

GEOTECHNICKÝ MONITORING PŘI STAVBĚ SILNIČNÍCH TUNELŮ LOCHKOV

Radek Bernard, Jakub Bohátka

ABSTRAKT

Ražba tunelu Lochkov zahrnovala výstavbu dvou souběžných tunelů dlouhých cca 1300 m (stoupající třípruhový tunel a klesající dvoupruhový tunel) mezi městskými částmi Lochkovem a Radotínem na jihozápadním okraji Prahy. Tunely byly raženy podle zásad Nové rakouské tunelovací metody (NRTM). Na ražené tunely navazovaly hloubené úseky, které dosahovaly u Lochkovského portálu délky 350 m. Součástí ražeb bylo také provedení 6 tunelových propojek.

Stavební práce na tunelu Lochkov byly zahájeny v létě roku 2006 výkopovými pracemi na severním portálovém úseku. Ražby na obou tunelech byly ukončeny v červnu roku 2008. Zahájení zkušebního provozu se datuje k září roku 2010.

ABSTRACT

The driving of the Lochkov tunnels incorporated the construction of two parallel tunnels approximately 1300 meters long (an ascending three-lane tunnel and a descending two-lane tunnel) between the municipal areas of Lochkov and Radotín, on the south-western edge of Prague. The tunnels were driven according to the principles of the New Austrian Tunnelling Method (NATM). Excavated cut-and-cover sections 350m in length at the Lochkov are linked to the driven tunnels. Six tunnel cross-passages were also part of the driving.

Construction work commenced on the Lochkov tunnel in summer 2006 by excavation works on the northern portal section. Tunnelling excavation was completed in June 2008. Start of testing operation in tunnels has been dated since September of 2010.

