SEKUNDÁRNÍ OSTĚNÍ TUNELU POVAŽSKÝ CHLMEC, KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ, PROVÁDĚNÍ A OŠETŘOVÁNÍ

SECONDARY LINING OF THE POVAŽSKÝ CHLMEC TUNNEL, STRUCTURAL SOLUTION, CONSTRUCTION AND CONCRETE CURING

LIBOR MAŘÍK

ABSTRAKT

Koncepce sekundárního ostění musí být jasná ještě před zahájením ražeb. V režimu stavby „navrhni a postav“, kdy projektování realizační dokumentace probíhá s minimálním předstihem před realizací a mnohdy dokonce paralelně, je domyšlení všech detailů a provedení optimalizace řešení sekundárního ostění základním předpokladem technicky i ekonomicky úspěšného provedení díla. Článek popisuje jednotlivé etapy projektování i realizace sekundárního ostění dálničního tunelu Považský Chlmec od volby délky bloku betonáže a optimalizace blokového schématu, přes dimenzování ostění na základě skutečně zastižených geotechnických podmínek, zvláštní případy bednění hloubených tunelů ve střední stavební jámě až po problematiku vlastní betonáže vyztužených i nevyztužených úseků ostění a jeho ošetřování po odbednění. V době psaní článku jsou betonáže definitivního ostění v obou tunelových troubách ukončeny a je možné rekapitulovat.

ABSTRACT

The concept of a secondary lining has to be clear before starting tunnel excavation oper-ations. In the “Design and Build” regime, where the process of designing the construction means and methods takes place in a minimum advance of the realisation and often even in parallel, thorough thinking out of all details and optimising the solution to the secondary lin-ing is a basic condition for technically and economically successful execution of the works. The paper describes individual stages of designing and realising the secondary lining of the Považský Chlmec tunnel, starting from the selection of the concrete casting block length and optimisation of the flow chart to structurally analysing the lining on the basis of actually en-countered geotechnical conditions, special cases of formwork for the cut-and-cover tunnels in the mid-point construction pit, up to the problems of casting concrete in the reinforced as well as unreinforced lining sections and curing concrete after stripping of the formwork. At the time of writing this paper the casting of the final lining concrete in both tunnel tubes is al-ready finished and it is possible to recapitulate.

ÚVOD

Základní informace o projektování a výstavbě tunelu Považský Chlmec na dálnici D3 v úseku Žilina (Strážov) – Žilina (Brodno) poskytuje článek uveřejněný v čísle 3/2015 časopisu Tunel. Výstavba tunelu pokračuje podle předpokladů a v době vydání tohoto čísla je v obou tunelových troubách dokončena betonáž sekundárního ostění. Další práce v tunelu již budou spojené s výstavbou kabelovodů, vozovky, chodníků a vnitřního vybavení tunelu. Správná volba typu konstrukce a hospodárný návrh sekundárního ostění ovlivňuje výši investičních nákladů stejně, jako optimalizace postupu ražby tunelu, nebo obecně šířka komunikace a volba příčného řezu tunelu. Proto jsou v článku zmíněny faktory, které přímo nebo nepřímo ovlivňují ekonomiku návrhu sekundárního ostění tunelu a minimalizují rizika při provádění i provozování tunelu.

Vzhledem k režimu výstavby „navrhni a postav“ podle žluté knihy FIDIC je optimalizaci technického řešení jak ve fázi projektu, tak realizace věnována mimořádná pozornost. Sekundární ostění představuje významnou část z celkové ceny díla, přičemž její výši ovlivňuje i rychlost provádění a minimalizace rizik spojených s možnými vadami při výstavbě, které je nutné v záruční době na náklady zhotovitele sanovat. Betonáž prvního bloku ostění byla zahájena 21. 12. 2015, poslední kubík betonu byl do portálového bloku uložen 30. 11. 2016. Betonáž ostění v celkové délce 4435,5 m trvala se dvěma bednicími vozy necelý rok.

OPTIMALIZACE TECHNICKÉHO ŘEŠENÍ

Realizace sekundárního ostění tunelu přichází v harmonogramu prací na řadu až po vyhloubení a zajištění svahů stavebních

INTRODUCTION

Basic information about designing and realising the construction of the Považský Chlmec tunnel on the D3 motorway in the Žilina (Strážov) – Žilina (Brodno) section is available in a paper published in issue No. 3/2015 of TUNEL journal. The tunnel construction proceeds according to the expectations, at the moment of the publication of this issue the casting of the secondary lining concrete is finished in both tunnel tubes. Other work in the tunnel will already be associated with the construction of cableways, the roadway, walkways and internal equipment of the tunnel. The correct selection of the structure type and economical design of the secondary lining influence the amount of investment costs in the same way as the optimisation of the tunnel excavation procedure or, in general, the roadway width and choice of the tunnel cross-section geometry. For that reason the paper mentions the factors which directly or indirectly influence the economy of the tunnel secondary lining design and minimise the risks encountered during the construction and operation of the tunnel.

With respect to the “Design and Build” construction regime according the FIDIC Yellow Book, the optimisation of the technical solution carried out in the phases of designing as well as realising the structures is paid special attention. The secondary lining represents a significant proportion of the total cost of the works, while its amount is affected even by the speed of the works and the minimisation of the risks associated with potential defects during the course of the construction works which have to be made good during the warranty period at contractor’s cost. Casting of the first block of the concrete lining started on 21st December 2015; the last

jam, vyražení tunelu a zajištění jeho stability primárním ostěním a provedením hydroizolační fólie. Projektant realizační dokumentace tunelu musí však myslet při návrhu technického řešení komplexně a sekundárním ostěním se zabývat již na samém počátku projekčních prací. Prvním v pořadí je návrh tvaru příčného řezu tunelu, který vychází z geometrických a geotechnických požadavků. Ke geometrickým požadavkům patří především kategorie tunelu a průjezdný průřez.

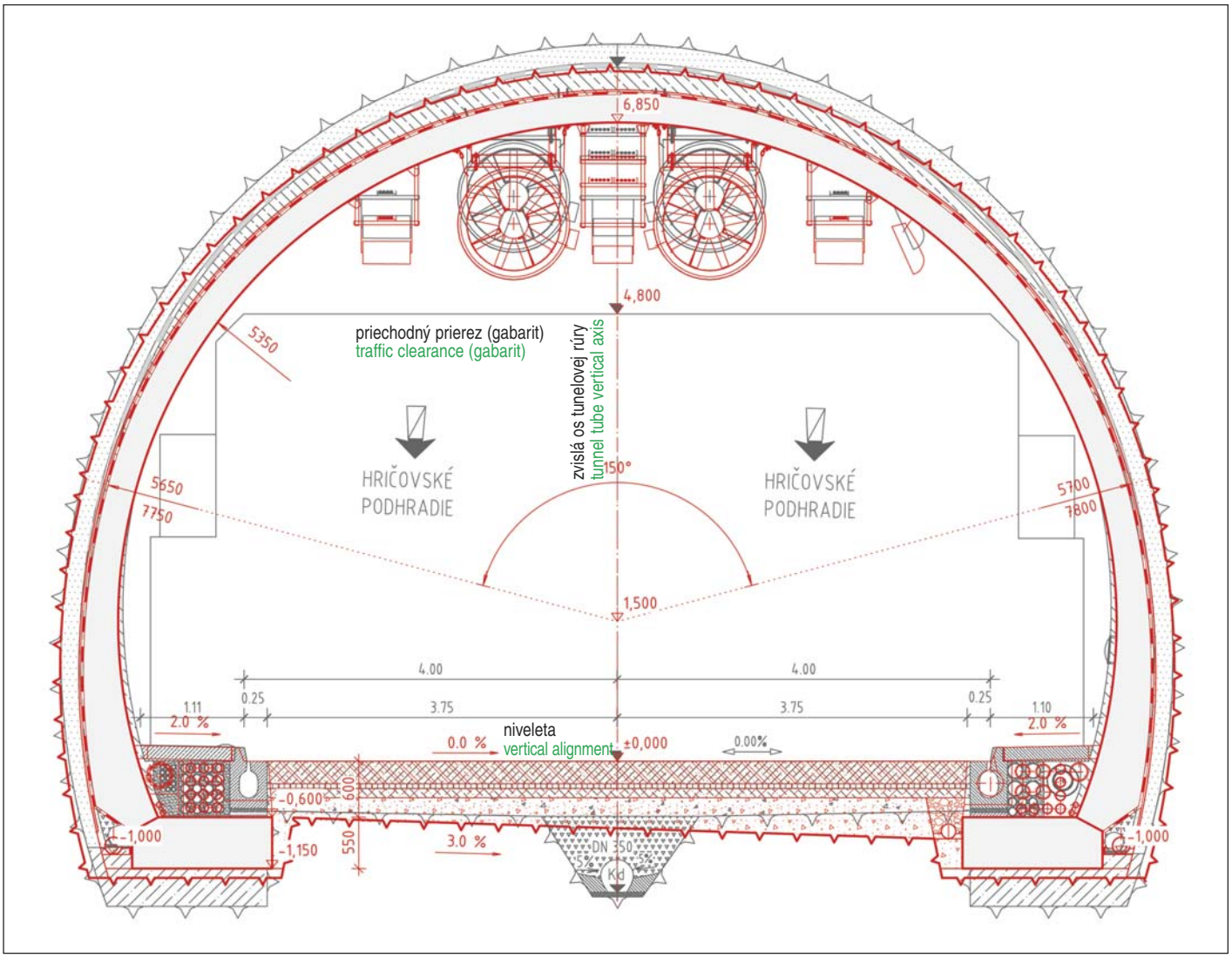
V případě tunelu Považský Chlmec se jedná o kategorii tunelu 2T-8,0 a průjezdný průřez s výškou 4,8 m podle STN 737507. Kategorií tunelu 2T-8,0 se rozumí dvě tunelové trouby s šířkou vozovky mezi obrubníky 8 m, tj. dva jízdní pruhy o šířce 3,75 m a dva vodící proužky o šířce 0,25 m. Společně s minimální šířkou chodníku 1 m jsou celková požadovaná šířka a výška tunelu základními parametry pro návrh příčného řezu tunelu. Líc tunelového ostění je při tomto poměru výšky a šířky ideálně tvořen jedinou kružnicí, neboť právě tvar blížící se kruhu ve většině případů nejlépe vzdoruje horninovému tlaku, má pozitivní dopad na průběhy vnitřních sil v ostění a přímo souvisí s možnostmi jeho dimenzování. Větší šířka vozovky mezi obrubníky již vede buď k velkému vzepětí klenby v případě kruhového tvaru příčného řezu, nebo ke staticky nevýhodnému zploštění klenby v její horní části. To má v prvním případě za následek zvětšení plochy výrubu, ve druhém

