

# REKONŠTRUKCIA ELEKTRICKOVÉHO TUNELA POD HRADOM V BRATISLAVE

## RECONSTRUCTION OF TRAM TUNNEL UNDER BRATISLAVA CASTLE

MILOSLAV FRANKOVSKÝ

### ÚVOD

V máji roku 2010 sa ukončili rekonštrukčné práce v električkovom tuneli pod Bratislavským hradom. Komplexná rekonštrukcia tunela a súvisiacich podzemných priestorov začala v máji roku 2009. Investorom rekonštrukcie tunela bol Dopravný podnik Bratislava, a. s., pričom časť súvisiacu s novým vodovodným potrubím financovala Bratislavská vodárenská spoločnosť a. s. Projektantom rekonštrukcie bol Terraprojekt, a. s., Bratislava a zhotoviteľom Združenie pre električku pod Hradom tvorené spoločnosťami OHL ŽS, a. s., Skanska BS, a. s., a Trnavská stavebná spoločnosť, a. s.

Električkový tunel je situovaný v mestskej časti Bratislava–Staré Mesto pod výbežkom Malých Karpát, klesajúcim do údolia rieky Dunaj (obr. 1). Tunel leží priamo pod Hradným vrchom a je na východnej strane napojený do križovatky ulíc Kapucínska–Zámocká, na západnej strane na Nábřežie arm. gen. Ludvíka Svobodu.

Masív hradnej skaly, v ktorom je tunel vybudovaný, je zložený prevažne zo žuly, ktorá v týchto miestach vystupuje na povrch územia a je pokrytá rôzne mocnými svahovými sedimentmi. Žula je prevažne rovnomerne zrnitá, miestami prestúpená tenšími aj hrubšími pegmatitovými a aplitovými žilami rôznych smerov. Geotechnické vlastnosti horninového masívu sú zhoršené tektonickými poruchami a účinkami mechanického a chemického zvetrávania, ktoré dosahuje hĺbku 8 až 10 m, miestami až 20 m. Priepustnosť horninového masívu je pomerne malá, ale zvyšuje sa v miestach porúch. Tektonická štruktúra masívu bola dotvorená v treťohorách pri alpínskom vrásnení. Vznikli pozdĺžne zlomy, v ktorých ďalšie tektonické sily spôsobili aj vznik priečných zlomov a mylonitových pásiem rôznych mocností, v ktorých je žula rozdrvená, takže jej pôvodný charakter sa úplne stratil. V hlbších častiach masívu sú pukliny uzavreté, preto aj menej priepustné. V tektonicky porušených a zvetraných častiach masívu však cirkuluje puklinová voda. Horninový masív je chudobný na ľahko rozpustné látky. Zrážková voda, ktorá steká po svahoch a vsakuje do pokryvných a zvetraných častí masívu, vytvára v masíve slabé zavodené horizonty, pričom výdatnosť priesakov je priamo závislá od intenzity zrážok.

### Základné technické údaje o tuneli:

Dĺžka tunela:	792 m
Prevýšenie tunela medzi portálmi:	18,2 m
Maximálna výška nadložia:	63 m
Maximálny pozdĺžny sklon:	2,99 %
Svetlá šírka tunela medzi oporami:	11,0 m
Svetlá výška tunela:	6,6 m

### HISTÓRIA TUNELA

Tunel bol vybudovaný v rokoch 1943–1949 ako cestný tunel s vozovkou šírky 7 m a obojstrannými vyvýšenými chodníkmi šírky 2 m. Svetlý prierez tunela pôsobiaci parabolicky je v skutočnosti skonštruovaný z kruhových segmentov. Stavebné práce realizovali firmy, ktoré mali skúsenosti z výstavby železničných tunelov klasickými tunelovacími metódami, najmä rakúskou metódou s pozdĺžnikovým dočasným výstrojom – výdrevou, preto sa táto metóda zvolila aj pre výstavbu tunela pod Hradom (obr. 2). Výstavba sa začala razením smerovej štólne lichobežníkového prierezu od oboch portálov tunela. Pokračovalo sa razením stropnej štólne, z ktorej boli razené do smerovej štólne v každom pracovnom páse sypacie šachty

### INTRODUCTION

Reconstruction work on the tram tunnel under Bratislava Castle was finished in May 2010, 12 months after the work commencement. The comprehensive reconstruction of the tunnel and associated underground spaces started in May 2009. The client for the tunnel reconstruction was Dopravný Podnik Bratislava, a. s. (a public transit company). A part of funding relating to a new water line was provided by Bratislavská vodárenská spoločnosť a. s. (a water company). The design for the reconstruction was carried out by Terraprojekt, a. s., Bratislava and the contractor was Združenie pre električku pod Hradom, a consortium consisting of OHL ŽS, a. s., Skanska BS, a. s., and Trnavská stavebná spoločnosť, a. s.

