

TUNELY METRA POD VLTAVOU

UNDERGROUND TUNNELS CROSSING THE VLTAVA RIVER

JAN L. VÍTEK

Rozšíření sítě pražského metra na sever vyžadovalo přejít Vltavu dvojicí tunelů velmi nízko pod dnem řeky. Každý z tunelů vyrobených z vodonepropustného betonu se betonuje v suchém doku vytěženém v pravém břehu řeky. Pro tento projekt bylo vyvinuto speciální posuvné bednění. Po dokončení bude každý z tunelů uzavřen ocelovými víky a vysunut do předem vytěžené rýhy ve dně řeky. Pak se tunely definitivně podeprou a zasypou štěrkokopískem a lomovým kamenem.

Extension of the underground network in Prague to the North required to cross the Vltava river by a couple of tunnels very close to the river bed. Each tunnel is made of waterproof concrete cast in a dry dock excavated in the right embankment of the river. A special sliding formwork has been developed for this project. After completion each tunnel separately will be closed by steel covers and launched into the final position in to the trench excavated in the river bed. Then the tunnels will be permanently supported and covered by stone, gravel and sand.

Úvod

Uvedené informace navazují na článek kolektivu autorů z Metroprojektu, kde jsou prezentovány základní údaje o trase metra IV.C1 a důvodech podchodu Vltavy právě pomocí tunelů. Dále bude věnována pozornost pouze této části trasy. V tendrové dokumentaci byl zvolen postup výstavby tradiční metodou v jímkách. Protože na Vltavě v místě křížení (mezi mostem Barikádníků a tramvajovým mostem) existuje čilý lodní provoz, a též z jiných důvodů, bylo nutné navrhnout 3 jímky, ve kterých by se tunely metra postupně betonovaly. Jímky musely být značně rozměrné, zasahovaly též do břehových oblastí, a proto bylo nutné počítat s nákladnými dvojitými jímkami. Postup výstavby byl pomalý, předpokládalo se, že výstavba potrvá 3 stavební sezóny. Tím byl úsek pod Vltavou – označovaný jako Oddíl 2 – na kritické cestě a zpomaloval výstavbu celé trasy IV.C1. Proto vznikla snaha použít jinou technologii, která by byla obecně příznivější.

GEOMETRICKÉ PARAMETRY TRASY METRA POD VLTAVOU

Pod Vltavou byly navrženy dvě nezávislé tunelové trouby, každá pro jednu kolej. Průřez tubusů je přibližně čtvercový cca 6,5 x 6,5 m s tloušťkou stěny, dolní a horní desky 0,7 m. V půdoryse jsou tubusy zakřiveny. Pravá kolej (směrem po proudu) má poloměr 750 m, a levá kolej (proti proudu) 670 m. Tunely jsou na holešovické straně od sebe vzdáleny asi 8 m, což je důsledkem uspořádání stanice Nádraží Holešovice se středním nástupištěm.

Na trojské straně je vzdálenost tunelů jen asi 1 m, protože se koleje pak sbíhají do dvoukolejného tunelu, který pokračuje do Kobylis. Výškově jsou tunely v údolnicovém oblouku o poloměru 3 800 m. Délka vysouvaných tunelů je 168 m.

VARIANTY POSTUPU VÝSTAVBY

Metrostav, a.s., již v době před vypsáním veřejné soutěže uvažoval o variantní technologii výstavby, aby se postup urychlil. Původní úvahy měly vzor v plavených holandských tunelech. Princip spočívá v tom, že se části tunelových trub vybetonují, pak uzavrou a jako plovoucí tělesa se přepraví na místo, kde se spustí na dno a připojí k dříve uloženým segmentům tunelu. Tato alternativa se ukázala jako nevhodná pro náš případ proto, že zakřivený tvar neumožňuje stabilní plavání tělesa a dále proto, že ve Vltavě není dostatek vody. Plovoucí tunel by působil jako přehrada na vodním toku. Další variantou byla analogie k vysouvaným mostům. Tunel by se po částech betonoval v suchém doku vybudovaném v břehové části na trojské straně a postupně vysouval do řečiště. Takový postup se též ukázal jako málo vhodný, protože požadavky na přesnost byly neúměrně vysoké a vybudování dočasných podpor v řečišti se zdálo velmi obtížné.

