

POROVNÁNÍ METOD NRTM A ADECO-RS NA PŘÍKLADU ITALSKÉHO TUNELU MONTE CUNEO

Peter Balušík, Libor Mařík

1 Úvod

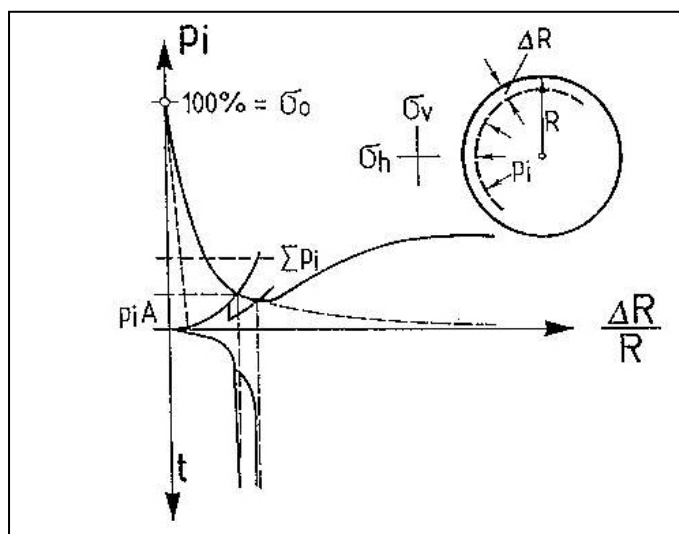
Podzemí lákalo člověka již od pradávna a nejprve mu poskytovalo ochranu před nepřízní počasí i nepřáteli v přírodních podzemních prostorách. Pravděpodobně nejstarší velkou umělou podzemní stavbou je kultovní komplex Hypogeum v Hal Safieni na ostrově Malta, jehož vznik se datuje do období po roce 2400 před n. l. S rozvojem měst docházelo na území Mezopotámie a Iránu k výstavbě vodovodních štol dokonce v období 3000 let před n. l. Ražba podzemních děl byla vždy velmi náročná a vzhledem k možnostem stávající techniky zdoluhavá a nebezpečná. Za posledních sto let však prošly tunelovací metody, stejně jako mnoho dalších oborů v tomto období, rychlým vývojem, který umožnil přechod od masivních zpravidla kamenných tunelových ostění k subtilním betonovým konstrukcím. Změna souvisí s vývojem techniky používané při výstavbě tunelů, ale také s odlišným chápáním role horninového masivu a jeho podílu na celkové únosnosti systému ostění – hornina. U klasických tunelovacích metod používaných na přelomu 19. a 20. století působil „nepřátelský“ horninový masiv zpravidla jen jako zdroj zatížení, a ostění byla dimenzována tak, aby horninovému tlaku dokázala vzdorovat. Enormní zatížení ostění bylo důsledkem členění profilu tunelu do mnoha dílčích výrubů a dlouhé doby od provedení výrubu k zajištění jeho stability výdřevou. Naproti tomu moderní tunelovací metody, vyvinuté v průběhu 20. století, začínaly čím dál více využívat samonosnosti horninového masivu a zohledňovat jeho funkci jako stavebního materiálu v nosném systému ostění – hornina. Použití stříkaného betonu a systémového kotvení líce výrubu nahradilo složitou výdřevu a dalo vzniknout moderním konvenčním tunelovacím metodám. Kolébkou těchto metod jsou vyspělé alpské země, kde reliéf terénu vyžaduje při návrhu silničních i železničních tras procházet četná pohoří. I v rámci nově vzniklých moderních tunelovacích metod však dochází k odlišnému filosofickému pohledu na chování horninového masivu během ražby a způsobu zajištění stability výrubu. Výsledkem je zcela odlišný přístup k technologii výstavby a dimenzování primárního i definitivního ostění. Dva pohledy na problém dosažení požadované stability výrubu lze demonstrovat na příkladu Nové rakouské tunelovací metody (NRTM), za jejíhož zakladatele je považován profesor Rabzewicz (rakouský patent 165573 z roku 1948), a metodě ADECO-RS vyvinuté profesorem Lunardim v 80. letech minulého staletí.