The tram tunnel is located in the municipal district of Bratislava–Staré Mesto, under a spur of the Lesser Carpathians declining to the Danube River valley. The tunnel is found directly under the Castle Hill. On the eastern side it is connected to the intersection between Kapucínska and Zámocká Streets, while General Ludvík Svoboda embankment is on its western side.

The castle rock mass which the tunnel passes through consists mainly of granite, which rises in this location to the surface of the area and is covered with slope sediments of variable thickness. The granite is mostly uniformly grained, locally interspersed with thinner to thicker veins of pegmatite and aplite, trending in various directions. Geotechnical properties of the rock mass are worsened by faulting and effects of mechanical and chemical weathering, which reach to the depth of 8 to 10 metres, locally up to 20m. Rock mass permeability is relatively low, but it increases at faults. The tectonic structure formation was completed in the Tertiary period, during the Alpine orogeny. Strike slip faults originated, with dip slip faults and mylonite zones of various thickness developing as the result of other tectonic forces. The granite in the latter faults was crushed, therefore, it completely lost its original character. Fissures in deeper parts of the rock mass are closed, therefore less permeable. Fissure water circulates within the broken and weathered parts of the massif. The rock mass is poor in easily soluble matters. Rain water which flows down the slopes and seeps into the surface parts and weathered parts of the massif forms slightly saturated horizons in the massif, with the seepage rate directly depending on the rate of precipitation.

### Basic technical data on the tunnel:

Tunnel length:	792m
Difference between altitudes of portals:	18.2m
Maximum overburden height:	63m
Maximum longitudinal gradient:	2.99 %
Net width between side walls:	11.0m
Net height of the tunnel:	6.6m

### TUNNEL HISTORY

The tunnel was constructed from 1943 to 1949 as a road tunnel with a 7m wide roadway and 2m wide elevated walkways on both tunnel sides. The net cross section of the tunnel, giving the impression of a parabola, consists in reality of circular segments. The construction was carried out by contractors experienced in constructing railway tunnels by traditional tunnelling methods, first of all the Austrian Tunnelling Method using bar timbering. For that reason this method was chosen even for the tunnel under the Castle. The construction started by driving a trapezoidal cross-section pilot tunnel



Obr. 1 Situácia tunela na mape mesta  
Fig. 1 Tunnel layout in a city map

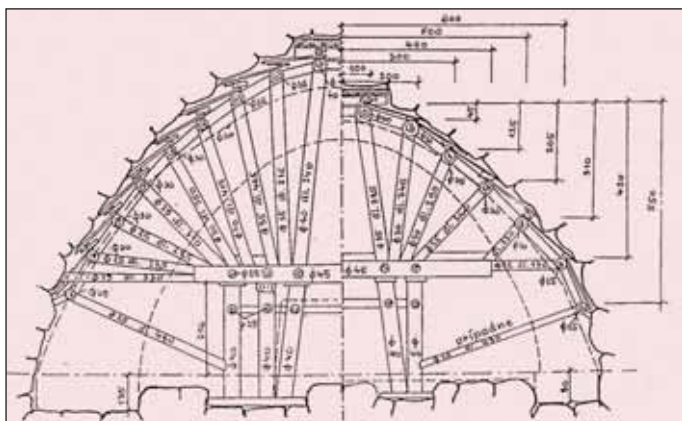
na vertikálnu dopravu rúbaniny. Horizontálna doprava rúbaniny bola zabezpečená úzkokolejnou železnicou vedenou v smerovej štólne. K otváraní plného prierezu tunela sa pristupovalo po pracovných pásoch maximálne 50 m za čelom štólne. Keďže sa v trase tunela predpokladali relatívne priaznivé geologické podmienky, pri návrhu dočasného výstroja aj definitívneho ostenia sa volilo spravidla využitie ľahšieho typu výdrevy a ostenia v 42 pracovných pásoch, resp. slabo- až stredne dimenzovaného typu v 27 pracovných pásoch. Silne dimenzovaný typ výdrevy a ostenia bol navrhnutý len v 13 pásoch pri západnom portáli, kde sa tunel budoval v otvorenom výkope a dodatočne zasypal. Ostenie tunela je zhotovené z ryolitových blokov z kameňolomu pri Hliníku nad Hronom. Ostenie opory je z lomového kameňa, na líci upraveného ako hrubé riadkové murivo. Klenba je z ryolitových klenákov s opracovaným lícom.

Súčasnou stavbou tunela bola úniková chodba s prierezom šírky 4 m a výšky 4 m vedená z tunela v stúpaní a vyústená na Palisády. Kvôli veľkému pozdĺžnemu sklonu (17,5%) sa v chodbe vybuďovalo schodisko. Chodba dĺžky cca 135 m sa pripája na tunel v páse č. 50. Do projektu tunela bol tiež zapracovaný a počas stavby aj vybudovaný kryt Civilnej protiletectkej ochrany určený na ochranu ústavných činiteľov. Vchod do krytu bol zabezpečený približne 56 metrov dlhou a 3,3 m vysokou chodbou začínajúcou v blízkosti východného portálu a tiež krátkou 2,5 m vysokou spojovacou chodbou v tuneli v tunelovom páse č. 76. Hlavná komora krytu tvaru tunelovej rúry má rozmery 11x12 metrov. Osobitnou kapitolou v histórii tunela bolo obdobie od júna 1944 do apríla 1945, keď bol ešte v štádiu rozostavenosti využívaný ako protiletectký kryt pre obyvateľstvo.

