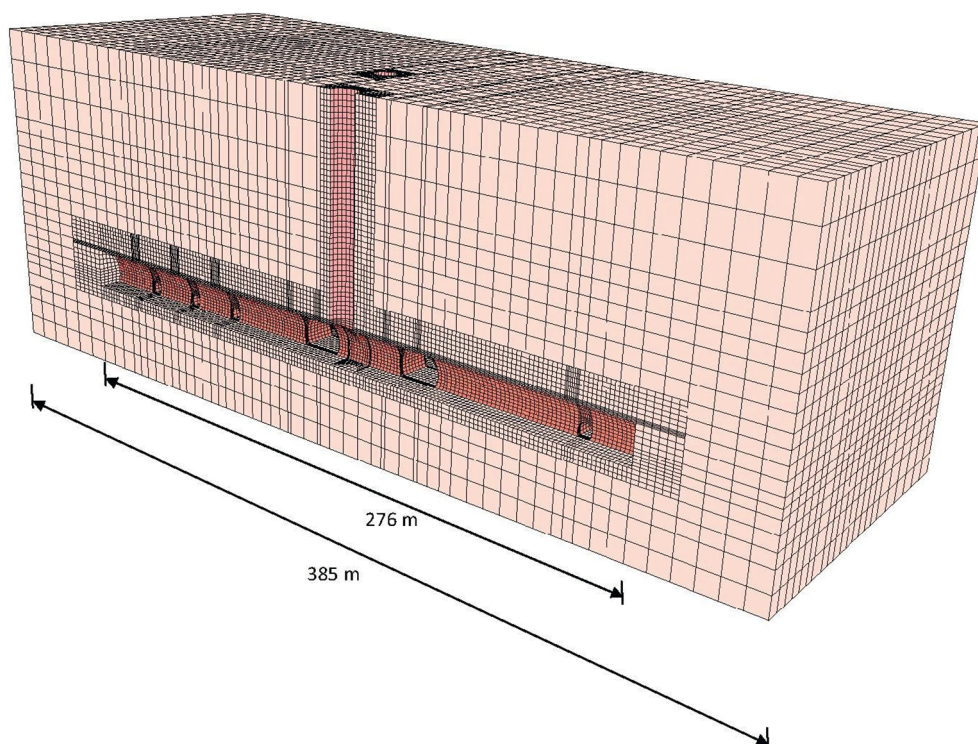


Fig. 3. Numerical model of emergency station – central area
Bild 3. Numerisches Modell Nothaltestelle – Zentralbereich

Schachtes mit der Längskaverne heran. Der Schacht Frörschnitt 2 (SF2) mündet in die Querkaverne 2 in einem Abstand von ca. 40 m zur Längskaverne. Somit ergibt sich eine komplexe Situation von großen Ausbruchquerschnitten auf engstem Raum (Bild 1 und Bild 2).

2.2 Geologische Verhältnisse

Die Nothaltestelle ist in der geologischen Einheit des „Wechsel-Kristallins“ gelegen, das aus einer Abfolge von Gneisen und Schiefen (sogenannten Albitgneisen und Albitschiefern) zusammengesetzt ist [1].

Für den zentralen Bereich der Nothaltestelle wurden weitgehend günstige Baugrundverhältnisse prognostiziert. Die Prognose sah meist gering bis mäßig zerlegte Albitgneise (Gebirgsarten GA 6d-1 und GA 6d-2) mit Einschaltungen von Albitschiefern vor, die meist mäßig bis stark zerlegt (GA 6e) sowie lokal tektonisch stärker geschert (GA 6f) vorliegen. Die Gefügeverhältnisse werden von flach nach Westen einfallenden Schieferungsflächen und mittelsteil bis steil nach Westen einfallenden tektonischen Strukturelementen geprägt.

Im Zuge der Vortriebsarbeiten wurden im Kreuzungsbereich der Längskaverne mit der Querkaverne 1 und der Querkaverne 2 die erwarteten günstigen Baugrundverhältnissen aus Albitgneisen angetroffen (v.a. GA 6d-2; Bild 2). Westlich wie auch östlich davon wurde Gebirge mit geringerer Gebirgsfestigkeit aufgeföhren, das vor allem Albitschiefer der GA 6e, in den östlichen Vortrieben abschnittsweise auch stärker gescherte Abschnitte entsprechend GA 6f umfasst. Sowohl am westlichen wie auch am östlichen Ende der Längskaverne wurden Störungszonen mit Mächtigkeiten von mehreren Metern angetroffen (GA 8c).