2 Konvenční tunelovací metody – dva různé pohledy na jeden problém

Zásadní problém při ražbě tunelů představuje způsob zajištění stability výrubu pro dosažení přijatelné míry rizika při optimální rychlosti výstavby. Ražba probíhá zpravidla v prostředí, které lze jen obtížně předem prozkoumat a jehož geotechnické parametry dosahují v závislosti na míře prozkoumání značného rozptylu. Konvenční tunelovací metody, mezi které obě zmiňované metody patří, dokáží více či méně reagovat na skutečně

zastižené geotechnické podmínky a způsob zajištění stability výrubu operativně modifikovat. K tomu slouží geotechnické sledování projevů horninového masivu při ražbě, nazývané též geotechnický monitoring. Při ražbě tunelu dochází k porušení primárního rovnovážného stavu napjatosti, které je v prostoru čelby provázáno prostorovým přeskupováním napětí, kterým se horninový masiv snaží dosáhnout nového rovnovážného stavu. Změny napjatosti jsou spojeny s deformací líce výrubu, resp. primárního ostění i celé oblasti v okolí výrubu. V zastavěné oblasti nebo v případě, kdy tunel podchází objekty nebo zařízení citlivá na poklesy, ovlivňuje volbu technologického postupu výstavby požadavek na omezení deformací nadloží. Zkušenosti z praxe i výsledky prostorových matematických modelů ukazují, že část deformace horninového masivu proběhne ještě před čelbou, část před instalací primárního ostění a provedením systémového kotvení či dalších opatření. Tato část deformace probíhá volně a není pomocí doprovodných opatření řízena. Zbývající část deformace již zatěžuje i primární, případně definitivní ostění tunelu a lze ji pomocí doprovodných opatření řídit. V závislosti na geotechnických vlastnostech horninového prostředí, velikosti výrubu, výšce nadloží a způsobu výstavby se poměr mezi volnou a řízenou deformací mění. Praxe prokázala i negativní vliv členění profilu tunelu při ražbě na větší množství dílčích výrubů. V okolí výrubu dochází k degradaci horninového masivu a snížení jeho geotechnických parametrů. Každý další dílčí výrub je proto ražen v horším prostředí, než předcházející.

Vztah mezi poměrnou radiální deformací výrubu a zatížením ostění vyjadřuje Fenner-Pacherova křivka. Názorně ukazuje vztah mezi okamžikem vsazení ostění do výrubu a jeho zatížením. Z grafu je zřejmé, že čím dříve je ostění do výrubu vsazeno, tím větším zatížením horninovým tlakem je namáháno. Průběh funkce není lineární a závisí na mnoha parametrech, které je velmi obtížné zjistit. Pokud se pohybujeme na sestupné větvi Fenner-Pacherovy křivky (viz obr. 1), snižuje se s narůstající deformací výrubu zatížení ostění, až v určitém okamžiku dosáhne optima. Pokud by deformace za tímto optimem dále narůstala bez provedení doprovodných opatření, došlo by opět k nárůstu zatížení, resp. by mohlo dojít až k závalu tunelu. V případě, že se během výstavby podaří nalézt optimální okamžik pro provedení primárního ostění, resp. pro další doprovodná opatření k zajištění stability výrubu, dojde i k optimalizaci dimenzí primárního ostění a ekonomicky příznivému technickému řešení. Princip lze uplatnit pouze v případě, kdy není třeba dodržet limitní hodnoty sedání nadloží tunelu z důvodu nebezpečí porušení objektů v zóně ovlivněné jeho ražbou.