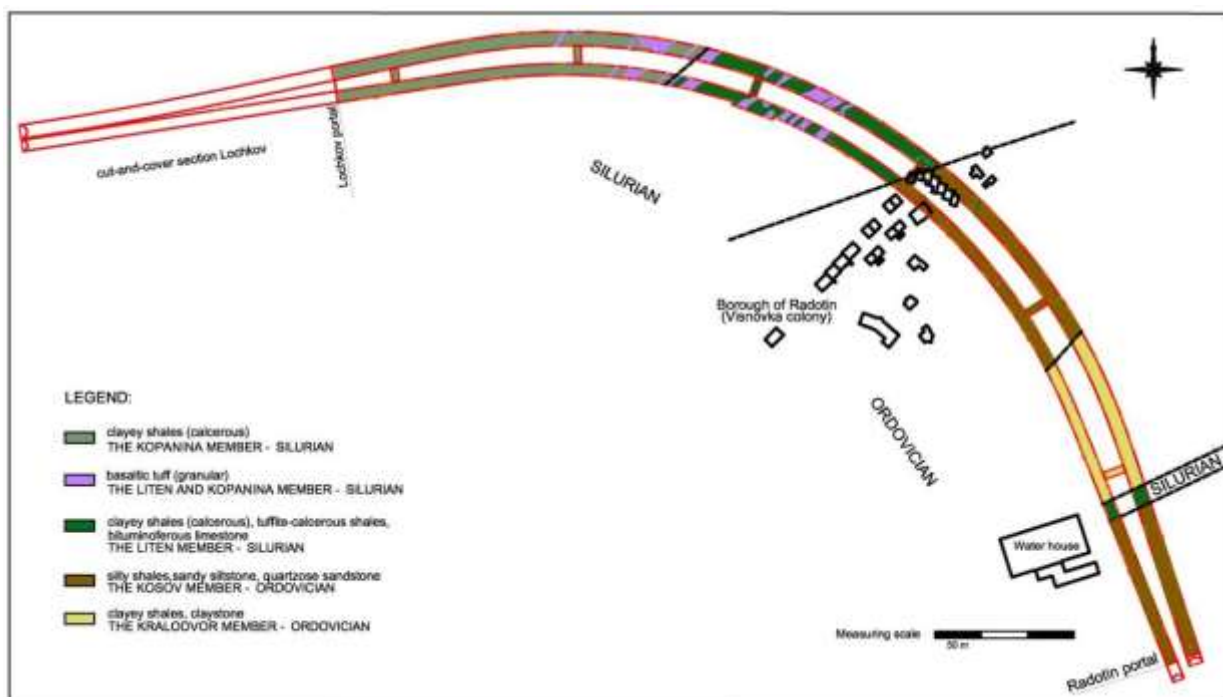
1. ÚVOD, POPIS STAVBY

Tunel Lochkov, který je součástí silničního okruhu kolem Prahy – SOKP, stavby 514, navazuje na estakádu v údolí Berounky u Radotína a vystupuje na terén u obce Lochkov. Tato část silničního okruhu kolem Prahy spojuje dvě hlavní dálniční tepny ČR (dálnice D1 a D5) směr východ – západ. Tento tunel byl koncem září 2010 uveden do provozu v rámci souboru staveb SOKP úseků 512, 513 a 514.

Investorem výstavby SOKP 514 bylo Ředitelství silnic a dálnic ČR, závod Praha. Projektantem tunelu Lochkov byla společnost Valbek, spol. s r.o. Zhotovitelem razících prací uvedeného díla byla firma Hochtief a.s. Při ražbě samotných tunelů bylo zhotovitelem geotechnického monitoringu sdružení firem ARCADIS Geotechnika a.s. (současný název ARCADIS CZ a.s., divize Geotechnika) a PUDIS a.s., přičemž ARCADIS Geotechnika byla lídrem sdružení.

Tunel dosahuje průměrného stoupání 4% ve směru staničení trasy. Je ve větší části své délky veden v levém směrovém oblouku o úhlu cca 90°, Obr. 1. Tunel má dvě jednosměrné tunelové trouby, pravá trouba (3PT), ve směru jízdy stoupací, je se třemi jízdními pruhy o šířce vozovky mezi obrubníky 11,75 m a s oboustranným nouzovým chodníkem šířky min. 1 m, levá trouba (2PT), ve směru jízdy klesající, má dva jízdící pruhy o šířce vozovky mezi obrubníky 9 m a oboustranný nouzový

chodník šířky min. 1 m. Podjezdná výška tunelů je 4,50 m. Délka 2PT je 1620 m, z toho ražená část je dlouhá 1252 m, délka 3PT je 1660 m, z toho ražená část je dlouhá 1302 m. Ražený profil stoupajícího třípruhového tunelu (3PT) představoval plochu 137 m², ražený profil klesajícího dvoupruhového tunelu činil 103 m². Tunelové trouby jsou propojeny 7 únikovými propojkami, z toho propojka č. 4 je určena pro průjezd velkých vozidel IZS a propojky č. 2 a 6 jsou určeny pro průjezd malých vozidel IZS. Zbylé propojky jsou určeny k úniku osob. Uprostřed trouby dvoupruhového tunelu, oproti propojce č. 4, je umístěn 50 m dlouhý nouzový záliv.



Obr. 1 Celková situace tunelu Slivenec

Ražba tunelu byla prováděna metodou NRTM. V profilu třípruhového tunelu byla v předstihu vyražena průzkumná štola soudkovitého tvaru o raženém profilu 25 m² jako dílčí střední výrub (Obr. 2). Zvolené umístění štoly v ose třípruhového tunelu se ukázalo jako velmi vhodné pro bezpečnost a rychlost vlastní ražby třípruhového tunelu. Průzkumná štola ve 3PT byla pro ražbu tunelu optimálně situována, horní klenba primárního ostění tunelu byla vyprojektována cca 0,5 m pod strop průzkumné štoly. Zhotovitel ražby tunelu tak odstraňoval pouze boky a dno ostění štoly a její horní část zůstávala při výrubu kaloty jako podpůrný prvek v nově zhotovovaném ostění horní klenby tunelu. Štola zde tudíž působila jako ztužující podélný nosník, který evidentně vylepšoval stabilitu čelby tunelu.