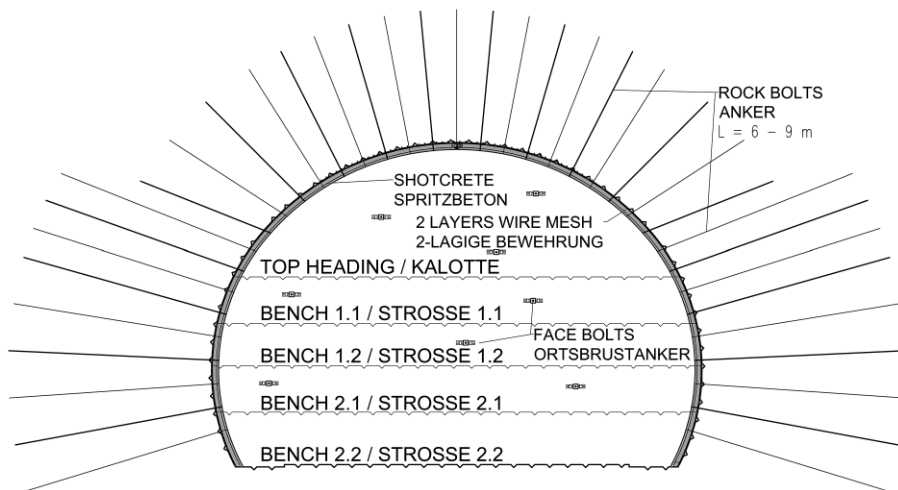


Fig. 4. Cross section and support for a cavern

Bild 4. Querschnittunterteilung und Stützmittel Kaverne

In the design, a subdivision into top heading and several benches was chosen due to geotechnical considerations and construction feasibility (Figure 4). In the numerical model, all excavation steps were modelled by 589 calculation steps.

Based on the calculation results, a support measure concept comprising different support types was developed as the basis for estimation for tender preparation. For construction, the relevant parts of this concept were stated as specifications for excavation and support.

For the intersection area of the caverns displacements of 50 mm were predicted based on the results of the numerical calculations.

3 Construction phase – Observations and measures carried out

3.1 Intersection longitudinal cavern west with cross cavern 2

Figure 5 shows the radial displacements plotted over time at measuring section MS-020 of the longitudinal cavern west immediately at the intersection with cross cavern 2.

Die hydrogeologischen Verhältnisse stellten sich weitgehend als trocken bis berg-feucht mit einzelnen Feuchtstellen und Tropfwasserzutritten dar.

Im Hinblick auf die geotechnische Planung wurden für die Gebirgsarten „verschmierte“ Gebirgskennwerte mit Hilfe des GSI-Konzeptes sowie unter Berücksichtigung von Erfahrungswerten festgelegt.

2.3 Geotechnische Planung

Aufgrund der komplexen Verschneidungsbereiche mit gegenseitigen Beeinflussungen der sich kreuzenden und parallel laufenden Bauwerkselemente wurden in der Planungsphase numerische 3D-Berechnung durchgeführt. Für die Modellbildung wurde ein vereinfachter, homogener Gebirgsaufbau mit isotropen Gebirgseigenschaften auf Grundlage des Materialmodells nach Mohr-Coulomb gewählt. Die Rechenkennwerte wurden basierend auf der geotechnischen Prognose entsprechend der GA 6e gewählt. Die größte In-situ Spannung wurde in horizontaler Richtung normal zur Vortriebsachse der Längskaverne

