

DÁLNIČNÍ TUNEL POHŮRKA NA OBCHVATU ČESKÝCH BUDĚJOVIC POHŮRKA HIGHWAY TUNNEL ON THE ČESKÉ BUDĚJOVICE RING ROAD

TOMÁŠ URBÁNEK, DAVID BENDA, DAVID KRÁSA

ABSTRAKT

Článek se věnuje projektové přípravě a částečně i realizaci hloubeného dálničního tunelu Pohůrka z pohledu projektanta. Popisuje vývoj a změny návrhu technického řešení tunelu v návaznosti na postupně doplňované informace geotechnického průzkumu. V závěru je uvedena informace o návrhu technologického vybavení tunelu.

ABSTRACT

The article deals with the project preparation and partly with the construction of the Pohůrka cut and cover motorway tunnel from the designer's perspective. It describes the development and changes in the tunnel technical design in connection with the gradually obtaining geotechnical investigation information. In the end of the paper information on the design of the technological tunnel equipment is provided.

ÚVOD

V sobotu 21. prosince 2024 byl uveden do provozu nový úsek dálnice D3 Úsilné – Kaplice nádraží. Délku má více než 28 km a sestává ze tří navazujících staveb Úsilné–Hodějovice (7,2 km), Hodějovice–Třebonín (12,5 km) a Třebonín–Kaplice nádraží (8,5 km). Důležitým posláním celého úseku je dálniční obchvat stotisícového krajského města České Budějovice, s odkloněním tranzitu exponovaného silničního tahu Praha–Linz.

Dálniční tunel Pohůrka je součástí prvního jmenovaného úseku D3 Úsilné–Hodějovice (km 131,240–138,450). Tunel se nachází jihovýchodně od centra Českých Budějovic v blízkosti městské části Suchá Vrbné a obcí Dobrá Voda a Stará Pohůrka (obr. 1). Celková délka tunelu je 999,5 m, proveden je jako mělce hloubený v poměrně plochém nezastavěném území těsně pod korytem Dobrovodského potoka. Jedná se o železobetonovou konstrukci s jízdními pásy v samostatných tunelových trubkách a s plánovanou životností minimálně 100 let. Důvody pro vedení komunikace pod zemí vycházejí zejména z požadavků z projednání stavby, z geomorfologických poměrů lokality a technologických možností realizace stavby. Tunely proto podcházejí ulici Dobrovodskou (Pražský portál) a Ledenickou (Kaplický portál).

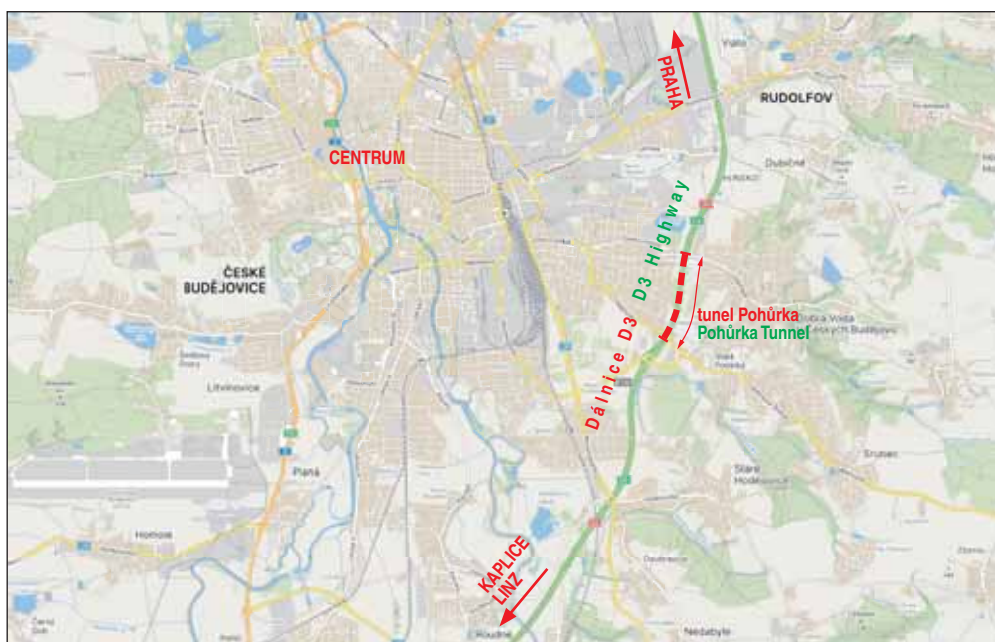
Investorem projektu je Ředitelství silnic a dálnic s.p (ŘSD). Zhotovitelem stavby je sdružení firem HOCHTIEF CZ a. s., Colas CZ, a. s. a M – SILNICE a. s. Projektovou dokumentaci úseku D3 Úsilné–Hodějovice zpracoval PRAGOPROJEKT, a. s., návrh tunelu Pohůrka pak METROPROJEKT Praha a. s. Realizační dokumentaci tunelu zpracovala firma MPI Projekt s. r. o.

Tunel, stejně jako celý úsek dálnice D3, byl uveden do předčasného užívání – zkušební provozu a v rámci stavby probíhá jeho kompletní

INTRODUCTION

On Saturday, December 21, 2024, a new section of the D3 motorway Úsilné – Kaplice station was put into operation. It is more than 28km long and consists of three connecting construction sections Úsilné–Hodějovice (7.2km), Hodějovice–Třebonín (12.5km) and Třebonín–Kaplice station (8.5km). An important mission of the entire section is a motorway bypass of the regional city of České Budějovice, with a population of 100,000, with the diversion of the Prague–Linz road heavy transit.

The Pohůrka motorway tunnel is part of the first-named section of the D3 Úsilné–Hodějovice (km 131.240–138.450). The tunnel is located southeast of the center of České Budějovice near the Suchá Vrbné district and the municipalities of Dobrá Voda and Stará Pohůrka (Fig. 1). The total length of the tunnel is 999.5m, it is constructed as a shallow excavation in a relatively flat, undeveloped area just below the Dobrovodský stream bed. It is a reinforced concrete structure with lanes in separate tunnel tubes and with



Obr. 1 Přehledná situace
Fig. 1 Plan view

dokončování. Od února letošního roku je tunel provozován s maximální rychlostí jízdy vozidel 100 km/h.

Projektová příprava tunelu probíhala od roku 2008 (DÚR byla vydána 2009), vlastní realizace pak proběhla v letech 2019–2024. Dosud tomuto projektu nebyla, dle názoru autorů, věnována větší publicita, proto je zde představen v obsáhlejší článku o celém vývoji řešení z pohledu projektanta.

1. INŽENÝRSKOGEOLOGICKÉ A HYDROGEOLOGICKÉ POMĚRY

Lokalita, ve které se nachází tunel Pohůrka, je součástí Česko-budějovické křídové pánve. Nadmořská výška se zde pohybuje v rozmezí 392–427 m n. m. Celková mocnost kvartérního pokryvu je převážně 0,3–2,3 m. Převažují zde deluviální sedimenty, především jílovité zeminy tuhé až pevné konzistence, méně pak písčité zeminy středně ulehlé. V okolí Dobrovodského potoka jde o fluviální zeminy mocnosti až 8,5 m.

Předkvartérní podloží je tvořené křídovými sedimenty, především jílovcí, prachovci a pískovci až drobnozrnnými slepenci. Zastoupení jednotlivých litologických typů je značně proměnlivé a v pískovcích se často vyskytují jílovité polohy a naopak. V prachovcích je častá proměnlivá příměs jemnozrnného písku. Nelze tedy často přesně stanovit rozhraní, menší polohy jedné horniny v druhé se vyskytují běžně. Zvětrání je také velice nepravidelné, zcela zvětralé polohy skalního podloží dosahují velkých hloubek (obr. 2).

Hydrologicky náleží území do povodí Dobrovodského potoka. Dle archivních sond a hydrogeologického průzkumu je zde téměř souvislé zvodnění s proměnlivou úrovní hladiny podzemní vody (HPV). Až na výjimky se podzemní voda vyskytuje v hloubce cca 6,3–11,1 m pod terémem. Vzhledem k horizontální i vertikální variabilitě křídových sedimentů se v oblasti vyskytují zavěšené zvodně s vyšší hladinou podzemní vody.

a planned service life of at least 100 years. The reasons for running the road underground are mainly based on the requirements of the construction negotiations, the location geomorphological conditions and the construction technology possibilities. The tunnels therefore run under Dobrovodská Street (Pražský portal) and Ledenická Street (Kaplícký portal).

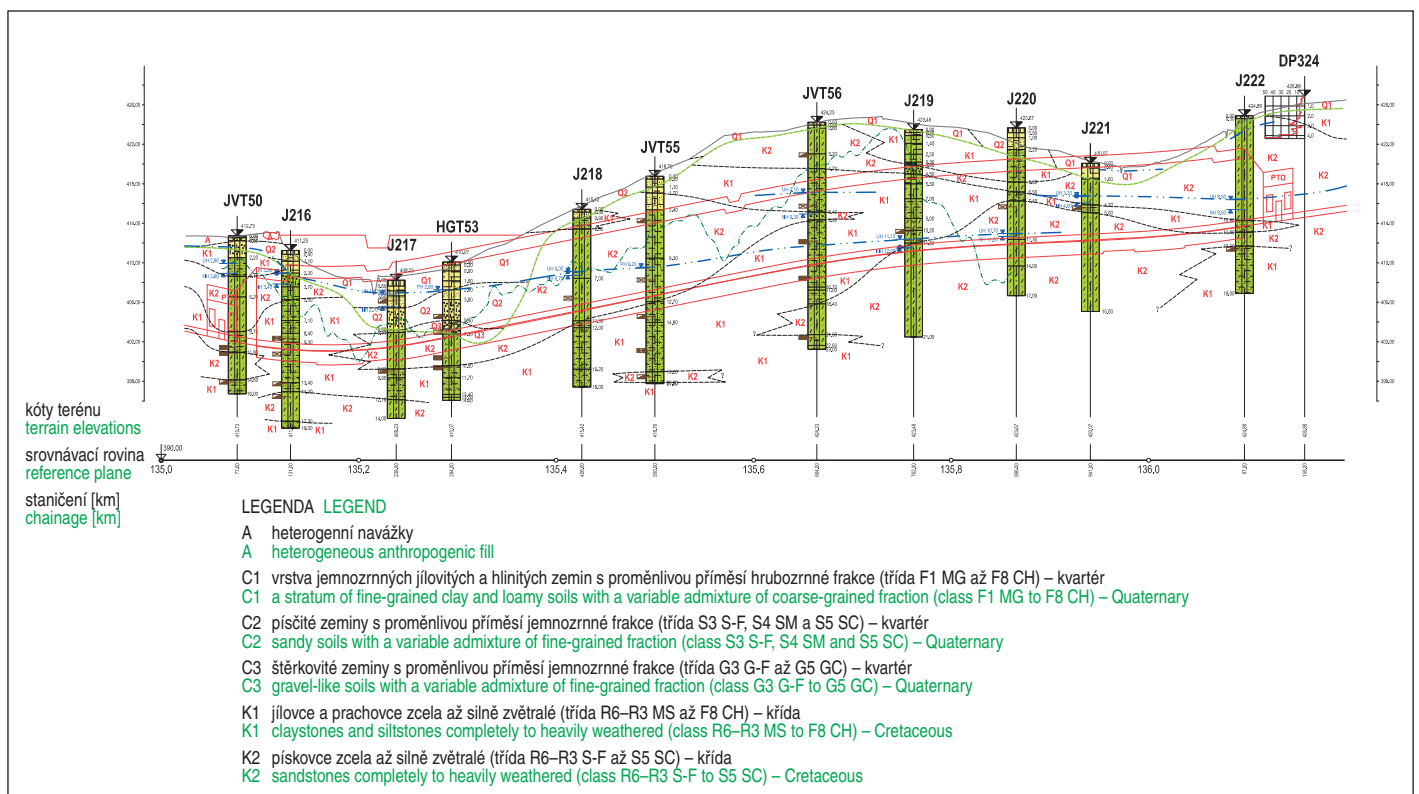
The investor of the project is the Roads and Highways Directorate s.p. (ŘSD). The construction contractor is a joint venture of companies HOCHTIEF CZ a.s., Colas CZ, a.s. and M – SILNICE a.s. The design documentation for the D3 Úsilné–Hodějovice section was prepared by PRAGOPROJEKT, a.s., and the design of the Pohůrka tunnel was prepared by METROPROJEKT Praha a.s. The tunnel detailed documentation was prepared by MPI Projekt s.r.o.

