

SPECIFIKA NAVRHOVÁNÍ HLOUBENÝCH TUNELŮ A PŘÍKLADY Z REALIZACE

SPECIFICS OF DESIGNING CUT-AND-COVER / COVER-AND-CUT TUNNELS; EXAMPLES OF IMPLEMENTATION

LIBOR MAŘÍK

ÚVOD

Pohled na domácí i zahraniční tunelářskou scénu nabízí v případě publikovaných článků i příspěvků na konferencích řadu témat z oblasti ražených úseků tunelů. Konvenční tunelovací metody i ražba pomocí štítů poskytují širokou paletu problémů spojených jak s technologií ražby, tak s očekávanými či neočekávanými geotechnickými podmínkami, které je nutno během ražby zvládnout. I u nás již zdomácnělou NRTM stále ještě halí jemná rouška tajemství a skrytých pochybností, jak to vlastně ve skutečnosti funguje. Diskuse o životnosti a únosnosti primárního ostění nebo polemiky o významu kotvení jako podpůrného opatření ke zvýšení samonosnosti horninového masivu odsouvají problematiku hloubených úseků tunelů na vedlejší kolej. Přitom se jedná o oblast, která je s výstavbou tunelů nerozlučně spjata a která vyžaduje při projektování i provádění minimálně stejnou pozornost, jaká je věnována raženým úsekům tunelů. Vzhledem k charakteru konstrukce, jejímu uložení do okolního prostředí i působícímu zatížení lze říci, že hloubené tunely reagují mnohem citlivěji na případná pochybení nebo odchylky od prognózovaného stavu. Zatímco v případě ražených úseků tunelů můžeme ještě spoléhat na mnohdy milosrdný horninový masiv a doufat v jeho větší či menší samonosnost, u hloubených úseků tunelů se projektant ani zhotovitel na obdobnou pomoc spoléhat nemůže a nesmí. V následujícím textu se na příkladech z realizovaných nebo pro realizaci připravených tunelů zabýváme některými oblastmi, které mohou úspěšný návrh a následnou realizaci hloubených úseků tunelů významně ovlivnit.

NAVŘH DIMENZÍ OSTĚNÍ – ZATÍŽENÍ ZNÁMÉ, ČI NEZNÁMÉ?

Při navrhování primárního i definitivního ostění ražených úseků tunelů bývá zpravidla velkou neznámou zatížení horninovým, případně hydrostatickým tlakem. Při jeho určení sahá projektant ve většině případů ke složitým výpočtům pomocí matematických modelů. Přesné výpočty zatěhuje řada nepřesných nebo obtížně zjistitelných vstupních hodnot a okrajových podmínek. Interpretace výsledků vyžaduje značné zkušenosti a určitý nadhled, neboť postižení geotechnických poměrů v trase tunelu pomocí matematického modelu znamená vždy určité zjednodušení reálného stavu. S velkou úlevou se proto projektant uchyluje k výpočtům hloubených úseků tunelů, kde sice musí řešit otázku okrajových podmínek v oblasti základových konstrukcí nebo s ohledem na stanovení tuhosti zásepového materiálu. Určení zatížení zásepem však na první pohled nepředstavuje žádný problém. Určité komplikace při dimenzování ostění hloubených úseků tunelů představuje nesymetrické zatížení. Nesymetrie zatížení může být způsobena jednak konečnou podobou reliéfu terénu nad zasypávaným tunelem, jednak obtížně dosažitelnými požadavky na hutnění při použití mechanizace ve stísněných poměrech stavební jámy. Obě příčiny se mohou navíc sečítat.

K typickým příkladům nesymetricky zatížených úseků hloubených tunelů vlivem reliéfu terénu patří dvoukolejný železniční tunel Vepřek na prvním železničním koridoru Praha–Děčín–Dráždany. Směrové poměry stávající trati vedené podél břehu řeky Vltavy neumožňovaly dosažení vyšší traťové rychlosti. Úprava směrových poměrů vyvolala nutnost vedení trati v úbočním tunelu s velmi nepříznivým úhlem zaražení tunelu v oblasti obou portálů. Tomu odpovídal tvar stavebních jam hloubených úseků tunelů i úroveň zpětného zásepů (viz obr. 1). Hloubka svahovaných stavebních jam dosahovala v místě rozhraní hloubené a ražené části 30 m. Konečný příčný sklon terénu, prováděný v poměru 1:2 až 1:3, vyvolával kvůli nesymetrii výšky zásepů v ostění tunelu nesymetrické namáhání, které mělo rozhodující vliv na návrh vyztužení. Při tloušťce ostění min. 600 mm se vyztužení na straně přivrácené ke svahu markantně lišilo od strany přiléhající k Vltavě. Na základě statického posouzení postupných fází zasypávání konstrukce i konečné úrovně zásepů navrhl projektant pracovní postup provádění zásepů, který zhotovitel velmi důsledně dodržoval. Principem bylo zahájení zásepů na straně tunelu přivrácené k řece, důsledné hutnění zásepového materiálu na předepsané parametry a dodržování rozdílu úrovně zásepů vlevo

INTRODUCTION

A look at the domestic and foreign tunnelling stage offers, as far as articles and contributions published at conferences are concerned, a wide range of topics from the field of mined tunnels. Both the conventional underground excavation methods and the shield driving method offer lots of problems associated with both the excavation technique and the expected or unexpected geotechnical conditions which had to be coped with during the excavation. Even the NATM, which has become established in the Czech Republic, is still shrouded in secrecy and hidden doubts as to how it works in reality. Discussions about durability and load-bearing capacity of a primary lining or polemics on the importance of anchoring as a supporting measure designed to increase the self-supporting capacity of ground mass put the problems of cut-and-cover / cover-and-cut tunnels off the track, without respect to the fact that this area is inseparably connected with tunnel construction and the work on designs and construction requires at least the same level of attention as the work on mined tunnel sections. It is possible to say that, with respect to the character of the structure, its placement into the surrounding environment and the loads acting on it, cut-and-cover / cover-and-cut tunnels respond much more sensitively in the case of mistakes or deviations from the predicted condition. While in the case of mined tunnel sections we can still rely on the often merciful ground mass and hope for higher or lower self-supporting capacity of the mass, there is not and must not be any similar help for the designer or contractor to rely on in the case of cut-and-cover / cover-and-cut tunnels. In the following text, we deal with some areas which can significantly affect a successful design and the subsequent implementation of cut-and-cover / cover –and-cut tunnels, using previously completed tunnels or tunnels which are prepared for construction as examples.

DESIGNING DIMENSIONS OF A LINING – ARE THE LOADS KNOWN OR UNKNOWN?

When a primary or final lining of mined tunnel sections is being designed, the confining pressure or hydrostatic pressure is usually a great unknown. When determining it, the designer mostly falls back upon complicated calculations using mathematical models. Exact calculations are burdened by a range of inaccurate or hard to determine input values and boundary conditions. Interpreting the results requires significant experience and a certain detached attitude because expressing geological conditions along a tunnel alignment by means of a mathematical model always means certain simplification of the real state. This is why the designers have, with great relief, recourse to calculations for cut-and-cover tunnels, where, on the one hand, they must deal with the issue of boundary conditions in the area of foundation structures or take into consideration the determination of the backfill



Obr. 1 Asymetrická stavební jáma tunelu Vepřek
Fig. 1 Asymmetric construction trench – the Vepřek tunnel



Obr. 2 Postupné obsypávání tunelu podle rysek na geotextilii
Fig. 2 Gradual backfilling of the tunnel according to marks on the geotextile

a vpravo konstrukce do max. 1 m. Zdrojem fatální chyby mohla být záměna výztuže na levé a pravé straně ostění. Výkresy výztuže proto projektant doplnil o popis „k hoře“ a „k řece“, které jednoznačně určovaly, kam má být výztuž v konstrukci umístěna. Zhotovitel přistoupil k navrženému technologickému postupu velmi zodpovědně a výstavba proběhla bez komplikací. Technologický postup hutnění usnadňovalo značení jednotlivých úrovní hutnění, které zhotovitel vyznačil na geotextilii, která sloužila jako ochrana hydroizolační fólie (viz obr. 2).