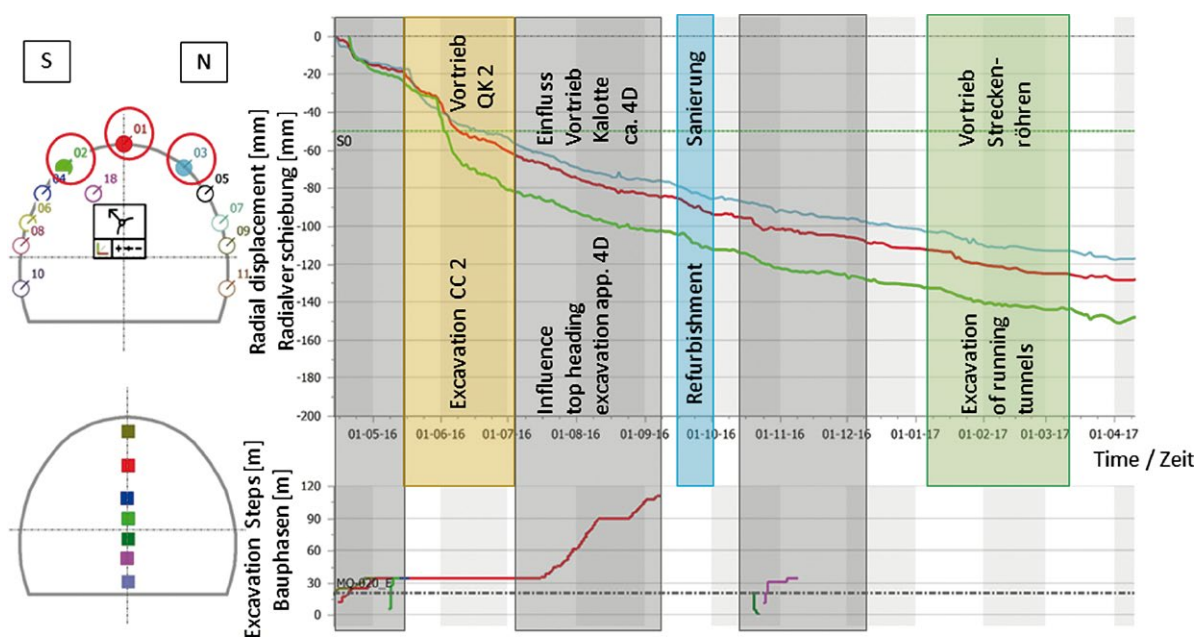


Fig. 5. Radial displacements in measuring section MS-020 of LC-west

Bild 5. Radialverschiebungen im Messquerschnitt MQ-020 der LK-West

As is shown, long-lasting increases characterize the displacement developments. In the following considerations, the influence of the time-dependence of the rock mass behavior is regarded to be low since the displacement increases approach zero immediately when the excavation of the longitudinal cavern west is finished (Figure 5). The predicted displacement value of 50 mm was already exceeded during the excavation of the top heading in the cross cavern 1 and cross cavern 2. At this time, the top heading of the longitudinal cavern was excavated over a length of approximately 2D (cavern diameter $D = 20$ m) on both sides of the shaft Fröschnitz 1 (about 1/3 of its total length). The further excavation of the top heading of the longitudinal cavern west caused additional displacement increases up to a distance of the excavation face of about 4D due to stress redistributions. During the excavations of the other caverns, displacement increases occurred up to a similar distance of the excavation face to the relevant measuring section. In contrast, during the excavation of the running tunnels ($D = 10$ m) displacement increases were observed only up to a distance of the excavation face of about 2D. In the present case, not only the larger cavity diameter causes a larger area with displacement increases, but also the factor increases from 2 to 4 due to the magnitude of the cavity diameter (size effect of the area with displacement increases or stress redistributions). Because of the ongoing displacement increases fractures occurred in the shotcrete lining, especially in the western sidewalls of the central pillars between the longitudinal and the cross caverns caused by the dipping of the foliation to the west. This was also observed in other cavern excavations [2].

Further displacement increases in measuring section MS-020 were caused by the excavations of the running tunnels, which run parallel to the longitudinal cavern at an axial distance of about 35 m. With the completion of the excavations in the caverns and a sufficient distance of the excavation faces of the running tunnels, no further displacement increases were observed. Finally, the total displacements were up to 150 mm, about three times the predicted value.

The difference between the expected and the observed system behavior (displacements, utilization of the support measures) can be derived from the geomechanical conditions within the rock mass. Figure 6 shows the encountered geological conditions in a vertical section along the longitudinal cavern and through shaft SF1. A change from favorable rock mass conditions (GA 6d-2, subsequently competent) to less favorable rock mass conditions (GA 6e, subsequently incompetent) above the crown of the caverns can be derived from geological mapping during the shaft sinking and the excavation of the longitudinal cavern west. Due to this change, dipping more or less parallel to the foliation, different thicknesses of competent rock mass exist above the cross caverns 1 and 2. Comparable to a tunnel excavation approaching a fault zone, there is a stress concentration in the competent rock mass between the excavation edge and the change to incompetent rock mass [3]. Consequently, the fracture zone at the measuring section shows a greater depth than the one defined by the geotechnical design. Further stress concentrations are caused by a large-scale stress redistribution from

mit dem 1,22-fachen der Vertikalspannung entsprechend den Ergebnissen aus Bohrlochversuchen angesetzt.

Unter Ausnutzung der Symmetrie wurde nur das halbe System modelliert. Eine Überlagerung von 100 m über Tunnelfirste wurde mittels FE-Netz modelliert, 300 m über eine äquivalente Auflast (Bild 3).

