

KRÁLOVOPOLSKÝ TUNEL V BRNĚ Z POHLEDU PROJEKTANTA VLASTIMIL HORÁK



Pohled na provizorní portál Královo Pole (noční snímek)

Základní informativní údaje o celé stavbě VMO Dobrovského jsou uvedeny na jiném místě tohoto časopisu, proto zde nejsou dále uváděny a článek je věnován plně pouze raženému tunelu. Výstavba části městského okruhu označované VMO Dobrovského, jejíž součástí je i Královopolský tunel (sice nesprávně, ale často též označovaný pracovním názvem tunel Dobrovského), byla oficiálně zahájena již v roce 2006. V důsledku několika táhlých soudních pří (některé kauzy nejsou ani do dnešního dne uzavřeny) byla bohužel ta nejdůležitější z patnácti vydaných stavebních povolení nepravomocná. S vlastní ražbou tunelu mohli tak zhotovitelé začít až teprve v lednu roku 2008. V druhé polovině roku 2007 bylo Obvodním báňským úřadem v Brně nařízeno dodatečné vyztužení stávajících průzkumných štol, jejichž stavebně technický stav již neodpovídal bezpečnostním požadavkům. Štoly byly navrženy a provedeny v letech 2001 až 2003 s předpokladem zahájení výstavby tunelových rour max. do dvou let od ukončení ražby štol. Investor i zhotovitelé tak mohli využít tohoto správního aktu Obvodního báňského úřadu v Brně, který nepodléhá Stavebnímu zákonu, a zahájit přestrojování (vyztužování) štol již plně v souladu s projektovou dokumentací pro tunely. Přestože stáří průzkumných štol bylo již daleko za předpokládanou životnost, byla převážná část ostění štol až překvapivě ve velmi dobrém stavu. Tímto způsobem byla alespoň z části eliminována vzniklá časová ztráta 18-ti měsíců, po které nesměla být ražba tunelů zahájena.

V souladu s původními předpoklady projektanta o využití stávajícího ostění štol jako nosného prvku velkého tunelu bylo takto vyztuženo cca 100 m průzkumných štol IIA a IIB. Současně s tím se ze stávajících štol prováděla pomocná opatření pro budoucí ražbu kaloty – chemické a zpevňující injektáže zvodnělých kvarterních souvrství, která jsou v oblasti provizorního Královopolského portálu v délce cca 80 m profilem kaloty zastižena.

Doba, po kterou se nesměla zahájit ražba, neznamenalala ale pro nikoho z účastníků výstavby čas pro nějaké zahálení. Byla velmi intenzivně využita k širokým diskuzím o technologii ražby, nasazení strojů, o způsobu a formě vystrojování výrubu primárním ostěním, byla posuzována z nejrůznějších pohledů prognóza poklesů a vlivů ražby na povrchovou zástavbu. Aktivně se této diskuse účastnili všichni přední odborníci a specialisté na tunelování. Jména jako Aldorf, Barták, Blindow, Eisenstein není jistě nutné nijak představovat. Byly vedeny i velmi ostré a vášnivé diskuse o filosofii a přístupu k výpočtům, matematickému modelování, o deformacích jak v podzemí tak na povrchu, o současných zkušenostech a možnostech zhotovitelů. Výsledkem těchto diskusí a v neposlední řadě díky vstřícnému přístupu investora k eliminaci možných rizik pak byl tzv. **souhrn kompenzačních opatření** pro eliminaci vlivů ražby na povrchovou zástavbu, který obsahoval následující prvky :