Těsně před dokončením ražby 2PT, poblíž Lahovického portálu, došlo k nadvýlomu velkého rozsahu. Tato událost byla úspěšně zvládnuta spoluprací účastníků výstavby a neprojevila se na konečný termín dokončení stavby. Situace byla podrobně popsána a hodnocena jedním z autorů v příspěvku vydaném v časopise Tunel. Tunelové portály na závěr výstavby ozdobily ocelové prvky architektonického záměru (Obr. 7). Konstrukci primárního ostění tvořilo 5 dílů příhradových rámců BTX (typu 129-25), dvě vrstvy ocelových sítí \varnothing 6 až 8/150, stříkaný beton C20/25-XO tloušťky 200 až 300 mm, vhodně zvolené kotevní prvky (svorníky samozávrtné, hydraulické či SN), případně předháněné jehly.



Obr. 2 Ražba tunelové roury 3PT s průzkumnou štolou

Definitivní ostění tunelů bylo budováno do pojízdného ocelového bednění a kontra formy u hloubených tunelů, Obr. 3. Pro zkosené portálové bloky tunelů bylo použito bednění PERI (světově uznávaná německá společnost zabývající se systémovým bedněním inženýrských staveb). Konstrukce sekundárního ostění byla budována z armovaného betonu C25/30 - XF4, XD3 tloušťky 50 cm. Směr postupu při betonáži byl totožný jako při ražbě, tedy úpadní od Lochkovského k Lahovickému portálu.



Obr. 3 Realizace rozsáhlé hloubené části tunelu – Lochkovský portál

Tunelová klenba je ve většině délky tunelu založena na základových pasech. U portálových částí ražených tunelů a v místech velkých deformací primárního ostění v poruchových částech horninového masivu byla realizována spodní klenba. Na tunelu 514 byly pro vyztužení definitivního ostění, jako na prvním českém tunelu, použity jednoosé ocelové sítě, které se realizovaly v hloubené i ražené části. Součástí tunelu jsou rovněž dva provozně technické objekty, které přiléhají na obou portálech k definitivním portálům tunelu.