Obr. 1 Fenner-Pacherova Křivka

2.1 Přístup z hlediska NRTM

Princip NRTM vychází z ražby alpských tunelů s vysokým nadložím, kde bylo hlavní snahou dosáhnout optimálního výsledku z hlediska bezpečnosti práce, efektivity provádění a technicko-ekonomických ukazatelů. Aby nedocházelo k degradaci horninového masivu, je výrub členěn na dílčí výrubu jen pokud je to nezbytně nutné, zejména s ohledem na zajištění jeho stability a dosah strojního vybavení (vrtací vozy, zařízení pro stříkání betonu nebo tunelového bagru). Primární ostění tvoří tenká vrstva stříkaného betonu vyztuženého zpravidla příhradovými ramenáty a sítěmi. Důležitou roli hraje prokotvení horninového prstence v okolí výrubu, který se významnou měrou podílí na celkové únosnosti systému ostění – hornina. Primární ostění je navrhováno jako měkké, aby bylo schopné přenášet bez velkého poškození značné deformace. Z historie jsou známy případy, kdy se primární ostění deformovalo v řádu decimetrů a v ojedinělých případech dosáhlo i hodnot větších než 1 m. Takové deformace není beton primárního ostění schopen přenést bez provedení doprovodných opatření, nebo bez značného poškození. Při použití tuhých výztužných rámu docházelo k jejich destrukci a bylo nutné zajistit jejich prokluz, jako je tomu např. u důlní výztuže. V primárním ostění se v úsecích s očekávanými velkými deformacemi výrubu nejprve vynechávaly celé podélné pásy, které zajišťovaly aktivaci ostění až po odeznění určité části deformace. S postupem času se do primárního ostění začaly vkládat deformační ocelové elementy s definovanou tuhostí, kterou bylo možné regulovat podle použitého typu prvku. Odhad předpokládané deformace výrubu má velký význam z důvodu nadvýšení primárního ostění a v případě dlouhých tunelů i z hlediska dimenzování deponií rubaniny. Stabilitu čelby zajišťoval v případě potřeby čelbový přitěžovací klín, nástřik betonu nebo kotvení. Měkké primární ostění v souladu s principem Fenner-Pacherovy křivky umožňuje deformaci a tím optimální zapojení horninového masivu do funkce. Definitivní ostění se betonuje zpravidla po ustálení deformací nebo v době, kdy rychlost deformace nepřekračuje cca 2 mm/měsíc. V nestabilním prostředí jsou prováděna další doprovodná opatření, zejména ke zvýšení stability čelby a líce výrubu. Jedná se např. o jehlování obvodu výrubu nebo předhánění pažin při ražbě v nesoudržných zeminách. Ražbu ve zvodnělých sedimentech může doprovázet zmrazování, ražba v přetlaku vzduchu nebo vakuování prováděné v předstihu před vlastní ražbou. NRTM, původně používaná v extravilánu, se s postupem času začala používat i pro ražbu městských tunelů se striktním požadavkem na omezení negativních projevů ražby v nadloží tunelu. Důsledkem toho je použití vyššího počtu doprovodných opatření a zkrácení intervalu od provedení záběru k osazení primárního ostění. Pozitivní vliv na omezení deformací nadloží má i vertikální členění výrubu. Primární ostění je v případě použití NRTM pod zástavbou dimenzováno nejen z hlediska únosnosti, ale i z hlediska přípustných deformací. Požadavek na omezení deformací má za následek zvýšení zatížení ostění horninovým tlakem a tím i jeho dimenzí. K souběhu ražby a betonáže definitivního ostění dochází spíše výjimečně, a to spíše u dlouhých tunelů z důvodu zkrácení doby výstavby. Přístup k dimenzování definitivního ostění souvisí s otázkou nosné funkce primárního ostění po dobu životnosti tunelu (podle českých norem 100 let). Ačkoli jsou ze světa i z použití v České republice známy případy, kdy je jako definitivní ostění použito jednoplášťové ostění ze stříkaného betonu (metoda „Laser Shell“ používaná v Londýně nebo řešení atypických profilů pražského metra), je v České republice přístup k únosnosti primárního ostění po betonáži definitivního ostění velmi konzervativní a předpokládá buď jeho úplnou degradaci nebo jen minimální podíl na celkové únosnosti obou ostění. To má za následek, že definitivní ostění je dimenzováno na stejné nebo větší zatížení jako ostění primární, neboť se jedná o trvalou konstrukci a

k zatěžovacím stavům přibývá i zohlednění teplotních klimatických vlivů, smršťování betonu, zatížení technologickým vybavením tunelu apod. V zahraniční literatuře se však objevuje i opačný extrém, který hovoří o tom, že definitivní ostění pouze zvyšuje koeficient bezpečnosti systému složeného z obou ostění, přičemž dostatečnou stabilitu tunelu zajišťuje již primární ostění. Reálný stav primárního ostění po 100 letech nelze zatím ověřit a ani v budoucnosti nebude možné vzhledem k nepřístupnosti ostění počítat s ověřením kvality jeho betonu metodami in-situ. I nadále proto předpokládáme na toto téma četné diskuse. Stanovení pravidla pro určení podílu primárního ostění na celkové únosnosti je velmi obtížné a dimenzování definitivního ostění závisí na „odvaze“ všech účastníků výstavby. Dopad do výše investičních nákladů plynoucí z otázky stanovení zatížení definitivního ostění je zřejmý, neboť se v případě horninového tlaku pohybuje v intervalu od 0% až do 100%.

2.2 Přístup z hlediska metody ADECO-RS

Metoda ADECO-RS (zkratka **A**nalysis of **C**ontrolled **D**eformation in **R**ocks and **S**oils) vychází z předpokladu, že existuje přímý vztah mezi deformací čelby, velikostí deformací probíhajících před čelbou a velikostí deformací výrubu a primárního ostění měřených po průchodu čelby. Metoda definuje pojem „jádro“ jako celík o profilu tunelu, který se nachází před čelbou tunelu. Ochrana jádra před nežádoucími deformacemi použitím doprovodných opatření prováděných v předstihu zamezuje deformacím (boulení) čelby a následně omezuje velikost deformací v oblasti za čelbou.