cubic metre of concrete was cast behind the formwork of the portal block on 30th November 2016. The casting of the concrete lining at the total length of 4435.5m using two travelling tunnel formwork units lasted for less than one year.

OPTIMIZATION OF THE TECHNICAL SOLUTION

The construction of the secondary lining takes a turn on the works schedule only after the completion of the excavation of construction pits and stabilisation of their slopes, the completion of the tunnel excavation, stabilisation of the excavation by the primary lining and installation of a waterproofing membrane. Despite this fact, the author of the design of means and methods has to think comprehensively when proposing the technical solution and deal with the secondary lining as early as the beginning of design work. First in line is the proposal for the tunnel cross-sectional geometry, which is based on geometrical and geotechnical requirements. Among the geometrical requirements there are first of all the tunnel category and the clearance profile.

In the case of the Považský Chlmec tunnel it is the 2T-8.0 category and the 4.8m high clearance profile according to the STN 737507 standard. The tunnel category 2T-8.0 means two tunnel tubes with the kerb-to-kerb width of 8m, i.e. two 3.75m wide traffic lanes and two 0.25m wide marginal strips.



Obr. 1 Porovnání původního a optimalizovaného tvaru tunelu
Fig. 1 Comparison of the original and optimised tunnel geometry

případě větší namáhání konstrukce. Společným jmenovatelem obou případů je negativní dopad do ceny díla.

Vzhledem k tomu, že stavba tunelu Považský Chlmec probíhá v režimu „navrhni a postav" podle žluté knihy FIDIC, došlo v první fázi optimalizace k úpravě tvaru příčného řezu tunelu s cílem minimalizace plochy výrubu a výše uvedenému zaoblení klenby, jak ukazuje obr. 1. Šedý stav představuje tvar tunelu ze zadávací dokumentace, červený stav tvar tunelu po optimalizaci, kdy je líc ostění tvořen jedinou kružnicí o poloměru 5,35 m.

Sekundární ostění se betonuje po blocích betonáže o délce max. 12,5 m. V tunelu se kromě standardních bloků betonáže pouze klenbového tvaru bez zvláštních úprav vyskytují i další typy bloků s výklenky na čistění drenáže, výklenky požárního hydrantu, výklenky kabin SOS, výklenky s prostupem do tunelových propojek a bloky betonáže v místě nouzových zálivů. Rozmístění těchto prvků v tunelu je svázáno normami a předpisy a vytvoření optimálního blokového schématu minimalizuje rizika provádění i zjednodušuje údržbu za provozu. Pro řidiče znamená snazší orientaci v tunelu v případě mimořádné události. Společnou snahou všech účastníků výstavby je proto minimalizace počtu atypických bloků betonáže.

Pro vzdálenosti výklenků platí následující pravidla:

vzdálenost výklenků na čistění drenáže	max. 50 m;
vzdálenost výklenků požárního hydrantu	max. 150 m;
vzdálenost výklenků kabin SOS	max. 150 m;
vzdálenost nouzových zálivů	max. 750 m;
vzdálenost tunelových propojek	max. 300 m.

Všechna tato čísla umožňují s výhodou použít blokové schéma s délkou bloku betonáže buď 10 m, nebo 12,5 m. Z hlediska minimalizace počtu do jisté míry rizikových spár mezi bloky betonáže i z hlediska rychlosti výstavby je výhodnější použití bloku betonáže délky 12,5 m. Délka bloku betonáže 10 m se používá zpravidla u ostění z betonu odolného proti průsakům s ohledem na omezení vzniku trhlin v ostění. To však není případ tunelu Považský Chlmec, kde se s ohledem na prognózu geotechnických poměrů spíše očekávalo nasazení nevyztuženého sekundárního ostění.

V první fázi optimalizace došlo ke sloučení výklenku na čistění boční tunelové drenáže, výklenku požárního hydrantu a kabiny SOS do jednoho bloku betonáže. Další zásadou bylo umístění kabiny SOS vždy proti ústí tunelové propojky a v polovině vzdálenosti mezi propojkami. Řidič tak má jistotu, že v místě úniku do vedlejší tunelové trouby najde i místo s možností nahlášení poruchy vozidla na tunelový dispečink. Díky zvětšení délky bloku betonáže z 10 m na 12,5 m, sjednocení výklenků a optimalizaci jejich vzájemné vzdálenosti se podařilo snížit počet nouzových zálivů ze 3 na 2, zmenšit výrazně počet atypických bloků betonáže s výklenky a sjednotit jejich délku tak, aby kromě portálových bloků betonáže délky 12 m byly všechny ostatní bloky délky 12,5 m. Všechny výklenky, včetně zaústění tunelových propojek, byly situovány v ose bloku betonáže a kolmo na osu tunelu.

NRTM JAKO OBSERVAČNÍ METODA PŘI NÁVRHU SEKUNDÁRNÍHO OSTĚNÍ

Nová rakouská tunelovací metoda (NRTM) je označována jako observační metoda, která umožňuje operativně reagovat postupem ražby a způsobem zajištění stability výrubu na skutečně zastižené geotechnické podmínky. Pokud to správně definované smluvní podmínky dovolují, jsou při ražbě vynakládány jen takové finanční prostředky, které jsou z hlediska zajištění

Together with the minimum width of 1m for the walkway, the total required width and height of the tunnel are the basic parameters for the design of the tunnel cross-section. At this proportion of the height to width, the contour of the inner surface of the tunnel lining is ideally formed by a single circle, because of the fact that a shape approximating a circle in the majority of cases best resists the ground pressure, has a positive impact on the variation of internal forces in the lining and is directly related to the possibilities of designing the dimensions. The greater kerb-to-kerb width results either to a great height of the vault in the case of a circular geometry of the cross-section or to statically disadvantageous flattening of the vault in its upper part. As a consequence, the cross-sectional area of the excavation increases in the first case, whilst the stress in the structure is higher in the latter case. A negative impact on the works cost is a common denominator of both cases.

With respect to the fact that the Považský Chlmec construction is carried out in the Design and Build regime according to the FIDIC Yellow Book, the tunnel cross-section was changed in the first phase of optimisation with the objective to minimise the excavated cross-sectional area and round the vault as mentioned above (see Fig. 1). The grey state represents the tunnel geometry from the tender design, while the red state represents the tunnel geometry after the optimisation, where the internal surface of the lining is formed by a single circle with the radius of 5.35m.

The casting of the lining concrete proceeds in casting blocks with the maximum length of 12.5m. Apart from standard vaulted concrete casting blocks without special modifications, even other types of the blocks exist, namely blocks with recesses for clearing the drainage, recesses for fire hydrants, recesses for SOS cabins, recesses with openings to tunnel cross passages and concrete casting blocks used in the locations of emergency lay-bys. The arrangement of these elements along the tunnel length is determined by standards and regulations and the creation of an optimal scheme minimises the construction risks and simplifies maintenance without interruption to traffic. For drivers it means easier orientation in the tunnel in the case of an extraordinary event. For that reason the minimisation of the number of atypical concrete casting blocks is a common effort of all parties to the construction.

The following rules are applicable to the spacing of recesses:

spacing of recesses for clearing drainage (manholes)	max. 50m;
spacing of recesses for fire hydrants	max. 150m;
spacing of recesses for SOS cabins	max. 150m;
spacing of emergency lay-bys	max. 750m;
spacing of tunnel cross passages	max. 300m.