Hlubené tunely v oblasti portálu Komořany stavby 513 silničního okruhu kolem Prahy (SOKP) představují příklad, který se zpočátku jevil z hlediska zatížení jako zcela bezproblémový. Dva paralelní tubusy hlubných tunelů délky 170 m, prováděných v pažené stavební jámě šířky 50 m a hloubky téměř 30 m, překrývala v nejhlubším místě jámy vrstva až 15 m horizontálně uloženého zásypového materiálu. Zatímco volný prostor mezi oběma tunely dosahoval u portálu šířky jen 4 m, mezi bokem tunelu a pažením stavební jámy volná šířka nepřekračovala 1,5 m. Do tohoto již tak velmi úzkého prostoru zasahovaly jednak převázky a hlavy lanových kotev stabilizujících pažení stavební jámy, jednak výklenky pro kabiny SOS, které se zadní stěnou opíraly o pažení a uzavíraly tak průchod do dalšího úseku jámy (viz obr. 3). Celou situaci komplikovaly i základové poměry. I když se podle prognózy stanovené na základě IG průzkumu měly mělce pod masivní základovou klenbou již nacházet jílovité břidlice, zastihl zhotovitel při hloubení stavební jámy mohutnou vrstvu písků. Na tuto skutečnost bylo nutné rychle reagovat a na způsob provádění a ochrání základové spáry nepanoval jednotný názor. Zaznívaly hlasy prosazující přehutnění nebo dokonce výměnu podloží. Vzhledem k jemnozrnnosti a mocnosti vrstvy písků nakonec převážil názor na ponechání ochranné vrstvy rostlého materiálu tloušťky min. 1 m a tvarování základové spáry s ústupem tak, aby nebyla pojižďena mechanizmy. Po vytvarování spáry do tvaru klenby následoval ochranný nástřik betonu, betonáž podkladního betonu a montáž výztuže. Pokud došlo z jakéhokoli důvodu k nakypření základové spáry, byl materiál vyměněn za vrstvu monolitického betonu. Práce probíhaly za přísného dozoru investora i zhotovitele a po úspěšném založení proběhla stejně



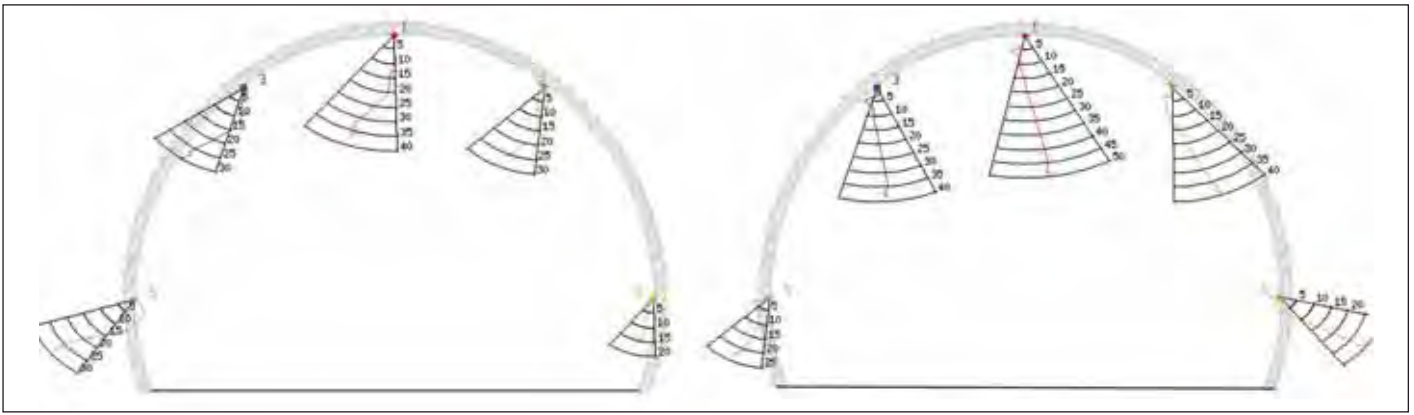
Obr. 3 Omezený prostor ve stavební jámě Komořany tunelů stavby 513
Fig. 3 Constricted space in the Komořany construction trench for the PCCR 513 tunnels

material toughness, on the other hand, determining the load exerted by the backfill does not pose, at first glance, any problem. Certain complications are posed by asymmetric loading when dimensions of the lining of cut-and-cover tunnels are being calculated. The asymmetry can be caused either by the final shape of the surface relief above the backfilled tunnel or by hard to meet requirements for compaction using machines in constricted construction trench conditions. In addition, the two causes may take place simultaneously.

The double-rail Vepřek tunnel on the first rail corridor between Prague – Děčín – Dresden is one of typical examples of sections of cut-and-cover tunnels loaded asymmetrically due to the surface relief. The horizontal alignment of the existing track, running along the Vltava River, did not allow increasing the speed limit over the track. A change in the horizontal alignment brought about the necessity of leading the track through a hillside tunnel with a very unfavourable angles of the tunnel entering the hill at both portals. The shape of the construction trenches for the cut-and-cover tunnels and the level of the backfill corresponded to this situation (see Fig. 1). The depth of sloped excavation trenches at the interface between the cut-and-cover and mined sections reached 30m. The final transverse slope of the terrain, which was carried out at a ratio of 1:2 to 1:3, induced, owing to the asymmetry of the backfill height, asymmetric stresses in the lining, which had the deciding effect on the reinforcement design. With the minimum thickness of the lining of 600mm, the reinforcement content on the side facing the slope markedly differed from the side adjacent to the Vltava River. The designer proposed a working procedure for the backfilling on the basis of a structural assessment of consecutive phases of backfilling of the structure and the final level of the backfill. The procedure was thoroughly adhered to by the contractor. The principle was that backfilling started on the tunnel side facing the river, the backfill material was consistently compacted to reach prescribed parameters and the maximum difference between the backfill levels on the left side and right side of the structure was held at 1m. Confusion in the installation of concrete reinforcement on the left side and right side of the lining structure could have become a source of a fatal error. For that reason the designer added a legend ‘toward the mountain’ or ‘toward the river’ in reinforcement



Obr. 4 Postup výstavby ve stavební jámě Komořany
Fig. 4 Construction procedure in the Komořany construction trench



Obr. 5 Deformace hloubených tunelů vlivem zasypávání
Fig. 5 Deformations of cut-and-cover tunnels due to backfilling

úspěšně i betonáž ostění hloubených úseků obou tunelů. Jednotlivé fáze postupu výstavby viz obr. 4, na kterém je patrná úprava základové spáry podkladním betonem, montáž výztuže a v pozadí probíhající betonáž spodní klenby tunelu. Provádění zpětných zásypů provázely komplikace spojené s nedostatečným prostorem mezi tunely a pažením stavební jámy. Ze statických důvodů bylo nutné u prvních 2 bloků betonáže před raženými tunely s nejvyšší vrstvou zásypu provést vyplnění prostoru mezi tunely a stěnou jámy i mezi oběma tubusy tunelů hlubným betonem, což zajistilo dostatečnou tuhost podepření boků tunelů. Bez tohoto opatření by nebylo možné konstrukci bez větších úprav nadimenzovat, i když tloušťka ostění dosahovala ve vrcholu klenby 1 m a do boků se rozšiřovala až na 2 m. Ve zbývajícím úseku s nižším nadloží byl pro zásyp stavební jámy použit na bocích tunelu písek a ve vyšších partiích jámy předrcená rubanina z tunelu. Vzhledem k prostorovým možnostem probíhalo hutnění mezi tunely a podél pažení stavební jámy různými mechanismy. Přes veškerou snahu se zřejmě nepodařilo dosáhnout stejné tuhosti zásypu po obou stranách konstrukce a následkem toho došlo k nesymetrickému zatížení konstrukce, přestože úroveň definitivního terénu po provedení zásypu je v příčném řezu vodorovná. Nesymetrii zatížení vlivem nerovnoměrného hutnění ukázala až geodetická měření deformace ostění, prováděná v měřickém profilu, obdobně jako tomu je při měření deformací primárního ostění. Pootočení a posun tunelu nezpůsobila v tomto případě neúnosnost podloží, ale způsob provádění zásypu, kdy docházelo k deformaci ostění směrem do obtížně zhutitelného zásypu na bocích tunelu. Tomu odpovídá na obr. 5 vektorové znázornění deformace ostění obou tunelových trub.