Tunel bol v období rokov 1949–1981 prevádzkovaný ako cestný a slúžil aj linkám autobusov MHD. Chodníky v tuneli v prvých rokoch využívali aj chodci. Neskôr sa z bezpečnostných dôvodov vstup chodcom zakázal. V rokoch 1981–1983 sa uskutočnila posledná veľká rekonštrukcia tunela, ktorej náplňou bola zmena jeho využitia z cestného na električkový tunel. V rámci tejto rekonštrukcie sa

from both tunnel portals. It continued by excavating the top heading. Vertical transport of the muck was through drop shafts, which were sunk from the top heading to the pilot tunnel in each working block. The horizontal transport of muck was by a narrow-gauge track installed in the pilot tunnel. The full tunnel cross-section was being opened in working blocks, 50m behind the pilot tunnel face. Because of the fact that relatively favourable geological conditions were expected to be encountered along the tunnel route, a lighter type of timbering and the lining was designed for 42 working blocks, and weak to medium strong types for 27 working blocks. Heavy timbering and lining was designed only for the 13 blocks adjacent to the western portal, where the tunnel was constructed in an open trench to be subsequently backfilled. The tunnel is lined with rhyolite blocks obtained from a quarry near Hliník nad Hronom. The sidewalls are in quarry stone, with the stone sides forming a carved inner face to give the impression of range masonry. The vault is lined with rhyolite wedges with a bush-hammered inner surface.

An escape gallery with the cross-section 4m wide and 4m high was part of the tunnel construction. It was driven from the tunnel on a rising gradient and ended in Palisády Street. A staircase was built in the gallery because of the steep longitudinal gradient (17.5%). The 135m-long gallery is connected to the tunnel lining block No. 50. A civil air defence shelter was incorporated into the tunnel design during the course of the construction to provide protection for constitutional officials. The shelter entrance was via an approximately 56m long and 3.3m high adit starting in the vicinity of the western portal, and via a short 2.5m high passage gallery leading from tunnel lining block No. 76. The main shelter chamber, having the form of a tunnel tube, is 11mx12m in cross section. The period from June 1944 to April 1945 was a special chapter in the tunnel's history. Despite the fact that it was still under construction, it was used as an air-raid shelter for Bratislava residents.



Obr. 2 Schéma výdrevy tunela  
Fig. 2 Tunnel timbering chart

vybudovala koľajová trať a potrubie vodovodu priemeru 800 mm sa uložilo na povrch južného chodníka. Úniková chodba z tunela na Palisády sa počas prevádzky električiek prestala používať a bola uzavretá. Nevyužívaný zostal aj kryt, ktorého portál od Skalnej ulice bol postupne zasypaný a dlhodobo neprístupný.

### HLAVNÉ DŮVODY REKONŠTRUKCIE

Stav tunela pred komplexnou rekonštrukciou (obr. 3) zodpovedal jeho veku, resp. času uplynutého od jeho poslednej veľkej rekonštrukcie v osemdesiatych rokoch minulého storočia. Dlhodobou neudržateľným stavom sa týkali viacerých častí stavby a jej vybavenia. Rozhodnutie o rekonštrukcii sa opieralo hlavne o tieto dôvody.

Podkladové panely a koľajnice boli v zlom technickom stave, hlava koľajnic bola deformovaná, čo spôsobovalo otrasy a hluk v električkách. Niektoré úseky koľajnic boli opotrebované v takej miere, že ohrozovali bezpečnosť električkovej dopravy.

Odvodnenie tunela bolo v zlom stave, systém priečných priechodov, zvodníc a pozdĺžnych zberačov bol v niektorých úsekoch nefunkčný a napomáhal zhoršovaniu podlažia koľajovej trate.

Potrubie vodovodu DN 800 umiestnené na povrchu medzi južnou oporou a koľajovou traťou znemožňovalo trvalý prístup k opornej časti ostena a k prvkom odvodnenia na južnej strane tunela. Zároveň potrubie zhoršovalo podmienky úniku osôb popri južnej opore v prípade mimoriadnej situácie.

Zabezpečenie prevádzkovej a požiarnej bezpečnosti v tuneli bolo nedostatočné, úniková chodba na Palisády bola nefunkčná, únikové cesty pozdĺž koľajovej trate neboli označené a osvetlené.

Tunel v poslednom období nebol osvetlený, existujúce viackrát modernizované osvetlenie bolo zdevastované a nefunkčné.