The tunnel, like the entire section of the D3 motorway, was put into early use – test operation and its completion are underway as part of the construction finalization. Since February of this year, the tunnel has been operated at a maximum vehicle speed of 100km/h.

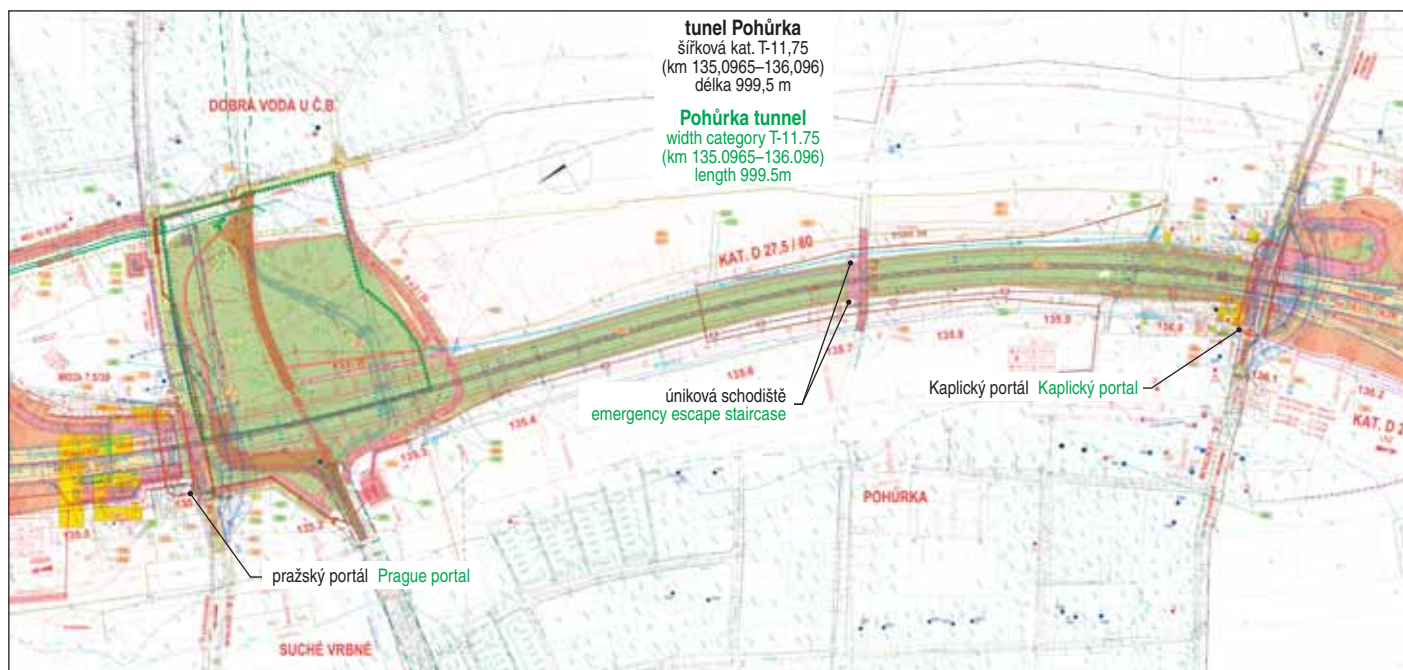
The project preparation of the tunnel has been underway since 2008 (the DÚR was issued in 2009), and the actual construction took place in 2019–2024. In the opinion of the authors, this project has not received much publicity so far, which is why it is presented here in a more comprehensive article about the entire design development from the designer's perspective.

1. ENGINEERING-GEOLOGICAL AND HYDROGEOLOGICAL CONDITIONS

The Pohůrka tunnel location is part of the České Budějovice Cretaceous Basin. The altitude here ranges from 392 to 427m above sea level. The total thickness of the Quaternary cover is mostly 0.3–2.3m. Deluvial sediments predominate here, especially clayey soils of stiff to firm consistency, less often sandy soils of medium



Obr. 2 Podélný geotechnický profil
Fig. 2 Longitudinal geotechnical profile



Obr. 3 Tunel Pohůrka – situace
Fig. 3 Pohůrka Tunnel – plan view

Vzhledem ke složitosti hydrogeologické problematiky v oblasti stavby tunelu, navazujících zářezů, odvodňovací štol, okolních studní a povrchové zástavby byl zpracován matematický hydrogeologický model proudění podzemní vody. Slouží k upřesnění rozsahu změn režimu podzemní vody v okolí stavby a pro oblast celé Českobudějovické pánve. Zmiňovaný model byl určen zejména pro optimalizaci návrhu konstrukce tunelu a způsobu výstavby. Tento model umožnil zhodnotit rozsah a hranice možného negativního ovlivnění režimu podzemních vod v okolí stavby a byl podkladem pro rozsah pasportizace povrchové zástavby. Sloužil také pro upřesnění způsobu a rozsahu monitoringu konstrukcí a území během stavby a po stavbě.

2. ZÁKLADNÍ PARAMETRY PRO NÁVRH KONSTRUKCE TUNELU

Pro návrh konstrukce tunelu o délce 999,5 m (obr. 3) byly projektem dálnice D3, Rizikovou analýzou a Požárně bezpečnostním řešením (PBŘ) stanoveny jako zadání tyto základní dispoziční parametry a bezpečnostní požadavky:

- samostatné tunelové trouby pro každý jízdní pás dálnice;
- pravá i levá tunelová trouba (PTT, LTT) jsou kategorie T 11,75 m, dvoupruhové s pruhy šířky 3,50 a 3,75 m a s průběžným nouzovým pruhem šířky 3,5 m, vodící proužky jsou 0,25 + 0,25 m, střední chodníky jsou širší 1,30 m, vnější 1,15 m;
- bezpečnostní kategorie TA dle ČSN 73 7507;
- požární vodovod s hydranty, s ohledem na délku tunelu stále napuštěný a pod tlakem;
- výklenky pro SOS kabiny ve vnějších stěnách tunelu;
- únikové cesty (prostory ve střední stěně tunelu) s protipožárními uzávěry a dvě samostatná úniková schodiště z tunelu na povrch pro evakuaci osob v případě mimořádné události v tunelu, a to samostatně z každé tunelové trouby.

U pražského portálu je umístěn provozně technologický objekt (PTO). Před oběma portály jsou plochy pro nástup složek integrovaného záchranného systému při mimořádné události v tunelu

density. In the vicinity of Dobrovodský stream, these are fluvial soils up to 8.5m thick.

The bedrock is formed by Cretaceous sediments, mainly claystones, siltstones and sandstones with fine-grained conglomerates. The occurrence of individual lithological types is highly variable and clayey deposits often occur in sandstones and vice versa. In siltstones, there is a frequent variable admixture of fine-grained sand. Therefore, it is often impossible to precisely determine the bedrock boundary, smaller deposits of one ground type are commonly found in another. Weathering is also very irregular, completely weathered rock reaches great depths (Fig. 2).

Hydrologically, the area belongs to the Dobrovodský stream basin. According to archival probes and hydrogeological investigations, there is almost continuous water bearing strata with a variable groundwater level (HPV). With some exceptions, groundwater occurs at a depth of approximately 6.3–11.1m below the terrain. Due to the horizontal and vertical variability of Cretaceous sediments, elevated aquifers with higher groundwater levels occur in the area.

Due to the hydrogeological complexity in the tunnel construction area, adjacent cuts, drainage adit, surrounding wells and buildings, a mathematical hydrogeological model of groundwater flow was developed. It serves to specify the extent of changes in the groundwater regime in the vicinity of the construction and for the entire České Budějovice Basin. The aforementioned model was intended primarily for optimizing the design of the tunnel structure and the construction method. This model allowed to evaluate the extent and limits of possible negative impacts on the groundwater regime in the vicinity of the construction and was the basis for the scope of the buildings survey. It also served to specify the method and scope of structures and terrain monitoring during and after construction.

2. BASIC PARAMETERS FOR THE TUNNEL STRUCTURE DESIGN

For the tunnel structure design with a length of 999.5m (Fig. 3), the following basic layout parameters and safety requirements

a pro techniku obsluhy a údržby tunelu. U každého portálu je přistávací plocha pro vrtulník.

3. VÝVOJ NÁVRHU KONSTRUKCE TUNELU

Ve zkratce lze vývoj popsat takto: Nejprve byla konstrukce tunelu v dokumentaci pro územní rozhodnutí navržena jako sružený rám (rám o dvou polích), poté byla v dokumentaci pro stavební povolení a tendrové dokumentaci (PDPS) změněna na metodu výstavby ražbou pod zastropením s podzemními stěnami, aby se ve vlastní realizaci vrátila k původní koncepční myšlence tuhé konstrukce sruženého rámu, budované v pažené stavební jámě. Tato poslední změna se odehrála takřka již za pochodu, po zahájení realizace stavby v roce 2019 a po doplňujících geotechnických a zatěžovacích zkouškách skutečných vzorových lamel podzemních stěn. K jednotlivým fázím návrhu podrobněji.