Zatímco na západním portále tunelu nebylo nutné měnit tvar konstrukce a navržená spodní klenba po úpravách odpovídala zastiženým geotechnickým podmínkám, na opačném portále navrhl projektant RDS po otevření stavební jámy úpravu způsobu založení hloubených tunelů. I když zóna zvětrání zasahovala do značné hloubky, v úrovni základové spáry již geotechnické parametry umožňovaly přechod z plošného založení tunelů na spodní klenbě na založení na patkách. Projektant se tím sice dostal při změně projektové dokumentace do časových problémů, ale zmenšení objemu zemních i betonářských prací, zjednodušení provádění i úspora investičních nákladů v řádu desítek milionů korun za to stála.

Nejmarkantnějším příkladem asymetrického zatížení hloubených tunelů je portálový úsek tunelu Libouchec na dálnici D8 v úseku z Ústí nad Labem na státní hranici ČR/SR. V případě jižního portálu tunelu Libouchec měla být východní tunelová trouba s ohledem na provádění zásypů a sklony násypových těles prodloužena v průběhu výstavby až o 24 m. Z prostorových důvodů nebylo možné zásadně měnit dispoziční uspořádání v oblasti portálu a posouvat provozně technologický objekt tunelu. Zásyp byl proto ukončen v úrovni vrcholu klenby tunelu a jeho východní bok přiléhající k provozně-technologickému objektu byl zcela obnažen. Estetické pojetí obkladu obnaženého boku tunelu v krajině Krušných hor ukazuje obr. 6. Ostění pod čedičovým obkladem je z vodonepropustného betonu.

VÝZNAM OPTIMALIZACE TVARU VÝKLENKŮ

Zatímco v případě ražených úseků tunelů je rubové bednění tvořeno primárními ostěním, u hloubených tunelů je nutné vybavit bednicí vůz kontra-bedněním. Součástí bezpečnostního vybavení silničních tunelů jsou výklenky skříní SOS, výklenky požárních hydrantů nebo výklenky šachet čištění boční tunelové drenáže, které zpravidla z ostění vystupují a komplikují provádění. U železničních tunelů je situace obdobná, neboť k bezpečnostním prvkům patří záchranné výklenky, jejich vzdálenost dosahuje max. 25 m. Výhodou u železničních tunelů je možnost umístění šachet

drawings, unambiguously marking the location for reinforcement bars where they were to be placed. The contractor's attitude to the proposed technological procedure was highly responsible; the construction was carried out without complications. The technological procedure for the compaction work was facilitated by marking of individual levels of the compacted backfill on either side. Marks were made on the geotextile protecting the waterproofing membrane (see Fig. 2).

The cut-and-cover tunnels in the area of the Komořany portal of the construction lot 513 of the Prague City Circle Road (PCCR) are an example of a construction which appeared in the beginning as absolutely trouble free as far as the loading was concerned. Two parallel 170m long tubes of the cut-and-cover tunnels, which were constructed in a 50m wide and nearly 30m deep construction trench, were covered in the deepest point of the trench by an up to 15m thick horizontally deposited backfill material. While the width of the free space between the two tubes reached a mere 4m at the portal, the free width of the gap between the tunnel side and the excavation bracing did not exceed 1.5m. In addition, walers and heads of cable anchors stabilising the construction trench bracing extended into this, anyhow very narrow, space. Recesses for SOS cabins also clogged this space. Rear walls of the cabins leaned against the bracing, thus hampering the passage along, to the neighbouring section of the construction trench (see Fig. 3). The whole situation was further complicated by the foundation conditions. Despite the fact that, according to the EG survey, clayey shales were to be found already at a shallow depth under a massive invert, the contractor encountered a huge layer of sand during the excavation of the construction trench. This fact had to be quickly responded to, but the opinion on the method of executing the work and protecting the foundation base was not unified. Voices were heard pushing through overcompaction or even replacement of the foundation bed. Taking into consideration the fineness of the sand and thickness of the sand layer, the opinion finally prevailed that an at least 1m thick protective layer of native material should be left untouched, and the foundation base be uncovered step by step to avoid driving of construction equipment on it. When the shaping of the foundation base into the shape of the inverted arch had been completed, a protective layer of shotcrete was applied, then blinding concrete was placed and reinforcement installed. If, for any reason, the foundation base got loosened, the loose material was replaced by a layer of cast-in-place concrete. The work proceeded under strict supervision by the owner and the contractor. When the foundation had been successfully completed, the lining of the cut-and-cover tunnel sections was cast with the same success. Individual phases of the construction procedure are presented in Fig. 4, showing the foundation base covered with blinding concrete, the installation of reinforcement and, in the background, the casting of the tunnel invert. The work on the backfill was accompanied by complications associated with the insufficient space between the tunnels and the bracing of the construction trench. For structural reasons, it was necessary at the two casting blocks adjacent to the mined tunnels to fill the space between the tunnels and the construction trench wall and between the two tunnel tubes with lean concrete. This action ensured sufficient rigidity of the support of tunnel sides. Without this measure, it would have been impossible to design dimensions of the structure without substantial measures, despite the fact that the thickness of the lining in the crown reached 1m and gradually increased on the sides up to 2m. In the remaining section where the overburden was higher, the backfill of the construction trench consisted of sand (on the tunnel sides) or crushed muck from the tunnel (in higher parts of the trench). Various types of compaction equipment were used, depending on the space available between the tunnel tubes and along the construction trench bracing. Despite all efforts, it is obvious that the attempt to achieve uniform rigidity of the backfill on



Obr. 6 Obklad jednostranně obnaženého portálového bloku tunelu Libouchec
Fig. 6 Cladding of the exposed side of the Libouchec tunnel portal block

čištění boční drenáže a napojovacích míst požárního suchovodu do záchranných výklenků, čímž se celkový počet výklenků zmenšuje. Z hlediska statické funkce ostění, bednění konstrukce i pokládky hydroizolační fólie je optimální, pokud tvar výklenků nezasahuje za rub ostění a celý výklenek lze zakomponovat do tloušťky ostění, která v opěři hloubených tunelů dosahuje značných rozměrů. Zatímco výklenky SOS nebo záchranné výklenky nelze vzhledem k jejich rozměrům do ostění integrovat, v případě výklenků požárních hydrantů a výklenků šachet čištění boční tunelové drenáže toho lze u silničních tunelů dosáhnout vhodnou optimalizací jejich tvaru a uzpůsobením průběhu drenáží. Další výhodou „skrytí“ výklenku do ostění je, že zadní stěna výklenku nezasahuje do stavební jámy, čímž je zachována stejná manipulační šířka podél tunelové trouby. To hraje ve stísněných poměrech stavebních jam zásadní roli jak při betonáži ostění a provádění hydroizolací, tak při provádění zásypů.

Jako příklad optimalizace tvaru výklenků lze uvést výklenky čištění drenáže u tunelů Libouchec a Panenská, které se oba nacházejí na dálnici D8 před hranicí se SRN. S předstihem projektovaný tunel Panenská měl výklenky čištění drenáže navržené pro původní průměr šachet podle zadávací dokumentace, a to zásadním způsobem ovlivnilo hloubku výklenku. Při projednávání technického řešení tunelu Libouchec se podařilo díky pozitivnímu přístupu investora zmenšit průměr šachet na čištění boční tunelové drenáže na pouhých 500 mm při hloubce šachet 1,5 m. Výsledný efekt ukazuje obr. 7, na kterém je vlevo bednění výklenku na tunelu Panenská, vpravo optimalizovaný tvar pro tunel Libouchec. Pro betonáž kratšího tunelu zhotovitel neváhal nechat vyrobit nové bednění formy výklenků.

