

## Geomonitoring pri výstavbe tunelov

Anna Garneková<sup>1</sup> a Jozef Čížik<sup>2</sup>

### Geomonitoring in construction of the tunnel

*A basic element in the decision making process on the adequacy of the support system was a monitoring and analysis process. We consider geomonitoring as continuous monitoring of objects (e.g. of mines, tunnels, machinery, buildings and a lot of constructions) during the construction or operating phase using geodetic, geotechnical and geophysical methods.*

*Geomonitoring is gaining increasing significance as a result of new safety aspects, from the point of view of immission control as well as in connection with early warning and alarm systems. Specific areas covered include geological and geotechnical explorations required, construction of tunnels and shafts, design considerations, geomechanical analysis, design of linings, and instrumentation and monitoring.*

*Consequently, monitoring of many of the instrument arrays have to continue for several years after construction. Monitoring programs must be carried out for well-defined purposes, be well planned, and be supported by competent staff through completion and implementation of results from the monitoring program.*

**Key words:** tunnel, monitoring, underground construction, measurements

### Úvod

Základným zmyslom geotechnického monitoringu je zabezpečenie každej geotechnickej stavby v etape výstavby, prevádzky a zabezpečenia okolia prípadnými nepriaznivými indukovanými účinkami (deformačné, dynamické, hydrogeologické a ich kombinácie) vyvolanými geotechnickou stavbou.

Kvalita stavebných prác je meraná mierou uspokojenia požiadaviek investora. Kvalitu, t.j. splnenie vopred stanovených kvalitatívnych cieľov možno zabezpečiť dvoma spôsobmi a to riadením a kontrolou kvality. Systém riadenia kvality je podstatne účinnejší ako systém kontroly kvality, ktorého úlohou je zisťovať nehody a nie im predchádzať.

Geotechnický model, na ktorom môžeme pozorovať správanie sa materiálu, je vždy len zjednodušená schéma prírodného javu alebo interakcie horninový masív – stavebná konštrukcia, zostavená na základe dostupných informácií, ktorý má charakter prognózy.

### Meracie systémy a metódy pri monitoringu

Monitoring je realizovaný pomocou rôznorodých meracích zariadení a systémov použitých podľa účelu, ktorý sledujeme a podľa horninových podmienok počas razenia podzemného diela. Meracie prístroje pre monitoring sú väčšinou jednoduché zariadenia a slúžia k zisťovaniu jednej hodnoty. Pozostávajú zo snímačej jednotky, ktorá zabezpečuje samotný záznam snímanej veličiny, prenosovej a odčítavacej jednotky, ktoré umožnia samotné odčítanie nameranej hodnoty s požadovanou presnosťou (Vavrek, P., Hamrák, H., 2001). Meracie systémy pracujú na rôznych princípoch:

- Mechanické systémy: väčšinou veľmi presné zariadenia jednoduchej konštrukcie, ktoré však neumožňujú diaľkový prenos dát. Patria sem mechanické pohybové detektory (zmena polohy bodov voči sebe je priamo úmerná meraniu vzdialeností) a mechanické dynamometre (miera zaťaženia zodpovedá deformáciám, ktoré sú odčítané indikátorovými hodinkami).
- Optické a elektrooptické systémy: slúžia väčšinou ku kontrole horizontálnych pohybov a na meranie morfológie povrchu (fotogrametrické metódy). Elektrooptické systémy využívajú odraz modulovaného svetla alebo laserového lúča od odrazových terčikov, pričom čas potrebný na cestu lúča tam a späť zodpovedá určovanej dráhe – vzdialenosti.
- Pneumaticko-hydraulické systémy: zariadenia určené na meranie tlaku horniny, sadanie hornín, tlak vody, ktoré využívajú princíp membránového pulzátora, pričom tlak vyvolaný médiom na jednej strane membrány je vyrovnávaný meraným tlakom.
- Tenzometrické systémy: odporové a strunové tenzometre určené na meranie napätí, zaťaženia alebo tlakov využívajú princíp proporcionálneho nárastu elektrického odporu s predlžovaním vodiča.