2. GEOLOGICKÉ A GEOTECHNICKÉ POMĚRY DOTČENÉ OBLASTI

2.1 Regionální geologická situace a zastižená geologie při ražbě

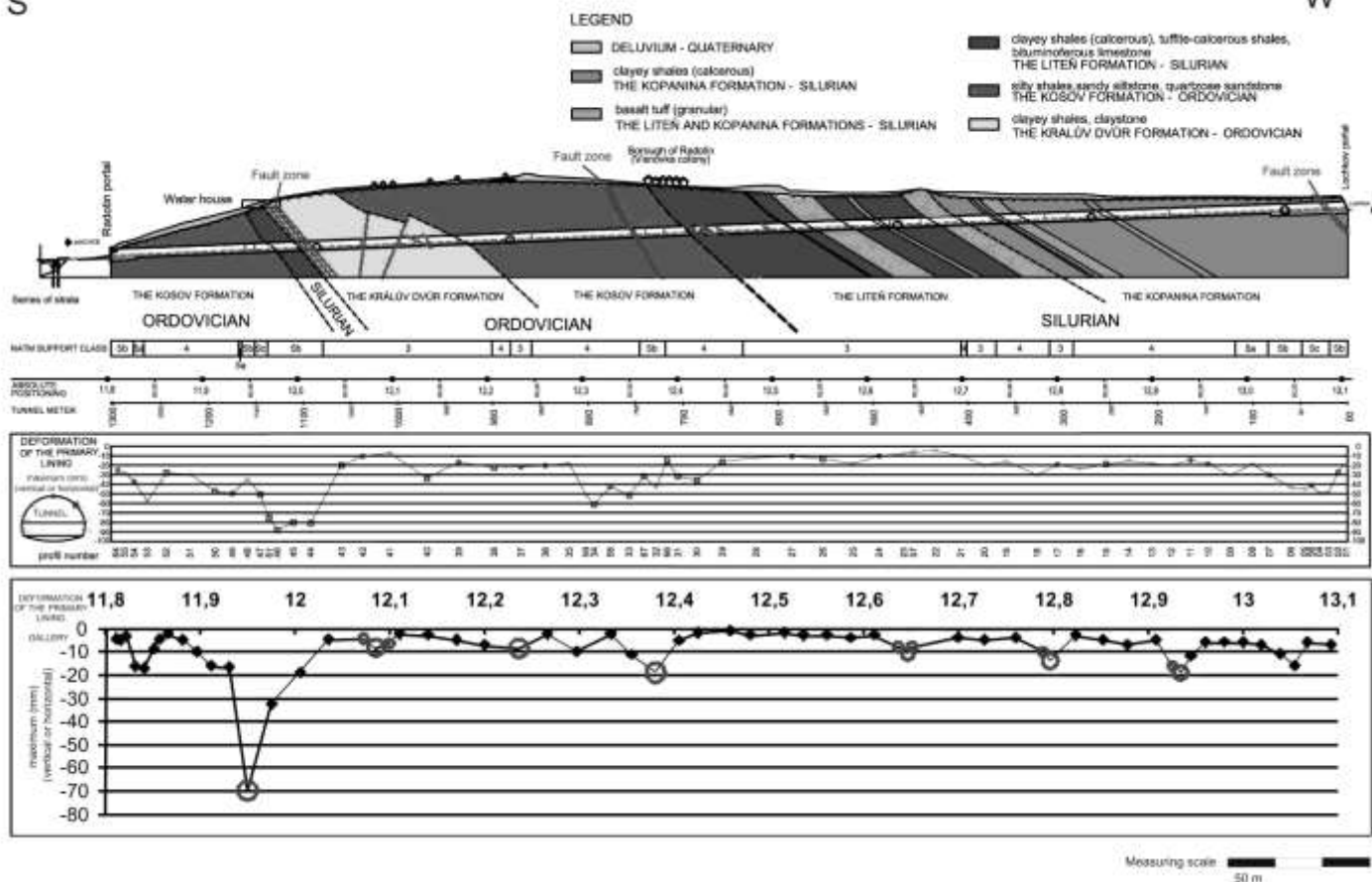
Tunel Slivenec se nachází na jihozápadním okraji hlavního města Prahy. Čistě z hlediska geologického, se jedná o velmi zajímavou, dnes již klasickou geologickou oblast Barrandien. Tunel je situován do hrany svahu údolí řek Vltavy a Berounky s převýšením až 130 m. Ražené tunely jsou situovány v JV křídle pražského synklinoria středočeského paleozoika tradičně označovaného jako barrandien.

Horniny, ve kterých byl tunel Lochkov ražen, jsou horniny paleozoického stáří. Jsou to jednak horniny svrchního ordoviku (královské a kosovské souvrství) a jednak spodního až svrchního siluru (liteňské a kopaninské souvrství). Ordovické a silurské horniny byly při variském vrásnění nejprve zvrásněny a posléze rozlámány v jednotlivé tektonické kry. Nedaleko tunelu probíhají místní výrazné tektonické linie, očkovský zlom a kodský zlom. Z hlediska litologického a stratigrafického se jedná o horniny silurské, reprezentované souvrstvím kopaninským a souvrstvím liteňským a horniny ordovické, reprezentované souvrstvím kosovským a královským.

Obě tunelové trouby byly tudíž raženy v ordovických a silurských horninách, které byly tektonicky porušeny a prostoupené zlomovými a vrásovými poruchami. Jednalo se především o vápnité břidlice, doplněné četnými vložkami vápenců či prachovců. V některých úsecích byly zastiženy bazaltové tufy. V polohách tufitických břidlic byly dokumentovány kulovité diagenetické konkrece o velikosti až 0,5 m. Další část ražeb probíhala střídavě v břidlicích, pískovcích až křemitých pískovcích, případně tufech.

U Lahovického portálu (cca do 50 m), byly zastiženy horniny královského souvrství (ordovik) postiženy četnými příčnými zlomy, tvořící poruchové zóny s výplní drčené horniny a paralelními zlomy. Z geotechnického hlediska se jednalo o silně porušený masiv a vzhledem k minimálnímu horninovému nadloží (3-10m) šlo o nejobtížnější úsek ražby. Složitá geologická situace při ražbách, včetně deformačního chování na primárním ostění, je zřejmá z podélného profilu (Obr. 4).