3.1 Konstrukce tunelu podle zadávací dokumentace

Nosná konstrukce tunelu byla navržena jako uzavřená konstrukce o dvou polích, budovaná metodou ražby pod zastropením. Konstrukce byla doplněna o dešťníkovou hydroizolaci na stropní desce s trvale sníženou hladinou podzemní vody pod pracovní spáru mezi stropní deskou a stěnami (obr. 4).

Svislé stěny byly navrženy jako tři konstrukční podzemní stěny tloušťky 800 mm. Krajní podzemní stěny byly kratší, vetknuté pod základovou spáru, střední podzemní stěna byla delší, vzhledem k předpokládanému vyššímu zatížení. Délky podzemních stěn

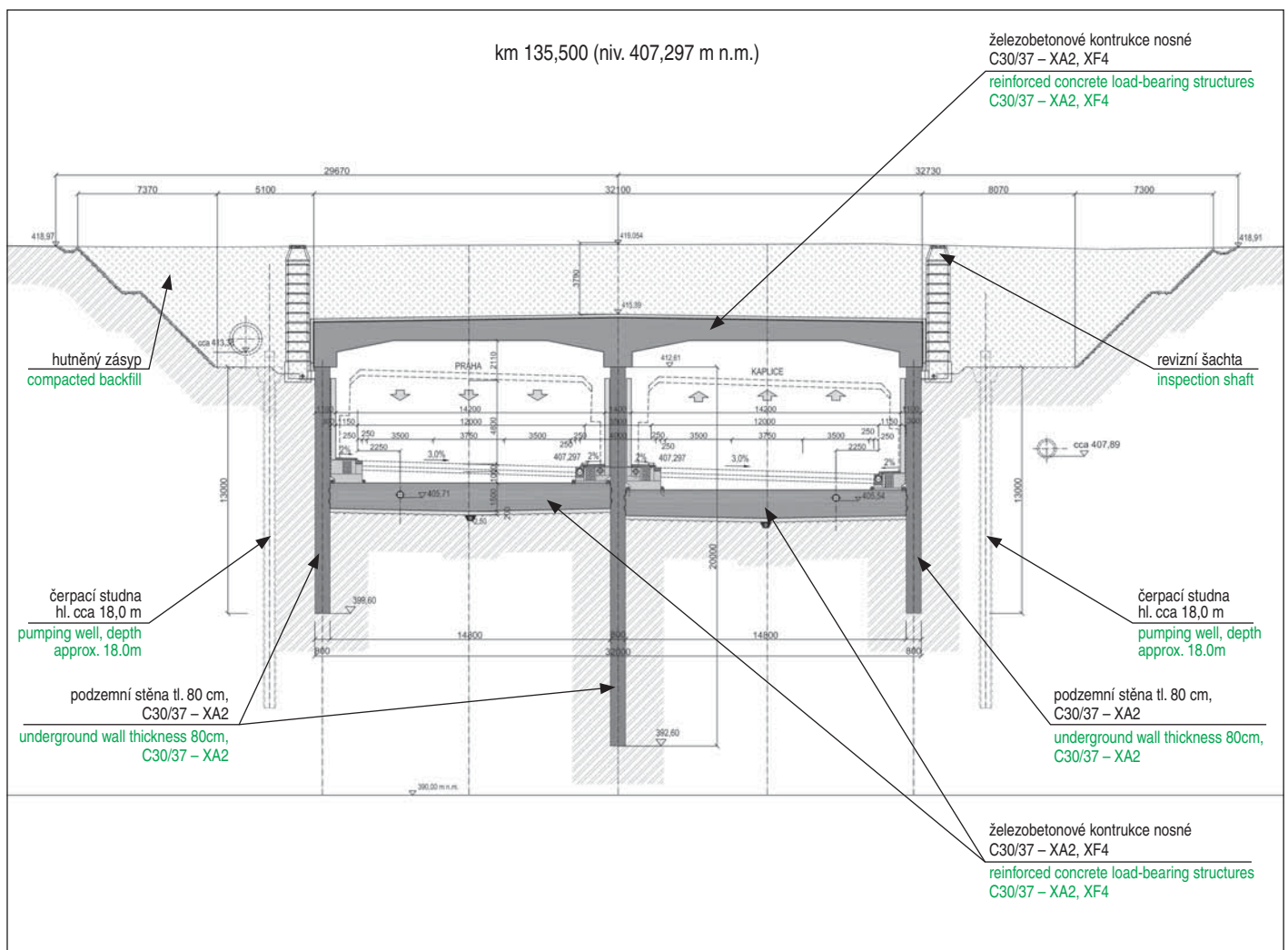
were set as specifications by the D3 motorway project, the Risk Analysis and the Fire Safety Solution (PBR):

- separate tunnel tubes for each motorway direction;
- right and left tunnel tubes (PTT, LTT) are category T 11.75m, two-lane tunnels with lanes 3.50 and 3.75m wide and with a continuous emergency lane 3.5m wide, guide strips are 0.25 + 0.25m, median walkways are 1.30m wide, outer walkways 1.15m;
- safety category TA according to ČSN 73 7507;
- fire water pipes with hydrants, with regard to the length of the tunnel always filled and under pressure;
- niches for SOS cabins in the outer walls of the tunnel;
- escape routes (passages in the middle wall of the tunnel) with fire-proof closures and two separate escape staircases from the tunnel to the surface for the evacuation of people in the event of an emergency in the tunnel, separately from each tunnel tube.

An operational and technological facility (PTO) is located at the Prague portal. In front of both portals there are areas for the arrival of the integrated rescue system units in the event of an emergency in the tunnel and for tunnel operation and maintenance equipment. There is a heliport at each portal.

3. DEVELOPMENT OF THE TUNNEL STRUCTURE DESIGN

In short, the development can be described as follows: First, the tunnel structure was designed as a continuous frame (two-span



Obr. 4 Příčný řez PDPS
Fig. 4 PDPS cross-section

byly staticky posouzeny na zemní a hydrostatický tlak a rovněž na omezení sedání po provedení stropní konstrukce a zásypů. Konstrukce tunelu musela rovněž odolat účinkům zvýšené hladiny vody v nové retenční nádrži při rozvodnění Dobrovodského potoka. Podzemní stěny byly navrženy jako vodonepropustné s vloženými spárovými pásy mezi jednotlivými lamelami, včetně pojistného systému injektáží.

Při provádění výkopů bylo navrženo postupné snižování hladiny systémem čerpacích studní, které měly sloužit i k pozorování změn režimu podzemních vod v okolí tunelu při výstavbě.

Na podzemní stěny měla být následně v „mělkém“ výkopu vybetonována stropní deska s deštníkovou hydroizolací, ukončenou na bocích tunelu dle speciálního detailu. Pod touto úrovní měla být osazena pojistná drenáž s revizními šachtami po cca 100 m po obou stranách tunelu. Tato pojistná drenáž měla gravitačně odvádět vody podél tunelu.

Navržený postup výstavby umožňoval provádění přeložek inženýrských sítí, komunikací a rovněž dočasné převedení Dobrovodského potoka, to vše rychleji a operativně s ohledem na prostorové a časové vazby. Tím mělo dojít ke zkrácení doby negativních účinků stavby na okolní povrchovou zástavbu, život obyvatel a životní prostředí.

V dalším kroku výstavby měly být provedeny výkopy pod stropem tunelu mezi podzemními stěnami na úroveň základové spáry pro základové desky dna tunelů. Výhoda hloubení pod zastropením spočívala v omezení přítoku podzemní vody pouze na dno a čelbu. Při ražbě tunelu bylo plánováno do dna instalovat dočasné ocelové rozpěry podzemních stěn k zamezení příčných posunů stěn vlivem tlaku zeminy a podzemní vody. Hydraulické prolomení dna bylo eliminováno dostatečnou délkou zejména bočních podzemních stěn.

Po dokončení výkopů nebo jejich části bylo plánováno provedení základových desek železobetonového dna obou tubusů, které měly být vodonepropustně propojeny s konstrukcí podzemních stěn. Základním prvkem byl ocelový svařenec, jehož část byla součástí podzemní stěny a zbývající část měla být navařena po odfrézování drážek v podzemní stěně pro napojení základové desky. Detail byl navržen s injektážními hadičkami pro zajištění vodonepropustnosti, injektáž měla být provedena před realizací vnitřních konstrukcí.

3.2 Změna návrhu pro realizaci – podklady pro změnu návrhu

Vzhledem k poměrně složitým geologickým podmínkám ukládal zadávací projekt zhotoviteli provedení doplňujícího geotechnického průzkumu s řádově vyšší vypovídací schopností, než poskytovaly výsledky z geotechnického průzkumu jádrovými vrty. Hlavním obsahem doplňujícího průzkumu byla zatěžovací zkouška lamel podzemních stěn.

Zhotovitel provedl tuto zkoušku v srpnu 2019 na třech jednoběžných lamelách podzemních stěn (PS). Zkouška byla situována do blízkosti Dobrovodského potoka. Lamely o rozměrech 0,8 × 2,8 m a hloubkách 17,0, 27,0 a 40,0 m, ve vzájemné vzdálenosti 10,0 m, byly hloubeny drapákem Stein K 810 pod ochranou pažicí bentonitové suspenze a po vložení armokošů vyplněny betonem C 30/37 XA3, XC2, S4/S5. Hlavy lamel byly opatřeny roznášecími deskami pro uložení spodního svařence ocelového zatěžovacího mostu (obr. 5). Dřívky lamel PS byly osazeny jednak tenzometry, jednak optickými kabely. Zkušební most typu „hříbek“ byl na každé z lamel přikotven

(frame) in the zoning documentation, then in the building permit and tender documentation (PDPS) it was changed to the door-frame construction method (with underground walls, in order to return to the original conceptual idea of a rigid continuous frame structure, built in a construction pit with retaining walls. This last change took place, so to speak, on the go, after the start of construction in 2019 and after additional geotechnical and load tests of actual sample lamellas of the underground walls. The individual design phases in more detail.

3.1 Tunnel design according to the tender documentation

The supporting structure of the tunnel was designed as a closed two-span structure, built using the door-frame method excavation. The structure was supplemented with umbrella sheet waterproofing on the upper slab with a permanently lowered groundwater table below the construction joint between the upper slab and the walls (Fig. 4).