Bei der Vortriebsplanung wurde eine Unterteilung in Kalotte und Strossen basierend auf geotechnischen Überlegungen und baubetrieblicher Machbarkeit gewählt (Bild 4). Sämtliche Ausbruchsschritte wurden durch 589 Berechnungsschritte im Modell abgebildet.

Basierend auf den Berechnungsergebnissen wurde als Kalkulationsgrundlage für die Angebotslegung ein Stützmittelkonzept mit mehreren, konkreten Ausbautypen entwickelt. Im Zuge der Ausführung wurden die relevanten Teile dieses Stützmittelkonzeptes als Vorgabe für Ausbruch und Stützung in der Planung ausgewiesen.

Aus den numerischen Berechnungen wurde für den Kreuzungsbereich der Kavernen ein erwarteter Verschiebungswert von 50 mm abgeleitet.

3 Ausführung – Beobachtungen und durchgeführte Maßnahmen

3.1 Kreuzungsbereich Längskaverne West mit Querkaverne 2

Bild 5 zeigt die Radialverschiebungen des Messquerschnittes MQ-020 der Längskaverne West unmittelbar in der Verschneidung mit der Querkaverne 2, aufgetragen über die Zeit. Wie gut zu erkennen ist, prägen langanhaltende Zunahmen die Verschiebungsverläufe. Der Einfluss des zeitabhängigen Verhaltens des Gebirges wird in den folgenden Betrachtungen als gering eingeschätzt, da mit Ende des Vortriebs in der Längskaverne West die Verschiebungszunahmen rasch gegen Null gehen (Bild 5). Der Prognosewert der Verschiebungen von 50 mm war bereits nach Vortrieb der Kalotte in der Querkaverne 1 und Querkaverne 2 überschritten. Die Kalotte der Längskaverne war zu diesem Zeitpunkt beidseitig des Schachtes jeweils ca. 2D (Kavernendurchmesser $D = 20$ m), rund 1/3

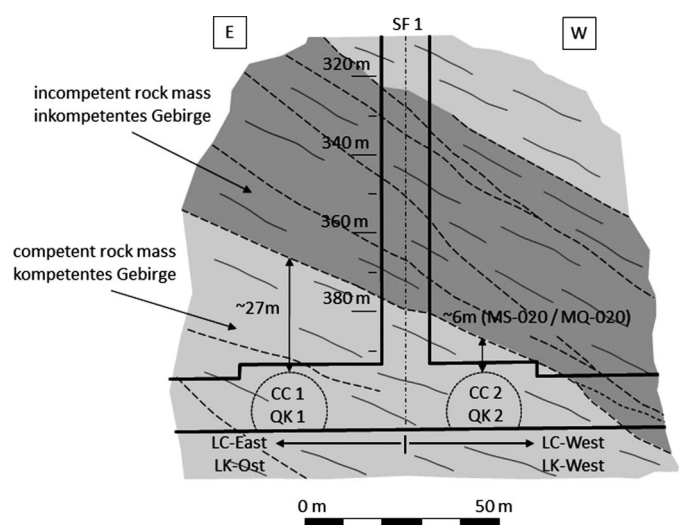


Fig. 6. Geological profile through shaft SF1 and longitudinal cavern

Bild 6. Geologisches Profil durch den Schacht SF1 und die Längskaverne

the more heavily fractured rock mass in the eastern and western excavation areas to the competent rock mass of the immediate intersection area.

Consequently, in addition to a more intensive monitoring, additional rock bolts with a length of 12 m were installed in the sidewalls of the pillars between the longitudinal cavern west and the cross cavern 2. Longer or pre-stressed rock bolts, as have been used on similar construction projects [4], were not necessary due to the observations regarding the stability of the entire intersection area. Additional rock bolts were also installed in the crown to achieve an improvement of the rock mass above. The shotcrete lining had to be refurbished due to overloading.

Regarding the stability of the entire intersection area, the most important factors are [5]

- the two central pillars between the longitudinal cavern, the two cross caverns and the running tunnels
- and the outer (in relation to the longitudinal cavern) sidewalls of the running tunnels, which form the (outer) side walls of the entire intersection area.