Z výše uvedeného je zřejmé, že byly zastiženy horniny s odlišnými geotechnickými typy horninového masivu - horniny silně zvětralé až zdravé s proměnlivou pevností v prostém tlaku od 0,5 do 262,7 MPa (hodnoty získané z laboratorních zkoušek na pravidelně odebíraných vzorcích z dokumentovaných hornin), tudíž i zařazení hornin bylo velmi rozdílné od R1 do R6 (dle normy ČSN 73 1001, jejíž platnost byla ukončena v březnu 2010 a nahrazena Eurocode 7).



Obř. 4. Geologický řez třípruhovým tunelem Lochkov s průběhy maximálních deformací primárního ostění při ražbě tunelu (horní graf) a při ražbě průzkumné štoly (dolní graf). U průběhu maximálních deformací primárního ostění průzkumné štoly (dolní graf) jsou pomocí kroužků odlišeny maximální deformace primárního ostění výhyben, rozšířených na kalotu třípruhového tunelu.

2.2 Geotechnické poměry tunelu Lochkov

Pro stavbu SOKP 514 bylo provedeno několik etap průzkumných prací. Předběžný GTP provedla společnost IKE s.r.o. v roce 1998 podrobný geotechnický průzkum (vrtné a geofyzikální práce) realizovala společnost PUDIS a.s. v roce 2001-2002. V roce 2004 byla provedena poslední etapa průzkumných prací spočívající ve vyrazení průzkumné štoly situované v ose třípruhového tunelu (dále 3PT). Ražba štoly byla prováděna z obou portálů a průzkumné práce provedly společnosti PUDIS a.s. (úpadní část) a ARCADIS Geotechnika a.s. (dovrchní část). Geotechnické vyhodnocení ražby průzkumné štoly pro následný projekt tunelů provedla společnost D2 Consult Praha, s.r.o. v roce 2005.

Součástí průzkumné štoly bylo také vyrazení 7 rozšířených výrubů (o délce 15 – 40 m) o velikosti kaloty budoucího třípruhového tunelu s raženým profilem 65m² sloužící současně jako výhybny pro kolovou dopravu. Ražba průzkumné štoly byla oproti tunelům prováděna z obou portálů. Realizace těchto rozšířených „pokusných“ výrubů zahrnovala nejen realizaci průzkumných geotechnických zkoušek (vrtné vějíře s presiometrickými zkouškami), ale současně umožnila sledovat při ražbě reálné hodnoty deformací projektovaného výrubu kaloty, v profilu později raženého tunelu, včetně predikace deformací nadloží a vývoje poklesové kotliny na povrchu terénu ve vazbě na přilehlou zástavbu.

Na základě provedených průzkumných prací byly geotechnické poměry v trase ražby tunelů definovány pomocí 18 kvazihomogenních celků. Základními geotechnickými parametry pro určení těchto celků byla četnost a charakter

rozpukání, pevnost hornin a výška nadloží. V zadávací dokumentaci (DZS) byly definovány technologické třídy NRTM TT3, TT4, TT5a a TT5b. V průběhu zpracování realizační dokumentace (RDS) byla na základě požadavku zhotovitele vyprojektována vstrojovací třída TT5c, obsahující provizorní protiklenbu kaloty ze stříkaného betonu s armovací sítí. V RDS byly stanoveny očekávané deformace primárního ostění v jednotlivých třídách (TT3-TT5c) a fázích výrubu (kalota, opěří, invert) a to formou grafu svislých a vodorovných deformací v čase.



Obr. 5 Provrásněné vápence v úvodní části ražeb 2PT

3. PROVÁDĚNÁ MĚŘENÍ PŘI STAVBĚ

Projektem RDS byly dle statického výpočtu nastaveny varovné stavy jednotlivých typů měření. Zpracovaný projekt geotechnického monitoringu uvažoval předpokládané charakteristické typy deformačního chování systému horninový masív – ostění a z nich vyplývající 3 hlavní varovné stavy. Kritériem pro posouzení, zda nastal či nenastal varovný stav, byly předem stanovené hodnoty deformací výrubu či sedání terénu a ovlivněných konstrukcí na povrchu s ohledem na průběh vývoje deformačního chování.