Zvolená varianta výstavby kombinuje postup vysouvání a zaplavování. Využívá vztaku vody k nadlehčení tunelu, což vede k redukcii manipulačních sil. Posun po dráze, která je celá mimo řeku, přitom stabilizuje tunel při pohybu. Princip postupu spočívá v tom, že se celý tunel postupně vybetonuje v suchém doku a pak se jako celek přesune do definitivní polohy v rýze v říčním dně. Při výsuvu bude tunel relativně lehký vlivem vztla-

Obr. 1
Bednění modelu
pro odzkoušení
postupu betonáže

Fig. 1 Formwork
of the model for
experimental
verification of the
casting sequence





Obr. 2 Pohled na posuvné bednění zředu.

Fig. 2 Front view on the formwork

ku vody, a proto je možné jej zavěsit v přední části na ponton a zadní část nechat posunovat po předem připravené dráze. Tunel bude tažen lanovým systémem z protějšího břehu. Předpětí lan se zajistí dalším zadním brzdícím závěsem. Potřebné tažné síly se vyvinou pomocí hydraulického zařízení.

Výhody navrhovaného a v současné době realizovaného postupu spočívají v urychlení výstavby (doba výstavby obou tunelových trub pod řekou se předpokládá asi 1,5 roku, včetně přípravných prací), zásahy do břehových částí i do řečiště jsou podstatně menší, což je zejména příznivé z ekologických důvodů. Omezení plavby se redukuje velice významně a klesají rizika spojená s nebezpečím velké vody. Též se předpokládá finanční úspora. Kvalita vlastního tunelu bude vyšší, neboť se použije kvalitnější vodostavební beton a silnější vyztužení dimenzované na trhliny. Tunely pod Vltavou nebudou opatřeny izolací proti vodě. Vodotěsnost se zajistí kvalitou betonové konstrukce.

REALIZOVANÝ POSTUP VÝSTAVBY

Koncem loňského roku byly zahájeny práce na budování tzv. suchého doku. To je stavební jáma zajištěná milánskými stěnami v místě pokračování tunelů v břehové části na trojské straně. Proti Vltavě je zajištěna štětovou stěnou na výšku cca 13 m. V suchém doku je dnes vybetonována první tunelová trouba. Během první poloviny roku se těžila rýha ve dně Vltavy, kde budou tunely definitivně umístěny a zasypány. Jejich strop bude přibližně 6 m pod hladinou řeky. Po zřízení suchého doku se na jeho dně betonovaly podélné prahy pod stěnami budoucího tunelu. Ty slouží jako základ pro tunel v poloze pro betonáž, pro pojezd posuvné formy a nakonec jako výsvuná dráha pro přesun tunelu. Betonáž tunelu probíhala po

12 m dlouhých segmentech, kterých je celkem 14. Po ukončení betonáže se tunel vystrojí dalším zařízením nezbytným k přesunu tunelu. K dosažení správné tíhy tunelu pod vodou a k vyrovnání nepravidelností vyvolaných běžnými nepřesnostmi slouží 3 skupiny vodních nádrží umístěných v tunelu. Nádrže jsou vybaveny čerpadly a měřením výšky hladiny. Tunel se na obou koncích musí uzavřít. Víka jsou navržena z oceli jako tenkostěnné konstrukce s vztuhami. Někdy se navrhuje i víka betonová, avšak v tomto případě se použila víka ocelová, neboť jsou výrazně lehčí. Na vnějším povrchu tunelu je osazena řada kotevnic prvků. K nim se připevní tažné zařízení a podpůrné prvky. Tažné zařízení obsahuje dva systémy lan, které budou zakotveny v tažných jednotkách na protější (holešovickém) břehu. Dále je doplněno brzdící zařízení, které se skládá z vlastního hydraulického systému a lanového závěsu. Brzdící zařízení slouží k případnému zastavení tunelu, nebo případnému zpětnému pohybu, ale jeho hlavní úloha spočívá v tom, že předpíná tažná lana, což vede ke ztužení celého systému a snížení citlivosti na další impulsy.