All of these figures allow for the advantageous use of a block scheme with the concrete casting block lengths either 10m or 12.5m. From the aspect of the minimisation of the number of the to some extent risky joints between concrete casting blocks and from the aspect of the speed of construction it is more advantageous to use 12.5m long blocks. The 10m length of the concrete casting block is usually applied to lining concrete from the water seepage resistant concrete with respect to the restriction on the creation of cracks in the lining. But this is not the case of the Považský Chlmec tunnel, where the application of unreinforced concrete secondary lining was rather expected with respect to the predicted geotechnical conditions.

bezpečné ražby a při dodržení požadované kvality provádění nezbytně nutné. V průběhu ražeb je prováděn geotechnický monitoring a kromě geotechnických měření je na každé čelbě hodnocena i kvalita horninového masivu. Výsledky geotechnického monitoringu však neslouží pouze pro optimalizaci ražby, ale i jako podklad pro dimenzování sekundárního ostění. Po vyražení tunelu projektant vyhodnotil výsledky geotechnického monitoringu a horninový masiv v ražené části tunelu rozdělil z hlediska dimenzování sekundárního ostění do tří geotechnických typů (kvazihomogenních celků).

V nejhorších podmínkách především v oblasti západního a východního portálu, nebo v místě tektonické poruchy mezi střední stavební jámou a východním portálem byla použita „těžká výztuž“. V lepších geotechnických podmínkách byla použita „lehká výztuž“ a v místě dobrých geotechnických podmínek bylo použito nevyztužené sekundární ostění. Bez ohledu na geotechnické podmínky byly vždy vyztuženy bloky betonáže v místě napojení tunelových propojek a v místě nouzových zálivů.

Zvláštní případ představují úseky tunelu ražené pod želvou, kde je tloušťka sekundárního ostění zvětšena z 300 mm na min. 400 mm a ostění je vyztužené. S ohledem na skutečně zastižené geotechnické podmínky není nikde v tunelu použit profil se spodní klenbou a tunel je založen na pásech. Pouze jediný blok betonáže v severní tunelové troubě na východním portále, který je zatížen výrazně asymetrickým zatížením, je založený z důvodu nutného rozepření základových pásů na základové desce. NRTM je tak jako observační metoda použita nejen k optimalizaci postupu ražby tunelu a bezpečnému zajištění výrubu primárním ostěním, ale i v oblasti návrhu a dimenzování sekundárního ostění.

PARAMETRY A TYPY KONSTRUKCÍ SEKUNDÁRNÍHO OSTĚNÍ

Z hlediska konstrukčního řešení je monolitické ostění tunelu Považský Chlmec možné rozdělit na ostění hloubených úseků tunelu a úseků ražených buď pomocí NRTM, nebo ražených pod klenbovým zastropením. Tento způsob výstavby je známý jako metoda želva. Zásadní rozdíl v technickém řešení ostění hloubených a ražených tunelů je ve způsobu napojení klenby tunelu na základové pásy a v tloušťce konstrukce. V případě hloubených tunelů je výztuž základových pásů propojena s výztuží klenby, v ražených úsecích tunelu jsou zvlášť vyztuženy základové pásy a zvlášť klenba tunelu s tím, že výztuž není propojena. I v ražených úsecích tunelu s nevyztuženým ostěním klenby jsou základové pásy vždy vyztužené.

Nepropojování výztuže základových pásů a výztuže klenby tunelu má mnoho výhod. Patří k nim snadné provádění bočních tunelových drenáží i ukončení hydroizolační fólie, snížení rizika poškození hydroizolační fólie o trčící výztuž, snazší montáž výztuže klenby ve vyztužených úsecích tunelu a lepší možnost rektifikace výztuže klenby než v případě provázání s výztuží základového pásu. Na tunelu Považský Chlmec je ostění navrženo ve třech základních tloušťkách. V hloubených úsecích tunelu je teoretická tloušťka konstrukce min. 600 mm, v úsecích ražených pod želvou min. 400 mm a v ražených úsecích tunelu min. 300 mm. Jedná se o tloušťku ostění ve vrcholu klenby, která se směrem k bokům tunelu zvětšuje. Vnitřní líc ostění je ve všech úsecích geometricky shodný. Sekundární ostění tunelu raženého pod želvou na západním portále ukazuje obr. 2.

Ražba tunelu probíhala v geologicky pestrém prostředí od zvětralých pískovců až po velmi pevné slepence. Tomu odpovídal způsob rozpojování horniny a délka záběru. V měkčích,

In the first phase of the optimisation, the recess for clearing the tunnel side drains, the recess for fire hydrant and the SOS cabin were merged into one concrete casting block. Another principle lied in locating the SOS cabin always across the mouth of the tunnel cross passage and in the middle of the distance between cross passages. Thus drivers can be sure that they will find a place where they can report a vehicle defect to the tunnel traffic management centre in the location of the escape exit to the neighbouring tunnel tube. Owing to increasing the concrete casting block length from 10 to 12.5m, merging the recesses and optimising their spacing, the number of emergency lay-bys was successfully reduced from 3 to 2, the number of atypical casting blocks containing recesses was significantly reduced and their length was unified so that, apart from 12m long portal blocks, all other blocks were 12.5m long. All recesses, including the mouths of tunnel cross passages, were located in the middle of the concrete casting block and were positioned perpendicularly to the tunnel centre line.

THE NATM AS THE OBSERVATIONAL METHOD APPLIED TO THE SECONDARY LINING DESIGN

The New Austrian Tunnelling Method (NATM) is described as an observational method allowing for operative responding to actually encountered geotechnical conditions by adjusting the excavation procedure and the system of securing the stability of the excavation. If properly defined contract conditions allow it, only such financial means are expended which are necessary from the aspect of ensuring safe excavation and adhering to the required quality of works. Geotechnical monitoring is carried out during the course of the excavation and, apart from geotechnical measurements, even the rock mass quality is assessed at each heading. However, the results of the geotechnical monitoring are used not only for the optimisation of the excavation procedure, but also as source documents for designing dimensions of the secondary lining. After the completion of the tunnel excavation the designer assessed the geotechnical monitoring results and divided the rock massif in the mined part of the tunnel from the aspect of the structural analysis of the secondary lining into three geotechnical types (quasi-homogeneous units).

“Heavy concrete reinforcement” was applied to the worst conditions, first of all in the area of the western and eastern portals or in the location of the tectonic fault between the midpoint construction pit and the eastern portal. “Lightweight concrete reinforcement” was applied to better geotechnical conditions, whilst unreinforced secondary lining was used in good geotechnical condition locations. Concrete casting blocks in the locations of the connections of tunnel cross passages and in locations of emergency lay-bys were always reinforced, irrespective of geotechnical conditions.

The sections excavated under the “tortoise shell”, where the thickness of the secondary lining is increased from 300mm to the minimum of 400mm and the concrete is reinforced, are special cases. With respect to the actually encountered geotechnical conditions, profiles with an invert are not designed and the tunnel is founded on footings. Only the concrete casting block behind the eastern portal of the northern tunnel tube, which is loaded significantly asymmetrically, is founded on a base slab with respect to the necessity for bracing the footings. The NATM is used as an observational method not



Obr. 2 Sekundární ostění tunelu raženého pod želvou
Fig. 2 Secondary lining of the tunnel excavated under the tortoise shell

tunelovým bagrem snadno rozpojitelných horninách, kde se délka záběru pohybuje do cca 1,5 m, se dařilo poměrně přesně držet projektovaný teoretický tvar výrubu bez větších nadvýrubů. U rozpojování horniny pomocí trhacích prací s délkou záběru přesahující 3 m již docházelo k technologicky i geologicky podmíněným nadvýrubům. Z hlediska rychlosti výstavby i ceny díla je důležité, do jaké míry je nutné takto vzniklé nadvýruby vyplnit a zda jsou vyplněny dražším a pomaleji aplikovatelným stříkaným betonem, nebo při betonáži sekundárního ostění levnějším monolitickým betonem. Na tuto skutečnost zahraniční předpisy pamatují [2] a podmínka pro povolenou odchylku od projektované tloušťky sekundárního ostění se objevila i v zadávací dokumentaci ve *„Zvláštních technicko kvalitativních podmínkách“* (ZTKP). Monolitickým betonem sekundárního ostění tak je možné vyplnit nadvýruby až do hodnoty 100 % projektované tloušťky sekundárního ostění. V případě teoretické tloušťky ostění 300 mm může mít konstrukce skutečnou tloušťku až 600 mm.

Tunel je izolován pomocí mezilehlé hydroizolační fólie. Protože závazné předpisy [1] i požadavky výrobce hydroizolační fólie předepisují maximální možnou křivost povrchu primárního ostění (poměr průměru nerovnosti k její výšce nesmí být menší než 10:1), tato podmínka zároveň zaručuje, aby se tloušťka sekundárního ostění neměnila skokem. To by mohlo mít negativní vliv na vznik trhlin jak z důvodu nerovnoměrného oteplení při hydrataci betonu, tak z důvodu rozdílné tuhosti konstrukce. V případě nevyztuženého ostění zadávací dokumentace připouští lokální oslabení jeho tloušťky o 50 mm v rozsahu maximálně 5 % povrchu příslušného bloku betonáže.