Na převážné většině prováděných měření bylo zaznamenáno příznivé deformační chování zařazené do varovného stavu vysoké bezpečnosti. Ovšem jelikož během výstavby tunelu Lochkov probíhala ražba i ve velmi složitých geotechnických podmínkách, tak byl v několika málo případech varovný stav bezpečnosti překročen a musel být uplatněn princip observační metody. Varovné stavy pro deformační chování podzemní konstrukce, zajištěných portálů a ovlivněné objekty na povrchu byly stanoveny projektantem před zahájení stavby. Projekt geotechnického monitoringu uvažoval s předpokládanými charakteristickými typy deformačního chování systému horninový masív – primární ostění a z nich vyplývajících 3 hlavních varovných stavů. Kritériem pro posouzení, zda nastal či nenastal varovný stav, byly

předem stanovené hodnoty deformací výrubu či sedání terénu (případně ovlivněných stavebních konstrukcí na povrchu terénu) s ohledem na průběh vývoje jejich deformačního chování. Maximální pozornost v průběhu ražeb byla věnována perfektně propracovanému geologickému sledování ražeb v součinnosti s konvergenčním měřením primárního ostění. Celkem bylo při ražbě v obou tunelech osazeno 126 konvergenčních profilů (63 ve 2PT a 63 ve 3PT).

Maximální absolutní deformace na primárním ostění z obou monitorovaných ražených tunelů byly naměřeny na vloženém konvergenčním profilu č. 21.60 ve dvoupruhovém tunelu. Zde ve staničení km 12.324 byly geologickou službou dokumentovány zhoršené geologické podmínky ražby, způsobené zastiženými tektonickými zlomovými poruchami. Na návrh kanceláře geotechnického monitoringu byl zde ihned vložen konvergenční profil. Již v průběhu ražby kaloty byl zaznamenán prudký nárůst deformací na zmiňovaném profilu, v prvních dnech po osazení konvergenčních bodů. V reakci na tyto informace bylo provedeno dodatečné dokotvení 6 m dlouhými radiálními kotvami IBO. Jelikož však nebylo dosaženo potřebného efektu (nedocházelo ke zpomalení rychlosti deformačního přírůstku), tak byly tyto dodatečné vystrojovací prvky ještě doplněny 8m dlouhými vodorovnými kotvami u patek kaloty. Až po aktivaci těchto dlouhých kotev došlo ke zpomalení přírůstku deformací a k následnému postupnému ustálení deformací na tomto konvergenčním profilu. Po uzavření celého profilu tunelu (tedy i dna tunelu) byla naměřena finální hodnota svislé deformace na úrovni 87 mm, což byla maximální zastižená deformační odezva na konstrukci primárního ostění.

