



Obr. 1: Kalota třípruhového tunelu v ordoviku



Obr. 2: Kalota třípruhového tunelu v proterozoiku

Geotechnický monitoring při stavbě tunelu Vestec–Lahovice na silničním okruhu kolem Prahy, stavba 513

Pro ověření předpokladů a výsledků statických a geotechnických výpočtů a v souvislosti s dodržáním vysoké bezpečnosti práce a efektivity výroby byl pro výstavbu tunelů SOKP 513 navržen geotechnický a hydrogeologický monitoring. Cílem článku je seznámit čtenáře s navrženým monitorovacím systémem na stavbě a s některými výsledky měření horninového prostředí a konstrukcí v průběhu realizace díla a jejich vlivem na vedení ražeb jednotlivých tubusů.

V dubnu 2007 byla zahájena ražba třípruhového tubusu silničního tunelu stavby 513 okruhu kolem Prahy. Tunel je tvořen jižní třípruhovou rourou, severní dvoupruhovou rourou, osmi tunelovými propojkami a vzduchotechnickou šachtou. Délka tunelů je cca 1950 m. Délka ražených úseků obou tubusů je cca 1675 m. Hloubená část u komořanského portálu je délky cca 170 m, u portálu cholupického délky 80 m. Ražená i hloubená část stavby jsou projekčně i technologicky velmi náročné stavební konstrukce, které představují kromě obrovského přesunu hmot také velké nároky na geotechnické a statické výpočty jak tunelových ostění (primárního i sekundárního), tak i stability pažicích konstrukcí zajišťujících stabilitu hloubených úseků.

I. Ražená část stavby

Ražba tunelů je navržena a prováděna podle zásad Nové rakouské tunelovací metody (NRTM). NRTM je technologie stavby tunelů, při které se maximálně využívá samonosnosti horniny. Provizorní (primární) ostění ve spolupráci s horninovým masivem přenáší účinek vnějších sil (systém hornina – ostění) a tím zajišťuje stabilitu výrubu.

Obecně je na základě podrobného inženýrsko-geologického průzkumu horninový masiv rozdělen do kvazihomogenních celků, kterým jsou v projektu přiřazeny příslušné technologické

třídy výrubu NRTM. V každé technologické třídě výrubu jsou potom stanoveny meze použití. Při překročení je ražba přetříděna do odpovídající třídy výrubu. Navržené zajištění výrubu a technologický postup je tedy operativně přizpůsobován skutečným geologickým podmínkám, zjištěným při vlastní ražbě, přímo na čelbě tunelu. Tím je umožněno dosáhnout vysoké efektivity nákladů vynaložených na ražbu.

Princip observační metody

Nová rakouská tunelovací metoda je metoda observační a byla přijata jako rovnocenná metoda návrhu geotechnických konstrukcí v rámci Eurokódu 7 – Navrhování geotechnických konstrukcí. Metoda v principu umožňuje posuzovat a případně upravovat původní návrh konstrukce v průběhu výstavby na základě výsledků monitoringu (observace) vybraných veličin.

Při použití observační metody je před zahájením výstavby třeba:

- stanovit meze přijatelného chování (deformační stav);
- stanovit rozsah možného chování konstrukce;
- navrhnout monitoring ověřující, zda skutečné chování stavební konstrukce odpovídá předpokladům projektu;
- vypracovat návrh možných opatření připravovaných k realizaci v případě, kdy monitoring prokáže chování stavební konstrukce mimo přijatelné meze stanovené projektem.

Návrh monitoringu ražených tunelů

Při provádění podzemních staveb NRTM je pro návrh konstrukce primárního ostění a poté pro návrh monitoringu důležité shromáždit pokud možno co nejvíce dostupných informací o horninovém prostředí v trase tunelu.