Ostění hloubených úseků tunelu je s ohledem na zatížení násypem a omezené možnosti bočního rozepření zásypovým materiálem navrženo z betonu C30/37. Ze statického hlediska by bylo možné v ražených úsecích tunelu ostění navrhnout z betonu C25/30 a ve větší části tunelu to tak skutečně je. Výjimkou jsou příportálové úseky tunelu, ve kterých je zadávacími podmínkami i závaznými předpisy [1] požadováno použití betonu C30/37 XF4. Názor na délku takto exponovaného úseku se v průběhu výstavby měnil. V zadávacích podmínkách byla požadována délka úseku 150 m. Požadavky ZTKP prodloužily délku úseku na 300 m a v revizi TKP26 z roku 2015 se již objevuje délka 600 m od každého portálu. Pro výstavbu tunelu je postupováno podle ZTKP stavby, a to zejména s ohledem na použití nevyztuženého sekundárního ostění, kde by použití betonu C30/37 s vyšším obsahem cementu vedlo ke zvýšení rizika vzniku trhlin.

only for optimising the tunnel excavation procedure and safe support of the excavation by a primary lining, but also in the area of designing the secondary lining and its dimensions.

PARAMETERS AND TYPES OF SECONDARY LINING STRUCTURES

From the structural solution point of view, the cast-in-place lining of the Považský Chlmec can be divided into liners of cut-and-cover tunnel sections and liners of sections excavated using the NATM or excavated under a vaulted roof. The latter construction technique is known as the “Tortoise Shell Method”. The fundamental difference between the technical solution to cut-and-cover and mined tunnels lies in the system of connecting the tunnel vault to the footings and in the thickness of the structure. In the case of cut-and-cover tunnels, the concrete reinforcement of footings is interconnected with the vault reinforcement, whilst in mined tunnel sections the footings and the tunnel vault are reinforced separately, without interconnecting the reinforcement. The concrete of footings is always reinforced, even in mined tunnel sections with unreinforced concrete vaults.

The system where the reinforcement of footings is not interconnected with the reinforcement of tunnel vaults has many advantages. Among them there are the easy execution of tunnel side drains and termination of the waterproofing membrane, as well as the reduction of the risk of damaging the membrane by piercing with sticking up reinforcement bars, easier installation of vault reinforcement in reinforced concrete sections of the tunnel and better possibility of rectifying the vault reinforcement than in the case of the interconnection with the reinforcement of footings. Three basic thicknesses are designed for the Považský tunnel lining. In cut-and-cover sections the minimum theoretical thickness of the structure is 600mm; in sections excavated under the tortoise shell the minimum is 400mm and in mined tunnel sections the minimum is 300mm. It is the thickness of the lining at the crown of the vault, which grows toward the tunnel sides. The contour of the internal surface of the lining is geometrically identical. The secondary lining of the tunnel excavated under the tortoise shell at the western portal is presented in Fig. 2.

The tunnel excavation proceeded through a geologically variable environment, ranging from weathered sandstone up to very hard conglomerates. The rock disintegration technique and the length of excavation rounds corresponded to this fact. In weaker rock easy to disintegrate by a tunnel excavator, where the excavation round length fluctuates up to ca 1.5m, the designed theoretical excavation contour was maintained without larger overbreaks. In the case of the rock disintegration by means of blasting with the excavation round length exceeding 3m, technologically and geologically conditioned overbreaks already occured. It is important from the aspect of the construction speed and the cost of the works to which extent it is necessary to fill such overbreaks and whether they are to be filled with more expensive shotcrete, the application of which is slower, or they are to be filled with cheaper cast-in-place concrete during the casting of the secondary lining concrete. Foreign regulations remember this fact [2] and the condition for the permissible deviation from the designed thickness of the secondary lining appeared even in the tender documents in the *„Special technical and qualitative specifications“* (STQS). The overbreaks up to the value of 100% of



Obr. 3 Vzdálenost portálů severní trouby ve střední stavební jámě
Fig. 3 The distance between portals in the mid-point construction pit

V oblasti střední stavební jámy přechází obě tunelové trouby z ražených úseků do krátkých hloubených úseků. V případě severní tunelové trouby (STT) odpovídá délka hloubeného úseku jednomu bloku betonáže, tj. 12,5 m, jak ukazuje obr. 3, na kterém je vpravo vidět želva ještě před vybetonováním sekundárního ostění. V jižní tunelové troubě (JTT) odpovídá délka hloubeného úseku třem blokům betonáže, tj. 37,5 m. Vzdálenost portálů JTT ukazuje obr. 4. Do střední stavební jámy je situována tunelová propojka a proti ústí propojky do tunelových trub sdružený výklenek požárního hydrantu, kabiny SOS a šachty na čistění boční tunelové drenáže. Z hlediska rubového bednění znamená průnik propojky s tunelovými troubami i sdružené výklenky geometricky složitý tvar.

Vzhledem k malé délce hloubených úseků tunelu se zhotovitel rozhodl nevyrábět systémové rubové bednění, jaké je použito na líci ostění ze strany dopravního prostoru tunelu, a použil konstrukci vytvořenou z výztužných rámů, ocelových sítí a stříkaného betonu, která je označována jako „falešné primární ostění“. Fáze výstavby této konstrukce ukazují obr. 5 a 6. Na obr. 5 probíhá montáž výztužných sítí na příhradové nosné rámy a upevňování geotextilie na vnější stranu konstrukce. Obr. 6 ukazuje falešné primární ostění po provedení první vrstvy nástřiku betonu. Tato konstrukce byla použita i pro rubové bednění jediného bloku betonáže hloubeného úseku severní tunelové trouby na západním portále. Jako první jsou postaveny příhradové nosné rámy, které jsou vzájemně zajištěny rozpínkami



Obr. 5 Montáž výztuže falešného primárního ostění
Fig. 5 Installation of the false primary lining concrete reinforcement



Obr. 4 Délka hloubeného úseku jižní trouby ve střední stavební jámě
Fig. 4 The length of the cut-and-cover tunnel section in the mid-point construction pit

the designed thickness of the secondary lining can be filled with cast-in-place secondary lining concrete in this way. In the case of the 300mm theoretical thickness of the lining the actual thickness of the structure can reach up to 600mm.

The tunnel waterproofing is carried out using an intermediate waterproofing membrane. Because binding regulations [1] and waterproofing membrane manufacturer's requirements prescribe the maximum allowable curvature of the primary lining surface (the proportion of an irregularity to its height must not be less than 10:1), this condition at the same time secures that the secondary lining thickness does not change by jump. It could negatively influence the origination of cracks both due to uneven heating during the concrete hydration process and the different stiffness of the structure. In the case of the unreinforced lining the tender design accepts the local reduction of its thickness by 50mm within the maximum extent of 5% of the surface of the respective casting block.

The C30/37 concrete grade is designed for the lining of cut-and-cover sections of the tunnel with respect to the loads generated by embankments and the limited possibilities of bracing the sides with the backfill material. From the structural point of view it would be possible to propose concrete grade C25/30 for mined tunnel sections and it really is so in a larger proportion of the tunnel length. The portal sections of the tunnel where the use of C30/37 XF4 grade concrete is required by the tender conditions and binding regulations [1] are exceptions. The opinion on the length of such an exposed section varied during the construction works. The tender conditions required the section length of 150m. The STQS conditions increased the length of the section to 300m and the length of 600m from each portal appeared in the Technical Specifications from 2015. The length specified in the STQS is applied, first of all with respect to the application of the unreinforced secondary lining concrete, where the application of C30/37 grade concrete with a higher content of cement would lead to increased risk of the creation of cracks.

In the area of the mid-point construction pit both tunnel tubes pass from mined sections to short cut-and-cover sections. In the case of the northern tunnel tube (NTT), the length of the cut-and-cover section corresponds to the length of one concrete casting block, i.e. 12.5m, as shown in Fig. 3, where the tortoise shell can be seen even before the secondary lining concrete was cast. In the southern tunnel tube (STT), the length of the cut-and-cover section corresponds to the length



Obr. 6 První nástřik betonu falešného primárního ostění
Fig. 6 Application of the initial shotcrete layer of the false primary lining

a vnější vrstvou sítí KARI. Na vrstvu sítí se připevní ocelové pletivo B-SYSTÉM, nebo geotextilie, aby bylo možné provést nástřik betonu.