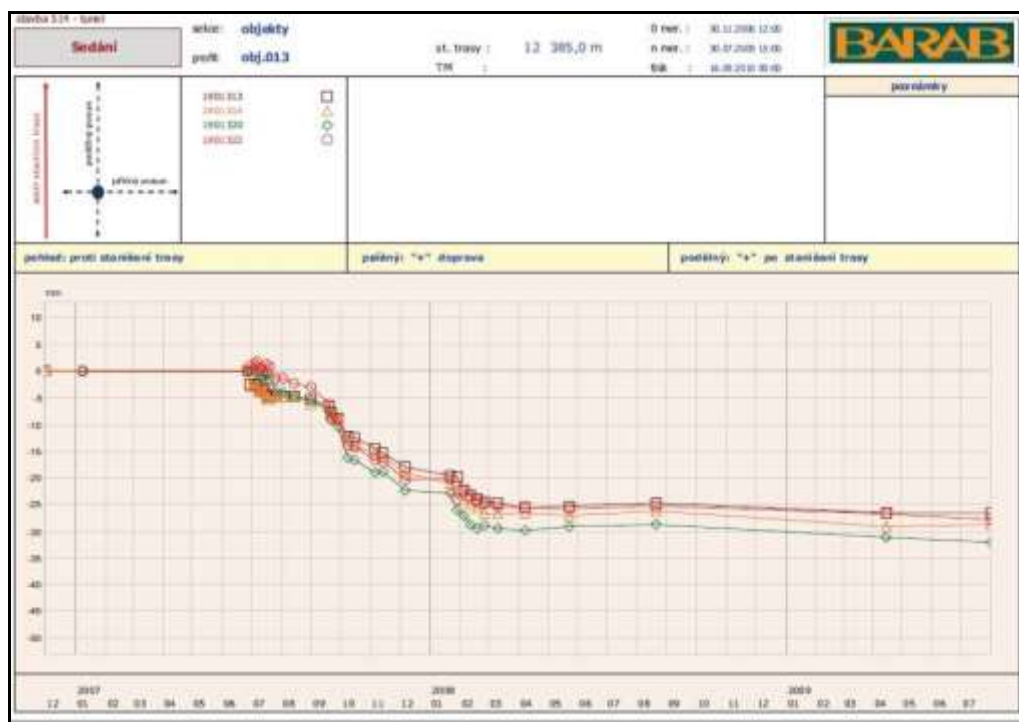
Na celou délku tunelů bylo navrženo sedm sdružených příčných profilů. Tyto profily zahrnovaly především nivelační měření povrchu a konvergenční měření na primárním ostění obou tunelů. Ve dvou případech byly součástí sdružených profilů extenzometrické vrty (1. a 2. sdružený profil) a v posledních dvou sdružených profilech zase inklinometrické vrty.

Z průběžného hodnocení ražeb, především díky konvergenčním měřením na primárním ostění v kombinaci s měřením extenzometrů, se potvrdily předpoklady z průzkumné štoly, že v úvodní části ražeb (od Lochkovského portálu), v poměrně příznivých geologických podmínkách s nadložím zhruba 10 m, se již vytvářela nad tunelem přirozená horninová klenba, která přenášela veškerá napětí od vyrubaného prostoru.

Inklinometrická měření byla projektem geotechnického monitoringu (dále GTM) naopak navržena na druhém konci stavby, tj. poblíž Lahovického portálu. Jeden inklinometrický vrt byl umístěn do příčného profilu v blízkém okolí rozsáhlého objektu Radotínské vodárny a zbylé čtyři inklinometry byly situovány ve sdruženém profilu, cca 15 m od hrany portálu. Z vyhodnocení lze konstatovat, že po ukončení ražeb dosahovaly horizontální deformace v obou zmíněných profilech maximálně necelých 18 mm. Oba popisované vyhodnocovací profily byly doplněny nivelačním měřením na povrchu, jež zachytilo vývoj příčné poklesové kotliny.

Kromě těchto měření bylo na obou portálech použito trigonometrické měření dočasně zajištěných portálových stěn a svahů, které zaznamenalo po dokončení ražeb maximální pohyby do 30 mm. Velkým přínosem pro vyhodnocování geotechnického monitoringu bylo i nivelační měření povrchové obytné zástavby. Objekty z městské části Praha - Radotín - Višňovka byly nad tunely situovány zhruba uprostřed ražeb, v místě velkého nadloží (nad 50 m). Část povrchové zástavby byla situována v zóně zdravých a pevných hornin skalního podloží, ale část

byla naopak nad oblastí zhoršených geologických podmínek, způsobených tektonickým porušením horninového masivu. To se projevilo i na rozdílných absolutních hodnotách sedání jednotlivých nadzemních objektů. Maximální pokles 33 mm (Obr. 6) byl naměřen na třech sousedních domech přímo nad osou tunelu 3PT. Nivelační body byly situovány na rozích jednotlivých objektů zmiňované zástavby (dvojdomy jsou založeny na společné betonové desce – dvě samostatné bytové jednotky). Příznivou skutečností bylo však rovnoměrné sedání, zaznamenané prakticky na všech povrchových objektech. Nejméně příznivý poměr nerovnoměrného sedání na obytných domech činil přijatelných 1 : 1400.