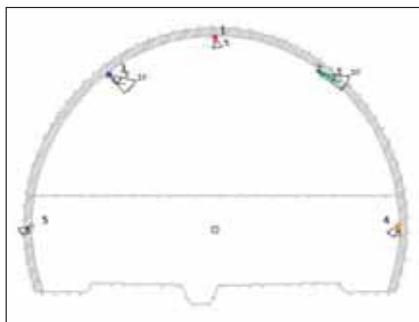
Z tohoto důvodu bylo před stavbou tunelů Vestec–Lahovská rozhodnuto o realizaci průzkumné štoly. Výsledky inženýrsko-geologického průzkumu se staly podkladem pro statický výpočet primárního ostění a poté pro návrh monitorovacích prvků v souladu s principy observační metody. Geologickou situaci v trase tunelů lze zjednodušeně popsat následujícím způsobem.

Geologické poměry v trase

Horninový masiv v trase tunelu tvoří dva stratigrafické celky – ordovik a proterozoikum. Ordovické vrstvy jsou zastoupeny pevnými horninami letenského souvrství, které je charakteristické flyšovým vývojem. Souvrství je tvořeno převážně prachovci a prachovitými břidlicemi, méně jsou zastoupeny křemence. Horniny ordoviku (obr. 1) lze klasifikovat jako zdravé, v okolí poruch navětralé, místy až zvětralé. Masiv je silně tektonicky porušen. Proterozoické horniny zastoupené siltovými, písčitymi, drobovými až křemitými břidlicemi a drobami byly zastiženy zhruba v polovině trasy (obr. 2). V nezvětralém stavu mají horniny většinou šedou až černošedou barvu, navětralé horniny mívají nazelenalé odstíny a zvětralé horniny jsou hnědé až okrové barvy. Horniny bývají rezavě a hnědě laminované, deskovitě vrstevnaté a na vrstevných plochách limonitizované.

Hydrogeologické poměry

Z hydrogeologického hlediska lze v prostoru trasy vylíčit tři typy kolektorů. Prvním je svrchní zvodnění, které je vázáno na přípovrchovou vrstvu navětrání a rozvolnění ordovických a proterozoických skalních hornin.



Obr. 3: Konvergenční profil

Kolektorem jsou často i nadložní kvartérní deluviální sedimenty. Jedná se o průlinopuklinové zvodnění většinou s volnou hladinou podzemní vody, která je pouze lokálně, pod sprašovými polohami, napjatá. Hloubkový dosah zvodně je do cca 30 m.

Ve větších hloubkách hydrogeologického masivu, tvořeného skalními horninami ordoviku a proterozoika, je vyvinuto puklinové zvodnění. Hydraulická vodivost je po těchto pro vodu predisponovaných cestách vyšší než v nadložním přívěrovém kolektoru. Otevřené puklinové systémy byly zjištěny hlavně v silicifikovaných partiích proterozoika a v křemenci bohatých souvrstev ordoviku. Třetím typem kolektoru jsou hrubozrnné písky a místy štěrky v pleistocénní vltavské terase, kterou prochází předportálový zářez u komořanských portálů.

Jedná se o průlinové zvodnění s dobrou propustností a s volnou hladinou podzemní vody.

Monitoring

Pro raženou část stavby byla navržena následující měření a činnosti. Podrobněji se zmíníme jen o měřeních pro ražbu rozhodujících. Obecně rozdělujeme měření na:

A. Směrodatné:

• Geotechnické sledování ražeb

Dokumentaci čelob provádí odborný geolog pro každý záběr do speciálního formuláře. Ve skalních a poloskalních horninách ordoviku a proterozoika geolog předně sleduje a vyhodnocuje tektonickou situaci líce výrubu ve vztahu k možným projevům strukturní nestability výrubu. Na základě tohoto pozorování a dokumentace se geologická služba podílí na vypracování prognóz geologických podmínek pro další ražbu.

Geolog kromě jiného sleduje stabilitu líce výrubu při dočišťování, podílí se na stanovení případných nezaviněných nadvylomů, dává doporučení pro změnu technologické třídy výrubu.