Při projektování realizační dokumentace tunelů stavby 513 silničního okruhu kolem Prahy využil zpracovatel realizační dokumentace zkušeností z tunelu Libouchec a po četných jednáních s investorem a budoucím provozovatelem se mu podařilo prosadit zmenšení průměru šachet čištění boční drenáže z 800 mm na 600 mm. Výsledek optimalizace byl ještě mnohem markantnější, než u tunelů na dálnici D8. Hlavní obavou investora při zmenšení průměru šachty je následná údržba. Zkušenosti z provozu ukazují, že



Obr. 7 Bednění původního (vlevo) a optimalizovaného (vpravo) tvaru výklenku čištění drenáže

Fig. 7 Formwork for the original shape (left) and optimised shape (right) of the drainage cleaning recess

both sides of the structure failed. As the result, asymmetric loads acting on the structure developed, despite the fact that the final terrain level after the backfilling is horizontal in the cross section. The asymmetry of the loading due to non-uniform compaction was proved subsequently by surveying of the lining, which was carried out at a measurement station, similar to the measurements of deformations of the primary lining. The angular rotation and displacements of the tunnel were not caused by instability of the sub-grade in this particular case. They were caused by the backfilling technique, where deformations of the lining occurred in the direction of the hard to compact backfill along the tunnel sides. The vector representation of deformations of both tunnel tubes shown in Fig. 5 corresponds to this opinion.

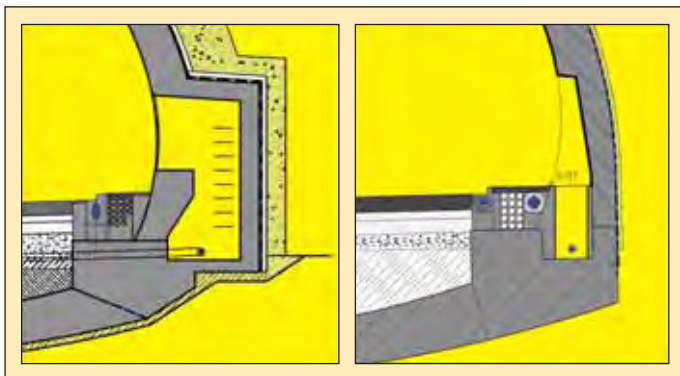
While the shape of the structure at the western portal of the tunnel did not have to be changed and the designed inverted arch, after some modifications, was adequate to the geological conditions encountered, the designer for the detailed design proposed, when the construction trench excavation on the opposite portal side was finished, a change in the cut-and-cover tunnel foundation system for this section. Even though the weathering zone reached rather great depths, the geotechnical parameters found at the foundation base level were already sufficient to allow transition from the flat foundation of the tunnels on the inverted arch to foundation on footings. In doing so, the designer encountered time-related problems having to change the design, but the reduced volume of earthmoving and concrete casting work, simplified work and savings in investment costs in the order of tens of millions CZK were worth the effort.

The most marked example of asymmetric loading on cut-and-cover tunnels is a portal section of the Libouchec tunnel on the D8 motorway in the section between the city of Ústí nad Labem and the border between the Czech Republic and Germany. In the case of the southern portal of the Libouchec tunnel, the eastern tunnel tube had to be extended during the course of the construction by up to 24m with respect to the backfilling operations and the gradients of slopes of the embankments. For space-related reasons, it was impossible to substantially change the layout in the area of the portal and shift the tunnel service building structure. For that reason, the backfill was terminated at the level of the tunnel vault crown and the eastern side of the tunnel adjacent to the service building was left completely exposed. The aesthetic concept of the cladding of the exposed tunnel side in the Krušné Mountains landscape is shown in Fig. 6. The lining under the basalt cladding is in water retaining concrete.

IMPORTANCE OF THE OPTIMISATION OF THE SHAPE OF RECESSES

While the external formwork for mined tunnels is provided by a primary lining, it is necessary in the case of cut-and-cover tunnels to equip the travelling formwork with an outside shutter. Part of the safety equipment of road tunnels are recesses for SOS cabins, fire hydrant recesses or recesses for cleaning manholes on side drains, which usually protrude from the lining and complicate the operations. In railway tunnels, the situation is similar because there are safety recesses installed at maximum 25m intervals among tunnel safety elements. An advantage of rail tunnels is the fact that installing the side drainage cleaning manholes and connection points of the (dry) fire main in safety recesses is allowed, thus the total number of recesses is reduced. As far as the structural function of the lining is concerned, the work on the form and the application of a waterproofing membrane are optimal if the shape of recesses does not extend beyond the outer side of the lining and the entire recess can be incorporated into the lining wall thickness, which is quite great at the side wall level of cut-and-cover tunnels. Whereas SOS recesses or safety recesses cannot be integrated into the lining because of their dimensions, the incorporation is possible in the case of fire hydrant recesses and recesses for cleaning manholes on side drains in road tunnels by optimising their shape and adapting the routes of drains. Another advantage of “hiding” a recess in the lining is the fact that the rear wall of the recess does not protrude into the construction trench, therefore a uniform width of the handling space along the tunnel tube is maintained. This feature plays a crucial role in the constricted space in construction trenches, during casting of the lining and installing of waterproofing layers, as well as during backfilling operations.

As an example of the optimisation of the shape of recesses, we can mention the drainage cleaning recesses in the Libouchec and Panenská tunnels, which are both found on the D8 motorway, before the border with the FRG. The drainage cleaning recesses for the Panenská tunnel, which was designed in an advance, were designed for the original diameter of the manholes given by the tender documents, which fact principally affected the depth of the recess. When the technical solution for the Libouchec tunnel was being negotiated, the side drainage cleaning manhole diameter was successfully reduced to a mere 500mm at the manhole depth of 1.5m, thanks to the owner's positive attitude. The resultant effect is shown in Fig. 7, in which the formwork for the Panenská tunnel is on the left side and the optimised formwork shape



Obr. 8 Optimalizace tvaru výklenku u tunelů SOKP 513
Fig. 8 Optimisation of the recess shape in the PCCR 513 tunnels

průměr šachty nečiní při čištění žádné problémy. Zásadní roli hraje pravidelná údržba drenážního systému, zejména v prvních letech po uvedení tunelu do provozu, kdy dochází k vyluhování jemných částic z horninového masivu i ze stříkaného betonu primárního ostění. Při prvním čištění po uvedení tunelu do provozu se ukázalo, že sedimenty v potrubí mohou dosahovat značných tloušťek. K rozptýlení obav investora přispělo zmenšení hloubky šachet. Tunely SOKP 513 se nacházejí ve dvou protisměrných obloucích s příčným sklonem vozovky 2,5 %. Na základě zahraničních zkušeností navrhl projektant natáčení celého profilu tunelu podle příčného sklonu vozovky, čímž uspořil na hloubce šachty oproti původnímu návrhu cca 15 cm a zejména zjednodušil přístup k drenážím, což hraje zásadní roli při jejich pravidelném čištění. U nenatočeného profilu při šířce třípruhového tunelu 14,5 m, u čtyřpruhového dokonce 18 m, příčný sklon výrazně ovlivňuje prostorové uspořádání na boku tunelu a tím i hloubku drenáží pod úrovní chodníku. Zmenšení průměru šachty a použití zalomení zadní stěny výklenku (opět dle zahraničního vzoru) vedlo k takovému zmenšení výklenku čistění drenáže, že konstrukčně nezasahoval do rubu ostění hloubeného tunelu. Význam optimalizace tvaru výklenku je zřejmý z obr. 8, kde je porovnán tvar konstrukce podle zadávací a podle realizační dokumentace. Stejný tvar výklenku čistění drenáže byl použit i pro výklenky požárních hydrantů, což bylo umožněno návrhem moderních tunelových hydrantů s vývody typu A a B nad sebou kolmo k ose tunelu. To vedlo k dalšímu zjednodušení bednicích prvků definitivního ostění. Tento tvar výklenků, vyvinutý z potřeby zjednodušení bednění hloubených tunelů, byl nakonec použit i v ražených úsecích tunelů stavby 513.