<sup>1</sup> Ing. Anna Garneková, Amberg Engineering Slovakia, s.r.o., Záhradnícka 27, Bratislava

<sup>2</sup> Ing. Jozef Čížik, PhD., Amberg Engineering Slovakia, s.r.o., Záhradnícka 27, Bratislava  
(Recenzovaná a revidovaná verzia dodaná 16. 6. 2009)

### Meranie posunov a deformácií

Konvergenčné merania sa realizujú v meracích profiloch v rovinách kolmých na pozdĺžnu os banského diela. Meraný profil je tvorený niekoľkými meracími bodmi, umožňujúcimi opakované meranie zmien ich vzájomnej vzdialenosti. Počet bodov v profile závisí na rozmere diela a účele merania. Pre stanovenie absolútnej veľkosti zložiek posunutia jednotlivých bodov musí meranie konvergenencie nadväzovať na meranie geodetické. Pre stanovenie posunov sa používajú dve základné metódy (Krepelka, F., Záhoranský, G, 2006):

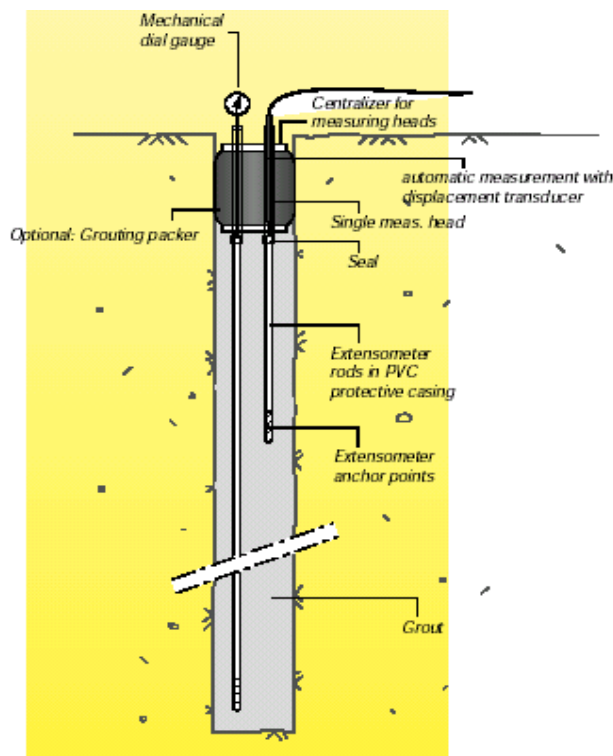
- meranie konvergometriami (strunovými alebo tyčovými),
- meranie geodetické (obr. 1).



Obr. 1. Meracia stanica (Soleexperts AG, 2003).

Fig. 1. Measuring station (Soleexperts AG, 2003).

Extenzometrické merania informujú o deformácii vo vnútri horniny pomocou vrtov. Extenzometre slúžia na meranie relatívnych posunov v horninovom prostredí (Vavrek, P., Hamrák, H., 2001). Extenzometer vytvára v hornine pevný bod, ktorého premiestnenie v priebehu banskej činnosti sa registruje na meracej hlave upevnenej v ústí vrtu. Extenzometre poznáme jednoduché a viacnásobné, podľa toho, v koľkých bodoch sa uskutočňuje meranie (obr. 2).



Obr. 2. Extenzometer pre meranie geotechnických deformácií a porúch (Soleexperts AG, 2003).

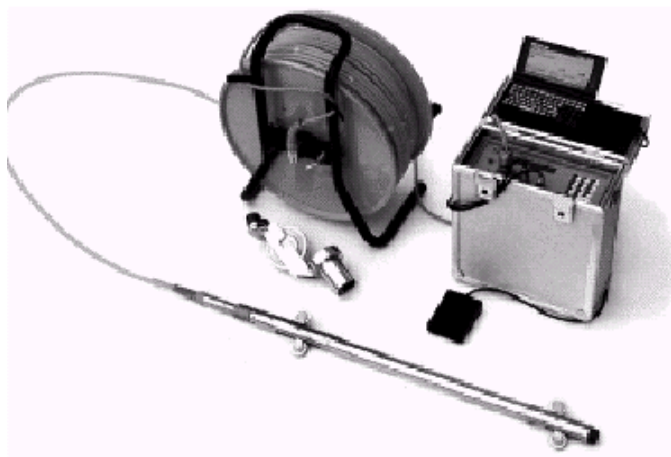
Fig. 2. Modular Extensometer For Measuring Geotechnical Deformation and Displacement (Soleexperts AG, 2003).

Posuvným mikrometrom možno registrovať priebeh axiálnych deformácií pozdĺž meranej priamky, tvorenej vrtom v horninovom prostredí. Týmito prístrojmi sa dajú uskutočniť veľmi presné merania. Jedná sa o prenosnú sondu s vysokou presnosťou, ktorá sa postupne zasúva do vrtu vystrojeného špeciálnymi značkami. Postupne sa zmapuje vývoj deformácií pozdĺž celého vrtu. Predstaviteľom tejto skupiny prístrojov je posuvný mikrometer (obr. 3).



Obr. 3. Mikrometer (Soleexperts AG, 2003).  
Fig. 3. Micrometer (Soleexperts AG, 2003).