• Konvergenční měření primárního ostění

je trigonometrické měření líce primárního ostění v jednotlivých profilech. Ražba tunelů je prováděna horizontálním členěním čelby, výrub tunelu je rozdělen na kalotu, lavici a případně dno tunelu. V každém profilu se osazují tři body v kalotě a dva v oblasti lavice (obr. 3).

Tato měření jsou pro ražbu prováděnou NRTM zcela nezbytná. Velikosti deformace primárního ostění se porovnávají s jednotlivými deformačními stavy DS1–DS4 (DS4 – havarijní stav), které jsou stanoveny projektem monitoringu pro jednotlivé technologické třídy.

Kritéria deformačních stavů se odvíjejí od hodnot stanovených statickým výpočtem (mezí, limitní hodnoty v realizačním projektu). Kritéria pro deformační stavy se během stavby mohou upřesňovat, a to v závislosti na růstu poznatků o chování podzemní konstrukce v daných geologických podmínkách.

Spolu s geologickou dokumentací tvoří konvergenční měření základ bezpečnostních měření,

kteřá jsou též legislativně ukotvena ve Vyhlášce ČBÚ č. 55/1996 Sb.

B. Indikativní:

• Extenzometrické měření

Jedná se o měření vertikálních posunů v libovolných hloubkových úrovních pod povrchem terénu. Cílem extenzometrického měření z povrchu terénu je v předstihu před ražbou objektivně stanovit deformace horninového masivu v různých hloubkových úrovních pod terémem. Časová rezerva umožňuje zhotoviteli včas reagovat na případné anomálie deformačního procesu v průběhu ražby. Na povrchu terénu jsme osadili extenzometrický profil (obr. 4) nad oběma tunelovými tubusy v místě nad druhým odstavňým zářivem ve dvoupruhovém tunelu. Intenzivní sledování profilu v době procházení jednotlivých ražeb potvrdilo velmi malou odezvu horninového masivu na probíhající ražby.

• Geodetické sledování povrchu terénu (nivelace)

Slouží ke zjištění odezvy ražby tunelů na povrch terénu nad tunelem a také k ověření exkluzivní zóny. Exkluzivní zóna je projektem stanovené území dotčené razicími pracemi. Výsledky měření jsou interpretovány jako grafy časového vývoje poklesu povrchu a jako příčné profily poklesové kotliny. Celkem je osazeno a měřeno osm profilů. Profily u komořanského portálu dosahují maximálních poklesů do 20 mm. Profily u cholupického portálu dosahují poklesů do 10 mm. U ostatních, mezilehlých profilů je naměřeno sedání povrchu do 3 mm.

C. Kontrolní:

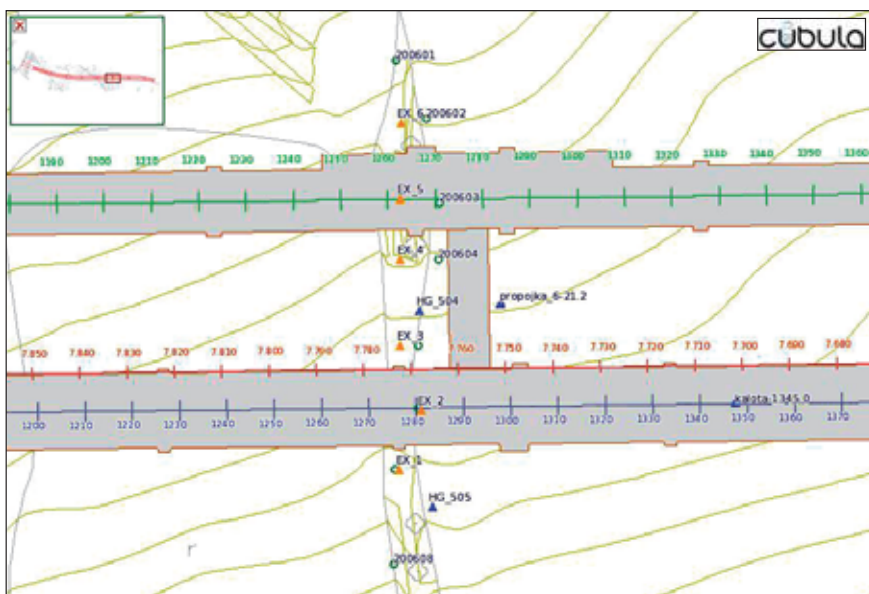
- Měření nivelace na objektech SO 609-Nouzov
- Dynamická a akustická měření v objektech
- Hydrogeologický monitoring
- Geoelektrická korozní měření