První vrstvou stříkaného betonu se vytvoří skořepina, na kterou se postupně nanášejí další vrstvy stříkaného betonu. Po navázání druhé, vnitřní vrstvy sítí se provede dostříkání konstrukce do projektované tloušťky 300 mm, jak ukazuje obr. 7. Použitím výztužných rámů, sítí a stříkaného betonu se podařilo vymodelovat všechny složité prostupy i výklenky hloubených tunelů. Na vytvořené falešné primární ostění se upevní hydroizolační fólie, smontuje se samonosná výztuž sekundárního ostění a pro bednění líce ostění je použit stejný bednicí vůz, jako v ražených úsecích tunelu. Pohled na falešné primární ostění v místě křížení s tunelovou propojkou ukazuje obr. 8.

Při návrhu technologického postupu prací je nutno zohlednit únosnost falešného primárního ostění na zatížení zásypem i směsí betonu při betonáži ostění tunelu. V případě hloubeného úseku na západním portále byl zásyp proveden předrcenou rubaninou z tunelu. Z hlediska únosnosti bylo falešné primární ostění zasypáno jen do cca 3 m, horní část klenby falešného primárního ostění bylo nutné vzhledem k zatížení betonovou směsí rozepřít do stěn stavební jámy. Falešné primární ostění na západním portále ukazuje obr. 9, ze kterého je patrná konstrukce ostění, úroveň zásypu i ocelové převázky pro rozepření konstrukce při betonáži sekundárního ostění.

V případě střední stavební jámy se v první fázi rovněž předpokládalo zasypání rubaninou. Od počátku stavby však vzbuzovala

of three concrete casting blocks, i.e. 37.5m. The distance between the STT portals is presented in Fig. 4. A tunnel cross passage is located in the mid-point construction pit and the combined recesses for the fire hydrant, SOS cabin and tunnel side drainage clearing manhole are located across the mouths of the cross passage to the tunnel tubes. From the aspect of the external formwork, the intersection of the cross passage with tunnel tubes and the combined recesses represent a complex geometrical shape.

With respect to the small depth of the cut-and-cover tunnel sections, the contractor decided not to produce the external formwork system which is used for the lining installed from the side of the tunnel roadway space. Instead they used a structure formed from support frames, welded mesh and shotcrete, which is labelled as a “false primary lining”. The phases of the construction of this structure are shown in Figures 5 and 6. The installation of welded mesh on lattice girders and the geotextile is fixed on the external side of the structure in Fig. 5. Fig. 6 presents the false primary lining after the application of the first layer of shotcrete. This structure was used even for the external formwork of the only concrete casting block of the cut-and-cover section of the northern tunnel tube at the western portal. In the first step the lattice girders are erected. They are secured by braces and an external layer of KARI mesh. B-system steel fabric or geotextile is fixed on the mesh layer so that the application of shotcrete is possible.

The initial shotcrete layer creates a shell, which is subsequently, step by step, covered with other layers of shotcrete. When the installation of the second, inner layer of mesh is finished, concrete is sprayed up to the full designed thickness of 300mm, as shown in Fig. 7. All complicated openings and recesses in cut-and-cover tunnels were successfully modelled by using lattice girders, mesh and shotcrete. Subsequently the waterproofing membrane is fixed to the false formwork, the self-supporting reinforcement of the secondary lining is assembled and the same tunnel form traveller is used for forming the inner surface of the lining as that used in the mined tunnel sections. A view of the false primary lining at the intersection with a tunnel cross passage is presented in Fig. 8.

When the method statement for the work is being designed, it is necessary to take into account the load-bearing capacity of the false primary lining loaded by the backfill and concrete mixture during pouring of the tunnel lining concrete. In the



Obr. 7 Líc falešného primárního ostění po dostříkání betonu
Fig. 7 Internal surface of the false primary lining after completion of spraying concrete



Obr. 8 Falešné primární ostění v místě napojení tunelové propojky
Fig. 8 False primary lining in the location of the connection of the tunnel cross passage



Obr. 9 Zásyp a prvky rozepření před betonáží sekundárního ostění
Fig. 9 Backfill and bracing elements before casting of secondary lining concrete

obavy možnost obtížně odhadnutelných přítoků vody do stavební jámy jednak z údolí nad jámou, jednak z okolních svahů. Hydrotechnické výpočty na normové hodnoty deště prováděné v souvislosti s dimenzováním odvodnění jámy po dobu výstavby tyto obavy potvrdily. Záplavy spojené s přívalovými dešti, které oblast v průběhu výstavby postihly, však ukazovaly, že skutečnost může být ještě mnohem horší než normové výpočty. Vzhledem k deštníkovému systému hydroizolace by nepředstavoval hydrostatický tlak bezprostřední ohrožení statické funkce ostění, došlo by však ke značnému zvýšení přítoků vody do tunelových drenáží s nebezpečím vyluhování jemných částic ze zásypového materiálu. Proto navrhl projektant realizační dokumentace po dohodě se zhotovitelem zaplavení stavební jámy do výšky vrcholu klenby tunelu popílkem, což oblast hloubených tunelů utěsní a prosakující povrchovou vodu převede přes stavební jámu údolím dolů tak, jako před vyhloubením stavební jámy.

Po kladném projednání návrhu se zástupci investora začaly přípravy na zaplavování stavební jámy popílkem. Ještě před zahájením prací se však příroda postarala o reálnou simulaci výše popisovaného stavu. Ve stavební jámě bylo provedeno falešné primární ostění a jáma byla pro potřeby zaplavování přehrazena těsnými přepážkami. V tomto okamžiku přišel přívalový déšť a voda stékající údolím i protékající suťovými kužely na svazích okolních hor vyplnila prostor mezi falešným primárním ostěním a svahy stavební jámy zhruba do výšky 4 m, jak ukazuje obr. 10. Pokud by již byly nainstalovány drenáže, proniklo by toto obrovské množství vody do drenážního systému tunelu a odtékalo směrem k západnímu portálu. V případě zasypání stavební jámy vysoce propustnou rubaninou by se tato situace opakovala při každém přívalovém dešti, nebo v období jarního tání. Náhoda ukázala, že myšlenka utěsnění stavební jámy popílkem je správná.



Obr. 10 Zaplavení střední jámy po přívalovém dešti
Fig. 10 Flooding of the mid-point construction pit after torrential rains

case of the cut-and-cover tunnel at the western portal, crushed muck from the tunnel was used for backfilling. With respect to the load-bearing capacity, the false primary lining was backfilled only up to the level of ca 3m and it was necessary, taking into consideration the load induced by the concrete mixture, to brace the upper part of the false primary lining vault against the walls of the construction pit. The false primary lining at the western portal is presented in Fig. 9. The lining structure, the backfill level and the steel walers allowing the bracing of the structure during the casting of the secondary lining concrete.

In the case of the mid-point construction pit, backfilling with muck was also planned for the first phase. However, the possibility of hard-to-guess water inflows to the construction pit from the valley above the pit and from surrounding slopes gave rise to concerns from the beginning of the works. The hydrotechnical calculations using standardised precipitation rate values which were conducted in the context of designing the construction pit drainage during the course of the construction confirmed the concerns. However, the flooding associated with torrential rains which affected the area during the course of the construction indicated that the reality could be much worse than according to standardised calculations. With respect to the umbrella-type waterproofing system, the hydrostatic pressure did not represent a major threat to the structural function of the lining, but the water inflows to tunnel drainage would significantly grow, with the danger of leaching of fine particles from the backfill material. For that reason the author of the design of means and methods, in agreement with the contractor, proposed flooding of the construction pit with fly ash up to the level of the top of the tunnel vault. This measure would seal the area of the cut-and-cover tunnels and would transfer the seeping surface water over the construction pit, down the valley, as it flew before the excavation of the construction pit.

After a positive discussion of the proposal with representatives of the project owner, preparations for flooding the construction pit with fly ash commenced. But the nature took care of the real simulation of the above-mentioned state even before the commencement of the work. The false primary lining was completed in the construction pit and sealed bulkheads were carried out in the pit for the needs of flooding. At this moment a torrential rain arrived and water flowing down the valley and through talus cones on the slopes of surrounding mountains filled the space between the false primary lining and the slopes of the construction pit approximately up to the level of 4m, as shown in Fig. 10. If the installation of the drains had been finished, this huge amount of water would have got into the tunnel drainage system and would have been drained away toward the western portal. In the case of filling the construction pit with the highly permeable muck, this situation would be repeated during each torrential rain or during the spring thawing period. An accident showed that the idea of sealing the construction pit with fly ash was good.

It was necessary for the determination of the time schedule for flooding to know the fly ash strength build-up rate because the false primary lining structure was not able to transfer the hydrostatic pressure without taking the gradual setting of individual fly ash layers into account. When the proposal was being prepared, it was based on the assumption that the fly ash would reach the strength of 0.3MPa and

Pro stanovení časového postupu zaplavování bylo nutné znát náběh pevnosti popílku v čase, protože zatížení hydrostatickým tlakem bez zohlednění postupného tuhnutí jednotlivých vrstev popílku nebyla konstrukce falešného primárního ostění schopna přenést. Při návrhu se vycházelo z předpokladu, že popílek dosáhne po dvou dnech pevnosti 0,3 MPa a po 28 dnech 3 MPa. Za těchto předpokladů byla předepsána maximální rychlost zaplavování jámy 0,5 m/den. Případnou nesymetrii zaplavování mezi pravou a levou částí konstrukce připouštěl technologický postup prací max. 0,5 m. Statickým výpočtem bylo dále prokázáno, že s ohledem na zatížení betonovou směsí ostění hloubených tunelů je jámu nutno zaplavit a tím falešné primární ostění podepřít min. do výšky 5,5 m nad jejím dnem. Pracovní fáze postupného zaplavování stavební jámy popílkem ukazují obr. 11 a 12. Po vybetonování ostění hloubených tunelů zaplavování pokračovalo min. do úrovně vrcholu klenby dálničních tunelů.