- Mírná úprava tvaru výrubu – zvětšení zaklenutí spodní klenby pro zvýšení její tuhosti.
- Vytužení primárního ostění ze stříkaného betonu svařovanými výztužnými prvky HEBREX, navrženými projektantem speciálně pro tuto stavbu jako alternativa k ohýbaným válcovaným profilům HEB. Název HEBREX (zkráceně též HBX) vznikl jako složenina z označení pro válcované nosníky HEB a z běžně používaného pojmenování BRETEX pro standardně používanou prostorovou svařovanou výztuž primáru. Tyto výztužné prvky HBX v sobě spojují příznivé vlastnosti válcovaných profilů (velká ohybová tuhost a okamžitá únosnost i bez zastříkání betonem, dlouhá deformační dráha) a příhradových nosníků (dobrá soudržnost se stříkaným betonem). Ne příliš výrazně, ale přece jen šetří HBX hmotnost oceli oproti válcovaným prvkům HEB (cca 10-15%). Jejich výrobu zvládne standardní zámečnická dílna s vhodnými a snadno vyrobitelnými přípravky. Na rozdíl od přesného ohýbání masivních válcovaných nosníků HEB, které „umí“ jen několik firem v Evropě.
- Úprava délky rozfárání dílčích čeleb – maximální zkrácení i za cenu několikanásobného zvýšení objemu opakovaně přemísťovaného recyklátu pro nájezdovou rampu do kaloty.
- Doplnění clonících stěn z pilířů tryskové injektáže podél zástavby na ulici Dobrovského téměř na celou délku ulice.
- Kompenzační injektáž pro speciálně vybrané ohrožené objekty – je navržena a prováděna pro celkem 26 nadzemních vícepodlažních objektů. Jde o největší rozsah této technologie, jaký kdy byl v České republice (v Evropě?) prováděn.
- Vzhledem k různosti technického stavu ostění průzkumných štol (degradace vlivem času, způsob a v neposlední řadě i kvalita provedení) a provedeným průzkumům a znaleckým posudkům bylo s ohledem na minimalizaci rizik dohodnuto, stávající ostění štol v plném rozsahu nahradit primárním ostěním novým, stejným jako při novoražbách (s výjimkou již hotového zesílení štol IIa, IIb v úseku prvních 100 m).
- Optimalizace tvaru primárního ostění tunelu s ohledem na očekávané deformace a tolerance v provádění montovaného ostění z prvků HBX.



Výztužné prvky HEBREX (foto)

V souvislosti s výše uvedenými přijatými kompenzačními opatřeními muselo proběhnout několik nových stavebních řízení, tentokrát již bez protestů a odporu občanských iniciativ či ekologických hnutí. Veškeré úpravy schváleného projektu tunelů musely být navrženy tak, aby nezavdaly sebemenší příčinu ke zpochybnění vydaného stavebního povolení, o jehož právoplatnosti v té době jednal správní soud. Vše bylo oběma stranami soudního sporu bedlivě sledováno.

Ražba tunelu – předpoklady a skutečnost

Navržený způsob ražby s horizontálním a vertikálním členěním výrubu o celkové ploše 130 m² na šest dílčích čeleb (A až F) s plochami od 14 m² do 25 m² a s okamžitým uzavíráním každého dílčího výrubu po každém kroku délky 1,0 m a následným bouráním vnitřních výztuh byl v ČR použit poprvé. Do dílčích výrubů nelze použít těžkou techniku – tunelbagr, ale je nutné nasadit menší a samozřejmě méně výkonné stroje. Krok ražby byl ve všech dílčích výrubech předepsán striktně jeden metr, pouze poslední část výrubu v počtvě je možné provádět v krocích po čtyřech metrech. Rovněž tuhá výztuž v primárním ostění s hmotností nejtěžších prvků přes 450 kg byly důvodem k obavám zhotovitelů o reálnosti této metody a dosažení projektem předpokládaných měsíčních postupů 40 až 50 m. Tunel I razí OHL ŽS a.s. a tunel II razí SUBTERRA a.s. V prvních cca 80 m tunelů od provizorního portálu bylo dosahováno zhruba polovičních měsíčních výkonů – ražba byla zpomalována zvodněnými kvarterními sedimenty, které bylo nutné zpevnit injektážemi. Nikdo nechtěl logicky přistoupit na riziko možného vykomínování na povrch při nadloží pouhých 5 až 8 m, protkaného hustou sítí kabelů, potrubí, kanalizací, plynovodů a vodovodů a s obytnou zástavbou na povrchu. Rovněž mikropilotové deštníky prováděné z kaloty každých 8 m celkový postup zpomalovaly. Při ražbě pod příčnou Palackého třídou s hustým silničním provozem včetně tramvají (jedno z nejkritičtějších míst ražby tunelu) poprvé po cca 120 m přesáhla výška nadloží výšku výrubu (!), plný profil tunelu byl již ražen v neogenních jílech a bylo možné vypustit mikropilotové deštníky. Postup ražby se logicky zrychlil a v měsíci 08.2008 bylo poprvé překročeno 45 m a v listopadu 2008 dokonce 50m plného uzavřeného profilu tunelu za měsíc.