K základním prvkům metody patří zvýšení tuhosti jádra v předstihu před vlastní ražbou, použití tuhého primárního ostění vyztuženého např. válcovanými profily tuhých rámu, ražba tunelu na plný profil a betonáž tuhého definitivního ostění v technologicky minimálním odstupu od čelby s rychlým uzavíráním spodní klenby. Jádro tunelu je standardně vyztužováno dlouhými sklolaminátovými kotvami délky minimálně odpovídající průměru tunelu, v případě nestabilního prostředí je zlepšováno pomocí tryskové injektáže (viz obr. 2) nebo v předstihu chráněno provedením primárního ostění pomocí metody obvodového vrubu, kdy speciální pilou vyříznutý vrub slouží jako bednění pro následně betonované ostění z drátkobetonu. K dalším opatřením patří např. provádění mikropilotových deštníků. Smykové parametry prostředí jsou vylepšovány pomocí radiálního kotvení obvodu výrubu. Vlastní ražba probíhá pod ochranou výše uvedených opatření. V případě, že je výrub prováděn pod hladinou podzemní vody a hrozí průsak



Obr. 2 Zajištění čelby dle ADECO-RS

vody do čelby a tím i do prostoru chráněného jádra tunelu, je nutné po obvodě výrubu instalovat drenážní trubky, které průsakům vody do jádra před čelbou i vlastní čelby tunelu zabrání. Ražba na plný profil vyžaduje nasazení speciálního strojního vybavení s dostatečným dosahem odpovídajícím velikosti tunelu. Metoda umožňuje výstavbu tunelů podle naplánovaných postupů, a to i v nejnepříznivějších podmínkách, bez nutnosti

improvizace během výstavby. Princip metody nazývá prof. Lunardi „zprůmyslněním tunelování“, kdy se veškeré sledování během výstavby omezuje pouze na sledování projevů jádra v reakci na ražbu a odpovídající způsob zajištění jeho tuhosti a stability. V závislosti na chování jádra při výstavbě definuje metoda pouze tři geotechnické kategorie, na základě kterých je zvolen další technologický postup:

Kategorie A: čelba je stabilní, prostředí se chová jako skalní hornina;

Kategorie B: čelba je stabilní krátkodobě, typ chování soudržných materiálů;

Kategorie C: čelba je nestabilní, typ chování nesoudržných materiálů.

Cílem metody je zachovat pokud možno původní stav blížící se primární napjatosti horninového masivu a zajistit tak odpovídající parametry horninového masivu jako stavebního materiálu tunelu. Provedená opatření mají za cíl eliminovat negativní vlivy ražby na vlastnosti horninového masivu a zvláště pak jádra před čelbou. Tento princip je obecně platný i při ražbě tunelu v extravilánu, kde nehrozí ovlivnění objektů v nadloží.

Z výše uvedeného je zřejmé, že ač se jedná o konvenční tunelovací metodu využívající obdobných prvků pro zajištění stability výrubu jako NRTM, přístup k zajištění stability výrubu je zcela odlišný. Výše uvedené postupy vyžadují použití podstatně tužšího primárního i definitivního ostění a vzhledem k posunu na Fenner-Pacherově křivce směrem k menším přípustným deformacím dochází k nárůstu zatížení a tím i dimenzí jak primárního, tak definitivního ostění. Metoda je méně citlivá na změnu geotechnických podmínek, neboť doprovodná opatření jsou standardně prováděna s předstihem na délku odpovídající průměru tunelu. Obdobné postupy jsou prováděny v rozdílných geotechnických podmínkách, což vede v porovnání s NRTM k méně hospodárnému řešení.

3 Realizácia tunela Monte Cuneo

Tunel Monte Cuneo sa nachádza v malebnom mestečku Avigliana v podhorí Álp, neďaleko od Turína. Tunel je súčasťou preložky štátnej cesty č. 589. Preložka sa skladá z 2 tunelov a cestnej komunikácie medzi nimi, ktoré budú po ukončení tvoriť východný obchvat mestečka Avigliana. Na projekt boli použité financie pre organizáciu 20. Zimných Olympijských hier v Turíne 2006. Investorom bola Agentúra pre usporiadanie 20. Zimných Olympijských hier Turín 2006. Dodávateľom bolo konzorcium talianskych firiem. Samotný tunel Monte Cuneo realizovala firma Grassetto Lavori S.p.A., subdodávateľom raziacich a betonárskych prác zo severovýchodného portálu bola firma Skanska BS a.s. Realizácia nášho rozsahu prác započala v januári 2005 a bola ukončená v decembri 2005.