Naopak negativní dopad do konstrukčního řešení tunelového ostění měly požadavky na vedení drenáží. Zatímco v ražené části tunelu probíhá tunelová drenáž podél patky ostění přímo, u hloubeného tunelu zabíhá kvůli tvaru rubu ostění tunelu do výklenku na čištění drenáže a následně vybíhá opět za rub ostění. Úhel odbočení hraje významnou roli z hlediska konstrukčních úprav výztuže ostění. Zatímco na tunelu Libouchec probíhalo odbočení pod úhlem 30°, v případě tunelů stavby SOKP 513 požadoval investor provést odbočení pod úhlem pouhých 15° s ohledem na lepší možnost revize a čištění drenážního potrubí. Zdánlivě ideální řešení z hlediska vodářského se negativně promítlo do konstrukčního řešení z hlediska stavebního. Prodloužení úseku, kde drenážní trubka prochází patou tunelu, i nepříznivý úhel drenáže k ostění ovlivnily provádění výztuže na úseku délky přes 3 m (viz obr. 9). Příklad ukazuje nutnost hledání kompromisů při nalezení optimálního technického řešení a posuzování konkrétních detailů z pohledu všech zúčastněných profesí.

IZOLOVAT, ČI NEIZOLOVAT?

V současné době je ve většině případů v ČR zajištěna vodonepropustnost ostění hloubených tunelů hydroizolační fólií. Standardně používaná signální vrstva plní svou funkci v případě ražených tunelů, kdy lze pomocí vrypů do signální vrstvy kontrolovat případná poškození způsobená např. při instalaci výztuže. U hloubených tunelů představuje největší nebezpečí pro hydroizolační fólii provádění zásypů a hutnění v těsné blízkosti konstrukce. V tomto případě signální vrstva již nemůže při identifikaci poškození pomoci a vady se projeví zpravidla až po provedení zásypů nebo dokonce po uvedení tunelu do provozu. Podzemní voda prosakující poškozeným místem hydroizolační fólie neproniká do tunelu v místě poruchy, ale v pracovní či dilatační spáře nebo v místě oslabení betonu ostění. Sanace takového problému je obtížná a finančně i časově náročná. Snahou projektanta i zhotovitele proto je navrhnout ochrannou vrstvu hydroizolační fólie tak, aby se riziko poškození minimalizovalo. Možností je několik. Při výstavbě železničního tunelu Vepřek navrhl projektant po dohodě se zhotovitelem a investorem ochranu hydroizolační fólie tl. 3 mm



Obr. 9 Přerušování výztuže při průchodu drenáže ostěním
Fig. 9 Cutting out of reinforcement bars for the passage of drainage through the lining

for the Libouchec tunnel on the right side. The contractor did not hesitate to order new forms for the recesses when casting the shorter tunnel.

When working on the detailed design for tunnels on construction lot 513 of the Prague City Circle Road, the designer used the experience obtained on the Libouchec tunnel and, after numerous discussions with the project owner and future operator, he managed to push through the reduction of the diameter of side drainage cleaning manholes from 800mm to 600mm. The result of this optimisation was even more visible than that in the case of the tunnels on the D8 motorway. The main concern of the owner was the future maintenance if the diameter is reduced. The experience gained during operation shows that the diameter of a manhole causes no problems during the drainage cleaning. The crucial role is played by regular maintenance of the drainage system, first of all during the first years after the tunnel commissioning, when washing out of fines from the ground mass and the shotcrete primary lining takes place. It turned out during the initial cleaning after the tunnel commissioning that the thickness of sediments in the pipeline can be significant. The reduction in the depth of manholes contributed to dispelling the owner's concerns. The PCCR 513 tunnels are found on two reverse curves with the transverse incline of the roadway of 2.5%. The designer, using experience from abroad, proposed that the entire tunnel profile be rotated proportionally to the transverse incline of the roadway, thus he saved about 15cm of the manhole depth compared to the original design and, first of all, simplified the access to drains, which fact plays crucial role during regular cleaning of the drains. In the case of a non-rotated profile, at the triple-lane tunnel width of 14.5m and even 18m width in the case of the quadruple-lane tunnel, the transverse incline significantly affects the geometric design on the tunnel side, thus also the depth of drains under the pavement surface. Reducing the manhole diameter and using a rebated rear wall of the recess (again according to a foreign model) led to such reducing of the drainage cleaning recess dimensions that the structure did not reach the external side of the cut-and-cover lining. The importance of optimising the shape of the recess is obvious in Fig. 8, where



Obr. 10 Ochrana hydroizolace stříkaným betonem
Fig. 10 Protection of the waterproofing with shotcrete



Obr. 11 Ochrana hydroizolace recyklátem pryže ELTEC
Fig. 11 Protection of the waterproofing with ELTEC recycled rubber plates

pouze pomocí geotextilie 800 g/m² a šterkopískovým obsypem (viz obr. 2). Díky precizní a bezchybné práci zhotovitele Metrostav se podařilo hloubené úseky dokonale zaizolovat a po 8 letech provozu lze konstatovat, že hydroizolační fólie plní svou funkci.

Při výstavbě tunelů stavby SOKP 513 navrhoval projektant zadávací dokumentace ochranu hydroizolační fólie pomocí stříkaného betonu. Jedná se o spolehlivý způsob, který byl použit např. při výstavbě tunelu Sitina v Bratislavě (viz obr. 10). Jeho použití však v případě tunelů SOKP 513 narazilo na prostorové poměry ve stavební jámě. Omezený prostor mezi stěnou jámy a ostěním tunelu technicky neumožňoval nástřik betonu provést. Zhotovitel SKANSKA BS proto společně s projektantem RDS hledali alternativní řešení, které by zohlednilo zvýšené riziko poškození fólie při manipulaci mechanismů ve stísněných poměrech jámy. Ochrana fólie pouze geotextilií v tomto případě nezaručovala bezchybné provádění prací. Původně navrhovaný stříkaný beton po řadě diskusí nahradily nakonec pásy recyklátu. Zhotovitel nejprve použil na kratším 70 m dlouhém přesypaném tunelu pásy z recyklované pryže ELTEC GR 850 FS tloušťky 20 mm. Trvanlivost i odolnost pásů proti mechanickému poškození dokladovaly atesty výrobku prováděné v souvislosti s jeho použitím pod pražci na železnici. Instalace na ostění tunelu probíhala bez větších problémů a výrobcem dokladované mechanické vlastnosti materiálu dávaly záruku dobrého výsledku (viz obr. 11). Komplikace přišly v okamžiku, kdy je nikdo nečekal, a jak se později ukázalo, souvisely s klimatickými podmínkami. Paradoxně se jednalo o počasí pro provádění izolačních prací optimální. Při osvitu slunečními paprsky se díky černé barvě materiál začal rychle zahřívat a následně měknout. Vlastní vahou tak došlo k protažení a nežádoucímu zvlnění. Svou roli hrál i tvar tunelu, jehož boky byly svislé a pásy nebyly k ostění nijak upevněny. I přes určitou komplikaci při provádění se podařilo zpětně zásypy zvládnout a v dnešní době je již tunel v celém rozsahu zasypán (viz obr. 12). Získaná zkušenost byla pro účastníky výstavby cenným poučením a pro ochranu izolace přes 170 m dlouhých úseků na portálu Komořany a 85 m dlouhých úseků na portálu Cholupice již zhotovitel použil recyklát S-FOAM, který i při zahřátí své mechanické vlastnosti zásadně neměnil.

Použití hydroizolační fólie není jedinou možností, jak zajistit vodonepropustnost ostění hloubeného tunelu. Další způsob představuje použití betonu odolného proti průsakům s těsněním pracovních a dilatačních spár mezi bloky betonáže spárovými pásy. V menším rozsahu došlo k úspěšnému nasazení této alternativy již na hloubených úsecích tunelů Vepřek a Libouchec, i když délka úseků nepřekročila 40 m. Ostění hloubených tunelů odolné proti průsakům navrhl projektant i na železničních tunelech Malá Huba a Hněvkovský I., při realizaci se však nepodařilo zajistit požadovanou kvalitu provádění betonu a konstrukce musela být dodatečně izolována pomocí fólie. Vodonepropustný beton se použil i na části tunelů staveb Metro IVC1 a tunelového komplexu Blanka.