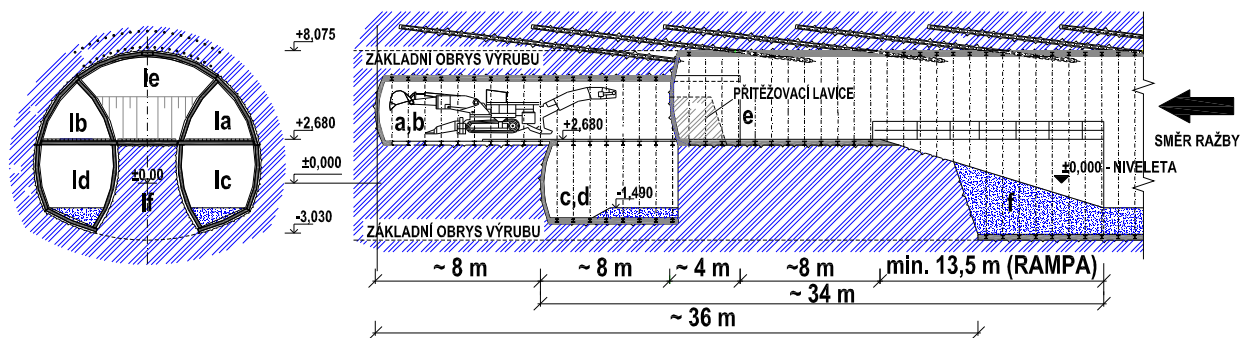


Schéma postupu ražby (výkres)

Bourání vnitřních výztuh ze stříkaného betonu s tuhými výztužemi se ukázalo jako největší problém nikoliv z hlediska času, jak se očekávalo, ale z hlediska hluku a vibrací, které se v daném geologickém prostředí brněnských téglů velmi dobře šíří a jsou obyvatelstvem velmi negativně vnímány již hluboko pod povolenými hygienickými limity. Stejně tak po rozhodnutí nahrazovat stávající ostění štol ostěním novým, je nutno jej vybourat, čímž se objem bouracích prací výrazně zvětšil. Po vyzkoušení několika různých způsobů rozpojování železobetonu a několika variant postupů se v současnosti stávající ostění štol bourá systémem příčných předřezů diamantovou pilou, předbouráním příčných „šliců“ a následným vylamováním důlních profilů K24. Vnitřní horní žebra se stříhají (drtí) nůžkami na beton a teprve poté (po uvolnění tlakového napětí v těchto žebrech) nastupuje klasické bourací kladivo na bagrovém výložníku. Bourání v nočních hodinách vibračními či přiklepovými mechanismy není dovoleno.

Původní předpoklad o využití až 60% neogenních jíílů jako druhotné suroviny např. pro výrobu cihel nebyl a pravděpodobně ani nebude vzhledem k příliš vysokým požadavkům na čistotu jíílů splněn.

Pro zrychlení postupu ražeb jsou zkoušeny a za pečlivého sledování deformací a vlivů ražby na povrch testovány varianty postupu ražby s dvojkroky v profilech C, D, osmimetrové kroky v části F – v počvě a variantní vzdálenosti dílčích čeleb. To vše umožňuje observační metoda, která je v tomto prostředí prakticky jedinou možností.

Podzemní voda, která působila největší obtíže při ražbě průzkumných štol v tunelu II byla naopak výrazně „nepříjemnější“ při ražbě v tunelu I. Přitom v průzkumné štole IB (tunel I) se vyskytovala před otevřením profilu velkého tunelu spíše symbolicky. Zvodnělé vrstvy byly sanovány v každé tunelové rouře jiným zhotovitelem a rozdílnými chemickými suspenzemi. Srovnání účinnosti a efektivity těchto injektáží je samozřejmě předmětem širokých diskusí a bylo by jistě vhodným samostatným tématem pro odbornou veřejnost. Podstatné je, že na tomto tunelu zpevňující injektáže svoji pozitivní úlohu splnily. Důkazem je skutečnost, že ražby obou tunelových rour prošly těmito zvodnělými úseky s minimálním nadložím a pod zástavbou prakticky bez problémů.