Technické parametre tunela

Tunel Monte Cuneo je jednorúrovňovým cestným tunelom, ktorý bol razený z oboch portálov. Jeho základné parametre:

- dĺžka razenej časti: 1 723 m
- dĺžka hĺbenej časti: 86 m a 107 m
- plocha výrubu: 120 – 146 m²
- núdzové zálivy: 6 ks dĺžky 45 m (3 po každej strane tunela šachovnicovo)
- výška nadložia: 15 – 100 m

3.1 Geologické a hydrogeologické podmienky

Tunel bol razený v masíve s pestrou geologickou skladbou, od vápencov so strednou pevnosťou, cez naplaveniny z ľadovcovej činnosti s výskytom rozmerných valúnov z alpského masívu až po piesčité nánosy ílu v kombinácii s vrstvami zahlienených štrkov. Povrch nad trasou tunela prechádza zo severovýchodu niekoľkými depresiami a v blízkosti trasy sa nachádza i menšie jazero, čo spoločne spôsobuje značné nasiaknutie horniny predovšetkým zrážkovou vodou. Prítoky v čele razenia sa pohybovali v závislosti od zrážok od 50 do 200 l/min. Výška nadložia je premenná od 15 do 100 m, pričom nízke nadložia bolo charakteristické predovšetkým pre priortálové úseky. Kombinácia horninového prostredia, nízkeho nadložia a vody vytvárala veľmi zložité podmienky pre razenie, čelba bola nestabilná, s častým vypadávaním horniny.

3.2 Použitá mechanizácia pri razení

Pre stabilizáciu čela výrubu a stropu v predpolí bola použitá vrtná súprava Casagrande (viz obr. 3). Je to veľkokapacitná vrtná súprava mohutnej konštrukcie s dvoma lafetami otočnými okolo osi stroja, schopná vrtať vrty až do dĺžky 24 m. Lafety sú opatrené hydraulickými valcami v prednej i zadnej časti, čím je zabezpečená variabilita nastavenia uhla/sklonu vrty. Mechanické otváranie bolo realizované pomocou pásových bagrov Fiat-Hitachi s použitím mechanického zuba, resp. hydraulického kladiva, odťažba pomocou kolosových nakladačov Fiat-Kobelco a nákladných 4-nápravových áut. Pre striekanie betónu boli používané striekacie súpravy Cifa CSS-1 a 2. Osadzovanie masívnych oblúkových nosníkov 2x IPE 180 zabezpečovala mobilná plošina Manitou MRT1850 so špeciálnym nástrojom pre uchytávanie týchto nosníkov (hydraulické kliešte).