Po vystrojení tunelu se zaplaví suchý dok. Tunel se nadzdvihne pomocí hydraulických válců a tím se plně aktivuje vodní vztlak. Pak se vhodně upraví hladina vody v nádržích. Tunel se zavěsí přibližně ve vzdálenosti 1/3 délky od předního konce na ponton. Zadní část tunelu bude spočívat na posuvném zařízení na dráze v suchém doku. Po otevření štětové stěny bude tunel tažen v předepsané dráze mírně nad jeho budoucí polohou až se čelo tunelu dostane do otvoru v jímce na holešovické straně. Pak nastane definitivní osazení tunelu na připravené koncové podpory a jeho postupné podbetonování a ukotvení do dna řeky. Suchý dok na trojské straně se utěsní, uzavře a vysuší. Postup se bude opakovat pro druhý tunel. Po výsuvu druhého tunelu do definitivní polohy se suchý dok opět vysuší a vybetonují se definitivní tunely. Ty se pak zasypou a jáma bude zrušena.

BETONÁŽ TUNELU

Tunely pod Vltavou svou konstrukcí zajišťují vodotěsnost. Proto byla postupu betonáže věnována mimořádná pozornost. 12 m dlouhé segmenty byly betonovány v jednom pracovním záběru, aby se maximálně omezil počet pracovních spár. Ty zbývají pouze na styku jednotlivých segmentů. Betonáž celého průřezu tubusu najednou kladla značné nároky na konstrukci bednění a na betonovou směs. Betonáž se zahájila ve středu spodní desky. Po jejím zhotovení se betonovaly stěny a nakonec stropní deska. Betonáž stěn musela být tak pomalá, aby beton desky dostatečně zatvrdl a nedošlo k jeho vytlačení (dolní deska nemá horní bednění), a zároveň natolik rychlá, aby



Obr. 3 Pohled
na posuvné
bednění zezadu

Fig. 3 Rear view
on the formwork

nevznikaly nežádoucí pracovní spáry vlivem dlouhých přestávek mezi jednotlivými dodávkami betonu. Betonová směs speciálně navržená s ohledem na zpracovatelnost a rychlost tuhnutí se dopravovala z výroby TBG Metrostav. Protože se jednalo o neobvyklý a náročný postup, betonáž se zkušela na velkorozměrovém modelu části tunelu tvaru L o rozměrech 6 x 4 x 6,5 m (obr. 1). Sledoval se postup betonáže, rychlost tuhnutí betonu a vývoj teplot od hydratačního tepla.

Teplotní režim při betonáži masivních konstrukcí je závažný z hlediska vývoje napjatosti a nebezpečí vzniku trhlin. Zejména při napojování nového segmentu na dříve vybetonovaný dochází k tomu, že starší část konstrukce je studená a nová ohřátá hydratačním teplem. Po vychladnutí a tím i smrštění nové části v ní mohou vznikat trhliny, které by v našem případě ohrozily vodo-

těsnost tunelu. Podrobná analýza vývoje tepla provedená prof. Šmerdou a jeho kolektivem pomocí programu ATENA Dr. Červenky vedla k rozhodnutí omezit teplotní gradienty tím, že se starý segment ohřeje, a tím se sníží teplotní gradient a vznikající napětí. Omezí se tak riziko trhlin. Kromě tohoto opatření se upravila vyztuž tak, aby byla v co nejučinnější poloze.

Vodotěsnost konstrukce je nejvíce ohrožena v oblasti pracovních spár. Jejich utěsnění je několikanásobné. Gumový těsnící pás šířky 240 mm zajišťuje hlavní ochranu. Doplňující těsnění tvoří bentonitový pásek a injektážní trubičky, které se použijí v případě průniku vody. Jejich konce jsou vyvedeny dovnitř tunelu tak, aby byly použitelné i v případě pozdější nutnosti tunel dotěsnit. Betonáž jednoho segmentu o objemu cca 195 m³ včetně přípravy, přesunu formy a vyztužení trvala po zaběhnutí 4 dny.



Obr. 4 Téměř
dobetonovaný tunel

Fig. 4 Almost
completed tunnel

Posuvná forma byla vyvinuta pro konstrukci tunelů ve spolupráci s firmou PERI (obr. 2 a 3). Tuhý vnitřní díl tvoří ocelová konstrukce s vnitřním bedněním stěn a stropu. Ocelová konstrukce je podporována vpředu portálovým rámem a vzadu pojíždí po dolní desce již hotového segmentu. Vnější bednění stěn je připnuto k vnitřním stěnám spínacími tyčemi, při přesunu je podporováno vpředu portálovým rámem (obr. 2) a vzadu pojíždí po stropě tunelu prostřednictvím příčného nosníku s podvozky (obr. 3). Forma umožňuje dodržení přesného tvaru a rozměrů tunelu.