Mikropilotové deštníky v kalotách byly prováděny v délkách 17 m, účinná délka je 8 m a přesah 3 m. Technologie vrtání se ztracenou výpažnicí, resp. AT systém, předepsané v zadávací dokumentaci byla nahrazena upravenou a zdokonalenou metodou vrtání (poprvé použitou u tunelu Březno) se speciálně upravenými ztracenými šnekovými korunkami, trubkami délky 17 m bez nastavování a přímo s cementovým výplachem, který stěnu vrtů v jíílů „maže“, zmenšuje odpor a přímo tvoří zálivku. Tímto způsobem bylo možno 19 mikropilot v kalotě osadit za jedinou 12-ti hodinovou směnu (!)

Ke konci listopadu je v tunelu I vyraženo v plném profilu 230 m (průměrný výkon 29 bm/měsíc) a v tunelu II 340 m (průměrný výkon 31 m/měsíc) z celkové délky cca 1060 m v každé tunelové rouře.



Hlavy MKP deštníků



Vrtačka MKP deštníků s lafetou dl. 17 m

Deformace a chování primáru – předpoklady a skutečnost

Chování primárního ostění a zejména spolupůsobení tuhé výztuže se stříkaným betonem a výsledná tuhost ostění byly zcela jednoznačně nejdiskutovanější otázkou. V zadávací dokumentaci byly projektantem prognózovány radiální relativní deformace primáru v hodnotách od 40 mm do 60 mm, což bylo v diskusích před zahájením ražeb některými odborníky označováno za podhodnocené. Rezervu na deformace a tolerance musel projektant zvětšit optimalizací tvaru primáru a polohou výztuže z původních 60 mm až na 120 mm. Výsledné hodnoty konvergenčních měření po uklidnění a po odečtení celkových poklesů (zaboření) dílčích profilů tunelového ostění nedosahují ani oněch prognózovaných 40 mm (ke konci listopadu). Ostění vytvořené z prvků HBX a stříkaného betonu se sítěmi se chová velmi „korektně“ a vykazuje spíše vyšší, než projektem předpokládanou tuhost.

Předpoklady projektu o největších deformacích v počvě (zvedání) se zatím nenaplnily. Jednak nebylo ještě dosaženo maximálního nadloží, a jednak je měření bodů v počvě přesypané recyklátem tloušťky až 1,30 m velmi komplikované a stále se precizuje nejvhodnější způsob osazování, měření a zejména ochrany těchto bodů před zničením stavbou.

Nenaplnily se rovněž obavy z nedostatečné přesnosti osazování jednotlivých dílů HBX. Prakticky celý profil tunelu je totiž závislý na přesnosti osazení výztuže v prvních dvou dílčích výrubech A, B a následné možnosti korekce v dalších výrubech podložkami mezi přírubami a atypickými klenákovými dílci jsou již jen minimální. Projektem předepsaná přesnost polohy osazení všech dílců HBX ± 25 mm je u drtivé většiny rámců dodržena. Zde je nutné oprávněně vyzdvihnout skvělou práci geodetů v obou tunelových rourách.

Obavy z nedostatečného zastříkání rubových přírub HBX a vzniku volných prostorů za těmito prvky, do kterých se bude vtlačet neogenní jíla, se naplnily pouze z menší části. Při provádění výrubů E, F jsou totiž tyto rubové příruby odkryvány a je možné kvalitu zaplnění stříkaným betonem snadno vizuálně ověřit. Pouze z menší části a nikdy ne v celé délce prvku jsou příruby na rubu ne plně kryty betonem. Bylo pozorováno, že pokud dochází ke vzniku stínů, nikdy se nejedná o souvislý jev po celé délce prvku a nikdy ne na plnou šířku příruby. Pokud je správně proveden základní stabilizační nástřík tl. 40 mm na hornině, vznikají tak pouze nesouvislé „dutinky“ uzavřené mezi stabilizačním nástříkem a přírubou. Na tuhost a chování primáru nemá

toto nedostříkání zatím žádný negativní vliv. Přesto musí být na kvalitu zastříkání kladen velký důraz a nelze tyto nedostatky přehlížet.