The vertical walls were designed as three structural underground walls 800mm thick. The outer underground walls were shorter, embedded under the foundation joint, the middle underground wall was longer, due to the expected higher load. The lengths of the underground walls were statically verified for earth and hydrostatic pressure and also for limiting settlement after the upper slab structure construction and backfilling. The tunnel structure also had to withstand the effects of increased water levels in the new retention reservoir during the flooding of the Dobrovodský stream. The underground walls were designed as watertight with inserted waterstop joint strips between the individual lamellas, including asafety injection system.

When carrying out the excavations, a gradual lowering of the groundwater level was proposed using a system of pumping wells, which were also intended to serve to observe changes in the groundwater regime around the tunnel during construction.

An upper slab with umbrella waterproofing was to be concreted onto the underground walls in a “shallow” excavation pit, ending on the sides of the tunnel according to a special detail. Below this level, a safety drainage system was to be installed with inspection shafts every 100m on both sides of the tunnel. This safety drainage system was to drain water along the tunnel by gravity.

The proposed construction procedure allowed for the of utilities relocation, communications and also the temporary diversion of the Dobrovodský stream, all of which was faster and more operational, taking into account spatial and time constraints. This was to shorten the period of negative effects of the construction on the surrounding build-up area, the community living and the environment.

In the next step of construction, excavations were to be carried out under the tunnel upper slab between the underground walls to the level of the foundation bedding for the foundation slabs of the tunnel bottom. The advantage of excavating under the upper slab was to limit the inflow of groundwater only to the bottom and face. During the tunnel excavation, it was planned to install temporary steel struts between the underground walls in the bottom to prevent lateral displacement of the walls due to the earth and groundwater pressure. Hydraulic fracturing of the bottom was eliminated by the sufficient length of the outer underground walls in particular.

After the excavations or part of them were completed, it was planned to make the reinforced concrete base plates of the bottom of both tubes, which were to be connected watertightly to the underground wall structure. The basic element was a steel weldment,



Obr. 5 Zatěžovací zkouška zkušební lamely
Fig. 5 Load test of the test lamella

12 ks zemních předpjatých pramencových kotev, rozmístěných do kruhu o průměru 6180 mm. Statické zatěžovací zkoušky na všech zkušebních lamelách byly navrženy pro maximální zatížení $P = 12,0$ MN. Kritériem pro ustalování zatížení byl jednak přírůstek deformace po dvou za sebou jdoucích měřeních sedání $\Delta s \leq 0,10$ mm, jednak minimální doba setrvání na příslušném zatěžovacím stupni 60 minut. Deformace byla snímána čtyřmi nezávislými elektronickými snímači deformací a síla byla kontrolována dynamometry. Výsledkem zatěžovacích zkoušek zkušebních lamel PS bylo stanovení charakteristických hodnot plášťového tření a napětí na patě pro přípustné sedání o velikosti $s \leq 10,0$ mm a $s \leq 15,0$ mm. Na základě těchto zkoušek doporučil zpracovatel vyhodnocení zatěžovací zkoušky, doc. Ing. Jan Masopust, CSc., počítat se zkouškou ověřenými charakteristickými hodnotami základových půd pro sedání lamel $s = 10$ mm.

Dalším podkladem pro změnu řešení byl nový vrt J999, ve kterém byla, oproti předchozím průzkumům, zjištěna napjatá hladina podzemní křídové zvodně. Toto nové zjištění bylo následně upřesněno dalšími průzkumnými vrty.

Dalším podstatným vstupem bylo pak i stanovisko Povodí Vltavy, s. p., ze 17. 4. 2019, které znemožňovalo provedení čerpání podzemní vody v průběhu výstavby do snížené úrovně, uvažované ve statickém výpočtu projektové dokumentace pro provádění stavby (PDPS).

3.3 Alternativní varianty konstrukce tunelu

Na základě těchto podkladů byl autorský dozor objednatelem požádán o vyhodnocení výše zmíněných skutečností na technické řešení tunelu. Vznikl tak návrh konstrukce, nazvaný Varianta „Upravená PDPS“.

Zároveň dne 29. 11. 2019 předal Zhotovitel stavby koncepčně odlišné alternativní technické řešení konstrukce tunelu, které rovněž reagovalo na výše zmíněné nové poklady. Toto řešení bylo nazváno „Varianta Krabice“.

Varianta „Upravená PDPS“

Koncepce návrhu a použité konstrukční prvky pro nosné konstrukce, jakož i postup výstavby, byly totožné jako ve stupni pro výběr zhotovitele (Metoda ražby pod zastropením). Na základě výsledků z doplňujícího průzkumu byly prodlouženy (resp. prohloubeny) všechny tři podzemní stěny tunelu. V nejproblematictějších místech došlo k návrhu prodloužení střední podzemní stěny až o 18 m. V této variantě bylo také zásadně omezeno čerpání

part of which was part of the underground wall and the remaining part was to be welded after milling the grooves in the underground wall for connecting the base plate. The design included injection hoses to ensure watertightness, the injection was to be carried out before the implementation of the internal structures.

3.2 Change in detailed design – background for design change

Due to the relatively complex geological conditions, the project tender documents required the contractor to carry out an additional geotechnical investigation with an order of magnitude higher informative capacity than the results of the geotechnical investigation by core drilling. The main component of the additional investigation was a load test of the underground walls lamellas.

The contractor performed this test in August 2019 on three single-section lamellas of underground walls (PS). The test was located near the Dobrovodský stream. The lamellas with dimensions of 0.8×2.8 m and depths of 17.0, 27.0 and 40.0 m, at a distance of 10.0 m from each other, were excavated with a Stein K 810 clamshell excavator under the support of a bentonite suspension and, after inserting the steel reinforcing cages, filled with concrete C 30/37 XA3, XC2, S4/S5. The heads of the lamellas were equipped with load distribution plates for accommodating the lower weldment of the steel load bridge (Fig. 5). The bodies of the PS lamellas were fitted with both strain gauges and optical cables. The mushroom-type test bridge was anchored to each of the lamellas with 12 prestressed earth anchors, arranged in a circle with a diameter of 6180 mm. Static load tests on all test lamellas were designed for a maximum load of $P = 12.0$ MN.

The criterion for load stabilization was the increase in deformation after two consecutive settlement measurements $\Delta s \leq 0.10$ mm, and the minimum time period at the respective load level of 60 minutes. The deformation was measured by four independent electronic deformation sensors and the force was controlled by a dynamometer. The result of the load tests of the PS test lamellas was the determination of the characteristic values of the skin friction and the stress under the foot for the permissible settlement of $s \leq 10.0$ mm and $s \leq 15.0$ mm. Based on these tests, the responsible for the load test evaluation, Assoc. Ing. Jan Masopust, CSc., recommended to adopt the test-verified characteristic values of the foundation soils for the settlement of the lamellas $s = 10$ mm.

Another basis for the design change was the new borehole J999, in which, in contrast to previous investigations, a chalk artesian aquifer was found. This new finding was subsequently confirmed by further exploration drilling.

Another significant input was the opinion of Povodí Vltava, s. p., dated 17 April 2019, which made it impossible to pump groundwater during construction to a lower level, considered in the static calculation of the project detailed design documentation (PDPS).

3.3 Alternative tunnel structures

Based on these inputs, the client requested the design supervision authority to evaluate the tunnel technical design based on the above-mentioned facts. This resulted in a design proposal called the “Modified PDPS” Alternative.

At the same time, on 29 November 2019, the Contractor submitted a conceptually different alternative technical design solution for the tunnel construction, which also responded to the above-mentioned new facts. This design solution was called the “Box Alternative”.

V dubnu roku 2020 požádal objednatel autorský dozor o úpravu obou předložených řešení a zpřístupnil mu data z měření dlouhodobého monitoringu hladiny podzemní vody v hydrogeologických vrtech a stávajících studních (měření firmy SAMSON PRAHA, spol. s r.o. od 03/2017).

Z konferenčního projednání a porovnání variant z 03/2020 vyplynulo zadání objednatele zpracovat pro rozhodnutí o dalším postupu celkem čtyři varianty konstrukčního provedení tunelu.

Varianta A: Konstrukce tunelu „PDPS“ – zastižená úroveň HPV bez snížení

Hloubka konstrukčních podzemních stěn byla navržena na základě výsledků ze Závěrečné zprávy o výsledcích zatěžovacích zkoušek lamel podzemních stěn, zpracované doc. Masopustem, který na základě těchto zkoušek a na základě skutečně zastižené HPV z dlouhodobého hydrogeologického monitoringu stanovil charakteristické hodnoty plášťových tření a únosnosti na patě v souladu s platnými normami. V této variantě se neuvažovalo se snižováním hladiny podzemní vody vně stavební jámy (obr. 6). Pod dnem tunelu byla navržena rozpěrná konstrukce v reakci na skutečně zastiženou HPV z dlouhodobého hydrogeologického monitoringu.

Varianta B: Konstrukce tunelu „PDPS“ – snížená HPV

Hloubka konstrukčních podzemních stěn byla v této variantě navržena stejným způsobem jako v předchozí Variantě A s tím rozdílem, že zde se počítalo se snižováním hladiny podzemní vody vně podzemních stěn po celé délce tunelu. Navržené dodatečné snižování hladiny podzemní vody umožnilo zcela vypustit dočasné ocelové rozpěry pod dnem tunelu.

Varianta C: Konstrukce tunelu „Krabice“ – zastižená úroveň HPV bez snížení

Pažení stavební jámy

Oproti předchozímu návrhu pažení rozepřenými podzemními stěnami (viz výše) byla navržena vodotěsná stavební jáma zapažená kotvenou štetovou stěnou s pramencovými kotvami ve dvou nebo třech úrovních. Vzhledem ke geologickým podmínkám nebylo v této variantě možné štetovnice beranit na celou hloubku, proto měly být osazovány do vytěžené rýhy tl. 600 mm a zality jílocementostruskovou směsí. V této variantě se neuvažovalo se snižováním hladiny podzemní vody vně stavební jámy.

Konstrukce tunelu

Nosnou konstrukci tvořil v této variantě železobetonový rám o dvou polích vytvářející dvě komory. Jedná se o plošně založenou železobetonovou konstrukci tunelu s tlakově uzavřeným systémem hydroizolačního souvrství.

Varianta D: Konstrukce tunelu „Krabice“ – snížená HPV

Pažení stavební jámy

Konstrukce tunelu se jako ve variantě C staví do zapažené stavební jámy. V tomto řešení se uvažovalo se snižováním hladiny podzemní vody vně stavební jámy po celé délce tunelu. Stavební jáma je zčásti zapažena vodotěsnou štetovou stěnou a zčásti levnějším záporovým pažením (v místech snížení HPV pod dno stavební jámy). Štetová i záporová stěna byly navrženy jako kotvené pramencovými kotvami ve dvou úrovních.