Kontrolní měření slouží všem účastníkům výstavby jednak pro vlastní kontrolu zatížení okolí stavbou, ale také jako podklad pro případné právní jednání se třetími fyzickými nebo právníckými osobami.

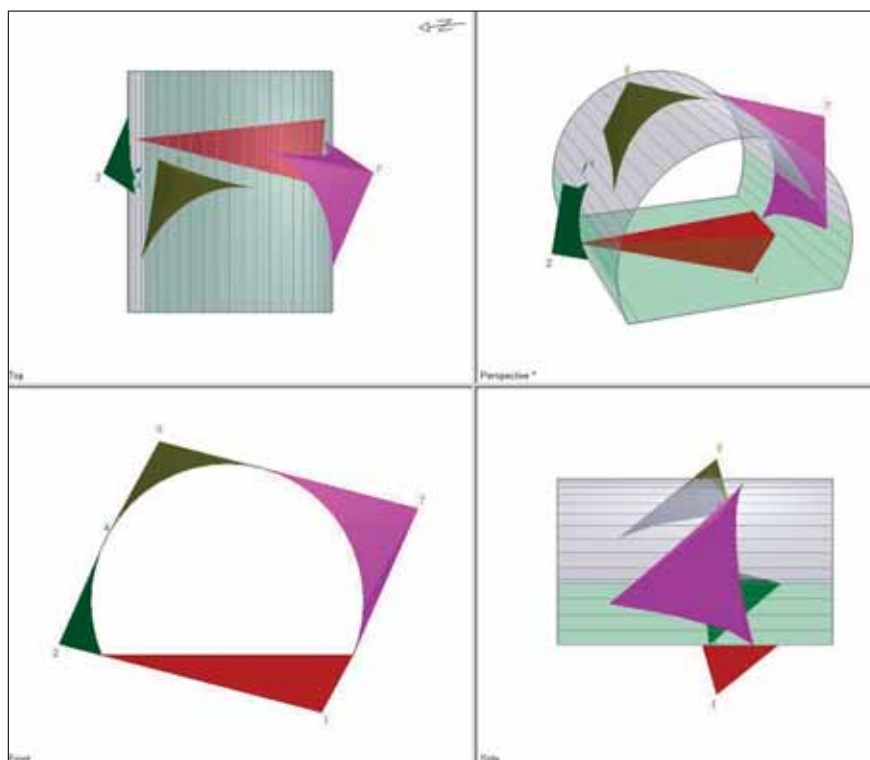
V případě této tunelové stavby jsou periodicky kontrolovány seismické účinky trhacích prací, hluk, kvalita vypouštěné technologické vody, kvalita lesních dřevin (pasportizace dotčeného lesa), nivelace terénu a stabilita přilehlého objektu Nouzov, který se nachází v blízkosti šachty vzduchotechniky.

Výsledky monitoringu ražené části

V článku uvádíme pouze výsledky směrodatných měření, která mají vliv v rozhodovacím



Obr. 4: Extenzometrický profil



Obr. 5: Charakteristický strukturální model výrubu

procesu při stanovení technologických tříd výrubu a případné redukci výztuže primárního ostění.