This explains why the largest displacements in the running tunnels in the immediate intersection area occurred at the outer sidewalls in relation to the longitudinal cavern. The central pillars were monitored with multi-point rod extensometers. Based on the results of these measurements, a fracture zone depth of about 10 m was determined. The form of the fracture zone did not change over the entire measuring period. Therefore, it was concluded that the pil-

der Gesamtlänge, vorgetrieben. Der weitere Kalottenvortrieb der Längskaverne West bewirkte weitere Verschiebungszunahmen bis zu einer Entfernung von ca. 4D aufgrund von Spannungsumlagerungen. Auch in den anderen Kavernenvortrieben stellten sich Verschiebungszunahmen bis zu einem ähnlichen Abstand der Ortsbrust zum jeweiligen Messquerschnitt ein. Im Vergleich dazu wurden im Zuge der Vortriebe der Streckenröhren ($D = 10 \text{ m}$) Verschiebungszunahmen nur bis zu einem Abstand der Ortsbrust von ca. $2D$ beobachtet. Es zeigt sich also im ggst. Fall, dass nicht nur der größere Hohlraumdurchmesser einen größeren Bereich mit Verschiebungszunahmen bewirkte, sondern auch der Faktor zufolge der Größenordnung des Durchmessers von 2 auf 4 zunimmt (Größeneffekt des Bereiches mit Verschiebungszunahmen bzw. mit Spannungsumlagerungen). Aufgrund der andauernden Verschiebungszunahmen traten, verursacht durch das Einfallen der Schieferung nach Westen, vor allem in den Westulmen der Mittelpfeiler zwischen der Längs- und den Querkavernen Brüche in der Spritzbetonschale auf. Dies wurde auch bei anderen Kavernenvortrieben beobachtet [2].

Weitere Verschiebungszunahmen im gegenständlichen Messquerschnitt waren durch die Vortriebe in den Streckenröhren, die mit einem Achsabstand von ca. 35 m parallel zur Längskaverne verlaufen, zu beobachten. Mit Fertigstellung der Vortriebe in den Kavernen und einem ausreichenden Abstand der Vortriebe in den Streckenröhren waren keine weiteren Verschiebungszunahmen zu



©OEBB

**MONITORING, SURVEYING,
INFORMATION TECHNOLOGY
FOR INFRASTRUCTURE & MINING**



GEODATA

- > Tunnel Surveying
- > Machine Guidance Systems
- > Control Measurements

- > Geotechnical Monitoring
- > Instrumentation
- > Automatic Data Acquisition

- KRONOS**
- > Tunnel Information
 - > Alarming System
 - > Data Visualisation

GEODATA SURVEYING &
MONITORING GROUP
Hans-Kudlich-Strasse 28
8700 Leoben, Austria
office@geodata.at
www.geodata.com

01 | Instrumentation & Monitoring,
Software & Systems

02 | Infrastructure &
Mining

03 | Industrial
Surveying

 **WE TURN DATA
INTO INFORMATION**

LEOBEN | GRAZ | SATTLTDT | VIENNA | ATHENS (GR) | COPENHAGEN (DEN) | LONDON (GBR) | MUNICH (GER) | OSLO (NOR) | SANTIAGO (CHI) | SYDNEY (AUS) | ZAGREB (CRO)

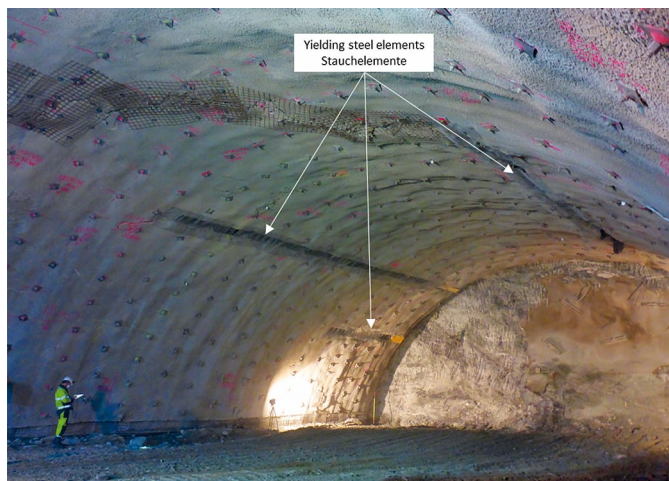


Fig. 7. Top Heading of LC-east with yielding steel elements
Bild 7. Kalotte der LK-Ost mit Stauchelementen

lars were not completely overloaded and the stability of the entire intersection area was ensured at any time.

3.2 Longitudinal cavern east

During the excavation of the top heading in the longitudinal cavern east (Figure 2), long-lasting displacement increases occurred over long sections caused by the previously mentioned size effect of the stress redistribution. In most of the measuring sections, the crown showed the largest displacements. About two weeks after the excavation of the top heading in the relevant area, shear fractures were observed in the shotcrete lining, mainly in the southern spring line.