Předpoklady projektu, vycházející z časového průběhu relativních i absolutních deformací ostění štol (80% sedání proběhlo v průběhu dvou měsíců a zbývajících 20% v období až 18 měsíců) se u velkých tunelů rovněž zcela nenaplnily. Prakticky již po dvou až třech týdnech po uzavření plného profilu primáru nastává výrazné uklidnění deformací na primáru a dále probíhá (a to pouze v některých měřených profilech) velmi pomalý plíživý pohyb o rychlosti 1 až 2 mm za měsíc, přičemž převládající je jednoznačně sedání celého profilu. Relativní radiální složka deformací je po měsíci od uzavření plného profilu prakticky uklidněná s nulovými přírůstky. Je zde patrný zásadní rozdíl v chování malých profilů průzkumných štol s relativně poddajným ostěním a velkým profilem tunelu s relativně mnohem tužším ostěním. Průzkumné štoly se z hlediska absolutní polohy po několika málo měsících od vyrazení prakticky nepohnuly, ale zato se deformovalo jejich poddajné ostění. U velkých tunelů naopak brzy dochází k uklidnění relativních deformací a v některých profilech k celkovému a zřejmě dlouhodobému sedání celého profilu. Globálnější vyhodnocení bude možné provést samozřejmě až po delší době a úplném uklidnění všech deformací.

Vlivy na povrch a zástavbu – předpoklady a skutečnost

Další z nejvíce diskutovaných otázek – poklesová kotlina. Nenaplnily se obavy a katastrofické předpovědi některých oponentů projektu o poklesové kotlině dosahující až 200 mm na rozdíl od projektem prognózovaným max. 110 mm.

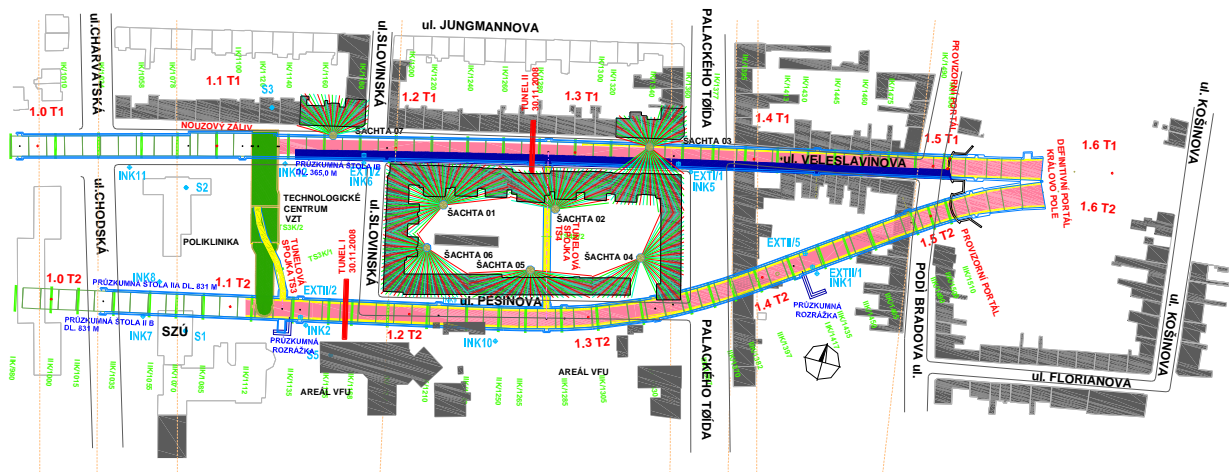
U objektů Poděbradova 26 a 28, stojících přímo nad tunelem II s nadloží cca 5 až 6 m, (v objektu 26 bez bázně a strachu sídlí vedení stavby) byl naměřeno od ražby tunelů max. pokles cca 40 mm. Připočteme-li k tomu naměřené maximum na tomto domě od ražby průzkumných štol 58 mm dostaneme se reálně k hodnotě oněch prognózovaných 100 mm. A odečteme-li sednutí objektu 28 od nástavby dvou podlaží těsně před začátkem ražby štol v hodnotě cca 20 mm, jsme určitě pod 100 mm. Dalším kritickým objektem z hlediska sedání je několikapodlažní dům Palackého 28, u něhož byl znaleckým posudkem konstatován havarijní stav již v 90. létech minulého století. Po ražbě štol, která pro něj znamenala asi poslední kapku, byl objekt vystěhován a nyní je neobývaný. Od ražby štol bylo naměřeno cca 46 mm, od dobírky plného profilu tunelu max. 76 mm, tj. celkem 122 mm. Prognózovaná hodnota je překročena o pouhých cca 10%.

Ke konci listopadu je ještě příliš brzy vyhodnocovat celkový tvar poklesové kotliny na již vyražených úsecích, protože dotvarování stále probíhá. Oproti předpokladům je však poklesová kotlina prozatím výrazně užší. Lze ovšem očekávat v průběhu času její pomalé „zploštění“ a tím i rozšíření.