Ražba tunelů byla od počátku (kromě příportálových úseků) vedena v poloskalních horninách ordoviku a poté proterozoika. Přesto, že masiv je tektonicky porušen, fragmenty horniny jsou pevné (R2, R3), diskontinuity jsou převážně bez jílovité výplně, takže nedochází k poklesu smykové pevnosti na diskontinuitách. Zastižená hornina se chová jako křehký materiál a minimálně se deformuje. Problémy se stabilitou výrubu se omezují na místní strukturální projevy nestability, které představují lokálně nadvýlomy cca 1–2 m3. Na základě dokumentace čeleb jsme ve vybraných profilech sestrojili strukturální model výrubu (obr. 5). Na něm jsou zobrazené bloky, které se v okolí výrubu vyskytují. Cílem tohoto řešení je vyhledávat bloky kritické a předcházet jejich uvolnění do výrubu v předstihu, než bude provedeno primární ostění

a systematické radiální kotvení, a minimalizovat tak případné nadvýlomy. Účinnou technickou podporou pro předcházení nadvýlomů je používané jehlování následujícího záběru. Samozřejmě ani při pečlivé strukturální analýze a sledování výrubu nelze určité nadvýlomy vyloučit, ale lze je účinně minimalizovat.

Minimální schopnost deformace horninového prostředí je zřejmě z konvergenčních měření primárního ostění. Hodnoty naměřených deformací svislých i vodorovných jsou nezvykle malé, obvykle po průchodu kaloty nedosahují ani 10 % DS1. Maximální svislé deformace po průchodu lavice výjimečně přesahují 20 mm. Příklad prezentace výsledků konvergenčních měření je na následujícím obrázku (6a, 6b).

Minimální deformace výrubu svědčí o tom, že odezva masivu na ražbu je velmi malá. Ražba nemá prakticky žádný vliv ani na povrchu

terénu. Naměřené hodnoty nivelace povrchu terénu i deformace horninového masivu (extenzometry) jsou minimální, na mezi přesnosti měření.

Vliv monitoringu na zatřídění a vedení ražeb

Stanovení nebo změna konkrétní technologické třídy výrubu jsou velmi citlivé záležitosti. Na mnoha stavbách dochází při této činnosti často ke zbytečným konfliktům. Po dohodě s investorem jsme na této stavbě zavedli systém „denních schůzek ražeb“. Tím bylo vlastní řízení rozděleno do dvou úrovní.

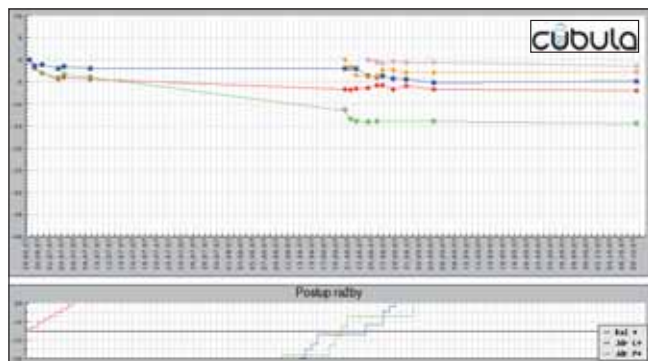
Denní schůzka představuje pravidelné setkání odpovědných zástupců zadavatele, zhotovitele a geotechnického monitoringu. Schůzka je samozřejmě svolávána i operativně na základě zastižených geotechnických podmínek nebo podle potřeb stavby. Na straně zadavatele se schůzky účastní i zástupce odborného konzultanta.

„Denní schůzka ražeb“ se zabývá pouze ražbou tunelů. Výsledkem jednání schůzky je rozhodnutí o zatřídění ražby do příslušné TTV, rozhodnutí o délce záběru, množství vystrojovacích prostředků a například v případě jehel a svorníků i o jejich rozmístění, délce apod. Toto rozhodnutí je na základě shody zúčastněných potvrzeno jako schéma vystrojení výrubu na příští období. Pokud nedojde ke shodě, je rozhodnutí o dalším postupu závislé na jednání mimořádné rady monitoringu, svolané vedoucím kanceláře monitoringu.