Based on the geological documentation of the longitudinal cavern east and the parallel running tunnels, it was finally deduced that the rock mass conditions were particularly complex. Sections of different stiffness and strength alternated very rapidly, with the thickness of the incompetent zones increasing (Figure 2). In interaction with the fault zone at the end of the longitudinal cavern east, stress redistributions occurred, which led to particularly high stress concentrations in the competent rock mass areas and consequently to an overloading of the shotcrete lining. The development of the shear fractures in the southern spring line was probably favored by the tangential course of geological structures like slickensided planes and joints to the excavation edge.

Therefore, three by four rows of yielding elements were installed in the spring line areas in the immediate vicinity of the fault (Figure 7). With the ongoing excavation works the number of rock bolts was continuously increased. Finally, in the fault zone two to three 12 m long rock bolts were installed per m^2 .

The measured displacements of the yielding elements corresponded with the measured 3D displacements. The full effect of the yielding elements was also confirmed by the small strains of the shotcrete lining measured with strain gauges. Despite further excavation works since December 2016, displacement increases of about 30 mm were observed until April 2017 due to long-lasting stress redistributions. Until now, no fractures of the shotcrete lining have occurred where yielding elements have been installed.

beobachten. Die Gesamtverschiebungen betrugen letztendlich ca. 150 mm, was dem Dreifachen der ursprünglich prognostizierten Verschiebungen entspricht.

Der Unterschied zwischen dem prognostizierten und dem beobachteten Systemverhalten (Verschiebungen, Auslastung der Stützmittel) lässt sich über die geomechanischen Zusammenhänge im Gebirge herleiten. Bild 6 zeigt die angetroffenen geologischen Verhältnisse in einem Vertikalschnitt entlang der Längskaverne und durch den Schacht SF1. Aus dem Schachtvortrieb und dem Vortrieb in der Längskaverne West kann ein Wechsel von günstigen Gebirgsverhältnissen (GA 6d-2, im Folgenden kompetent) hin zu ungünstigeren Gebirgsverhältnissen (GA 6e, im Folgenden inkompetent) oberhalb der Firste der Kavernen abgeleitet werden. Durch das mehr oder weniger schieferungsparallele Einfallen dieses Wechsels ergibt sich über den Querkavernen 1 und 2 eine unterschiedliche Mächtigkeit des kompetenten Gebirges. Wie bei einem Tunnelvortrieb, der sich einer Störungszone annähert, ergibt sich im kompetenten Gebirge zwischen Ausbruchsrund und Wechsel zum inkompetenten Gebirge eine Spannungskonzentration durch eine Spannungsumlagerung hin zum kompetenten Gebirge [3]. Dies hat zur Folge, dass die Bruchzone im Bereich des Messquerschnittes aufgrund der beschriebenen Spannungskonzentration eine größere Tiefe aufweist als aus der geotechnischen Planung abgeleitet. Weitere Spannungskonzentrationen im kompetenten Gebirge des unmittelbaren Kreuzungsbereiches ergeben sich durch eine großräumige Spannungsumlagerung aus dem stärker zerlegten Gebirge in den östlichen und westlichen Vortriebsbereichen.

Als Maßnahmen wurden neben einer intensivierten messtechnischen Beobachtung in den Ulm- und Kämpferbereichen der Pfeiler zwischen der Längskaverne West mit der Querkaverne 2 zusätzlich 12 m lange Selbstbohranker eingebracht. Längere bzw. vorgespannte Anker, wie sie bei ähnlichen Bauvorhaben [4] eingesetzt wurden, waren aufgrund der im Folgenden beschriebenen Beobachtungen in Hinblick auf die Stabilität des gesamten Kreuzungsbereiches nicht erforderlich. Auch in der Firste wurden zusätzliche Anker eingebaut, um eine Vergütung des darüber liegenden Gebirgsbereiches zu erreichen. Die Spritzbetonschale musste in Folge von Überbeanspruchungen saniert werden.

In Hinblick auf die Stabilität des gesamten Kreuzungsbereiches spielen

- sowohl die beiden Mittelpfeiler zwischen der Längskaverne, den beiden Querkavernen und den Streckenröhren
- als auch die der Längskaverne abgewandten Seiten der Streckenröhren, die die (äußeren) Ulmbereiche des gesamten Kreuzungsbereiches bilden,

eine maßgebende Rolle [5]. Dies erklärt, warum in den Streckenröhren im unmittelbaren Kreuzungsbereich die größten Verschiebungen auf den der Längskaverne abgewandten Seiten auftraten.