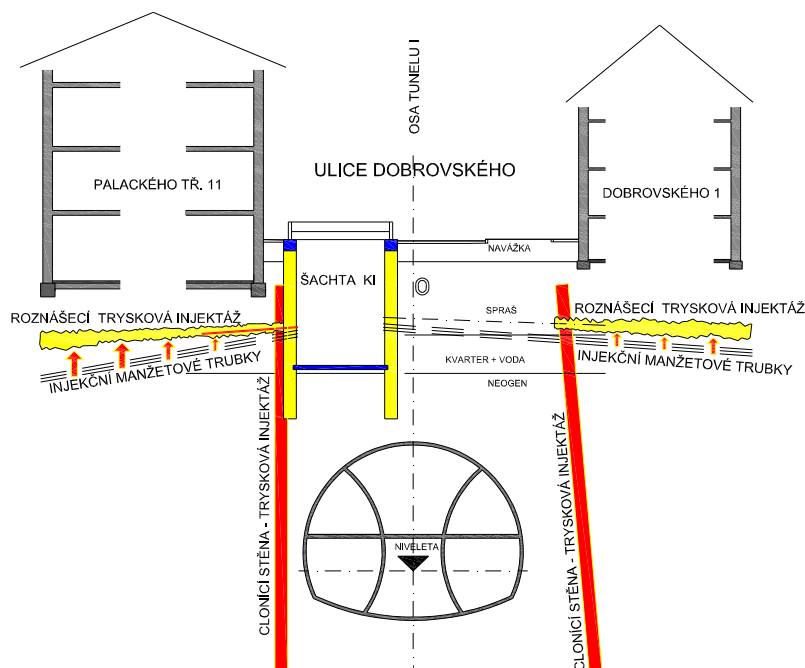
U nadzemní zástavby a ražbou tunelů způsobených poruch se projevuje především kvalita a provedení nosných konstrukcí objektů. Špatně provedené dilatace, nedostatečné, špatné nebo vůbec žádné vodorovné ztužení objektů, nejrůznější přístavby a přílepkové na budovách bez dodržení statických zásad, se při nerovnoměrných poklesech od ražby markantně a nemilosrdně projevují. Pokud tyto stavební a konstrukční vady domů nebyly odhaleny již v prvotní pasportizaci a podchyceny v projektu dodatečným ztužením, projevují se teď velmi výrazně.

V zadávací dokumentaci byla přijatá zásada a přístup k dodatečnému ztužování v tom smyslu, že dotčené domy nad tunely v poklesové kotlině nelze staticky vyztužit do tuhých bloků a proto budou „ztužovány“ fixačními táhly, pomocnými rámy v místech otvorů apod., jejichž cílem je eliminace rizika bezprostřední havárie či kolapsu nosných systémů. Dnes se ukazuje toto rozhodnutí v podstatě jako správné. Ke konci listopadu prakticky není nutné dodatečně jakékoliv domy ztužovat či jinak zajišťovat.

Jako velmi účinné opatření se ukazují s tunelem souběžné clonící stěny z pilířů tryskové injektáže snižující maximální pokles a zejména náklony objektů vně těchto clon o významných cca 30%.