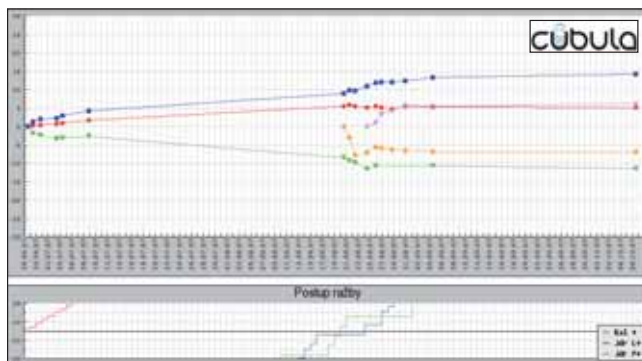
Rada monitoringu a technická rada jako vyšší stupeň řízení tak vzhledem k ražbě tunelů plní hlavně kontrolní funkci, prováděnou v pravidelných intervalech jednání rady.

Rada monitoringu je seznámena se zastiženými geotechnickými podmínkami, výsledky kontrolních měření geotechnického monitoringu a odpovídajícím zatříděním ražeb do technologických tříd výrubu a postupem ražeb za dané období.

Toto uspořádání radě umožňuje věnovat větší pozornost dalším problémům spojeným s výstavbou rozsáhlého podzemního díla. Jedná se o kontrolu plnění průběžných termínů prací, koordinaci prací na realizační dokumentaci stavby apod.



Obr. 6a: Konvergenční měření – svislé deformace



Obr. 6b: Konvergenční měření – vodorovné deformace



Obr. 7: Dno jámy v úrovni klenby kaloty



Obr. 8: Obnažení přístupové části průzkumné štoly

II. Hloubená část stavby

V tomto článku se budeme věnovat pouze monitoringu hloubené části na komořanské straně, kde hloubka stavební jámy u portálu dosahuje 30 m. Hloubený úsek tunelu je budován v hluboké stavební jámě, zapažené v portálové části vrтанou pilotovou stěnou střídavě s konstrukcí záporového pažení v místě budoucích tunelových trub. Zbývající stěny stavební jámy jsou kompletně zapaženy záporovým pažením. Piloty i záporové pažení je dle projektu na základě statického výpočtu opatřeno v různých hloubkových úrovních převážkami a předpjatými kotvami. Hloubení jámy bylo prováděno postupně po etážích až na konečnou projektovanou úroveň. Postup hloubení jámy je zachycen na obrázcích 7, 8, 9.

Návrh monitoringu hloubené části SO513 v Komořanech

Monitorovací systém pažicích konstrukcí komořanské jámy byl navržen dle zásad kontrolního monitoringu. Dimenze pažicích konstrukce se neměnily na základě zastížených poměrů a výsledků měření jako u observační metody. Prioritní je prokázat bezpečnost a stabilitu návrhu pažicích konstrukcí.

Geologické poměry

Prostor jámy je budován kvartérními sedimenty. Střídají se hlinitý písek – hlína písčité s pískem, které střídají méně mocné vrstvy hlinitého štěrku. Toto geologické prostředí je zcela nevhodné pro tunelování. Komořanský portál byl umístěn bezpečně až za (pod) bázi kvartérních sedimentů do skalních hornin ordoviku. Detail rozhraní mezi kvartérním pokryvem a skalním podkladem je zachycen na obr. 10.

Monitoring

Základním měřením v tomto případě bylo trigonometrické měření. Ve třech rovinách kolmých na osu hloubené části jsme ve třech hloubkových úrovních osadili 6 trigonometrických profilů a na portálovou stěnu další tři profily (obr. 11a, 11b, 11c). Měření byla prováděna jednak v pravidelných časových intervalech (kontrolní měření) a jednak v souladu se stavebními pracemi po odtěžení příslušné etáže, resp. napnutí kotvě. Pro získání informací o deformaci okolí stavební jámy byly instalovány inklinometrické vrty se speciální pažnicí, umožňující měření přesné inklinometrie (obr. 12). Četnosti měření se řídily stejnými pravidly jako u geodetického měření.