Trolejové a napájacie vedenia a súvisiace zariadenia boli vo veľmi zlom technickom stave.

Uvedené hlavné dôvody boli analyzované a zhrnuté v investorskom zámere [1]. Následne bola v roku 2008 spracovaná dokumentácia pre



Obr. 3 Interiér tunela pred rekonštrukciou (foto M. Dekánek, 2009)  
Fig. 3 Tunnel interior before reconstruction (Photo courtesy of M. Dekánek, 2009)

The tunnel was operated as a road tunnel and was used by buses of the urban mass transit system. The walkways in the tunnel were even used by pedestrians during the initial years. Later the entry of pedestrians was forbidden for safety reasons. The last major reconstruction of the tunnel took place in 1981 – 1983, changing the purpose of its use. It was changed from the road tunnel to a tram tunnel. A rail track was laid and an 800mm-diameter water pipeline was installed on the surface of the southern walkway. The gallery allowing escape from the tunnel to Palisády Street ceased to be used during the tram operation and was closed. The shelter also remained unused. The portal from Skalná Street was gradually backfilled and was inaccessible for a long time.

### MAIN REASONS FOR THE RECONSTRUCTION

The condition of the tunnel before the comprehensive reconstruction corresponded to its age or the time which had passed since the previous major reconstruction in the 1980s. The condition which was untenable for a long time comprised several parts of the structure and its equipment. The decision that the reconstruction would be carried out was mainly based on the following reasons:

Rails carrying concrete panels and the rails were in a poor technical condition; the head of rails was deformed, causing shaking and noise inside trams. Some stretches of the rails were worn to an extent which jeopardised the safety of the tram traffic.

The tunnel drainage was in a poor condition, the system of transverse drain holes, cross drains and longitudinal collecting drains was out of function in some blocks, contributing to deterioration of the rail track sub-grade.

Owing to the DN 800mm water pipeline lying on the surface between the southern sidewall and the rail track, a permanent access to the lining on the sidewall and elements of the drainage on the southern part of the tunnel was impossible. At the same time, the pipeline worsened conditions for the escape of people along the southern sidewall in the case of an emergency.

The level of the operational and fire safety in the tunnel was insufficient; the escape gallery ending in Palisády Street was out of function, escape routes along the tram track were not provided with markings and were not illuminated.

Lately the tunnel was not illuminated because the existing, several times upgraded, illumination was devastated and out of function.

The overhead catenary and power lines, as well as associated facilities were in a very poor technical condition.

The above-mentioned main reasons were analysed and summarised in a project concept [1]. Subsequently the final design was carried out [4]. The tender proceedings for the reconstruction took place at the beginning of 2009.

### TUNNEL USER SAFETY

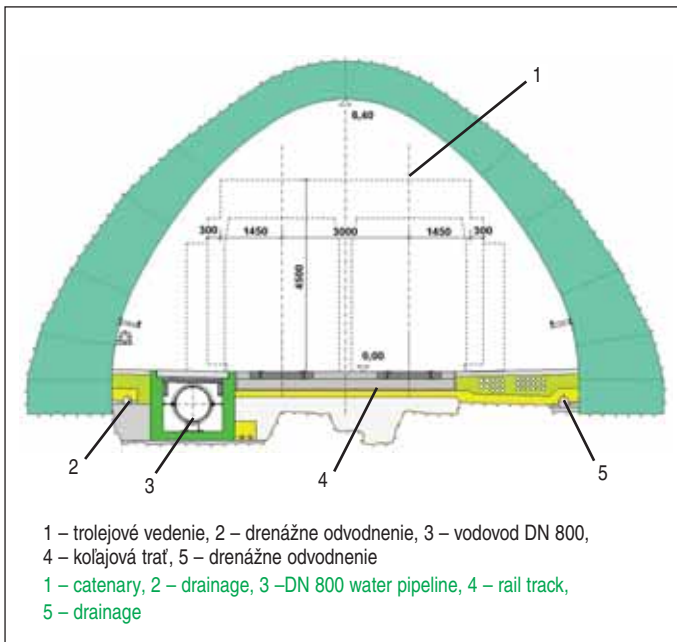
Problems associated with the safety of tunnel users had to be dealt with during the work on the reconstruction design. A safety concept [2] was worked out as early as the initial stages of the design preparation. It assessed and proposed measures the objective of which was to implement a safety standard comparable with railway tunnels. The reason was the fact that the tram tunnel is the only of its kind in Slovakia and the number of tram tunnels in neighbouring countries is not sufficient for creating specific regulations solving safety equipment for this type of tunnels. It must be stressed that, according to conclusions reached by authors of the safety concept, the risk of an incident in the tunnel carrying only tram traffic is significantly lower compared to road tunnels, which are every day passed through by thousands of cars and lorries.

The following measures were proposed as the basic elements of the safety concept:

The gallery ending in Palisády Street will be brought into service to be used as an escape route in the case of a tunnel fire. The gallery, the structure of which will be reconstructed, will be equipped with fire shutters, a forced ventilation system and lighting.