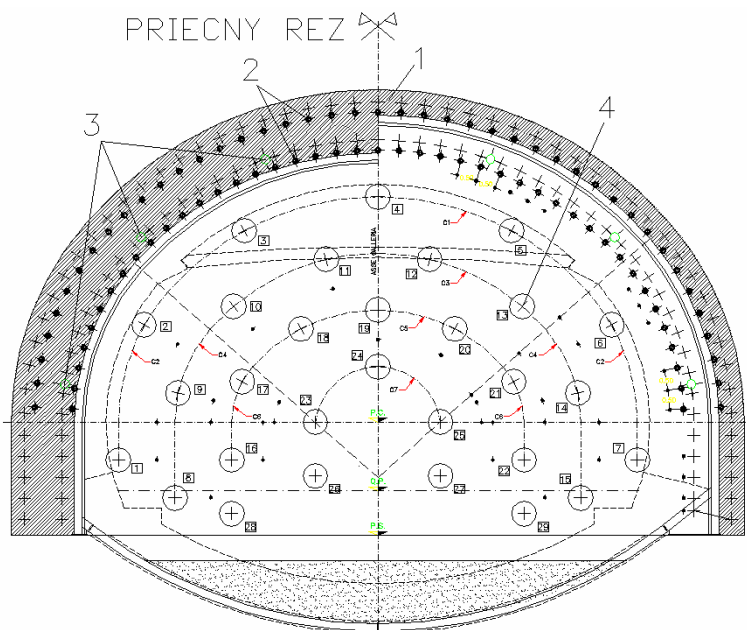


Obr. 3 Vrtná súprava Casagrande

3.3 Technológia razenia

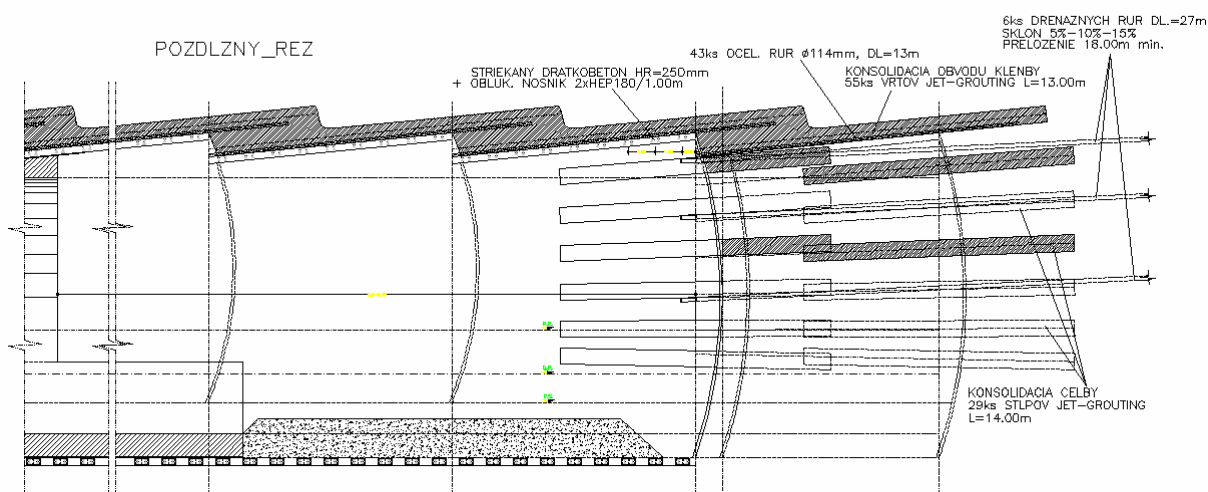
Pri razení bola využívaná talianska tunelovacia metóda ADECO-RS známa tiež ako Lunardiho metóda. Charakteristické pre túto metódu je razenie na plný profil bez ohľadu na geologické podmienky. Tak tomu bolo i v našom prípade. Razilo sa na plný profil pod ochranou mikropilotových dáždnikov, pričom výrub bol stabilizovaný horizontálnou tryskovou injektážou a v obzvlášť zlých geologických podmienkach aj sklolaminátovými svorníkmi v dĺžke 14 m (viď obr. 4). Samotný ochranný mikropilotový dáždnik ktorého realizácia trvala v priemere 4 dni bol zložitou konštrukciou a jeho výroba predpokladala nasledovné činnosti:

- Zaistenie obvodu klenby vrtmi v počte 55 ks a dĺžky 13 m preinjektovanými tlakovou injektážou (5 MPa);
- 43 ks vrty ochranného dáždnika z perforovaných rúr DN 114 dl. 13 m s následnou výplňovou injektážou (do vzdialenosti 270 mm pod vrty spevňujúce klenbu);
- 6 ks drenážnych odvodňovacích vrty dĺžky 27 m, pričom min. 9 m vrty bolo pažené drenážnou pažnicou, ktorých úlohou bolo eliminovať tlak vody na čelo razenia.



Legenda:

- 1 - 55 ks stĺpov tryskovej injektáže dl. 13 m ; 2 – 43 ks ocel. Rúr ø114 dl. 13 m
 3 – 6 ks drenážnych rúr dl. 27 m ; 4 – 29 ks stĺpov trysk. injektáže dl. 14 m



Obr. 4 Schéma zaistenia stability čelby (priečny a pozdĺžny rez)

Tieto práce boli vykonávané za použitia vrtacej súpravy Casagrande a veľkokapacitnej injektážnej súpravy umiestnenej na povrchu. Pred započatím stabilizácie čela a stropu výrubu bolo potrebné zaistiť čelo razenia vyprofilované do konkávneho tvaru 15 cm hrubou vrstvou striekaného drôtobetónu. Dôvodom bolo optimalizovať účinok injektáže a zosilniť čelo, aby odolalo horninovému tlaku a pôsobiacej injektáži. Ďalej bolo potrebné pripraviť pred čelbou miesto pre vrtaciu súpravu, odvodňovacie kanály a sedimentačné jímky pre prebytočnú injektážnu zmes (príprava trvala v priemere 12 hodín). Razenie prebiehalo po 1,5 m záberoch v tzv. „kampách“ (kampo = 1 cyklus pod mikropilotovým dáždnikom). Dĺžka 1 kampa bola 9 m. Variácia 14 m neprinesla očakávané urýchlenie

prác z dôvodu veľkej časovej náročnosti vŕtania 18 m vrtov, nízkej účinnosti injektáže a odvodňovacích vrtov a s tým súvisiacimi veľkými problémami so stabilitou čela pri razení. Otváranie záberu bolo realizované mechanickými prostriedkami bez použitia trhacích prác. Zaistenie výrubu zabezpečoval predstrek 50 mm drôtobetónu, 5 segmentová nepoddajná výstuž tvorená zvarencom 2x IPE 180 a následný dostrek striekaného drôtobetónu do hrúbky 250 mm. Priemerné postupy pri razení dosahovali 3 m denne. Keď počítame celkové priemerné postupy, vrátane stabilizácie čela a stropu výrubu (realizované firmou Fondazioni Speciali S.p.A.), tieto dosahovali 0,9 m za deň, pričom stabilizácia trvala v priemere 5 dní, vyrazenie jedného 9 m kampa 3 dni. Primárne ostenie protiklenby bolo totožné s primárom v hornej klenbe, t.j. 2x IPE180 a striekaný drôtobetónu hr. 250 mm. Po dokončení protiklenby bola táto späťne zasypaná, aby bola možná doprava do čelby.