Konstrukce tunelu je identická s předchozí variantou C, tj. železobetonový rám o dvou polích.

Ve variantách označených „snížená HPV“ bylo uvažováno se snížením aktuálně zastižené hladiny podzemní vody při výstavbě

the PDPS alternative. To determine the embedment depth, it was necessary to take into account the influence of groundwater flow under the foot of the wall (bottom stability against hydraulic heave, washing out of fine particles – suffosis).

Two rows of steel struts were designed to temporarily support the retaining underground walls (spanning in the top of the PS and in an intermediate position) so that it would be possible to concrete the tunnel structure under the upper struts. The function of the struts during construction was gradually taken over by the definitive structure of the bottom slab and upper slab of the frame. This procedure would create a closed monolithic tunnel structure frame with two spans, completely enclosed by a waterproofing layer.

In April 2020, the client requested the design supervision authority to modify both submitted solutions and made available the data from long-term monitoring of groundwater levels in hydrogeological boreholes and existing wells (measurements by SAMSON PRAHA, spol. s r.o. since 03/2017).

The conference discussion and comparison of the alternatives from 03/2020 resulted in the client's assignment to prepare a total of four tunnel design alternatives for a decision on further action.

Alternative A: Tunnel structure “PDPS” – encountered HPV level without lowering

The depth of the structural underground walls was designed based on the conclusions of the Underground Wall Lamellas Load Tests Results Final Report, prepared by Assoc. Prof. Masopust, who, based on these tests and on the basis of the actually achieved HPV from long-term hydrogeological monitoring, determined the characteristic values of skin friction and foot bearing capacity in accordance with applicable standards. In this alternative, lowering the groundwater level outside the construction pit was not considered (Fig. 6). A strut structure was designed under the bottom of the tunnel in response to the actual HPV found from long-term hydrogeological monitoring.

Alternative B: Tunnel structure “PDPS” – lowered HPV

The depth of the structural underground walls in this alternative was designed in the same way as in the previous Alternative A, with the difference that a lowering of the groundwater level outside the underground walls along the entire length of the tunnel was taken into account. The proposed additional lowering of the groundwater level made it possible to completely leave out the temporary steel struts under the tunnel bottom.

Alternative C: Tunnel structure “Box” – HPV level reached without lowering

Retaining walls of the construction pit

In contrast to the previous design of retaining underground walls (see above), a waterproof construction pit design included anchored sheet pile wall with strand cable anchors in two or three levels. Due to the geological conditions, it was not possible to drive the sheet piles to the full depth in this alternative, therefore they had to be installed in an excavated trench 600mm thick and filled with a clay-cement-slag mixture. This alternative did not consider lowering the groundwater level outside the construction pit.

Tunnel structure

The supporting structure in this alternative was a reinforced concrete frame with two spans creating two chambers. This is a slab foundation, reinforced concrete tunnel structure with a pressure-sealed waterproofing system.

4.1 Zajištění stavební jámy štětovými stěnami

V zastižených geologických podmínkách nicméně nebylo možné štětovnice beranit, musely proto být osazovány do rýhy těsnící podzemní stěny tl. 600 mm, dostatečné hloubky, vyplněné samotvrdnoucí jílocementostruskovou suspenzí. Délky štětových stěn byly dány posouzením na zemní a hydrostatický tlak. Koruna štětovnic kopírovala niveletu tunelu. Toto řešení štětových stěn zaručilo vodonepropustnost pažení včetně spáry v napojení na podzemní stěny portálů. Délky (hloubky) štětových stěn byly v podélném směru odstupňovány. Při provádění výkopů byla postupně snižována HPV v prostoru stavební jámy systémem čerpacích studní.

Kotvení štětových stěn bylo navrženo dočasnými pramencovými kotvami různých délek a sklonů přes ocelové převázky. Mezi stěnou budoucího hloubeného tunelu a pažením byl navržen pracovní prostor šířky cca 1500 mm. Pokud se prostup kotvy pažící stěnou nacházel pod hladinou podzemní vody, byl proveden jako vodotěsný.

4.2 Zajištění stavební jámy záporovým pažením

Zápor byly navrženy z dvojice profilů IPE 360 á 2,4 m (ocel S235). Kotveny byly přímo přes ocelový profil, nebylo tedy nutné na stěnu osazovat ocelové převázky. Vlastní pažení bylo provedeno z polohraněného řeziva.

4.3 Konstrukce tunelu

Nosnou konstrukci tunelu tvoří v tomto případě plošně založený železobetonový rám o dvou polích vytvářející dvě komory s tlakově uzavřeným systémem hydroizolačního souvrství.

Standardní příčný řez tunelem je obdélníkový s vnitřní světlou šířkou 14,65 m v LTT (levé tunelové troubě) a 14,15 m v PTT (pravé tunelové troubě). Světlá výška konstrukce v LTT i PTT je 7,93 m. Nad průjezdným prostorem výšky 4,80 m je pojistný prostor 0,30 m a prostor pro osvětlení a portály proměnného dopravního značení. V místech velkoplošných dopravních značek a ventilátorů je strop tunelů zvýšen na potřebnou úroveň při zachování pojistného prostoru nad průjezdným profilem.

Stropní deska je ze statických důvodů navržena s náběhy ke střední i bočním stěnám. Pracovní spára stěny a stropu je při realizaci náležitě ošetřena. Tloušťka stropní konstrukce je v převážné délce tunelu 1,0 m.

V místech křížení tunelu s přeložkou kanalizace DN1400 (km 135,122), s definitivní přeložkou Dobrovodského potoka (km 135,132), se stokou (km 135,580) a s vodovodem v Ledenické ulici (km 136,096) je profil tunelu snížen.

4.4 Požární odolnost konstrukce tunelu

Požární bezpečnosti byla při návrhu tunelu věnována značná pozornost. Nejdůležitější vstupy:

- Tunel Pohůrka je, jako hloubená konstrukce s rovným stropem, prvním dálničním tunelem tohoto typu v ČR. Není přítomno jasně stanoveno, jak k posouzení požární odolnosti přistupovat.
- Riziko „Velkého požáru“ je jednou za 15 let – dle Rizikové analýzy tunelu Pohůrka [2].
- Nutno prověřit zatěžovací stav, kdy je „retenční nádrž naplněna a v tunelu hoří“ (Riziková analýza tunelu Pohůrka [2]).

Pro návrh konstrukce bylo důležité, jaký je požární scénář (průběh požáru, průběh zásahu hasičů) a jakou zvolit teplotní křivku. Po seznámení s možnostmi byla navržena teplotní křivka ZTV-ING dle německého předpisu [5] (obr. 8). Takový průběh teploty

management – pumping groundwater in order to lower its level, which was subsequently obtained.

In this alternative, the tunnel construction was designed in a way different from the tender documentation. It was newly assumed that the construction pit would be temporarily secured using two technologies, depending on whether the groundwater level was found above or below the tunnel excavation level. In the case of HPV above the bottom of the tunnel construction pit, the pit was supported with anchored sheet pile retaining walls (section Prague portal to km 135.680). In the case of HPV below this level, the construction pit was supported with anchored soldier piles and lagging (km 135.680 to Kaplice portal). The slab foundation of the tunnel structure was gradually built in the pit supported in this way. The final monolithic tunnel structure design included a complete pressure waterproofing system, without the need for a permanent drainage system (Fig. 7).

4.1 Construction pit with retaining sheet pile walls

However, in the geological conditions encountered, it was not possible to ram the sheet piles, so they had to be installed in the trench 600mm thick, of sufficient depth, filled with clay-cement slag suspension. The sheet pile walls depths were determined by the assessment of earth and hydrostatic pressure. The heads of the sheet piles copied the tunnel's vertical alignment. This solution of the sheet pile walls guaranteed the watertightness of the sheet piles, including the joint in the connection to the underground walls of the portals. The lengths (depths) of the sheet pile walls were graded in the longitudinal direction. During the excavations, the HPV in the construction pit area was gradually lowered by a system of pumping wells.

The sheet pile walls were designed to be supported with temporary strand cable anchors of various lengths and inclinations and fixed to steel walings. A working space of approximately 1,500mm width was designed between the wall of the future cut and cover tunnel and the retaining wall. If the anchor penetration through the retaining wall was below the groundwater table, it was made watertight.

4.2 Construction pit with soldier pile retaining wall

The soldier piles were designed to be built from a pair of IPE 360 profiles, 2.4m apart (steel S235). They were anchored directly through the steel profile, so it was not necessary to install steel waling on the wall. The lagging was made of half-edged lumber.

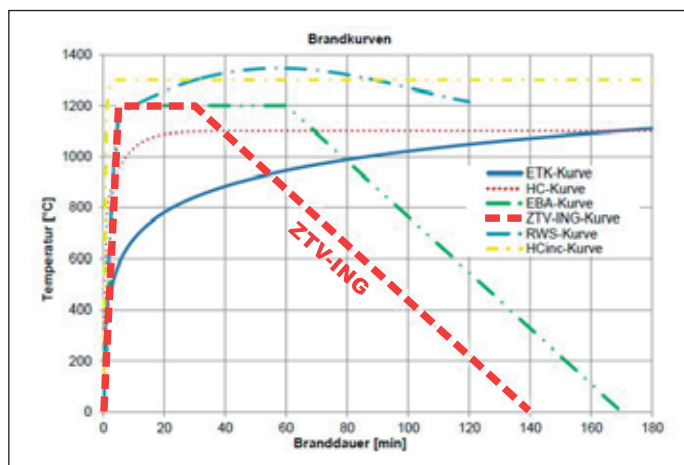
4.3 Tunnel structure

In this case, the supporting structure of the tunnel consists of a slab foundation, reinforced concrete frame with two spans creating two chambers with a pressure-sealed waterproofing system.

The standard tunnel cross-section is rectangular with an internal clear width of 14.65m in the LTT (left tunnel tube) and 14.15m in the RTT (right tunnel tube). The clear height of the structure in both the LTT and RTT is 7.93m. Above the 4.80m high passageway, there is a safety space of 0.30m and space for lighting and carriers of variable message traffic signs. In places of large-area traffic signs and fans, the tunnel upper slab is raised to the necessary level while maintaining the safety space above the passageway profile.

For static reasons, the upper slab is designed with chamfers at the middle and side walls. The working joint of the walls and upper slab is properly treated during construction. The thickness of the upper slab structure is 1.0 m for most of the tunnel length.