ZPŮSOB VYZTUŽOVÁNÍ A BETONÁŽ OSTĚNÍ

Kromě atypických portálových bloků betonáže jsou všechny bloky tunelu betonovány do posuvného bednění délky 12,5 m. Návrh správné receptury betonu je prvním krokem k úspěchu a musí odpovídat specifikům tunelového ostění. Jiné nároky



Obr. 11 První fáze zaplavování střední jámy popílkem
Fig. 11 First phase of flooding of the mid-point construction trench with fly ash

3MPa after two days and 28 days, respectively. Under these assumptions, the maximum rate of 0.5m per day was prescribed for flooding the pit. The method statement permitted the maximum contingent asymmetry between flooding of the right-hand and left-hand parts of the structure of 0.5m. It was further proved by a structural analysis that, with respect to the loads on the lining of the cut-and-cover tunnels by concrete mixture, it was necessary to flood the construction pit up to the level of 2.5m above the bottom, thus to support the false primary lining. The working phases of the gradual flooding of the construction pit with fly ash are presented in Figures 11 and 12. When the casting of the lining concrete of the cut-and-cover tunnels was finished, the process of flooding continued minimally up to the level of the top of the vault of the motorway tunnels.

CONCRETE REINFOREMENT SYSTEM AND CASTING OF LINING CONCRETE

With the exception of atypical concrete casting portal blocks, the concrete of all tunnel blocks is poured behind 12.5m long traveller formwork. A proposal for a correct concrete formulae is the first step to success. It has to correspond to the tunnel lining specifics. Other requirements are imposed on concrete for cut-and-cover tunnels, other ones on reinforced concrete liners, other on unreinforced linings of mined tunnels. An important role in this field is played by the build-up of strength during the initial phase after casting the concrete and the development of hydration heat. Portal concrete casting blocks are not at all supported after stripping of the formwork and the concrete is always reinforced. The design prescribed the stripping strength of 10MPa at the top of the vault so that the self-supporting capacity of the structure is guaranteed and the bond between concrete and steel is not corrupted or excessive deformations do not develop.

A better situation from the aspect of boundary conditions can be expected in the case of cut-and-cover tunnels where concrete is cast behind a false primary lining which is braced by muck backfill or even flooded with fly ash. In this way of bracing the cut-and-cover tunnels are already approaching the boundary conditions in the mined sections of the tunnel, where the lining vault is “inserted” into the primary lining, respectively into the excavated opening, along the entire circumference. According to the conditions of the tender design, the casting of secondary lining concrete is permitted at the moment when the rate of the primary lining deformations does not exceed 2mm per month. The stripping strength of 6MPa at the top of the vault is prescribed for the reinforced concrete lining of mined tunnel sections, whilst the minimum stripping strength of 4.5MPa had to be applied according to the TKP26/2015 specifications to unreinforced concrete linings despite the fact that the project STQS permitted the stripping strength of 3MPa. According the Austrian regulation [2] this value is already identified as risky from the aspect of the creation of cracks. It recommends the strength value within the interval between 2MPa up to 3MPa.

The secondary lining concrete casting rate varies between 4 to 5 blocks per week (7 days), i.e. 50m to 62.5m of the tunnel. The most complicated element of the formwork is a special extension of the traveller form in the location of an emergency lay-by. This so-called “backpack” is assembled in the



Obr. 12 Zaplavení falešného ostění pod vrchol klenby tunelové propojky
Fig. 12 Flooding the false lining under the top of the tunnel cross passage vault

jsou kladeny na beton hloubených tunelů, jiné na vyztužené, jiné na nevyztužené ostění ražených tunelů. Významnou roli přitom hraje nárůst pevnosti v počáteční fázi po betonáži a vývin hydratačního tepla. Portálové bloky betonáže nejsou po odbednění ničím podepřeny a jsou vždy vyztuženy. Aby byla po odbednění zaručena samonosnost konstrukce a nedošlo vlivem deformace k porušení soudržnosti mezi betonem a ocelí nebo nedošlo k nadměrné deformaci, byla projektem stanovena odbedňovací pevnost ve vrcholu klenby na 10 MPa.

Lepší situaci z hlediska okrajových podmínek lze očekávat u hloubených tunelů betonovaných do falešného primárního ostění rozepřeného zásypem z rubaniny nebo dokonce zaplaveného popílkem. Tímto způsobem rozepření se již konstrukce hloubených tunelů blíží okrajovým podmínkám v ražených úsecích tunelu, kdy je klenba ostění po celém obvodě uložena do primárního ostění, resp. do výrubu. Betonáž sekundárního ostění smí být podle požadavků zadávacích podmínek zahájena v okamžiku, kdy rychlost deformace primárního ostění nepřekročí 2 mm/měsíc. Pro vyztužené ostění ražených úseků tunelu je předepsána odbedňovací pevnost ve vrcholu klenby 6 MPa, pro nevyztužené ostění bylo nutné podle TKP26/2015 použít odbedňovací pevnost min. 4,5 MPa, ačkoli ZTKP stavby připouštěly odbedňovací pevnost min. 3 MPa. Podle rakouského předpisu [2] je tato hodnota již označena jako riziková z hlediska vzniku trhlin a doporučuje hodnotu pevnosti v intervalu mezi 2 MPa až max. 3 MPa.

Rychlost betonáže sekundárního ostění se pohybuje 4 až 5 bloků za týden (7 dní), což představuje 50 m až 62,5 m tunelu. Nejkomplikovanějším prvkem bednění je speciální nástavba bednicího vozu v místě nouzového zálivu. Tento tzv. „ruksak" je v zálivu smontován po montáži samonosné výztuže a po příjezdu bednicího vozu do zálivu je k němu připevněn. Nouzový záliv šířky 14,5 m a výšky téměř 9 m je v místě zaústění tunelové propojky nejnáročnějším místem jak z hlediska bednění, tak i z hlediska montáže výztuže. Do něj se v ose bloku betonáže zaúsťuje tunelová propojka o šířce 6 m a výšce 5,2 m. Na obr. 13 je samonosná výztuž nouzového zálivu se zaústěním do tunelové propojky a vynecháním výztuže v místě čela bloku betonáže. Vpravo stojí nástavec bednicího vozu pro bednění zálivu.

Zvláštní kapitolou v postupu betonáže ostění jsou chráničky, které slouží pro vedení kabelů k jednotlivým prvkům technologického vybavení tunelu. Chráničky jsou nejvýše v trojicích vedeny z kabelových šachet umístěných pod tunelovým chodníkem do ostění bočních stěn tunelu. Chráničky jsou ve vyztužených úsecích tunelu upevněny na výztuž ostění. V nevyztužených úsecích tunelu jsou upevněny k speciálně instalovaným ocelovým rámům. Alternativně je možné chráničky umístit do „rukávů"

emergency lay-by after the installation of the self-supporting reinforcement and is mounted on the traveller formwork after its arrival. The 14.5m high and nearly 9m wide emergency lay-by at the mouth of the tunnel cross passage is the most complicated place both from the aspect of formwork and from the aspect of the installation of concrete reinforcement. The 6m wide and 5.2m high mouth of the tunnel cross passage is connected to the lay-by on the block axis. The self-supporting reinforcement of the emergency lay-by with the connection to the tunnel cross passage and the reinforcement omitted in the location of the casting block stop end is presented in Fig. 13. The traveller lay-by formwork extension piece stands on the right side.

A special chapter in the lining concrete casting procedure is dedicated to protective pipes used for cable lines leading to individual elements of the tunnel equipment. The protective pipes are led at the most in triads from cable shafts placed under the surface of tunnel walkways and run in the lining around the whole circumference of the tunnel. In the reinforced concrete tunnel sections the protective pipes are fixed to the lining concrete reinforcement. In unreinforced concrete tunnel sections they are fixed to specially installed steel frames. It is alternatively possible to place the protective pipes into waterproofing membrane "sleeves" torched on the tunnel waterproofing layer. In this way the quantity of concrete reinforcement is further minimised.