Další rozsáhlé použití ostění z betonu odolného proti průsakům se v ČR nyní chystá. V listopadu 2009 započalo hloubení stavební jámy dvoukolejného železničního tunelu Votický na tratě u úseku Votice–Benešov u Prahy. Tunel je vzhledem k nízkému nadloží v celé délce 590 m prováděn jako hloubený. Jeho délka byla příčinou, proč se projektant po dohodě s investorem rozhodl při zajištění vodonepropustnosti nespolehat na hydroizolační fólii. Vzhledem k tomu, že vodonepropustné ostění dosud nebylo v takovém měřítku v ČR použito, a i s ohledem na negativní zkušenosti z již zmiňovaných tunelů Malá Huba a Hněvkovský I., si investor vymínil jako pojistku pro lepší odvod prosakující vody použít alespoň v části horní klenby novou fólii. I když navržený způsob

the structure shape required in tender documents is compared with the shape according to the detailed design. The same shape of the drainage cleaning recess was even used for fire hydrant recesses. This use was possible owing to a modern tunnel hydrant design with the outlet types A and B found above one another, perpendicular to the tunnel centre line. This improvement led to further simplifying of the formwork for the final lining. This shape of recesses, which was developed on the basis of the need for simplifying the formwork for cut-and-cover tunnels, was eventually used even in mined tunnel sections of the tunnels on construction lot 513.

Conversely, requirements for the alignment of drains had a negative effect on the tunnel lining. While in a mined part of a tunnel the tunnel drainage runs directly along the tunnel footings, it diverts to the drainage cleaning recess and subsequently returns beyond the external surface of the lining in the case of cut-and-cover tunnels. The diversion angle plays an important role in terms of structural changes in the reinforcement of the lining. While the diversion angle was 30° in the Libouchec tunnel, the PCCR 513 project owner required the diversion to be only at 15° so that inspections and cleaning of drains were easier to perform. The solution, which was seemingly ideal from hydraulic engineer's point of view, negatively projected itself into the design of the tunnel structure. The extension of the section in which the drainage pipe runs through the tunnel footing and the unfavourable angle between the drain and the lining affected the reinforcement placing operation within an over 3m long section (see Fig. 9). This example shows how necessary it is to seek compromises in searching for an optimum technical solution and assessing particular details from points of view of all professions collaborating on the design.

WATERPROOFING – WITH OR WITHOUT IT?

At the moment, the majority of cases water-tightness of cut-and-cover tunnel linings are secured by waterproofing membranes. A signal layer, which is used as the standard, fulfils its role in the case of mined tunnels, where visible notches in the signal layer allow the inspection of contingent defects caused, for example, when reinforcement bars are being placed. As far as cut-and-cover tunnels are concerned, the greatest threat to a waterproofing membrane is presented by backfilling and compacting the backfill in a close vicinity of the structure. In this particular case the signal layer can never help to identify damage and defects are usually discovered too late, when the backfill has been completed or even later, after the tunnel is opened to traffic. Ground water seeping through the damaged point in the waterproofing membrane does not leak into the tunnel in this location. Instead it leaks through a day joint or expansion joint, or in a location where the concrete forming the lining is weakened. Solving of such a problem is a difficult task, demanding in terms of costs and time. The designer and the contractor therefore make all efforts to design a protective waterproofing membrane layer minimising the risk of damage. There are several options available. In the case of the Vepřek rail tunnel construction, the designer proposed and the contractor and the project owner agreed to protecting the 3mm thick waterproofing membrane only with an 800 g/m² geotextile and gravel-sand backfill (see Fig. 2). Owing to the precise and flawless work of Metrostav a.s., the contractor, the cut-and-cover tunnels were provided with perfect waterproofing and, after 8-year operation, it is possible to state that the waterproofing membrane fulfils its function.

Regarding the tunnels on the PCCR lot 513, the designer for the tender documents proposed protecting the waterproofing membrane by a shotcrete layer. This reliable method was used before, for example during the construction of the Sitina tunnel in Bratislava. (see Fig. 10). The application of this method to the PCCR 513 tunnels was found impossible due to the lack of space in the construction trench. Owing to the constricted space between the side of the trench and the tunnel lining, the application of shotcrete was technically impossible. The contractor, SKANSKA BS, together with the designer, for that reason sought an alternative solution which would allow for the increased risk of damaging the membrane by equipment moving in the constrained conditions of the construction trench. Protecting the membrane only by geotextile in this case did not guarantee flawless execution of the works. The originally designed shotcrete was, after numerous discussions, replaced by sheets of recycled rubber. First, the contractor used 20mm thick ELTEC GR 850 FS recycled rubber sheets on the shorter, 70m long false tunnel. Durability and resistance of the sheets against mechanical damage were documented by certificates which had been issued in the connection with testing of this product for its use under sleepers on rail tracks. The application to a tunnel lining did not encounter bigger problems and the mechanical properties of the material declared by the manufacturer gave a guarantee of a good result (see Fig. 11). Complications arose at the moment when nobody expected them. As it turned out later, they were associated with climatic conditions. Paradoxically, the weather was optimal for the application of a waterproofing membrane. When exposed to the sun light, owing to its black colour, the cladding material quickly started to heat up and subsequently to soften. Then it got elongated by its own weight and undesirably undulated.



Obr. 12 Kompletní zásyp hloubeného tunelu
Fig. 12 Complete backfill of a cut-and-cover tunnel

klade vysoké nároky na provádění, věříme, že úspěšná realizace povede k většímu rozšíření používání vodonepropustných ostění v ČR a rozptýlí počáteční obavy investora. Provádění vyžaduje věnovat mimořádnou pozornost návrhu betonové směsi, správnému způsobu hutnění, preciznímu provádění detailů, stanovení doby odbednění i ošetřování betonu po odbednění. Vznik trhlin je třeba minimalizovat snížením hydratačního tepla i důsledným ošetřováním betonu v počátečních okamžicích po odbednění nejen z hlediska vysychání, ale i s ohledem na tepelný šok. Cenou za precizní provedení bude minimální riziko průsaků a pokud k nim přece jen dojde, pak to bude skutečně v místě, které je problematické, což se u varianty s hydroizolační fólií prohlásit nedá. Lokalizace poruchy je v případě fólie velmi obtížná a sanace průsaků náročná a nákladná, naopak u voděodolného ostění je místo poruchy snadno identifikovatelné a sanovatelné.

V zahraničí bylo ostění hloubených tunelů z betonu odolného proti průsakům vody již mnohokrát s úspěchem použito. I u tunelů s vysokou hladinou podzemní vody jsou tzv. „bílé vany“ běžně zvládnutým pracovním postupem.

TUNELY ČÁSTEČNĚ HLOUBENÉ, ČÁSTEČNĚ RAŽENÉ

Pod trochu kontroverzním názvem této části článku se skrývají konstrukce hloubených úseků tunelů ražných pod zastropením. Metoda výstavby se v ČR výstižně nazývá „želva“. Důvodů proč sáhnout k tomuto způsobu



Obr. 13 Tvarování horniny do profilu klenby
Fig. 13 Moulding of ground into the shape of a vault

The tunnel shape also played its role. The sides were vertical and the sheets were not fixed to the surface by any means. Even despite a certain complication during the work, the backfill was successfully completed and today is completely covered (see Fig. 12). The experience which was gained became a valuable lesson for the parties to the construction. The contractor subsequently used S-FOAM recycled plates, which did not significantly change mechanical properties when heated, for the protection of the waterproofing of over 170m long sections at the Komořany portal and 85m long sections at the Chloupice portal.

The use of a waterproofing membrane is not the only way to ensure waterproofing of a cut-and-cover tunnel lining. Another technique is represented by the use of water retaining concrete with construction joints and joints between concrete casting blocks sealed by waterstops. This alternative was successfully used to a smaller extent even before, on cut-and-cover sections of the Vepřek and Libouchec tunnels, where the length did not exceed 40m. The water retaining lining of cut-and-cover tunnels was proposed by the designer even for the Malá Huba and Hněvkov I rail tunnels. Unfortunately, the contractor failed to maintain the required quality of processing the concrete, therefore the structure had to be provided by a waterproofing membrane. The water retaining concrete was also used on some section of the underground line IVC1 and of the Blanka complex of tunnels in Prague.