Die messtechnische Überwachung der Mittelpfeiler erfolgte mittels Extensometern. Aus den Messergebnissen wurde eine Bruchzontiefe von rund 10 m abgeleitet, die Form der Bruchzone veränderte sich über die gesamte Messdauer hinweg nicht. Dies bedeutet, dass die Pfeiler

3.3 Comparative calculation

To perform a detailed assessment of the observed system behavior, the numerical calculation of the design phase was adapted by varying the rock mass parameters. Due to the long calculation time, a discrete modelling of the alternations in the rock mass was not modelled. An averaged rock mass strength lower than the one in the tender design was assumed instead. In this comparative calculation, the displacements at the intersection of the longitudinal cavern and cross cavern 2 corresponded roughly with the measured ones. The central pillars between the caverns however showed continuous overloading in the comparative calculation, which did not correspond to the observations described before. This can be explained by the fact that the pillars in reality have a significantly higher strength than the averaged strength used in the calculation (Figure 6).

4 Conclusions

Large cavities react particularly sensitively to slight changes in ground conditions. On this type of project, the determination of the rock mass parameters must be based on a scale effect exceeding the one of tunnels of common size. Long-lasting displacement increases caused by the excavation of large cross sections in several steps (top heading, several benches) and by mutual influences of adjacent and crossing excavations must be taken into account in geomechanical considerations. The extent of areas with displacement increases or stress redistributions show a size

nicht durchgehend überbeansprucht sind und die Stabilität des gesamten Kreuzungsbereiches zu jedem Zeitpunkt gewährleistet war.

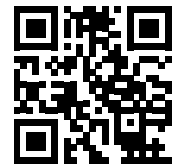
3.2 Längskaverne Ost

Im Zuge des Kalottenvortriebs in der Längskaverne Ost (Bild 2) stellten sich, verursacht durch den zuvor erwähnten Größeneffekt der Spannungumlagerung, über weite Strecken langanhaltende Verschiebungszunahmen ein. In den meisten Messquerschnitten wies die Firste die größten Verschiebungen auf. Etwa zwei Wochen nach dem Kalottenvortrieb im jeweiligen Bereich waren vor allem im südlichen Kämpfer Scherbrüche im Spritzbeton zu beobachten.

An Hand der geologischen Dokumentation der Längskaverne Ost und der parallel laufenden Streckenröhren zeigte sich schlussendlich, dass in diesem Bereich besonders komplexe Gebirgsverhältnisse vorliegen. Abschnitte unterschiedlicher Steifigkeit und Festigkeit wechseln mitunter sehr rasch, wobei die Mächtigkeiten der inkompetenten Zonen zunehmen (Bild 2). In Wechselwirkung mit der Störungszone am Ende der Längskaverne Ost stellten sich dadurch Spannungumlagerungen ein, die zu besonders hohen Spannungskonzentrationen in den kompetenten Gebirgsbereichen und in weiterer Folge zu einer Überbeanspruchung der Spritzbetonschale führten. Dabei führte vermutlich der tangierende Verlauf geologischer Strukturen wie Harnischflächen und Klüfte an den Hohlraumrand dazu, dass sich die Scherbrüche im Spritzbeton vorzugsweise im südlichen Kämpfer ausbildeten.



consulentes



Tunnelling · Buildings & structures · Construction & project management ·
Geology & geotechnical engineering · Energy · Environment · Technical building equipment ·
 Transport & mobility · Water

Vienna · Salzburg · Villach · Ybbs · Innsbruck · Athens · Belgrade · Bogotá · Bucharest · Freilassing ·
 Kiev · Ljubljana · Pristina · Skopje · Sofia · Tiflis · Tirana · Zagreb

innovative | integrative | international

iC consulentes
Ziviltechniker GesmbH
 Schönbrunner Straße 297
 1120 Vienna, Austria
 T +43 1 521 69-0

Office Salzburg
 Zollhausweg 1
 5101 Bergheim, Austria
 T +43 662 450 77 3

www.ic-group.org



© OEGB/graefner

effect (length increase from 2D to 4D) depending on the size of the cross section.

References

- [1] *Vanek, R., Fasching, A.*: Geological and geotechnical ground investigation for new Semmering Base Tunnel in Austria. Tunnel – Magazine of the Czech Tunnelling Association and the Slovak Tunnelling Association ITA-AITES, volume 22, No. 2 (2013), S 18–24.
- [2] *Schönlechner, C., Bitschnau, M.*: Die Bauausführung des Pumpspeicherkraftwerks Obervermuntwerk II. Geomechanik und Tunnelbau 9 (2016), No. 5, S. 435–446.
- [3] *Steindorfer, A.*: Short Term Prediction of Rock Mass Behaviour in Tunnelling by Advanced Analysis of Displacement Monitoring Data. Geotechnical Group Graz, Vol. 1, 1998.
- [4] *Abraham, K. H., Barth, St., Bräutigam, F., Hereth, A., Müller, L., Pahl, A., Rechser, O. J.*: Vergleich von Statik, Spannungsoptik und Messungen beim Bau der Kavernen Waldeck II. Rock Mechanics, Suppl. 3 (1974), S. 143–166.
- [5] *Poisel, A.*: Stability analyses of shallow double tube tunnels in soft rock. Master's Thesis. TU- Wien, 2005.