3.4 Betonáž hlbených tunelov a sekundárneho ostenia

Betonáž hlbených tunelov bola realizovaná v dvoch rôznych tvaroch profilu. Kým hlbený tunel na juhozápadnom portáli mal tvar totožný s tvarom sekundáru v razenej časti, zo severovýchodného portálu mal pričný rez tvar obdĺžnika. Súviselo to s použitou technológiou. Vyplyvalo z toho, že pri súbežnom razení a betonáži bola nutnosť použiť dva typy debnenia. Pre hlbený tunel na JZ portáli bol použitý debniaci voz od firmy Cifa, ktorý prešiel po dobetónovaní do razenej časti. Pre hlbený tunel na SV portáli bolo použité systémové debnenie Doka.



Obr. 5 Osádzanie oblúkového nosníka

V hlbenom tuneli bola betonáž rozdelená na štyri fázy: základová doska, základové pásy (bankety), steny a strop. Posledný blok hlbenej časti bol prechodovým medzi hlbenou a razenou časťou a mal vnútorný pričný rez totožný s razenou časťou, pričom sa preň použil sa debniaci voz firmy Cifa. Ako kontradebnenie bolo použité systémové debnenie Doka.

V razenej časti bola betonáž sekundáru rozdelená tak isto do 4 fáz: protiklenba, základové pásy, horná klenba a medzistrop. Maximálna vzdialenosť medzi čelom výrubu a zabetónovanou klenbou bola presne stanovená projektom: 2,5-4x šírka profilu, t.j. v najlepšom prípade $4 \times 14,4 \text{ m} = 58 \text{ m}$. Vzdialenosť betonáže protiklenby a základových pásov sa časovo odvíjala od tejto vzdialenosti. Protiklenba a základové pásy sa betónovali vždy v čase zaisťovania stropu predpolia a čela výrubu a vzdialenosť od čela výrubu bola cca 30 m. Protiklenba bola vystužená a bola betónovaná bez použitia debnenia. Čelo bolo zabezpečené B-systémom. Dĺžka 1 záberu bola 9 m, hrúbka betónu 900 mm, použitý betón C25/30. Pre debnenie základových pásov bola použitá forma od firmy Cifa dl. 12 m. Debnenie hornej klenby zabezpečoval debniaci voz Cifa dl. 12 m. Použitý bol prevzdušnený betón C25/30 bez zvláštnych požiadaviek na chemickú odolnosť. Minimálna hrúbka betónu v hornej klenbe bola 500 mm, vzhľadom na razenie pod ochranným dáždnikom sa hrúbka vyšplhala až do 1400 mm. Debniaci voz pre betonáž medzistropu bol taktiež výrobkom firmy Cifa.

3.5 Porovnanie ADECO-RS a NRTM z hľadiska realizácie

Realizácia prác za podmienok metódy ADECO-RS bola pre nás zaujímavou skúsenosťou. Raziť tunel s pričným prierezom cca 120 m² na plný profil v tak zlých geologických podmienkach s prítokmi vôd bolo často adrenalínovým športom. Pri porovnaní s NRTM tu chýbala možnosť operatívneho zaistenia čelby – keď sme mali problém s padajúcou čelbou, jedinou možnosťou ako ju zachytiť bol striekaný drôtobetón. Ten však na blatistom povrchu čelby s prítokmi vody odpadával aj s vrstvou horniny. Použitie kari siete na posilnenie funkcie striekaného betónu bolo obmedzené. Uchytiť sme ju mohli len na väčšinou „rozstrapkané“ fiberglasy a tak sa neraz stalo, že nám celý bezpečnostný striekaný betón odpadol z čelby aj s kari sieťou. Nebola možnosť zachytiť ho svorníkmi, pretože jediná vrtná súprava bola „obrovská“ casagrande, ktorá na to nebola vhodná a hlavne neoperatívna (doprava Casagrande do čelby trvala cca 4-8 hodín).

Za nedoriešené som považoval aj použitie mohutných oblúkových nosníkov 2x IPE180. Ich inštalácia bola veľmi náročná (výška profilu 10 m – viz obr. 5) a zastriekanie zvarenca problematické (dva IPE profily privarené k sebe IPE profilom v rastri 1 m, pričom vzdialenosť medzi hlavnými nosníkmi zvarenca bola iba 30 cm). V prípade, že ochranný dáždnik nebol navrhnutý pod stanoveným uhlom, resp. niektorá z mikropilot „ušla“ zo smeru, nebolo možné osadiť nosník presne. Následná profilácia podprofilov znamenala doslova deštruktívne práce.

Pre výrobu injektážnej zmesi použitej pre zainjektovanie vývrvtov sa používala injektážna stanica. Táto bola situovaná pred tunelom a zmes bola dopravovaná do čelby pod tlakom v špeciálnom potrubí. Toto riešenie, pre taliansku metódu obvyklé, malo veľa úskalí. Je síce pravda, že umiestnenie stanice v tuneli by bolo náročné tak z priestorového hľadiska ako aj z hľadiska dodávky materiálov, no potrubie bolo poruchové a vzhľadom na intenzitu prác v tuneli aj náchylné na poškodenie.