Escape walkways on both sides of the tram track will be equipped with guidance illumination, marking of the distance to the nearest escape exit and hand rails.

A leaky-feeder radio communications cable running throughout the tunnel length will be used for transmitting information, allowing communication between the tram driver with the traffic control room.



1 – trolejové vedenie, 2 – drenážne odvodnenie, 3 – vodovod DN 800, 4 – koľajová trať, 5 – drenážne odvodnenie  
1 – catenary, 2 – drainage, 3 – DN 800 water pipeline, 4 – rail track, 5 – drainage

**Obr. 4** Vzorový priečný rez tunela po rekonštrukcii  
**Fig. 4** Typical cross-section through the tunnel after reconstruction

stavebné povolenie [4] a začiatkom roku 2009 prebehla súťaž na výber zhotoviteľa rekonštrukcie.

## BEZPEČNOSŤ UŽIVATEĽOV TUNELA

Počas spracovania projektov dokumentácie rekonštrukcie bolo potrebné riešiť otázky súvisiace s bezpečnosťou užívateľov tunela. Už vo vstupných štádiách projektov prípravy bola spracovaná bezpečnostná koncepcia [2], ktorá zhodnotila a navrhla opatrenia, ktorých cieľom bolo zaviesť bezpečnostný štandard porovnateľný so železničnými tunelmi. Elektrický tunel je totiž jediný svojho druhu na Slovensku, pričom ani v okolitých krajinách nie je počet elektrických tunelov dostatočný na to, aby existovali osobitné predpisy riešiace bezpečnostné vybavenie tohto druhu tunelov. Je treba zdôrazniť, že podľa záverov spracovateľov bezpečnostnej koncepcie je riziko vzniku mimoriadnej udalosti v tuneli slúžiacom len elektrickej doprave podstatne nižšie v porovnaní s cestnými tunelmi, ktorými denne prechádzajú tisíce osobných i nákladných vozidiel.

Ako základné prvky bezpečnostnej koncepcie boli navrhované tieto opatrenia.

Sprevádzkuje sa chodba ústiaca na Palisády, ktorá bude slúžiť ako úniková v prípade požiaru v tuneli. Stavebne zrekonštruovaná chodba bude vybavená požiarnymi uzávermi, pretlakovým vetraním a osvetlením.

Únikové chodníky po oboch stranách elektrickej trate budú vybavené orientačným osvetlením, označením vzdialenosti k najbližšiemu únikovému východu a držadlami.

Na prenos informácie bude slúžiť rádiové spojenie zabezpečené vyžarovacím káblom po celej dĺžke tunela, umožňujúce spojenie vodiča električky s dopravným dispečingom.

Pred tunelmi bude doplnené premenlivé dopravné značenie zabráňujúce vstupu električky do tunela v prípade mimoriadnej udalosti v ňom.

Pri portáloch tunela budú zriadené požiarné hydranty.

Na podklade takto navrhnutého štandardu sa začali rokovania s predstaviteľmi prezídia Hasičského a záchranného zboru. Po dlhých a často búrlivých diskusiách bolo na základe požiadaviek predstaviteľov požiarnej ochrany do projektového riešenia zapracovaných niekoľko ďalších opatrení.

V tuneli je zriadený kamerový dohľad po celej dĺžke s prenosom obrazu do dopravného dispečingu prevádzkovateľa.

V tuneli je inštalované nezavodnené potrubie DN150 požiarného vodovodu, slúžiaceho v prípade zásahu hasičov.

Kvôli zabezpečeniu požadovaného tlaku v potrubí je zriadená automatická tlaková stanica so záložným zdrojom napájania (dieselagregátom). Obe zariadenia sú umiestnené v podzemných priestoroch bývalého krytu.



**Obr. 5** Vizualizácia interiéru tunela podľa projektu  
**Fig. 5** Visualisation of the tunnel interior according to the design

Variable traffic signs preventing a tram from entering the tunnel in the case of an incident inside the tunnel will be installed in front of the tunnel portals.

Fire hydrants will be installed at the tunnel portals.

The standard proposed in the above-mentioned way provided a base for initial negotiations with representatives of the Fire Rescue Service presidium. After lengthy and often heated discussions, several additional measures were incorporated into the design, as required by the Fire Rescue Service representatives:

A camera surveillance system is installed throughout the tunnel length. Images are transmitted to the tunnel operator's control room.

A DN150mm dry hydrant line is installed in the tunnel to be used in the case of a fire intervention.

An automatic booster pump station with a backup power source (a diesel generating set) is installed on the pipeline. Both facilities are located in the underground spaces of the former shelter.

In the case of an extraordinary situation inside the tunnel, the tram driver will inform the traffic operator using the radio communication system. The traffic operator will be able to identify the condition using the camera surveillance system and announce a contingent fire to the fire brigade. Subsequently the traffic operator will take care of switching the catenary off and filling the hydrant line with water. The entry of other trams into the tunnel will be prevented by means of variable traffic signs.