Dipl.-Ing. Alexander Poisel
IGT Geotechnik und Tunnelbau ZT GmbH
Mauracherstraße 9
5020 Salzburg
a.poisel@igt-engineering.com



Dipl.-Ing. Johannes Weigl
iC consulenten Ziviltechniker GesmbH
Schönbrunner Str. 297
1120 Wien
office@ic-group.org



Dipl.-Ing. Tobias Schachinger
ÖBB-Infrastruktur AG
SAE – Fachbereich Bautechnik –
Tunnelbau Nordbahnstraße 50
1020 Wien
tobias.schachinger@oebb.at



Mag. Robert Vanek
3G Gruppe Geotechnik Graz ZT GmbH
Triester Straße 478a
8055 Graz – Seiersberg-Pirka
Vanek@3-g.at



Dipl.-Ing. Gernot Nipitsch
ÖBB-Infrastruktur AG
Griesgasse 11/1
8020 Graz
gernot.nipitsch@oebb.at

Im unmittelbaren Störungsbereich wurden daher 3–4 Reihen Stauchelemente in den Kämpferbereichen eingebaut (Bild 7). Die Regelankerung wurde im Kalottenvortrieb zunehmend verdichtet, wobei im Bereich der Störungszone zwei bis drei 12 m lange Anker pro m² eingebaut wurden.

Der Vergleich der gemessenen Verschiebung der Stauchelemente mit den gemessenen 3D-Verschiebungen zeigte eine gute Übereinstimmung. Die volle Wirkung der Stauchelemente wurde auch durch die geringen, mittels Dehnmessgebern beobachteten Dehnungen der Spritzbetonschale bestätigt. Trotz ruhender Vortriebsarbeiten seit Dezember 2016 waren aufgrund langanhaltender Spannungumlagerungen bis April 2017 Verschiebungszunahmen von rund 30 mm zu beobachten. Bis dato treten im Bereich der Stauchelemente keine Brucherscheinungen im Spritzbeton auf.

3.3 Vergleichsrechnung

Um das beobachtete Systemverhalten detailliert beurteilen zu können, wurde die numerische Berechnung der Ausschreibungsphase durch Variation der Gebirgskennwerte adaptiert. Wegen der besonders langen Rechenzeit wurde auf eine diskrete Modellierung der Wechselfolgen im Gebirge verzichtet. Stattdessen wurde eine gemittelte, gegenüber der Ausschreibungsplanung geringere Gebirgsfestigkeit angesetzt. Bei dieser Vergleichsrechnung stellen sich im Kreuzungsbereich Längskaverne – Querkaverne 2 annähernd die gemessenen Verschiebungen ein. Die Mittelpfeiler zwischen den Kavernen wiesen aber in der Vergleichsrechnung eine durchgehende Überbeanspruchung auf, was – wie zuvor beschrieben – jedoch nicht den Beobachtungen entspricht. Dies kann damit erklärt werden, dass die Pfeiler in der Realität eine gegenüber der gemittelten Festigkeit in der Rechnung deutlich höhere Festigkeit haben (Bild 6).

4 Schlussfolgerungen

Große Hohlräume reagieren bereits auf geringe Änderungen in den Gebirgsverhältnissen besonders sensibel. Bei solchen Bauvorhaben ist bereits bei der Bestimmung der Gebirgsparameter ein Maßstabeffekt zugrunde zu legen, der jenen bei Tunneln herkömmlicher Größenordnung überschreitet. Des Weiteren ist bei geomechanischen Überlegungen und Modellvorstellungen zu berücksichtigen, dass das Auffahren großer Querschnitte in mehreren Phasen (Kalotte, mehrere Strossen) und darüber hinaus Einflüsse benachbarter und kreuzender Querschnitte lang anhaltende Verschiebungszunahmen verursachen. Die Ausdehnung der Bereiche mit Verschiebungszunahmen bzw. mit Spannungumlagerungen weist dabei einen Größeneffekt (Zunahme von 2D auf 4D Abstand von der Ortsbrust) abhängig von der Hohlraumgröße auf.