The tunnel profile is reduced at the points where the tunnel crosses the DN1400 sewerage system (km 135.122), the definitive



Obr. 8 Varianty teplotní křivky
Fig. 8 Temperature curve variants

v tunelu je reálný za předpokladu, že zásah Hasičského záchranného sboru (HZS) může skutečně proběhnout v časech, které křivka předpokládá. To bylo také kladně projednáno s HZS Jihočeského kraje.

Po této shodě na teplotním zatížení konstrukce bylo třeba prokázat odolnost konstrukce při požáru podle odsouhlasené teplotní křivky. Bylo hned zřejmé, že železobeton bez dalších úprav nemusí takovému teplotnímu zatížení vyhovět. Proto byly navrženy příměsi polypropylenových (PP) vláken do nejvíce namáhaných částí nosné konstrukce. Byla provedena požární zkouška tunelového ostění, proběhla ve zkušebně PAVUS, a.s., a to na třech různých typech betonu:

1. běžný beton bez vláken;
2. vláknobeton s 1 kg PP vláken na m^3 ;
3. vláknobeton s 2 kg PP vláken na m^3 .

Požární zkouška (obr. 9) prokázala významný přínos PP vláken na zlepšení požární odolnosti, a to ve stejné míře v dávce 1 kg/m^3 (vzorek 2) i v dávce 2 kg/m^3 (vzorek 3). U obou vzorků nepřekročila teplota vnitřní výztuže hodnotu 400 °C při 70 mm krytí.



Obr. 9 Požární zkouška – provedení
Fig. 9 Fire test – execution

Dobrovodský stream (km 135.132), the sewer (km 135.580) and the water supply in Ledenická Street (km 136.096).

4.4 Fire resistance of the tunnel structure

Attention was paid to fire safety in the tunnel design. The most important inputs:

- The Pohůrka Tunnel is, as a cut and cover structure with a flat upper slab, the first motorway tunnel of this type in the Czech Republic. However, it is not clearly defined how to approach the assessment of fire resistance.
- The risk of a “Major Fire” is once every 15 years – according to the Risk Analysis of the Pohůrka Tunnel [2].
- It is necessary to check the load condition when the “retention reservoir is filled and there is a fire in the tunnel” (Risk Analysis of the Pohůrka Tunnel [2]).

For the design of the structure, it was important to know what the fire scenario was (the course of the fire, the course of the firefighters' intervention) and which temperature curve to choose. After familiarizing themselves with the options, the ZTV-ING temperature curve was adopted according to the German regulation [5] (Fig. 8). Such a temperature curve in the tunnel is realistic, provided that the intervention of the Fire Rescue Service (HZS) can actually take place at the times assumed by the curve. This was also positively discussed with the HZS of the South Bohemian Region.

After this agreement on the temperature load of the structure, it was necessary to demonstrate the resistance of the structure in a fire according to the agreed temperature curve. It was immediately obvious that reinforced concrete without further modifications may not be able to withstand such a temperature load. Therefore, polypropylene (PP) fiber additives were prescribed by design in the most stressed parts of the supporting structure. A fire test of the tunnel lining was carried out in the PAVUS, a.s. testing laboratory, using three different types of concrete:

1. regular concrete without fibers;
2. fiber concrete with 1kg of PP fibers per m^3 ;
3. fiber concrete with 2kg of PP fibers per m^3 .

The fire test (Fig. 9) demonstrated a significant contribution of PP fibers to improving fire resistance, to the same extent with the dose of 1 kg/m^3 (sample 2) and with the dose of 2 kg/m^3 (sample 3). In both samples, the temperature of the internal reinforcement did not exceed 400 °C with a 70mm cover.

From a technological point of view, it is significantly easier to produce concrete with 1 kg/m^3 (sample 2), while test samples 2 and 3 behaved very similarly during the fire test. The 500 °C isotherm was located at a depth of 50mm below the surface, and therefore the cross-section in the static calculation was reduced by 50mm with the selected reinforcement cover of 70mm. The temperature at the location of the load-bearing reinforcement reached a maximum of 327 °C, and therefore did not exceed 400 °C. It was therefore not necessary to reduce the load-bearing capacity of the reinforcement elements in the static calculation.

4.5 Tunnel construction process

The tunnel construction (Fig. 10) was carried out in accordance with the phasing of excavations



Obr. 10 Rozestavěný tunel – pohled od Prahy, leden 2023

Fig. 10 Tunnel under construction – view from Prague, January 2023

zdroj archiv Zakládání staveb, a.s. source Zakládání staveb, a.s. archive

Z technologického hlediska je významně snazší vyrábět beton s 1 kg/m^3 (vzorek 2), přičemž zkušební vzorky 2 a 3 se během požární zkoušky chovaly velmi podobně. Izoterma $500 \text{ }^\circ\text{C}$ se nacházela v hloubce 50 mm pod povrchem, a tedy průřez ve statickém výpočtu byl redukován o 50 mm při zvoleném krytí výztuže 70 mm . Teplota v místě nosné výztuže dosahovala ve svém maximu $327 \text{ }^\circ\text{C}$, a tedy nepřekročila $400 \text{ }^\circ\text{C}$. Ve statickém výpočtu tak nebylo nutné redukovat únosnost výztužných prvků.

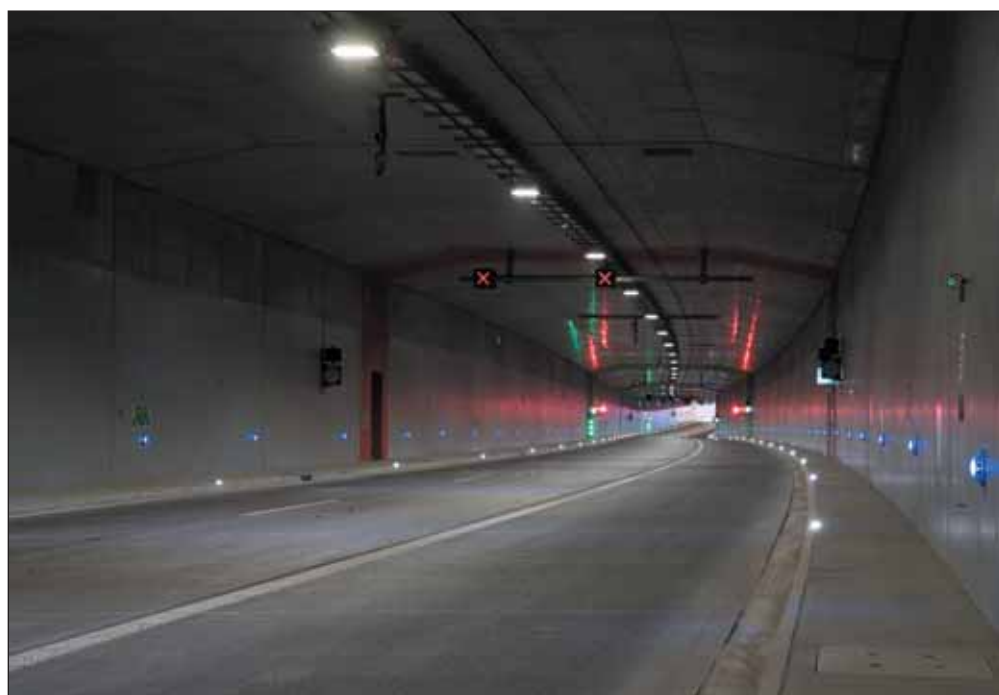
4.5 Postup výstavby konstrukce tunelu

Výstavba tunelu (obr. 10) proběhla v souladu s etapizací výkopů a přeložek na povrchu (Dobrovodská a Ledenická ulice, Dobrovodský potok, retenční nádrž, kanalizace atp.).

Po zhotovení drenážních a podkladních vrstev byla provedena hydroizolace základové desky s tvrdou ochranou z betonové mazaniny a na tu pak byla vybetonována základová deska. Následně byly zhotoveny tři monolitické podélné stěny tunelu a na ně vybetonovaná stropní deska. Hydroizolace byla na stěny

and surface utility relocations (Dobrovodská and Ledenická streets, Dobrovodský stream, retention reservoir, sewerage, etc.).

After the drainage and base layers were laid, the foundation slab waterproofing with hard cover protection from concrete screed was constructed and then the foundation slab was concreted



Obr. 11 Dokončený tunel před uvedením do provozu

Fig. 11 Completed tunnel before commissioning



Obr. 12 Dokončený kaplický portál při uvedení do provozu
Fig. 12 Completed Kaplický portal during commissioning

provedena jako kotvená z vnějšího povrchu. Stropní deska byla taktéž opatřena hydroizolačním systémem s tvrdou ochranou. Tímto způsobem vznikla ze všech stran vodotěsně izolovaná konstrukce tunelu s plošným založením. Hydroizolace byla provedena z PVC tl. 3 mm.

Prostor mezi pažením stavební jámy a konstrukcí tunelu byl po dokončení nosné konstrukce vyplněn popílkovým stabilizátem pevnosti cca 1 MPa. Tento stabilizát byl ukládán po etážích tak, aby mohly být deaktivovány dočasné pramencové kotvy pažení. Po zalití a vytvrdnutí stabilizátu byly štetovnice vytaženy, resp. všechny, u kterých to bylo možné. Následovalo provedení definitivních zásypů a přeložek na povrchu.

Nosná konstrukce (obr. 11) je rozdělena na 76 dilatačních dílů různých délek. Všechny pracovní a dilatační spáry byly provedeny jako vodotěsné.

4.6 Pražský portál (severní)

Objekt pražského portálu ukončuje hloubený tunel v místě Dobrovodské ulice. Vlastní portál vytváří prostor pro zpevněné plochy před vjezdem do tunelu v rozsahu cca km 135,000 až 135,096. V nejširším místě je plocha široká až 77 m (obr. 12). Ve směru jízdy od Prahy je vpravo situován provozně technologický objekt (PTO), kde jsou místnosti technologického vybavení, lokální pracoviště řízení provozu v tunelu, sklady materiálů, ústředna mobilních operátorů a čerpací stanice. Objekt dočasně slouží pro trvalou obsluhu, po přepojení na nové řídicí středisko tunelů bude sloužit pouze jako záložní. Jedná se o zděný objekt rozměrů cca 26 × 14 m a výšky 5 m.

Před PTO je umístěna podzemní nádrž požární vody a nádrž odlučovače ropných látek (ORL). V pravém rohu portálu (ve směru staničení dálnice na jih) je umístěna šachta odvodňovací stoky do Dobrovodského potoka. Volné zpevněné plochy před a za PTO jsou určeny jako nástupní plochy IZS v případě mimořádné

and utilities relocation. Subsequently, three monolithic longitudinal walls of the tunnel were built and the upper slab was concreted on top of them. The waterproofing was anchored on the outer surface of the walls. The upper slab was also provided with waterproofing layers with hard cover protection. In this way, a tunnel structure with a flat foundation slab was created that was waterproofed on all sides. The waterproofing was made of PVC, 3mm thick.