Obr. 6 Grafický výstup z měření objektu nad raženým tunelem 3PT – ISM Barab

V rámci GTM při výstavbě tunelů byla taktéž prováděna i seismická či akustická měření na objektech, hydrogeologický monitoring apod., která rovněž výrazně přispěla k co nejoptimálnějšímu způsobu ražby obou tunelů.

Nedílnou součástí následných stavebních prací byla samozřejmě měření deformací definitivního ostění na raženém i hloubeném tunelu Lochkov. Tento monitoring probíhal nejprve v rámci stavby a schváleného projektu GTM. V současnosti, při zkušebním provozu tunelu, probíhá měření v souladu s požadavkem projektanta, ve smyslu novelizované TKP 237 a taktéž na základě požadavku vyhlášky ČBU č. 49/2008 Sb. o požadavcích k zajištění bezpečného stavu podzemních objektů (zpracován projekt GTM za provozu).

4. ZÁVĚR

Komplexní geotechnický monitoring tunelu Lochkov potvrdil v průběhu výstavby i v průběhu provozu, předpoklady projektu. Při stavbě mohla být přijímána technologická opatření umožňující v rámci projektu co nejrychlejší a nejekonomičtější ražení tunelů. Konstrukce tunelů byla budována v očekávaném deformačním rozmezí, pod určenými limitními deformačními hodnotami ze statického výpočtu projektanta. Stavba tunelu byla tudíž zdárně dokončena v požadované kvalitě a za přiměřenou cenu.

V současnosti probíhá na tunelových objektech geotechnický monitoring při zkušebním provozu, který zahrnuje geodetická měření definitivní obezdívky v kontrolních profilech a navazující hydrogeologický monitoring oblasti. Nivelační měření příčného profilu nad Lahovickým portálem současně se 3 inklinometry bylo ukončeno na základě neúprosného požadavku nového majitele pozemku (požadavek na likvidaci bodů a vrtů). Průběžné výsledky zatím nesignalizují žádné výrazné anomálie, či nepřiměřený růst deformací.



Obr. 7 Tunely těsně před dokončením - Lahovický portál

LITERATURA

- Chmelař, R., Březina, B., Síla, L. (2005): *Tunely Lahovská, průzkumná štola, 1.část-úpadní ražba, Závěrečná zpráva geotechnického průzkumu a monitoringu, Silniční okruh kolem Prahy, stavba 514 Slivenec-Lahovice, PUDIS a.s., Praha*
- Urbanová, L., Bohátka, J. (2005): *Průzkumná štola pro tunely (podrobný geologický průzkum), II.část - dovrchní ražba. Závěrečná zpráva geologické dokumentaci a geotechnickém monitoringu v průzkumné štolě „Lahovská“, Silniční okruh kolem Prahy, stavba 514 Slivenec-Lahovice, SG-Geotechnika, a.s. Praha*

Bohátka, J. (12/2006): Projekt - *Geotechnický a hydrogeologický monitoring při stavbě tunelů Slivenec*, SG-Geotechnika, a.s. Praha
Bernard, R. & Bohátka J. (12/2008), *Geotechnický monitoring při stavbě SOKP 514 – Tunely Slivenec*. Příspěvek do odborného časopisu ITA – IATES “TUNEL”, číslo 4/08. ISSN 1211-0728
Bernard, R., Bohátka, J., Chmelař, R., Síla, L. (5/2009): *Geotechnical Monitoring of the Slivenec Road Tunnel on the Prague City Ring Road*, 35rd WTC 2009 in Budapest, Hungary, ISBN 978-963-06-7239-9
Bernard, R., Chmelař, R. (10/2010): *Závěrečná Zpráva, Geotechnický monitoring, Tunely Lochkov*, Praha, sdružení GTM.

Autoři:

Ing. Radek Bernard, Ph.D.

&

Jakub Bohátka

ARCADIS CZ, a.s., Divize Geotechnika

Geologická 4, Praha 5 – Barrandov

Tel. 234 654 519, 607 150 669

Tel. 234 654 221, 602 707 823

e-mail: radek.bernard@arcadis.cz

e-mail: jakub.bohatka@arcadis.cz