Výsledky monitoringu hloubené části Komořanech

Na obr. 13 je znázorněn charakteristický průběh deformací, který představuje rovinný vektor deformace v rovině kolmé na osu trasy. Max. deformace po odlehčení (odtěžení) je 10–15 mm. Měřeními přesné inklinometrie ve vrtech nebyl prokázán žádný vývoj smykové plochy nebo zóny. Výsledky měření se pohybují v mezích přesnosti metody. Na obr. 14 jsme uvedli výsledky měření ve vrtu.

Organizace a řízení monitoringu Kancelář monitoringu

Kancelář monitoringu je místo, kde se shromažďují, vyhodnocují a archivují veškeré výsledky měření dotýkající se stavby tunelu. Zde se také soustředí informace o zatřídění jednotlivých ražeb do příslušných tříd výrubu. Po dobu výstavby tunelů vedoucí kanceláře monitoringu komplexně vyhodnocuje výsledky



Obr. 12: Zhlaví inklinometrického vrtu

všech měření. K jeho hlavním úkolům patří zejména:

- pravidelná účast na operativních, týdenních a měsíčních schůzkách účastníků výstavby,
- vypracovávání návrhu týdenního aktuálního plánu měření,
- koordinace všech zhotovitelů měření tak, aby tato byla prováděna v souladu se schváleným týdenním aktuálním plánem měření, dle tohoto projektu a v souladu s potřebami výstavby,
- průběžné vyhodnocování výsledků měření s ohledem na jejich vztah k deformačním stavům,
- předávání informací o dosažení deformačního stavu zodpovědným osobám.

Ukládání a sdílení dat (interaktivní systém CUBULA)

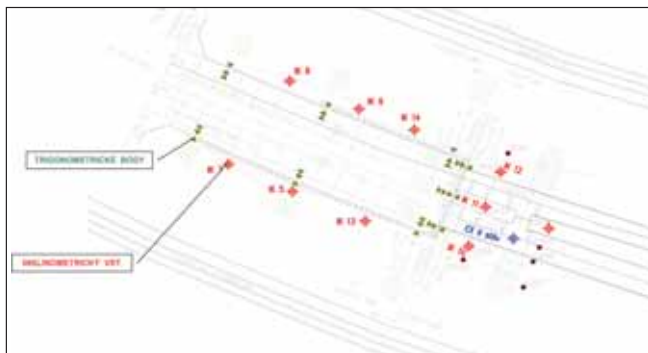
V dnešní době je již pro efektivní řízení monitoringu nezbytné mít k dispozici databázový interaktivní systém sloužící pro ukládání, vyhodnocování a sdílení datových souborů. Pro tyto účely byl vyvinut originální interaktivní systém CUBULA, který uvedené parametry splňuje. Celková struktura systému je řešena pomocí databází, ve kterých jsou uložena jak grafická



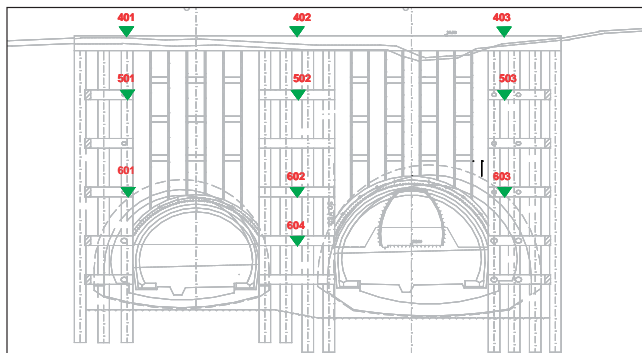
Obr. 9: Konečná hloubka stavební jámy, příprava výtuže dna definitivního ostění hloubené části tunelu



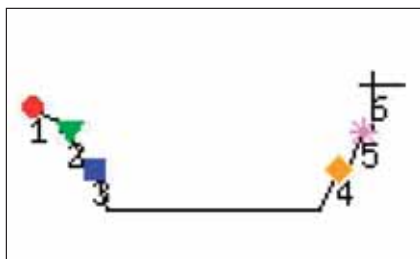
Obr. 10: Rozhraní mezi kvartérním pokryvem a skalním podkladem