Situace Královo Pole

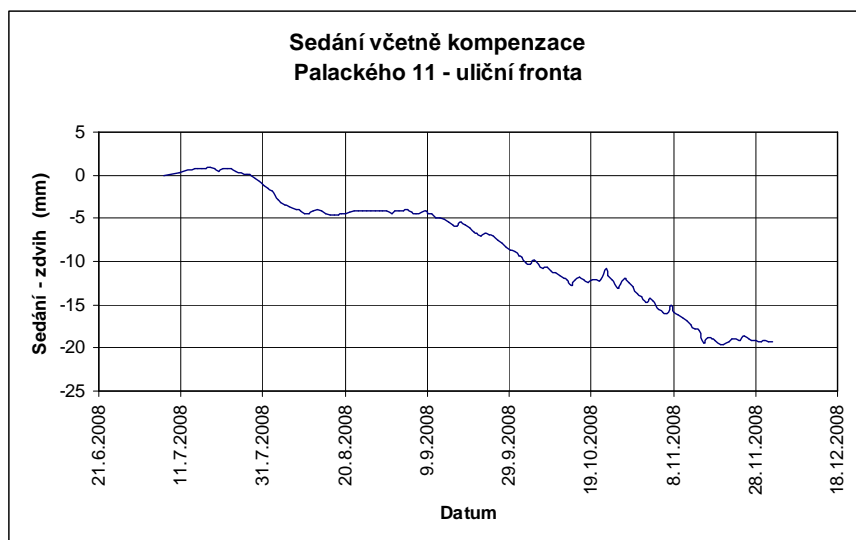


Injekční šachta KI, clonící stěny z tryskové injektáže

Kompenzační injektáž

Pro kompenzaci sedání u 26 vybraných objektů bylo nutné vybudovat sedm injektážních šachet hloubky cca 8 m a průměru cca 6 m. Jako pažení těchto jam bylo využito v místních poměrech již ověřené tryskové injektáže. Pod kompenzovanými objekty byly ještě vytvořeny roznášecí „desky“ rovněž ve formě vodorovné tryskové injektáže. Vrtý pro kompenzaci jsou provedeny v délkách do 30 m a v několika etážích nad sebou. Vystrojení manžetovými ocelovými trubkami umožňuje mnohonásobnou opakovatelnost injektování. Do současné doby byly některé trubky použity pro injektáž až 20 krát(!). Pro kontinuální měření objektů na fasádách každou hodinu je nasazeno devět totálních geodetických stanic, orientovaných na síť pevných geodetických bodů situovaných mimo poklesovou kotlinu.

Důležitým prvkem pro nasazení této metody byl injektážní pokus na jednom z vykoupených a neobývaných domů, při kterém se ověřily základní parametry kompenzací – délky a rozteče vrtů, schopnost řízeného zdvihu v požadované rychlosti a velikosti, spotřeby injekčních směsí, způsob měření a vazba naměřených hodnot na vlastní řízenou injektáž. Nasazení této metody bude určitě předmětem samostatné publikace a více odborných článků či přednášek firmy Zakládání staveb a.s., která tyto kompenzace provádí.



Měření nivelace na objektu zvedaném kompenzační injektáží

Monitoring vlivů stavby

I tato součást výstavby Královopolského tunelu je dosud nejrozsáhlejší v České republice. Několik stručných údajů o rozsahu :

- Soudně znalecké posudky a pasportizace 262 nadzemních objektů
- Měření, kontroly a pravidelné prohlídky u více než 150 nadzemních objektů (z toho 110 objektů bylo před zahájením ražby dodatečně vyztuženo)
- Konvergence a geodetická kontrolní měření v tunelech á 15 až 20 m.
- Kontrolní geodetická měření všech budovaných stavebních konstrukcí včetně tunelů.
- Geologický sled u všech zemních prací – ražba, stavební jámy, veškeré vrty, výkopy
- Měření poklesové kotliny na terénu ve 14-ti vybraných profilech šířky 75 m od osy tunelů.
- Inklinometry v terénu i pažících konstrukcích stavebních jam délky až 45 m.
- Extenzometrická měření z povrchu kolem ražených podzemních děl.
- Deformetrická a náklonoměrná měření nadzemních objektů.
- Revize a prohlídky podzemních sítí, zejména kanalizací.
- Kontroly plynovodních sítí a přípojek, včetně měření možných úniků plynu v ohrožených objektech i na venkovním prostranství.
- Měření hluku a vibrací ve vnějších i vnitřních prostorách objektů v zóně ohrožení.
- Systém přenosu a distribuce dat na serveru BARAB již zřejmě překonal počáteční dětské nemoci, známé jeho uživatelům z dřívějších nasazení, a ukazuje se jako plnohodnotný nástroj observační metody pro všechny účastníky výstavby. Zejména u této rozsáhlé stavby jsou i v jejím průběhu doladovány a precizovány vstupy, výstupy, grafické zpracování apod. I systém monitoringu je ve své podstatě observační metoda a neustále se vyvíjí.

Závěr

Ke konci listopadu, kdy tento článek vzniká, lze z pohledu projektanta konstatovat hřejivý fakt, že stavba tunelu i v tak náročných podmínkách městské zástavby a nepřívětivé geologie je realizovatelná bez zásadnějších problémů.

Ing. Vlastimil Horák
 AMBERG Engineering Brno a.s.
 Ptašinského 10
 602 00 Brno
 tel. +420 541 432 612
 vhorak@amberg.cz
 URL : www.amberg.cz