The space between the construction pit retaining walls and the tunnel structure was filled with fly ash stabilizer with a strength of approximately 1MPa after the completion of the supporting structure. This stabilizer was placed in layers so that the temporary strand anchors of the sheeting could be deactivated. After the stabilizer was poured and hardened, the sheet piles were pulled out, or rather, most of them where this was possible. This was followed by the final backfilling

and utilities relocation.

The supporting structure (Fig. 11) is divided into 76 dilation blocks of various lengths. All construction and dilation joints were made waterproof.

4.6 Prague portal (Northern)

The Prague portal structure ends the cut and cover tunnel at Dobrovodská Street. The portal creates space for paved areas before the tunnel entrance in the range of approximately km 135.000 to 135.096. At its widest point, the area is up to 77m wide (Fig. 12). In the direction of travel from Prague, the operational and technological building (PTO) is located on the right, where there are rooms for technological equipment, a local tunnel traffic control facility, material warehouses, a mobile phone operator exchange and a gas station. The building temporarily serves for permanent operation; after tunnels being connected to the new tunnel control center, it will serve only as a backup. It is a brick building measuring approximately 26 × 14m and 5m high.

In front of the PTO is an underground fire water reservoir and an oil separator (ORL) tank. In the right corner of the portal (in the direction of the motorway chainage to the south) is a drainage sewer shaft to the Dobrovodský stream. The paved areas in front of and behind the PTO are intended as emergency response areas in the event of an emergency in the tunnel and for operation and maintenance equipment. In the direction of Prague, when exiting the tunnel, there is a widened area on the right, which merges into the emergency exit lane. An underground contaminated water tank is located in this area.

In addition to the aforementioned objects, two ground-level fire water hydrants and SOS call cabinets are always located in the area in front of the portal. Sewerage, drainage and water pipes with inspection shafts and cable ducts with cable shafts for high-current, low-current and communication cables are located below the surface.

události v tunelu a pro techniku provozu a údržby. Ve směru do Prahy, při výjezdu z tunelu, je vpravo rozšířená plocha, přecházející do odbočovacího pruhu nouzového výjezdu. V této ploše je situována podzemní nádrž kontaminovaných vod.

Kromě jmenovaných objektů jsou na ploše před portálem umístěny vždy dva nadzemní hydranty požárního vodovodu a SOS hlásky. Pod povrchem jsou uložena kanalizační, drenážní a vodovodní potrubí s revizními šachtami a kabelovody s kabelovými šachtami pro silnoproudé, slaboproudé a sdělovací kabely.

Zajištění jámy portálu

Portálové stěny pražského portálu byly navrženy jako trvalé konstrukce v půdorysném tvaru otevřeného U. Tvoří je kotvené konstrukční podzemní stěny tl. 800 mm a 1000 mm (PS80, PS100) o hloubkách 11,2–23,0 m. Vzhledem k tomu, že při hloubení zapažené stavební jámy portálu tunelu po dokončení podzemních stěn v heterogenním prostředí by mohlo dojít k zastižení lokálních zvodní se zvýšenými přítoky vody, byla v předstihu realizována tato opatření:

- průběžný hydrogeologický monitoring sítě čerpacích a pozorovacích studní;
- odvodňovací šachty a odvodňovací štoly do Dobrovodského potoka;
- jílostruskové příčné těsnicí clony, umístěné dle očekávaného výskytu podzemní vody, realizované společně s podzemními stěnami;
- drenážní podzemní stěny vyplněné propustným materiálem, situované vně jámy portálu;
- podélné těsnicí podzemní stěny pro přerušení proudění podzemní vody do prostoru portálu a odclonění možných průsaků;
- subhorizontální odvodňovací vrt, ústící do líce obkladu podzemních stěn a do odvodňovacích rigolů; voda z vrtů byla svedena do odvodnění portálu a odvodňovací štoly;
- plošná drenáž portálu z kameniva do odvodňovací štoly pro minimalizaci vztlínání podzemní vody na zpevněné plochy a pro eliminaci rizika hydraulického prolomení dna.

Smyslem těchto opatření je systémové trvalé odvedení podzemních vod z prostoru portálu, trvalé snížení hladiny podzemní vody za rubem podzemních stěn na úroveň max. cca 4–5 m nad niveletu dálnice a dále minimalizace průniků vody do konstrukčních vrstev zpevněných ploch při portálu a trvalé odvádění průsakových vod odvodňovací štolou.

4.7 Kaplický portál (jižní)

Objekt kaplického portálu je situován v místě Ledenické ulice. Délka portálové konstrukce na horní hraně zářezu je až cca 135 m. Stěny kaplického portálu jsou tvořeny kotvenými konstrukčními podzemními stěnami tl. 800 mm o hloubkách 11,2–18,2 m. Boky jámy portálu jsou svažované, stejně jako u navazující části dálnice ve volném terénu. Na vlastní portál navazuje předportálová otevřená část se sjízdnou rampou a přípojovacím nouzovým pruhem z Ledenické ulice. Plocha je rozšířena pro nástup IZS a odstavení techniky provozu a údržby. Na straně rozšíření je umístěna podzemní nádrž požární vody. Ostatní vybavení je shodné s pražským portálem (hydranty požárního vodovodu, SOS hlásky apod.).

4.8 Konstrukce vnitřního vybavení tunelu

Jedná se o obvyklé konstrukce chodníků, kabelovodů, šachet, šterbinových žlabů a obrubníků, protipožárních dveří v únikových prostupech, chrániček pro příčné převedení kabelů do stěn

Portal pit support

The portal walls of the Prague portal were designed as permanent structures in the open U-shape in plan. They consist of anchored structural underground walls 800mm and 1000mm thick (PS80, PS100) with depths of 11.2–23.0m. Given that when excavating the construction pit of the tunnel portal after completion of the underground walls in a heterogeneous environment, local aquifers with increased water inflows could be encountered, the following measures were implemented in advance:

- continuous hydrogeological monitoring of the network of pumping and observation wells;
- drainage shafts and drainage galleries to the Dobrovodský stream;
- clay slag transverse sealing curtains, located according to the expected occurrence of groundwater, constructed together with underground walls;
- drainage underground walls filled with permeable material, located outside the portal pit;
- longitudinal sealing underground walls to interrupt the flow of groundwater into the portal area and screen off possible seepage;
- subhorizontal drainage drillholes, entering into the face of the underground wall cladding and into drainage ditches; water from the drillholes was led into the portal drainage and the drainage gallery;
- surface area drainage of the portal made from aggregates to drain into the drainage gallery to minimize the seepage of groundwater onto the paved surfaces, and to eliminate the risk of hydraulic fracturing of the bottom.

The purpose of these measures is to systematically and permanently drain groundwater from the portal area, permanently lower the groundwater level behind the underground walls to a maximum level of approx. 4–5m above the highway grade and further minimize water penetration into the structural layers of the paved areas at the portal and permanently drain seepage water through the drainage tunnel.

4.7 Kaplický portál (southern)

The Kaplický portal is located at Ledenická Street. The length of the portal structure at the upper edge of the cut is up to approximately 135m. The walls of the Kaplický portal are formed by anchored structural underground walls 800mm thick with depths of 11.2–18.2m. The sides of the portal pit are sloping, as in the adjacent part of the motorway in open terrain. The portal is connected to the pre-portal open part with a ramp and a connecting emergency lane from Ledenická Street. The area is expanded for the arrival of the IRS and the parking of operation and maintenance equipment. An underground fire water reservoir is located on the side of the expansion. Other equipment is identical to the Prague portal (fire water hydrants, SOS call cabinets, etc.).

4.8 Tunnel internal structures and facilities

These are the usual structures of walkways, cable ducts, shafts, slotted channels and curbs, fire doors in escape passages, ducts for transverse cable transfer to the walls and upper slab in the tunnel, carriers for hanging traffic signs, SOS cabinets, etc. The tunnel drainage is provided by a tunnel sewer with inspection shafts in the tunnel walkway. The drainage pipe is placed in the tunnel bottom slab. The drainage of the backup drains and slotted channels is discharged into the sewer. The roadway in the tunnel is solid

a stropu v tunelu, nosníků pro zavěšení dopravního značení, SOS kabiny atd. Odvodnění tunelu je zajištěno tunelovou kanalizací s revizními šachtami v chodníku tunelu. Potrubí odvodnění je uloženo v desce dna tunelu. Do kanalizace je zaústěno odvodnění pojistných drenáží a šterbinových žlabů. Vozovka v tunelu je tuhá cementobetonová. Její vrchní vrstvy byly položeny vcelku, širokým finišerem na celou šířku tunelové trouby.

4.9 Zásypy

Zásypy nosné konstrukce tunelu byly provedeny po etapách v návaznosti na dokončení nosné konstrukce, hydroizolace a vytažení štětovic. V souběhu se zásypy tunelu byly prováděny přeložky kanalizačních stok jako součást definitivních úprav povrchu. Hutněné zásypy byly prováděny z vytěženého materiálu, který byl na deponii tříděn podle vhodnosti užití do zásypů. Zemní těleso zásypů dosahuje výšky až 6 m.

V křížení konstrukcí tunelu a Dobrovodského potoka bylo navrženo výškové uspořádání tak, aby přesýpaný tubus dálničního tělesa vytvořil hráz retenční nádrže. Zásypy zde byly provedeny s náročnějšími požadavky na kvalitu zásypového materiálu a hutnění. Tato hráz vytváří prostor pro poldr a vodní nádrž. Součástí tohoto objektu byly i konstrukce pro definitivní převedení Dobrovodského potoka zpevněným korytem a shybkou pod konstrukcí tunelu. Definitivní úpravy povrchu terénu nad tunelem a okolo portálů a opěrných zdí jsou zakončené zatravněním.

5. BEZPEČNOST V TUNELU A TECHNOLOGICKÉ VYBAVENÍ

Tunel je v souladu s platnými předpisy navržen tak, aby se pokud možno předešlo jakýmkoli mimořádným situacím. Ty však nelze vyloučit úplně, a tak je bezpečnost v tunelu zásadně posouzena na dvě nejkritičtější návrhové situace – nehodu a požár. Na základě tohoto posouzení je určena doba potřebná pro evakuaci osob a únikové cesty. Evakuace osob je podporována bezpečnostními systémy, které jsou následující:

Větrání – uvnitř tunelu zajišťuje proudění vzduchu proti směru unikajících osob a přetlakové větrání únikových cest.