The next use of water retaining concrete in the Czech Republic is now prepared. The excavation of a construction trench for the Votice double-rail tunnel on the Votice – Benešov u Prahy track section started in November 2009. Because of the shallow depth of the cover, the tunnel is designed throughout its length of 590m as a cut-and-cover structure. Its length was the cause why the designer, with owner's approval, decided not to rely on a waterproofing membrane when securing the waterproofing. Taking into consideration the fact that such the extent of a watertight concrete lining has not been used in the Czech Republic yet and with respect to the negative experience with the use on the above-mentioned Malá Huba and Hněvkovský I tunnels, the owner insisted on the application of a dimpled membrane to the upper part of the vault as an insurance providing better evacuation of water seeping through the backfill. Even though the designed construction technique puts heavy demands on workmanship, we believe that successful completion will lead to wider spreading of the use of water retaining concrete linings in the Czech Republic and will dispel the owner's initial concerns. This work requires exceptional attention to be paid to the concrete mix design, a proper compaction technique, precise workmanship on details and determination of the stripping time and curing time after the form stripping. Developing of cracks must be minimised by reducing the heat of hydration and thorough curing of concrete immediately after the form stripping, not only as far as concrete drying is concerned but also with respect to a thermal shock. The precise workmanship will be rewarded by minimised risk of seepage and, if it occurs despite the measures, it will be in a location which is really problematic. This cannot be stated in the case of the waterproofing membrane variant. Locating a defect is a really difficult task in the case of a plastic membrane and sealing of leaks is a difficult and cost demanding operation, whereas the defect location is easy to find and remedy in the case of a water retaining concrete lining.

Cut-and-cover tunnel linings in water retaining concrete have already been many times successfully used abroad. The so-called "white tank" technology (Translator's note: "white tank" in the meaning of Austrian standards) is currently commonplace even in the case of tunnels where the water table level is high.

PARTLY CUT-AND-COVER AND PARTLY MINED TUNNELS

The little bit controversial heading of this part of the paper contains structures of cover-and-cut tunnels, where the mining is carried out under a roof deck. This construction method is aptly called the "tortoise" in the Czech Republic. There are several reasons for choosing this construction



Obr. 14 Ražba tunelu Malá Huba pod provizorní klenbou
Fig. 14 Driving the Malá Huba tunnel under the temporary vault

provádění je hned několik a některé budou v dalším textu prezentovány na již realizovaných stavbách. Proč razit tunel pod zastropením?

Prvním z důvodů je omezení šířky i hloubky stavební jámy a minimalizace objemu výkopů. K hloubení tunelů dochází v místě, kde výška nadloží nedovoluje ekonomickou a bezpečnou ražbu tunelu. Geotechnické poměry v dolních partiích stavebních jam však již v řadě případů poskytují dostatečnou stabilitu masivu pro ražbu. V případě zmiňovaných železničních tunelů Malá Huba a Hněvkovský I. by vzhledem k reliéfu terénu představovalo standardní otevření svahované stavební jámy značný zásah do krajiny. Proto projektant navrhl použití „metody želva“, kdy se na vytvarovaný rostlý terén dna svahované stavební jámy po obvodu kaloty tunelu osadila separační fólie a na ní vybetonovala vlastní klenbová konstrukce provizorního ostění, která svým tvarem připomíná krunýř želvy (viz obr. 13). Na obrázku jsou znázorněny fáze provádění od vytvarování zemního tělesa, přes pokládku separační fólie a geotextilie až po zahájení montáže výztuže klenby. Po dosažení potřebné únosnosti klenby je možné konstrukci zasypat a ražba již probíhá pod její ochranou. Klenba plní funkci primárního ostění a postup výstavby pod ochranou klenby odpovídá postupu při konvenčním způsobu tunelování. Kromě menších rozměrů stavební jámy je další výhodou možnost použití subtilnějšího ostění, než kdyby se jednalo o standardně prováděný hloubený úsek tunelu. Toho je dosaženo lepším podepřením konstrukce na bocích tunelu rostlou horninou, než v případě obsypaného hloubeného tunelu. Tunel prováděný pod zastropením znázorňuje na příkladu tunelu Malá Huba obr. 14, kde je již klenba zasypána a ražba pod zastropením umožnila minimalizovat objem zemních prací spojených s výkopem stavební jámy. V daném úseku nebylo možné vzhledem k malé výšce nadloží tunel razit standardním způsobem a při provádění v otevřené stavební jámě by zvláště levý bok jámy zasahoval daleko do lesa.

Jedním z důvodů ražby tunelu pod zastropením je zkrácení etapy výstavby, kdy je povrch území postižen stavbou. To hraje hlavní roli při výstavbě městských tunelů. V tomto případě boky stavební jámy zajišťuje pažení, které zároveň slouží jako nosná konstrukce tunelu. Po zastropení tunelu lze provést povrchové úpravy a území vrátit životu ve městě. Ražba pak probíhá nezávisle na povrchu území.

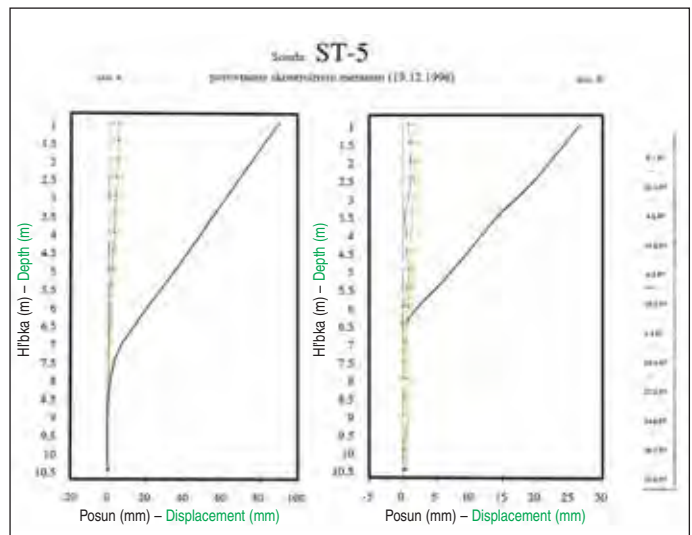
Další příklad ukazuje možnost využití této metody ke stabilizaci svahu stavební jámy. Jedná se o východní portál dálničního tunelu Branisko na Slovensku. V oblasti portálu došlo v souvislosti s ražbou průzkumné stoly i s hloubením stavební jámy pro ražbu vlastního tunelu k odtěžení značného množství horniny v patě svahu pohoří Branisko. Hloubený tunel měl být prováděn po ochranou kotvených podzemních stěn. Během prací na prohlubování stavební jámy hloubeného tunelu došlo k enormním deštům a zvodnění horninového masivu nad stavební jámou. Voda prosakovala až na bázi pokrývá a zasahovala i zvětralé polohy skalního podkladu. Svah nad tunelem se dal do pomalého, ale dlouhodobého pohybu a bylo nutné urychleně provést jeho stabilizaci, neboť v případě sesuvu přímo ohrožoval stavební jámu tunelu. Kromě povrchových drénů a odvodňovacích vrtů bylo nutné co nejrychleji zpětně přitížit patu svahu. Inklinometr osazený do podzemní stěny u nestabilního svahu již ukazoval její přelomení a nebylo času nazbyt (viz obr. 15). Další odtěžování paty svahu v místě hloubených tunelů vzniklá situace vylučovala. V místě jižního tunelu bylo okamžitě započato s úpravou terénu do tvaru klenby. Betonáž začala počátkem prosince a značně ji komplikovaly klimatické podmínky, kdy teplota klesala pod $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Betonáž klenby probíhala pod plachtami, pod které byl vhnán

technique. Some of them will be presented in the following text on examples of already completed projects. Why should tunnel excavation be carried out under a roof deck?