Přesné rozměry tunelu musí být dodržovány zejména proto, aby se dosáhlo plánované hmotnosti tunelu, což je podmínka úspěšné manipulace. Celý tubus o délce 168 m váží zhruba 7000 t a přitom je nadlehčován téměř stejnou silou, aby s ním bylo možné manipulovat. Odchyly od projektované hmotnosti by vedly k nutnosti tunel příliš mnoho přitěžovat nebo, pokud by byl příliš těžký, k nemožnosti jeho posunu. Před naplánováním výstavby a konečným rozhodnutím o tloušťkách stěn tubusu provedl kolektiv prof. Teplého z VUT Brno rozsáhlé statistické vyhodnocení vlivu variability rozměrů, objemové hmotnosti betonu a dalších faktorů s cílem ověřit realnost dosažení požadovaných parametrů. Cílem bylo stanovit např. potřebnou velikost vyvažovacích nádrží. Ukázalo se, že statistický rozptyl cílové hmotnosti může být značný, avšak vhodným postupem betonáže za současného sledování již vybetonovaných úseků lze tento rozptyl výrazně snížit.

Výsledné parametry dosažené při betonáži byly příznivější, než se předpokládalo. Odchyly tloušťek stěn se

pohybovaly do 6 mm (typicky 2 až 3 mm), odchylky v objemu betonu u jednotlivých segmentů nepřesáhly 1,3 % (typicky 0,6 %). To jsou parametry výrazně lepší, než připouští normové předpisy. Největší rozptyl vykazovala objemová hmotnost betonu, a to max. 2 % (typicky 1 %). Téměř dobetonovaný první tunel v suchém doku je vidět na obr. 4.

ÚČASTNÍCI VÝSTAVBY

Investorem celé stavby je Dopravní podnik hl. m. Prahy, a.s., který je zastupován IDS, a.s. Projektovou dokumentaci zpracovává Metroprojekt, a.s. Generálním dodavatelem celé trasy je Metrostav, a.s., a dodavatelem oddílu 02 – podchodu pod Vltavou je divize 6 a.s. Metrostav. Na oddílu 02 spolupracuje značným dílem Zakládání staveb, a.s., která provádí jako subdodavatel práce spojené s těžebním ve vodě a se zajištěním tunelu v definitivní poloze. Na vývoji a realizaci tažného zařízení spolupracuje firma VSL. Vzhledem k mimořádnosti stavby byla ustanovena na úrovni dodavatele Technická rada, tj. skupina odborníků z řad dodavatele, projektanta a nezávislých expertů z ČR a ze zahraničí. Technická rada schvaluje koncepci řešení a dohlíží na realizaci stavby.

ZÁVĚR

Stavba dosud není dokončena, proto je předčasné dílo hodnotit. Dosud lze konstatovat, že betonáž prvního tubusu proběhla bez závažných problémů, s lepšími parametry, než se plánovalo. Zkušenosti z dosavadního vývoje projektu ukazují, že nedostatek podkladů je nutné nahrazovat řadou individuálních zkoušek, výpočetních analýz a konzultacemi s odborníky od nás i ze zahraničí. Vzhledem k netradičnímu postupu výstavby se veškeré známé skutečnosti pečlivě vyhodnocují a rizikové operace se zajišťují několikanásobně, aby se riziko vzniku nepředvídaných okolností snížilo na minimum. K tomu byla hned zpočátku zpracována za pomoci prof. Tichého „matice nebezpečí“, jejímž cílem bylo identifikovat nejrizikovější činnosti. Nutnou podmínkou úspěšného dokončení projektu je dosud vynikající spolupráce mezi účastníky výstavby, od investora přes projektanta až po subdodavatele a další organizace, jako např. Povodí Vltavy, bez které by se ani běžné problémy v krátkém časovém úseku nedaly řešit.

Při výstavbě byly využity poznatky získané při řešení grantových projektů GAČR., č. 103/99/0734, 103/00/0615 a 103/99/0122.

Doc. Ing. Jan L. Vitek, CSc.

Metrostav, a.s.

Koželužská 5, 180 00 Praha 8

tel.: 02 6670 9317, fax: 02 6670 9193

e-mail: vitek@metrostav.cz

a Fakulta stavební ČVUT

Thákurova 7, 166 29 Praha 6