Keby som mal zhrnúť porovnanie metód ADECO-RS a NRTM z pohľadu realizátora prác, NRTM má obrovskú výhodu v operatívnosti, teda v možnosti okamžite reagovať tak v prípade zhoršenia ako aj zlepšenia geologických podmienok. Tá možnosť je predovšetkým vo variabilite zaist'ovacích prostriedkov a v strojnom vybavení používanom pri tejto metóde. Tým je možné optimalizovať náklady na primárne ostenie. Stroje sú pri NRTM využívané kontinuálne, bez väčších prestojov. V prípade ADECO-RS je spôsob zaist'ovania prakticky nemenný aj v prípade zmien v geológii, čo má výhodu len v tom, že nie je potrebný tak intenzívny geotechnický monitoring a pracovníci vykonávajú „továrenskú výrobu“ bez zásadných zmien. Na našej stavbe bolo bežné, že geológ kontroloval čelbu 2x za týždeň, čo pri NRTM nie je mysliteľné. Dozor sa obmedzoval na kontrolu kvality prevedenia prác.

4 Závěr

Tunelovací metódy ADECO-RS i NRTM lze při použití příslušných doprovodných opatření nasadit ve stejném spektru geotechnických podmínek. Ačkoli se jedná o metódy využívající při dosažení stability výrubu obdobných prostředků, přístup každé z metod k technologickému postupu ražby i názoru na jeho optimalizaci je zcela odlišný.

Metóda NRTM dokáže velmi operativně zvládat změnu geotechnických podmínek a optimalizovat technologický postup výstavby i způsob zajištění stability výrubu s pozitivním dopadem na výši investičních nákladů. Vyžaduje podrobnější sledování chování horninového masivu během výstavby a vyšší odbornou zainteresovanost všech

účastníků výstavby. Pro dosažení technických i ekonomických výsledků vyžaduje vytvoření transparentních pravidel na úrovni zadávací dokumentace, přesné specifikace výkonů a precizních smluvních vztahů zohledňujících rozdělení technologických i geologických rizik během výstavby. Optimálních výsledků lze dosáhnout při výstavbě tunelů v prostředí, které umožňuje plně využít samonosnosti horninového masivu a neklade zvláštní požadavky na omezení deformací nadloží tunelů. Při ražbě pod zástavbou dokáže použít taková opatření, která omezí vznik nežádoucích deformací. Přístup k chování horninového masivu umožňuje návrh subtilnějších konstrukcí primárního i sekundárního ostění, které bývá mnohdy provedeno z prostého betonu.



Obř. 6 Tunel Monte Cuneo po dokončení

Metoda ADECO-RS používá k dosažení stability výrubu robustních prostředků a díky způsobu zajištění jádra před čelbou na vzdálenost odpovídající alespoň průměru tunelu není schopna dostatečně rychle reagovat na změnu geotechnických podmínek. Ražba na plný profil vyžaduje věnovat mimořádnou pozornost stabilitě čelby a bezpečnosti práce v oblasti čela tunelu. Požadavek na rychlé uzavírání klenby primárního i definitivního ostění klade vysoké nároky na koordinaci prací při souběhu ražby a betonáže definitivního ostění. Princip metody obecně zvyšuje zatížení obou ostění horninovým tlakem s dopadem do dimenzí i výše investičních nákladů. Autorem metody uváděné „zprůmyslnění výstavby“, kdy se cyklicky opakují stále stejné činnosti bez výraznější reakce na změnu geotechnických podmínek, zjednodušuje provádění jak z hlediska objednatele, tak zhotovitele. Dochází k tomu ale za cenu nárůstu investičních nákladů. Metoda je vhodná spíše do obtížných geotechnických podmínek s monotónním vývojem s přísným požadavkem na zajištění přípustné deformace nadloží.

Literatura

- [1] PROF. ENG. PIETRO LUNARDI, *Lunardi Consulting Engineers Milan, The design and construction of tunnels using the approach based on the analysis of controlled deformation in rock and soil, T&T International ADECO-RS Approach May 2000, str. 3 – 30.*

Ing. Peter Balušík

✉ Skanska BS a.s. organizační složka
Perucká 2483/9
121 44 Praha 2
☎ +420 244 001 185
📄 +420 244 001 182
😊 peter.balusik@skanska.sk
URL www.skanska.sk

Ing. Libor Mařík

✉ IKP Consulting Engineers, s. r. o.
Jirsíkova 5
186 00 Praha 8 - Karlín
☎ +420 255 733 522
📄 +420 255 733 605
😊 libor.marik@ikpce.com
URL www.ikpce.com