The situation of smoke propagation which could occur in the case of a tram fire was analysed on the basis of requirements of representatives of the Fire Rescue Service. Ventilation studies [3] confirmed that spreading of smoke back through the tunnel was impossible at all meteorological variants and variants of the fire magnitude being verified because the smoke propagation velocity in the west-east direction exceeded the critical velocity. A fire intervention is therefore possible from the western portal. A mobile fan will be used in the case of an intervention from the eastern portal.

## EXTENT AND COURSE OF RECONSTRUCTION OPERATIONS

The construction of the new tram track was the main part of the comprehensive reconstruction. A ballastless track structure of the slab track type was designed for the tram tunnel, in accordance with requirements for future maintenance and the length of life. The track gauge is 1,000mm. The track alignment in the tunnel is nearly straight, horizontal curves are found only in the vicinity of the tunnel portals.

The track superstructure consists of the following elements:

- NT1 rail with elastomer rail pads,
- elastic fastening of rails on base plates with anchor bolts,
- a closed concrete cover reaching up to the top of rail level,
- C30/37 concrete base slab 245mm thick, reinforced with steel mesh at the lower surface,



Obr. 6 Výstavba koľajovej trate, vpravo potrubie vodovodu v kanáli  
Fig. 6 Construction of the rail track; for the right: the water pipeline in the duct

V prípade mimoriadnej situácie v tuneli sa vodič električky spojí prostredníctvom rádiového spojenia s dopravným dispečingom. Dispečer môže pomocou kamerového dohľadu identifikovať stav a v prípade požiaru tento zhlásiť hasičskej jednotke. Dispečer následne zabezpečí vypnutie napájania trolejového vedenia a naplnenie potrubia požiarneho vodovodu. Vstup ďalších električiek do tunela bude zamedzený prostredníctvom premenlivých dopravných značiek.

Na základe požiadaviek predstaviteľov požiarnej ochrany bola preverená aj situácia šírenia dymu, ku ktorej by mohlo dôjsť v prípade požiaru električky. Štúdia vetrania [3] potvrdila, že pri všetkých preverovaných meteorologických variantoch a tiež variantoch veľkosti požiaru prevyšuje rýchlosť šírenia dymu v smere od západu na východ kritickú rýchlosť, a teda spätné šírenie dymu nie je možné. Zásah hasičov je preto možný od západného portálu a v prípade zásahu od východného portálu sa použije mobilný ventilátor.

## ROZSAH A PRIEBEH REKONŠTRUKČNÝCH PRÁČ

Hlavnou súčasťou komplexnej rekonštrukcie bolo vybudovanie novej koľajovej trate. V súlade s požiadavkami na budúcu prevádzku a životnosť bol v tuneli navrhnutý bezštrkový električkový zvršok typu pevná jazdná dráha. Koľaj má rozchod 1000 mm. Trať v tuneli je takmer priama, smerové oblúky sa nachádzajú iba v blízkosti portálov tunela.

Skladba konštrukcie koľajovej trate je takáto:

- žliabková koľajnica NT1,
- pružné podkladnicové upevnenie koľajnic s kotevnými skrutkami,
- uzatvorený kryt po úroveň temien koľajnic z betónu,
- podkladná betónová doska hrúbky 245 mm z betónu C30/37, pri spodnom okraji vystužená oceľovou sieťou,
- elastická rohož uložená po celom obvode prierezu „vane“ pre konštrukciu koľaje,
- podkladová vrstva z filtračného betónu slúžiaca ako drenážna a protimrazová vrstva.

Plán pod koľajovou traťou bola vyhlbená na skalné podložie, pričom boli odstránené pôvodné prvky odvodnenia. Vybratá bola aj nefunkčná vodovodná oceľová rúra priemeru 600 mm, nachádzajúca sa pod koľajovou traťou, ktorá nebola odstránená počas predošlej rekonštrukcie. Vzniknutý priestor bol vyplnený zhutneným drveným kamenivom frakcie 32/63 až po úroveň vrstvy z drenážneho betónu (obr. 4).

Odvodnenie tunela odvádza vodu z horninového masívu zväznanú priečnymi zvodmi spoza ostenia, resp. prenikajúcu priesakmi cez ostenie. Priečne zvody cez ostenie sú napojené do dvoch pozdĺžnych zberačov umiestnených pri oboch oporách, ktoré sú pri oboch portáloch cez šachty prepojené do potrubí napojených do verejnej kanalizačnej siete. Do odvodnenia je napojené aj povrchové odvodnenie koľajovej trate.