UNREINFORCED CONCRETE LINING, DESIGN AND CONTRACTUAL RELATIONSHIPS

Unreinforced concrete secondary lining has a long tradition in Slovakia. It was already used at the first motorway tunnel driven using the NATM, the 4975m long Branisko tunnel, which was opened to traffic in 2003. The geotechnical conditions encountered along the route of both tunnel tubes allowed for using unreinforced concrete linings even in the Považský Chlmec tunnel, in sections featuring minimum deformations and good quality ground conditions. The condition survey of each excavation face was carried out in each excavation round during the course of the tunnel excavation, with drawing the dips of geological layers and their interfaces, describing water inflows and their yields and describing the quality of the ground mass encountered. In the NTT and STT, 894 headings and even 1112 headings, respectively, were documented in this way in the top heading. According to the tunnel chainage, the corresponding condition survey was assigned to the secondary lining concrete casting blocks and



Obr. 13 Samonosná výztuž a bednění nouzového zálivu
Fig. 13 Self-supporting reinforcement and formwork of an emergency lay-by

z hydroizolační fólie natavené na tunelovou izolaci. Tím se dále minimalizuje množství výztuže v ostění.

NEVYZTUŽENÉ OSTĚNÍ, PROJEKT, PROVÁDĚNÍ A SMLUVNÍ VZTAHY

Nevyztužené sekundární ostění má na Slovensku dlouholetou tradici a bylo použito již na prvním dálničním tunelu raženém pomocí NRTM, tunelu Branisko délky 4975 m, uvedeném do provozu v roce 2003. Geotechnické poměry zastižené v trase obou tunelových trub umožnily i v tunelu Považský Chlmec v úsecích s minimálními deformacemi výrubu a kvalitním horninovým prostředím použití nevyztuženého ostění. Při ražbě tunelu byla v každém záběru prováděna pasportizace čelby se zakreslením sklonů geologických vrstev a rozhraní, popisem přítoků vody a jejich vydatnosti a popisem kvality zastižených hornin. V severní tunelové troubě bylo tímto způsobem v kalotě tunelu zdokumentováno 894 čeleb, v jižní tunelové troubě dokonce 1112 čeleb. Podle tunelového staničení byla odpovídající pasportizace čeleb přiřazena blokům betonáže sekundárního ostění a ražená část tunelu rozdělena na kvazihomogenní celky.

O použití nevyztuženého ostění rozhodl projektant realizační dokumentace na základě vyhodnocení kvality masivu v daném bloku betonáže, podle výsledků měření deformace výrubu a výsledků statických výpočtů. V jižní tunelové troubě s délkou raženého úseku 2120,5 m je nevyztužené ostění použito v celkové délce 1262,5 m (59,5 %), v severní tunelové troubě s délkou raženého úseku 2200 m je nevyztužené ostění použito v celkové délce 1325 m (60,2 %).

Na rozdíl od železobetonu, kde je možné vznik trhlin regulovat způsobem vyztužení průřezu, jsou u prostého betonu nástroje k omezení vzniku i vývoje šířky trhlin značně omezené. Jedná se o vhodný návrh betonové směsi, správný technologický postup provádění a vhodně zvolený okamžik odbednění a ošetřování betonu po odbednění. Návrh betonové směsi je značně závislý na možnosti využití místních zdrojů a vyladění receptury po stránce reakce cementu a chemických přísad. V případě betonu pevnostní třídy C25/30 XF2 se podařilo Ing. Mikovi z firmy Beton Bohemia nalézt recepturu s požadovaným hydratačním teplem i nárůstem pevnosti betonu v počáteční fázi po betonáži. V případě betonu C30/37 XF4, který je předepsán do vzdálenosti 300 m od portálu, byla situace vzhledem k nutnému množství cementu složitější.

Opatřením k omezení vzniku trhlin byla věnována pozornost zejména ve fázi po odbednění při ošetřování konstrukce proti tepelnému šoku a vysychání. Jako zásadní se ukázalo rozhodnutí zhotovitele použít pro omezení tepelného šoku ošetřovací vůz délky 25 m (dva bloky betonáže), který je tažen bezprostředně za bednicím vozem a chrání konstrukci v okamžiku, kdy hydratační teplo dosahuje maximálních hodnot. Ošetřovací vůz tvoří ocelová konstrukce, na kterou je připevněna tepelně izolační fólie. Na

the mined tunnel section was divided into quasi-homogeneous units.

The author of the design of means and methods decided on the use of the unreinforced concrete lining on the basis of the assessment of ground mass quality in particular concrete casting blocks, according to the results of measurements of deformations of the excavated opening and results of structural analyses. In the STT, where the mined section is 2120.5m long, the unreinforced concrete lining is used at the total length of 1262.5m (59.5 %), in the NTT, where the mined section is 2200m long, the unreinforced concrete lining is applied to the total length of 1325m (60.2 %).

In contrast with reinforced concrete, where the origination of cracks can be regulated by the design of the cross-section reinforcement, the tools for restricting the origination and development of the width of cracks are significantly limited. They comprise an appropriate design of concrete mixture, a correct technological procedure of works, an appropriately chosen moment of stripping and curing the concrete after stripping. The concrete mixture design is significantly dependent on the possibility of using local sources and tuning the formulae from the aspect of the reaction of cement and chemical agents. In the case of the C25/30 XF2 concrete grade, Ing. Míka from Beton Bohemia managed to find formulae with required hydration heat and concrete strength build-up in the initial phase after casting the concrete. In the case of the C30/37 XF4 concrete grade, which is prescribed up to the distance of 300m from the portal, the situation was more complicated due to the necessary amount of cement.

Measures designed to restrict the origination of cracks were paid attention mainly in the phase after stripping the formwork, during curing of the concrete structure designed to prevent thermal shocks and drying out. Contractor's decision to use a 25m long concrete curing travelling scaffold which was towed immediately behind the traveller formwork and protected the structure at the moment when the heat of hydration reached maximum values, turned out to be crucial. The concrete curing travelling scaffold is formed by a steel structure with a thermally insulating membrane attached to it. At the beginning, in the middle and at the end of the scaffold there are inflatable collars installed around the whole circumference (see Fig. 14). When the curing scaffold setting is finished, the collars are inflated, thus the space between the thermally insulating membrane and the tunnel lining is sealed. The microclimate created in this way protects the structure against rapid cooling and drying out. Taking into consideration the fact that one concrete casting cycle from setting the travelling formwork into position through casting concrete, the required strength build-up and formwork stripping takes ca 30-35 hours, each concrete casting block is protected for 60 to 70 hours after stripping.

Even though unreinforced linings have already been used in Slovakia in several tunnels, no rules exist yet to define the conditions when the structure is handed by the contractor over to the client as far as the origination and development of cracks is concerned. With respect to the fact that the measures designed to restrict them are limited, their origination is, for the above-mentioned reasons, virtually unavoidable. Their existence is in the majority of the cases without negative impacts on the load-carrying capacity or the utility function of the lining. Defining the rules for the structure handover/takeover represents rather making administrative



Obr. 14 Ošetřovací vůz pro snížení teplotního šoku
Fig. 14 Concrete curing travelling scaffold for reducing the thermal shock

začátku, v prostředku a na konci vozu jsou po celém obvodě nainstalovány nafukovací manžety, jak ukazuje obr. 14. Po ustavení ošetřovacího vozu jsou manžety nafouknuty, a tak utěsněn prostor mezi tepelně izolační fólií a ostěním tunelu. Vzniklé mikroklima chrání konstrukci jak před rychlým ochlazením, tak před vysycháním. Vzhledem k tomu, že jeden cyklus betonáže od ustavení bednicího vozu přes betonáž, požadovaný náběh pevnosti a odbednění trvá cca 30–35 hodin, je každý blok betonáže chráněn 60 až 70 hodin po odbednění.

I když je nevyztužené ostění na Slovensku použito již na na více tunelech, neexistovala až do konce roku 2016 pravidla, která by definovala podmínky při převzetí konstrukce mezi objednatelem a zhotovitelem z hlediska vzniku a rozvoje šířky trhlin. Vzhledem k tomu, že opatření k jejich omezení mají své limity, jejich vznik je z dříve uvedených důvodů prakticky nevyhnutelný a jejich existence je v převážné většině případů bez negativního dopadu na nosnou či užitnou funkci ostění, představuje definování pravidel pro předání/převzetí konstrukce spíše administrativní zprůhlednění vztahů ve výstavbě. Kritéria pro přípustnou šířku trhliny nevyztuženého ostění lze najít i v zahraničních směrnicích pro projektování a provádění tunelů [3], [4], [6], [7], [8], [9]. Zadavatel těmito kritérii deklaruje, že mu je problematika vzniku trhlin známá a jejich existenci v definovaném rozsahu připouští. Zhotovitel tím bere na vědomí, že je povinen v možné míře vznik a vývoj trhlin pomocí opatření při výstavbě omezit a v případě jejich nadlimitního množství či šíře provede na své náklady jejich sanaci.

V České republice tato diskuse proběhla v souvislosti s prováděním nevyztuženého ostění na tunelu Libouchec na dálnici D8, který byl uveden do provozu v roce 2006. Kritéria vzniku a vývoje trhlin nevyztuženého ostění, která tehdy vznikla jako konsenzus projektanta realizační dokumentace a zástupců ŘSD ČR, byla v obdobném znění implementována do revize technicko-kvalitativních podmínek TKP18 Beton pro konstrukce z ledna 2016 [5].