The first reason is the fact that the width and depth of the construction trench are limited and the excavation volume is minimised. The cut-and-cover method is used in locations where the height of the overburden does not allow economic and safe tunnel excavation. Geotechnical conditions in lower parts of construction trenches often provide stability of ground mass sufficient for the application of mining techniques. Regarding the above-mentioned Malá Huba and Hněvkov I tunnels, opening of a sloped construction trench in a standard manner would have meant significant intervention into the landscape. For that reason the designer proposed using the “tortoise” method, where the natural terrain at the bottom of the sloped construction trench was moulded into the shape of the tunnel calotte roof, a separation membrane was spread on the moulded ground and the vaulted structure of the primary lining, reminiscent of a tortoise shell, was cast on it (see Fig. 13). In addition, the picture shows phases of the process, from the ground body moulding, through applying the separation membrane and geotextile up to commencing the placement of the vault reinforcement. When the required loading capacity of the vault is achieved, the structure can be backfilled and the subsequent mining operation takes place under the protection of the vault. The vault fulfils the role of a primary lining and the work under the protection of the vault corresponds to the conventional mining procedure. Another advantage is, apart from smaller dimensions of the construction trench, the possibility of designing a thinner lining than in the case of building a standard cut-and-cover tunnel. This effect is the result of better bracing of the tunnel sidewalls against natural ground mass than it is in the case of the cut-and-cover tunnel. A cover-and-cut tunnel is presented on an example of the Malá Huba tunnel (see Fig. 14), where backfill of the vault was completed and owing to the excavation under the roof deck the volume of earthmoving associated with the excavation of the construction trench could be minimised. It was impossible in the particular section to apply standard mining procedures because of a shallow overburden and, in the case of excavating an open construction trench, the left slope above all would have extended far into the forest.

One of the reasons for using the cover-and-cut technique is shortening of the construction period, during which the surface of the area is affected by the construction works. This reason plays the main role when urban tunnels are in question. In such the case the sides of a construction trench are supported by bracing which serves at the same time as an element of the tunnel structure. When the roof deck has been completed, it is possible to carry out surface finishes and return the area to the life in the city. The further excavation then proceeds independently of the surface of the area.

The other example shows the possibility of using this method for stabilising a slope of the construction trench. The construction in question is the eastern portal of the Branisko motorway tunnel in Slovakia. A significant volume of ground was removed from the toe of a slope of the Branisko mountain range in the area of the portal when an exploratory gallery was being driven and the construction trench for driving of the tunnel itself was being excavated. Anchored diaphragm walls were



Obr. 15 Průběh deformace podzemní stěny po aktivaci sesuvu
Fig. 15 Diaphragm walls deformation curve after the landslide activation



Obr. 16 Klimatické poměry při betonáži želvy na tunelu Branisko
Fig. 16 Climatic conditions during the casting of the Branisko tunnel tortoise shell



Obr. 17 Podchycení základových patek prefabrikované klenby
Fig. 17 Underpinning of footings of the precast vault



Obr. 18 Přitížení paty svahu východního portálu tunelu Branisko
Fig. 18 Surcharging of the toe of the slope at the eastern portal of the Branisko tunnel

horký vzduch (viz obr. 16). Tunel délky 4975 m byl prováděn jako jednotroubový, ale u východního portálu již byl před ústím průzkumné štoly, která je vedena v trase budoucího severního tunelu, připraven zárodek druhé tunelové trouby, tvořený prefabrikovanou klenbou osazenou na základových pasech podchycených mikropilotami (viz obr. 17). Konstrukci tvořily pouze dva prefabrikované dílce a staticky se jednalo o tříkloubový oblouk. Monolitická i prefabrikovaná klenba umožnily urychlené provedení zásypů, které zajistily přitížení paty svahu a zastavily počínající sesuv. Při ražbě pod klenbou jižního tunelu se již svahové posuny neprojevovaly. V současné době je vypsáno výběrové řízení na projekt pro územní rozhodnutí výstavby druhé trouby tunelu. Budoucí zhotovitel díky provedeným opatřením již nebude muset znovu otevírat problematickou oblast nestabilního svahu východního portálu. Na obr. 18 jsou znázorněny obě klenbové konstrukce a čelní gabionová zeď, která umožnila zvýšit objem zásypů a přitížit tak pasivní oblast potenciálního svahového sesuvu.

ZÁVĚR

Projektování a provádění hloubených tunelů není zdaleka tak jednotvárné a snadné, jak by se mohlo na první pohled zdát, i když se v něm možná neskrývá tolik tajemství, jako v případě navrhování ražených úseků tunelů. Uvedená problematika a příklady z praxe výstavby hloubených tunelů poukazují na některé aspekty, které významně ovlivnily způsob projektování a provádění uvedených tunelů. K mnoha změnám došlo až ve fázi realizační dokumentace, což bylo způsobeno jednak reakcí na skutečně zastížené podmínky, jednak snahou o nalezení optimálního řešení z hlediska provádění.

Změna projektu v úrovni realizační dokumentace je vždy náročná jak na rychlost zpracování úpravy projektu, tak i na projednání s ostatními účastníky výstavby. Proto věříme, že uvedené zkušenosti mohou být pro čtenáře inspirující a mohou jim pomoci při projektování i výstavbě tunelů.

ING. LIBOR MAŘÍK, libor.marik@ikpce.com,
IKP CONSULTING ENGINEERS, s. r. o.

Recenzoval: prof. Ing. Jiří Barták, DrSc.

designed to protect the construction of the cut-and-cover tunnel. Enormous rains were encountered during the construction trench deepening operations. They saturated the ground mass above the construction trench. Water seeped down to the base of the soil cover, reaching even the weathered layer of the bedrock. The slope above the tunnel started slowly but continuously to move. It had to be quickly stabilised because it would have threatened the construction trench for the tunnel in the case of a landslide. Apart from surface drains and drainage wells, it was necessary as fast as possible to apply a surcharge to the toe of the slope. An inclinometer installed in the diaphragm wall at the instable slope had already shown that the wall was broken, there was therefore little time to waste (see Fig. 15). Because of the new situation, further cutting off of the slope toe in the cut-and-cover tunnel location was ruled out. The work on moulding of the terrain into the vault shape started immediately in the location of the southern tunnel tube. Concrete casting started at the beginning of December. It was seriously complicated by climatic conditions, with temperatures dropping under -15°C . Concrete was placed under the protection of tarpaulins and hot air was blown underneath (see Fig. 16). The 4975m long tunnel was built as a single-tube structure, but there was a short length of the other tunnel tube prepared at the eastern portal, in front of the mouth of the exploratory gallery following the alignment of the future northern tunnel tube. It was formed by a precast vault placed on foundation footings, which were underpinned by micropiles (see Fig. 17). The structure consisted only of two precast elements, structurally acting as a triple-hinged arch. Both the cast-in-place and precast vaults allowed expedited backfilling so that the surcharge to the toe of the slope could be applied and the commencing landslide be intercepted. The slope movements never appeared again during the excavation under the southern tunnel tube vault. Currently, bids have been invited to carry out the design for issuance of the zoning and planning decision for the second tunnel tube. Owing to the implemented measures, the future contractor will not have to reopen the problematic area of the instable slope at the eastern portal. Fig. 18 shows the two vault structures and the front end gabion wall, which made an increase in the backfill volume possible, owing to which the passive area of a potential landslide was surcharged.

CONCLUSION

Designing and constructing cut-and-cover or cover-and-cut tunnels is far from routine and easy job as it might seem at first glance, even though there are not so many secrets hidden in it as in the case of mined sections of tunnels. The above-mentioned problems and examples from tunnel construction praxis indicate the existence of some aspects significantly affecting the design and construction of the above-mentioned tunnels. Many changes were implemented as late as the detailed design stage. The reason was the fact that the actually encountered conditions had to be responded and an optimum solution in terms of the works execution had to be sought.

Any change at the detailed design level is always demanding in terms of the short time available for the designing work and negotiations with other parties to the construction. For that reason we believe that the experience described above can be inspiring for readers and help them in the process of designing and constructing tunnels.

ING. LIBOR MAŘÍK, libor.marik@ikpce.com,
IKP CONSULTING ENGINEERS, s. r. o.