V celom rozsahu tunela sú vybudované nové chodníky vytvárajúce únikové cesty v prípade mimoriadnej situácie. Pod severným chodníkom boli vybudované chráničkové trasy pre vedenie silnoprúdových a slaboprúdových káblových vedení. Chodníky sú vybavené



Obr. 7 Práce pred východným portálom tunela  
Fig. 7 Working in front of the eastern tunnel portal

- elastic mat installed on the entire surface of the “tub” housing the track structure,
- a sub-base layer of porous concrete serving as a drainage and frost blanket course.

The excavation for the roadbed was carried out up to the bedrock level. Original elements of the tunnel drainage were removed during the excavation. The 600mm-diameter out-of-service steel pipeline which was found under the track, which had not been removed during the previous reconstruction, was removed. The originating space was backfilled with compacted 32/63-fraction crushed aggregate up to the porous concrete layer level.

The tunnel drainage system evacuates water from the rock mass which is collected by cross drains from the outer side of the lining or seeping through the lining. The cross drains passing through the lining are connected to two longitudinal sewers running along both side walls. The sewers are connected via shafts to the public sewerage network at both portals. The drainage on the tram track surface is also connected to the drainage system.

New walkways, forming escape routes in the case of an incident, are built throughout the tunnel length. Cableways for heavy current and light current cables were installed under the northern walkway. The walkways are equipped with handrails, guidance lighting, safety marking and marking of the distance to the nearest escape exit.

The existing elevated water line was replaced by an 800mm-diameter ductile cast iron pipeline placed into an underground reinforced concrete duct running next to the rail track, along the southern sidewall. The duct is covered throughout its length with precast slabs. The water pipeline was extended in front of both portals during the reconstruction. The extensions were placed in a reinforced concrete duct, similarly to the pipeline inside the tunnel. On the one hand, the decision that the pipeline would be extended complicated the course of the reconstruction, but on the other hand, it brought an unambiguous positive in the form of the exclusion of a possibility of disrupting the tram traffic in the case of a defect on the pipeline.

A new catenary system was installed throughout the tunnel length. The catenary is supplied with power by cables installed in cableways under the walkway. New operating lighting was installed in the tunnel in the form of lighting fixtures located under the ceiling and emergency fire lighting in the form of fixtures above both walkways, which are attached to the handrails. The lighting will be switched on during the tram traffic operation time.

Both galleries linking to the tunnel, which had not been used for a long time, were also reconstructed. The gallery leading to Palisády Street will be again used as an escape route. The reconstruction covered the exit spaces in Palisády Street and the substructure including the drainage. An automatic booster pump station and an emergency power supply unit are installed in the original air-raid shelter (the gallery leading to Skalná Street). They serve to supply the hydrant line with water. The gallery which led from the shelter to the space next to the portal was blinded because a multifunctional building was under construction in the area of operations.

držadlami, orientačným osvetlením a bezpečnostným značením ako aj značkami so vzdialenosťami k únikovým východom.

Existujúce nadzemné vodovodné potrubie bolo nahradené potrubím z tvárnej liatiny priemeru 800 mm uloženým do podzemného železobetónového kanálu umiestneného vedľa koľajovej trate pri južnej opore tunela (obr. 6). Kanál je v celej dĺžke prekrytý prefabrikovanými doskami. Počas rekonštrukcie boli vybudované aj predĺženia vodovodu pred oboma portálmi s jeho umiestnením do železobetónového kanálu podobne ako v tuneli. Rozhodnutie o predĺžení vodovodu síce skomplikovalo priebeh rekonštrukcie, prinieslo však jednoznačné pozitívum v podobe vylúčenia ohrozenia električkovej dopravy v prípade poruchy na vodovodnom potrubí.

V celej dĺžke tunela bolo vybudované nové trolejové vedenie. Napájanie trolejového vedenia je zabezpečené káblami umiestnenými v chráničkách pod chodníkom. V tuneli je inštalované nové prevádzkové osvetlenie tunela vo forme svietidiel umiestnených pod stropom a požiarne núdzové osvetlenie vo forme svietidiel nad oboma chodníkmi, ktoré sú pripojené k držadlám (obr. 8). Osvetlenie bude zapnuté počas prevádzkovej doby električiek.

Zrekonštruované boli obe dlhodobu nevyužívané chodby napojené na tunel. Chodba na Palisády bude opäť slúžiť ako úniková chodba, rekonštruované boli jej výstupné priestory na Palisádach a tiež spodná konštrukcia, vrátane odvodnenia. V pôvodnom protiletectvom kryte (chodba na Skalnú) je inštalovaná automatická tlaková stanica a náhradný zdroj elektrickej energie, ktoré slúžia pre potrubie požiarneho vodovodu. Chodba, ktorá viedla z krytu do priestoru vedľa portálu, bola zaslepená, lebo v dotknutom území prebieha výstavba polyfunkčného domu.