ZÁVĚR

Sekundární ostění tunelu Považský Chlmec je navrženo na základě vyhodnocení informací o geotechnických poměrech v trase tunelu získaných po jeho vyražení. Šířkové uspořádání tunelu kategorie T2-8 s šířkou komunikace 8 m, optimalizace tvaru tunelu provedená v počátcích projekčních prací a s ní spojené příznivější namáhání tunelového ostění zvýšilo šanci na použití nevyztuženého ostění, které je v tunelu nasazeno na 60 % délky jeho ražených úseků. I přes velké obavy zástupců stavebního dozoru ze

relationships in construction more transparent. Criteria for the allowable width of a crack in an unreinforced concrete lining can be found even in foreign directives on designing and constructing tunnels [3], [4], [6], [7], [8], [9]. Through these criteria the contracting entities declare that the problems of the origination of cracks are known to them and their existence within the defined scope is acceptable for them. By accepting the criteria the contractors note that they are obliged to restrict the origination and development of cracks during the course of the construction to the extent possible and, in the case of their amount or width exceeding the limits, to repair them at their own cost.

In the Czech Republic this discussion took place in the context of the construction of the unreinforced concrete lining in the Libouchec tunnel on the D8 motorway, which was opened to traffic in 2006. The criteria for the origination and development of cracks in unreinforced concrete liners originated then as a consensus between the author of the design of means and methods and representatives of the Road and Motorway Directorate of the Czech Republic. They were implemented in similar wording into the review of technical and quality specification TKP18 for structural concrete from January 2016 [5].

CONCLUSION

The Považský Chlmec tunnel secondary lining is designed on the basis of the assessed information on geotechnical conditions along the tunnel route gathered after the completion of the tunnel excavation. The tunnel roadway configuration T2-8 with the roadway width of 8m, the optimisation of the tunnel cross-sectional geometry carried out at the beginning of the work on the design and the more favourable stressing of the tunnel lining associated with it increased the chances of using the unreinforced concrete lining, which has been implemented to 60% of the length of the tunnel length. Despite the great concern of representatives of the Engineer of the formation of cracks in the unreinforced lining, cracks in the lining have been successfully virtually eliminated during the initial months after casting the concrete owing to the correctly designed concrete formulae and adherence to the construction procedure.

The cracks in the lining may have even a structural cause. The secondary lining concrete is cast after the stabilisation of the deformations of the primary lining. The tunnel lining is designed for the rock pressure which is currently transferred by the primary lining and which would start to act on the lining in the case of the degradation of the primary lining and anchors reinforcing the rock ring in the excavation surroundings. The primary lining quality tests conducted on samples taken from linings of Austrian tunnels in the context of the construction of second tunnel tubes show that sprayed concrete is in very good condition even after 30 years after the tunnel opening to traffic [10] and the primary lining is still capable of transferring rock pressures. It is therefore a question when the secondary lining will really be loaded by the combinations of the loads assumed in structural analyses.

After the optimisation of the technical solution the number of concrete casting blocks in the STT was reduced from 222 to 175 and in the NTT from 229 to 180. The number of emergency lay-bys was reduced from three to two. The experience of HOCHTIEF CZ a. s. with constructing tunnels abroad

vzniku trhlin v nevyztuženém ostění se daří díky správně navržené receptuře betonu a dodržování technologického postupu výstavby trhliny v ostění v prvních měsících po betonáži prakticky eliminovat.

Trhliny v ostění mohou mít i statickou příčinu. Betonáž probíhá po ustálení deformací primárního ostění. Ostění tunelu je dimenzováno na horninový tlak, který je v současné době přenášen primárním ostěním a který by na ostění dolehl v případě degradace primárního ostění i kotev vyztužujících nosný horninový prstenec v okolí výrubu. Zkoušky kvality primárního ostění prováděné na vzorcích odebraných z ostění rakouských tunelů v souvislosti s výstavbou druhých tunelových trub ukazují, že stříkaný beton je i po 30 letech po uvedení tunelu do provozu ve velmi dobré kondici [10] a primární ostění je schopné horninový tlak přenášet. Je proto otázkou, kdy bude sekundární ostění skutečně zatíženo kombinacemi zatížení předpokládanými ve statickém výpočtu.

Po optimalizaci technického řešení se oproti zadávací dokumentaci snížil počet bloků betonáže v JTT z 222 ks na 175 ks a v STT z 229 ks na 180 ks. Počet nouzových zálivů se snížil ze tří na dva. Při výstavbě jsou uplatňovány zkušenosti firmy HOCHTIEF CZ a. s. s prováděním tunelů v zahraničí a při návrhu technologických postupů projektant i zhotovitel spolupracují se specialisty z mateřské firmy v SRN.

Tunel Považský Chlmec realizuje pro investora NDS a. s. firma HOCHTIEF CZ a. s.. Geotechnický monitoring po dobu výstavby provádí firma ARCADIS CZ a.s., stavební dozor investora zajišťuje sdružení firem EUTECH&ESP&MULLER&API-D3. Geodetické práce při ražbě i betonáži sekundárního ostění provádí firma Angermeier Engineers, s.r.o. a návrh betonové směsi i konzultace při realizaci poskytuje firma BETON Bohemia ZL s. r. o. Realizační dokumentaci zpracovává projekční složka firmy HOCHTIEF CZ a. s. Funkci geotechnického dozoru na stavbě během ražeb prováděla firma 3G Consulting Engineers s.r.o. Pohled přes portálový blok směrem k estakádě přes Hričovskou vodní nádrž (obr. 15) ukazuje náročnost staveb na úseku dálnice D3 Žilina (Strážov) – Žilina (Brodno) a je symbolickým příslibem zdárného dokončení díla.

Ing. LIBOR MAŘÍK, Libor.Marik@hochtief.cz,
HOCHTIEF CZ a. s.

Recenzovali Reviewed: prof. Ing. Jiří Barták, DrSc.,
prof. Ing. Matouš Hilar, MSc., Ph.D.



Obr. 15 Portál tunelu a návaznost na estakádu přes Hričovskou vodní nádrž
Fig. 15 The tunnel portal and continuation to the viaduct over Hričov water reservoir

was applied during the construction and the designer and the contractor collaborate with specialists from the mother company in the FRG.

The Považský Chlmec tunnel is realised by HOCHTIEF CZ a. s. for the project owner, NDS a. s. (National Motorway Company). Geotechnical monitoring during the construction works is carried out by ARCADIS CZ a.s., client's site supervision is ensured by a consortium of companies EUTECH&ESP&MULLER&API-D3. Surveying is carried out during the excavation and casting of secondary lining concrete by Angermeier Engineers, s.r.o. and concrete mixture is designed and consultancy during the realisation is provided by BETON Bohemia ZL s. r. o. The design of means and methods is carried out by the designing organisational unit of HOCHTIEF CZ a. s. The function of geotechnical supervision on the site during the tunnel excavation was performed by 3G Consulting Engineers s.r.o. A view through the portal block toward the viaduct over Hričov water reservoir (see Fig. 15) documents the demands of structures on the Žilina (Strážov) – Žilina (Brodno) section of the D3 motorway and is a symbolic promise of the successful completion of the works.

Ing. LIBOR MAŘÍK, Libor.Marik@hochtief.cz,
HOCHTIEF CZ a. s.

LITERATURA / REFERENCES

[1] Technicko-kvalitatívne podmienky MDVRR SR, TKP časť 26 Tunely, 07/2015
[2] Richtlinie Innenschalenbeton, Österrechische Bautechnik Vereinigung, 12/2012
[3] Richtlinie 853 – Eisenbahntunnel planen, bauen und instand halten, DB Netz AG, 01/2013
[4] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten ZTV-ING, Teil 5 Tunnelbau, Abschnitt 1 Geschlossene Bauweise. Bundesanstalt für Bauwesen, 12/2014
[5] Technické kvalitativní podmínky staveb pozemních komunikací, Kapitola 18 Betonové konstrukce a mosty. Ministerstvo dopravy, odbor pozemních komunikací, leden 2016
[6] Richtlinie Bewertung und Behebung von Fehlstellen bei Tunnelinnenschalen. Österrechische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, April 2009
[7] Empfehlungen zu Ausführung und Einsatz unbewehrter Tunnelinnenschalen, Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen (DAUB) – Arbeitskreis „Unbewehrte Tunnelinnenschalen" – Stand: 24. April 2007
[8] Kriterien für die Anwendung von unbewehrten Innenschalen für Straßentunnel, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenierbau, Heft B92, April 2013
[9] PÖTTLER, R. Die unbewehrte Innenschale im Felstunnelbau – Standsicherheit und Verformung im Rissbereich. *Beton- und Stahlbetonbau*, Juni 1993
[10] VOGEL, F., SOVJÁK, R., HOLČAPEK, O., MAŘÍK, L., ŠACH, J. Experimental Study of Primary Lining Tunnel Concrete after Thirty Years of Operation. *Applied Mechanics and Materials*. Vol. 732, pp. 403-406, Feb. 2015