Osvětlení – nouzové osvětlení rovnoměrně osvětluje únikové cesty. Svítidla nouzového osvětlení jsou instalována ve výšce 0,8 m nad chodníky, aby bylo zajištěno jejich osvětlení i v případě zakouření tunelu.

Tunelový rozhlas (či evakuační rozhlas) – zajišťuje předávání hlasových povelů a informací uživatelům tunelu.

Bezpečnostní a orientační značení – zajišťuje vizuální informace o směru úniku a o vstupu do únikových cest.

Pro případy poruchy vozidla či náhlé zdravotní indispozice posádky vozidla jsou tunely vybaveny bezpečnostními základy, v případě tunelu Pohúrka průběžným odstavným pruhem, kde je možné s vozidlem bezpečně zastavit a následně pro přivolání pomoci využít **SOS kabiny**, které jsou rovnoměrně rozmístěny uvnitř tunelu, jakož i na vjezdech/výjezdech. S jejich pomocí se lze spojit s dispečinkem tunelu, který je v provozu nonstop.

Pro zajištění bezpečnosti provozu v tunelu a pro minimalizaci škod je stěžejní rychlá a spolehlivá detekce incidentů a požáru s následným spuštěním přednastavených scénářů opatření. Tato detekce je průběžně zajišťována **kamerovým systémem** s automatickou videodetekcí incidentů a požáru, a také **elektrickou požární signalizací** (EPS).

U dálničních tunelů se stalo standardem, že jsou vybaveny systémem pro šíření signálu mobilních telefonů uvnitř. Tak je tomu

cement concrete slab. Its upper layers were laid in one piece, with a wide paver over the entire width of the tunnel tube.

4.9 Backfilling

The backfilling of the tunnel supporting structure was carried out in stages following the completion of the supporting structure, waterproofing and sheet piles withdrawal. In parallel with the tunnel backfilling, the sewers relocation was performed as part of the final landscaping. The compacted backfill was made from excavated material, which was sorted at the muck storage according to its suitability for backfilling. The earth body of the backfill reaches a height of up to 6m.

At the intersection of the tunnel and Dobrovodský stream, the backfill elevation was designed so that the backfilled tunnel would create a retention reservoir dam. Backfilling here was carried out with more demanding requirements for the quality of the backfill material and compaction. This dam creates space for a polder and a water reservoir. This facility also included structures for the definitive transfer of the Dobrovodský stream through artificial trough and a siphon under the tunnel structure. The landscaping above the tunnel and around the portals and retaining walls is completed with grass implanting.

5. TUNNEL SAFETY AND TECHNOLOGICAL EQUIPMENT

In accordance with applicable regulations, the tunnel is designed to prevent any emergency situations as much as possible. However, they cannot be completely ruled out, so safety in the tunnel is fundamentally assessed for the two most critical design situations – an accident and a fire. Based on this assessment, the time required for the evacuation of people and escape routes is determined. Evacuation of people is facilitated by safety systems, which are as follows:

Ventilation – inside the tunnel, it ensures air flow against the direction of escaping people and positive pressure ventilation of escape routes.

Lighting – emergency lighting evenly illuminating escape routes. Emergency lighting fixtures are installed at a height of 0.8m above the sidewalks to ensure their illumination even in the event of smoke in the tunnel.

Tunnel radio (or evacuation radio) – ensures the transmission of voice commands and information to tunnel users.

Safety and orientation markings – provides visual information about the direction of escape and about the entrances to escape routes.

In the event of a vehicle breakdown or sudden health indisposition of the vehicle crew, the tunnels are equipped with emergency bays, in the case of the Pohúrka tunnel with a continuous parking lane, where it is possible to safely stop the vehicle and then use the **SOS cabinets** to call for help, which are evenly distributed inside the tunnel, as well as at the entrances/exits. They can be used to contact the tunnel control room, which is in non-stop operation.

To ensure the traffic safety in the tunnel and to minimize damage, the key is the rapid and reliable detection of incidents and fires with the subsequent launch of preset scenarios of measures. This detection is continuously ensured by a **camera system** with automatic video detection of incidents and fires, as well as an **electric fire alarm** (EPS).

It has become standard for highway tunnels to enable mobile phone signals. This is also the case at Pohúrka. However, from the point of view of safety systems, this is not considered a key channel for emergency communication. However, users are so adapted

i na Pohůrce. Z hlediska bezpečnostních systémů se však tento nepovažuje za stěžejní kanál nouzové komunikace. Uživatelé jsou však na mobilní telefony a jejich možnosti natolik adaptovaní, že je to většinou první možnost, kterou v případě problému v tunelu volí pro komunikaci s IZS.

V neposlední řadě je potřeba nebezpečným situacím předcházet. Rozšířeným nešvarem, který značně zvyšuje riziko nehody, je překračování maximální povolené rychlosti. Proto je zde instalován **systém úsekového měření rychlosti vozidel**.

Další systém pro zvýšení bezpečnosti je **proměnné dopravní značení** v předportálových úsecích a uvnitř tunelu, včetně pruhové signalizace pro řízení dopravního proudu a jízdy v pruzích.

Tunel Pohůrka je, se svou délkou necelý 1 km a uvažovaným maximálním dopravním zatížením více než 40 tisíc vozidel denně, zařazen do kategorie TA, tedy kategorie, která je z hlediska vybavení tunelu bezpečnostními systémy nejnáročnější.

Technologické a bezpečnostní vybavení tunelu (viz též obr. 11) bylo v průběhu realizace přizpůsobeno aktuálním trendům. Původně bylo navrženo pro rychlost jízdy vozidel 80 km/h, ačkoliv směrově a stavebně by tunel vyhovoval i pro rychlost vyšší. Obecně je v české dálniční síti snaha výhledově zavést v tunelech maximální rychlost 100 km/h tam, kde to podmínky dovolují. Prvním takto provozovaným je tunel Valík na dálnici D5. Proto se v dubnu 2022 investor ŘSD rozhodl pro změnu – přípravu technologického vybavení tunelu Pohůrka na rychlost 100 km/h. To mělo dopad zejména do návrhu osvětlení. Zkušební provoz byl zahájen s dovolenou maximální rychlostí 80 km/h, ale po cca dvou měsících byla příprava zúročena a tento limit zvýšen na 100 km/h.

6. ZÁVĚR

Vážení čtenáři, asi jste z článku pochopili, že ti, kdo prošli návrhem a realizací tunelu Pohůrka, nekráčeli po cestě vedoucí nejkratším směrem k cíli. Popsané peripetie změn návrhu „za pochodu“ nebyly jednoduché a bohužel prodloužily i dobu realizace. Jsme však přesvědčeni, že zprovozněný tunel je ve výsledku kvalitním dílem s perspektivou dlouhé životnosti.

Průjezd tunelem trvá zhruba 1,5 minuty. Třeba si přitom vzpomenete na některou dřívější cestu na Linec, kdy jste postávali v koloně při průjezdu Českými Budějovicemi.

*Ing. TOMÁŠ URBÁNEK, tomas.urbanek@metroprojekt.cz,
DAVID BENDA, david.benda@metroprojekt.cz,
Ing. DAVID KRÁSA, david.krasa@metroprojekt.cz,
METROPROJEKT Praha a.s.*

Recenzoval / Reviewed by: Ing. Pavel Šourek

to mobile phones and their capabilities that it is usually the first option they choose to communicate with the emergency services in the event of a problem in the tunnel.

Last but not least, there is a need to prevent dangerous situations. A widespread problem that significantly increases the risk of an accident is exceeding the maximum permitted speed. Therefore, a **system of sectional speed measurement** of vehicles has been installed here.

Another system for increasing safety is **variable message traffic signs** in the pre-portal sections and inside the tunnel, including lane signaling for traffic flow control and lane driving.

The Pohůrka Tunnel, with its length of less than 1 km and an expected maximum traffic load of more than 40 thousand vehicles per day, is classified as TA, i.e. the category that is the most demanding in terms of the tunnel safety systems equipment.

The technological and safety equipment of the tunnel (see also Fig. 11) was adapted to current trends during the realization. It was originally designed for a vehicle speed of 80km/h, although the tunnel would be suitable for a higher speed in terms of alignment direction and structurally. In general, there is an effort to introduce a maximum speed of 100km/h in tunnels of the Czech motorway network in the future where conditions allow. The first one to be operated in this way is the Valík Tunnel on the D5 motorway. Therefore, in April 2022, the investor ŘSD decided to make a change – to install the technological equipment of the Pohůrka tunnel to enable a speed of 100km/h. This had an impact, in particular, on the lighting design. The test operation was started with a maximum permitted speed of 80km/h, and after about two months, the installations were repaid and this limit was increased to 100km/h.

6. CONCLUSION

Dear readers, you probably understood from the article that those who went through the design and construction of the Pohůrka tunnel did not walk the shortest path to the goal. The described vicissitudes and changes of the design “on the go” were not easy and unfortunately extended the construction time. However, we are convinced that the tunnel that has been put into operation is ultimately a high-quality work with a long service life.

The passage through the tunnel takes about 1.5 minutes. Perhaps you will remember an earlier trip to Linz, when you stood in a queue while passing through České Budějovice.

*Ing. TOMÁŠ URBÁNEK, tomas.urbanek@metroprojekt.cz,
DAVID BENDA, david.benda@metroprojekt.cz,
Ing. DAVID KRÁSA, david.krasa@metroprojekt.cz,
METROPROJEKT Praha a.s.*

LITERATURA / REFERENCES

- [1] PRAGOPROJEKT, a.s., METROPROJEKT Praha a.s. Dálnice D3 0310/I Úsilné–Hodějovice, dokumentace pro územní rozhodnutí (DÚR). 2009.
- [2] AF-CITYPLAN s.r.o., Kraso s.r.o. Bezpečnostní dokumentace tunelu Pohůrka – riziková analýza, operativně taktická studie. 2016.
- [3] PRAGOPROJEKT, a.s., METROPROJEKT Praha a.s., VIAPONT, s.r.o. Dálnice D3 0310/I Úsilné–Hodějovice, dokumentace pro provedení stavby (PDPS). 2017.
- [4] MPI Projekt s.r.o. Dálnice D3 0310/I Úsilné–Hodějovice, SO 600 tunel Pohůrka, realizační dokumentace stavby (RDS). 2019–2024.
- [5] BASt Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen – Baulicher Brandschutz für Tunnel in offener Bauweise. 2015 Dostupné z: <https://www.bast.de/DE/Publikationen/Foko/2015-2014/2014-04.html>.