Dlhodobým problémom zhoršujúcim prevádzkovú bezpečnosť v tuneli boli priesaky horninovej vody do tunela. Pre hodnotenie zamokrenia bola použitá takáto klasifikácia:

0° – ostenie je suché,

1° – na líci ostenia sú vlhké plochy odlíšiteľné od suchých tmavším zafarbením, dlaň ruky ostáva po priložení na ne suchá,

2° – na líci ostenia sú mokré plochy; voda zo stropu odkvapkáva vo viasekundových intervaloch, resp. nepatrnou rýchlosťou steká po zvislých stenách, mokré plochy sa lesknú,

3° – voda zo stropu padá vo forme dažďa, resp. steká po stenách, kde sa prípadne objavujú aj malé sústredené výtoky,

4° – veľké sústredené výtoky, resp. striekanie vody (tlaková voda).

Na základe výsledkov prehliadky v roku 2008 a porovnania s prehliadkou v roku 1998 bolo vyhodnotených 24 % dĺžky tunela v stupni zamokrenia 2 a 3 % dĺžky v stupni 3. Cieľom bolo najmä odstrániť zamokrenie v stupni 3 a minimalizovať prejavy zamokrenia v stupni 2, najmä nad koľajovou traťou. Na tento účel bolo navrhnuté úplné prečistenie priečných zvodov v päte ostenia v celej dĺžke tunela a vykonanie injektážnych prác a radiálnych odľahčovacích vrtov do ostenia a masívu v najviac zamokrených pásoch. Po prečistení zvodov a navrtaní odľahčovacích vrtov sa neprejavil očakávaný pozitívny efekt na zamokrenie klenby. Po odskúšaní floccementových injektáží masívu za ostení a chemických injektáží klenby do hĺbky cca 60 cm bolo rozhodnuté o vykonaní chemických injektáží na báze polyuretánu v šírke klenby 6 m nad koľajovou traťou v pásoch s pretrvávajúcím stupňom zamokrenia 2. Počas rekonštrukcie bolo zainjektovaných cca 600 m<sup>2</sup> klenby tunela, čím síce došlo k zlepšeniu situácie, nie však k úplnému odstráneniu zamokrenia, ktoré sa po extrémne intenzívnych zrážkach v priebehu mesiaca mája 2010 paradoxne prejavovalo vo väčšom počte pásov než počas celého priebehu rekonštrukcie.

ING. MILOSLAV FRANKOVSKÝ,  
frankovsky@terraprojekt.sk,  
TERRAPROJEKT, a. s.

Recenzovala: Ing. Viktória Chomová



Obr. 8 Interiér tunela po rekonštrukcii  
Fig. 8 Tunnel interior after reconstruction

Seepage of ground water into the tunnel had been a long-term problem, reducing the operating safety in the tunnel. The following classification was applied to assess the degree of wetting:

0° – dry lining,

1° – moist areas on the lining surface are recognisable from wet areas by darker colour; a palm put on the surface remains dry,

2° – wet areas are on the lining surface; water drops from the ceiling at several-second intervals or flows down on vertical walls at a very low rate; wet areas glisten,

3° – water falls from the ceiling in the form of a rain or flows down on walls, where even small concentrated outflows may appear,

4° – major concentrated outflows or gushing leaks (water under pressure).

The degree of wetting was assessed on the basis of an inspection in 2008 and the comparison with the inspection which was carried out in 1998. Degrees 2 and 3 were determined within 24% and 3% of the tunnel length, respectively. The objective was first of all to remove the degree of wetting 3 and minimise manifestations of the degree of wetting 2, first of all above the rail track. For that reason it was proposed that the cross drains at the footings of the lining be cleared throughout the tunnel length and grouting boreholes and radial relief holes be drilled through the lining and into the rock mass in the wettest blocks of the lining. Once the clearing of the cross drains and the relief boreholes had been completed, the anticipated positive effect on the degree of wetting of the vault did not manifest itself. After trying injections of clay-cement grout into the rock mass behind the lining and chemical grout into the vault lining to the depth of 60cm, the decision was made that polyurethane-based chemical grout would be injected within the vault width of 6m above the rail track in the lining blocks displaying the degree of wetting 2. About 200m<sup>2</sup> of the tunnel vault were treated with grouting. Owing to this measure the situation improved, but the complete removal of the wetting was not achieved. Paradoxically, after extremely intense rains during May 2010, the wetting manifested itself in a higher number of the tunnel lining blocks than during the course of the whole reconstruction work.

ING. MILOSLAV FRANKOVSKÝ,  
frankovsky@terraprojekt.sk,  
TERRAPROJEKT, a. s.

## LITERATURA / REFERENCES

- ET DPB, a. s., Tunel pod Hradom, Investorský zámer, DPB, a. s., 2007  
Konceptia bezpečnosti tunela, ILF Beratende Ingenieure, 2007  
Štúdia vetrania a aerodynamické posúdenie, ILF Beratende Ingenieure, 2008  
ET DPB, a. s., Tunel pod Hradom, Dokumentácia na stavebné povolenie, Terraprojekt, a. s., 2008  
Ing. Matej Kavacký, Ph.D., Príbeh tunela pod Bratislavským hradom