Obr. 11a: Schéma monitorovacích prvků jámy Komořany



Obr. 11b: Schéma monitorovacích prvků v profilu



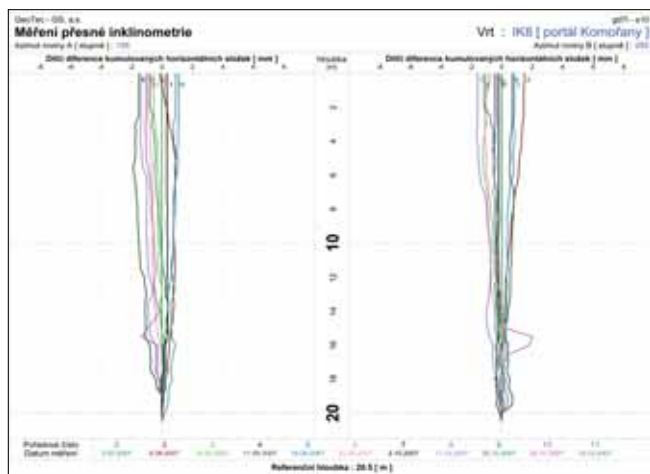
Obr. 11c: Schéma monitorovacích prvků na portále

data, tak i dokumenty. Systém pro svoji práci využívá webovské rozhraní a je funkční pod standardními prohlížeči (explorer, opera). Ke svému provozu nepotřebuje žádné další instalace na straně uživatele.

Grafické soubory jsou dvojího druhu. Pevné soubory (situace, projekt, letecké snímky) jsou členěny do vrstev a jejich zobrazení ovládá uživatel výběrem v záložce „Témata – mapy“. Tyto soubory slouží jako orientační podklad, jsou zpracovány při zahájení stavby (tvorbě projektu). Rozsah zobrazovaných dat je definován v rámci každého projektu dle požadavků zadavatele.



Obr. 13: Trigonometrický profil č. 3



Obr. 14: Inklinometrický vrt IK8

Pro oprávněného uživatele jsou vždy přístupna veškerá dostupná data daného projektu v celém časovém rozsahu. Odpadá tak potřeba distribuce dat a archivace na straně uživatele. Systém současně ukládá informace o uživateli, který dokument vložil nebo provedl aktualizaci, a čase uvedené operace.

Několik bodů závěrem

- Na základě výše uvedených výsledků monitoringu jsme v průběhu výstavby přistoupili v souladu s principy NRTM a ve spolupráci s projektantem, zhotovitelem a investorem k redukci některých výtuzných prvků.
- Systém sledování razicích prací, předně zařizování výrubů do technologických tříd, optimalizace výtuzných prvků primárního ostění, za účasti supervize, vedoucího monitoringu, stavbyvedoucího a investora, se jednoznačně osvědčil jako velmi efektivní. Celý systém potom naplňuje částečně i doporučení FIDIC, kde odborný konzultant zhotovitele plní úlohu kompetentního pracovníka investora ve funkci geotechnika a částečně i stavebního dozoru (tzv. Engineer).
- Pažicové konstrukce hloubených úseků jsou stabilní. Kontrolní měření prokazují vysokou bezpečnost zajištění těchto hlubo-

kých stavebních jam metodami speciálního zakládání staveb.

Igor Zemánek, MOTT MACDONALD Praha, spol. s r. o.

Petr Svoboda, D2 Consult Prague, s. r. o.

Eva Kolářová, MOTT MACDONALD Praha, spol. s r. o.

Geotechnical monitoring during construction of tunnel Vestec – Lahovice on Prague ring road, site 513

As it was requested to adhere to production efficiency and security of work, geotechnical and hydrogeological monitoring was designed for construction of tunnels SOKP 513. It also serves as means how to verify hypothesis and results of static and geotechnical calculations. Aim of this article is to give information about designed system of monitoring on the site and with some results of measurement of rock environment and structures during construction and their influence on driving of each tunnel tube.



Obr. 15: Příklad znázornění GISU