Na meranie priečných posunutí vo vrte slúži deflektometer inklinometer (obr. 4). Vo vrte sú v určitých vzdialenostiach osadené snímače, ktoré sú spojené prostredníctvom napnutého drôtu. Relatívne posunutia sú merané cez polygónový ťah.



Obr. 4. Inklinometer (Soleexperts AG, 2003).  
Fig. 4. Inclinometer (Soleexperts AG, 2003).

### Určovanie napätí a tlakov

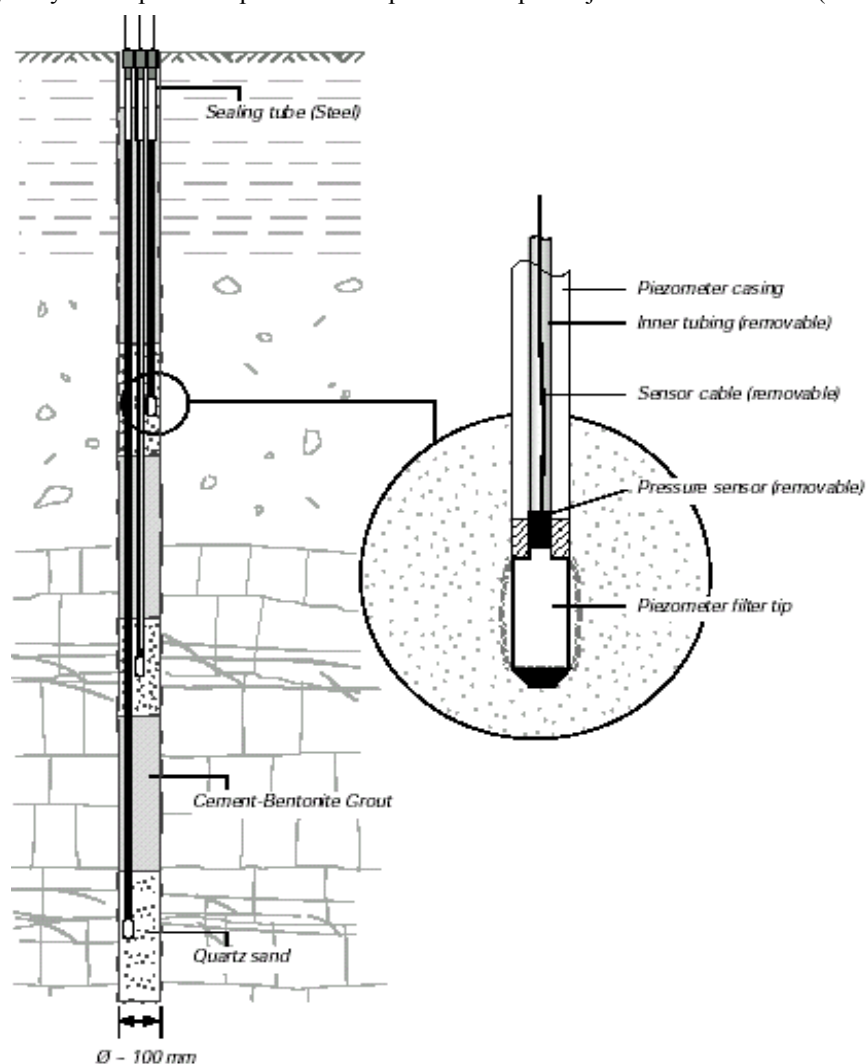
Druhou, v geotechnike najčastejšie monitorovanou veličinou sú napätia. V porovnaní s deformáciami sú hodnoty z týchto meraní zaťažené mnohokrát väčšími chybami. Na meranie napätí a tlakov sa používajú nasledujúce snímače:

- merací snímač pracujúci na hydraulickom princípe,
- merací snímač pracujúci na princípe chvenia struny,
- strunový snímač,
- hydraulický snímač.

Miera nejednoznačnosti je pri betóne spojená s tým, že niektoré deformácie betónu (napr. zmrašťovanie) vôbec nesúvisia so zmenou napätosti a sú závislé od času (napr. tečenie). Tieto vplyvy nie je možné nikdy jednoznačne eliminovať. Z uvedených dôvodov sa v geotechnike už mnoho rokov používajú *tlakomerné krabice*, ktoré sa zabetónujú do stavebnej konštrukcie alebo na styk konštrukcie a horninového masívu. Výhodami merania napätí pomocou tlakomerných krabíc je priame meranie napätia, možnosť jednoduchého odčítania v prípade priamo pripojeného manometra. Nevýhodou, naopak, použitie len pre meranie tlakových napätí ako i možnosť vzniku medzery medzi krabicou a betónom vplyvom teplotných zmien pri tuhnutí betónu. Tento nedostatok je možno ale eliminovať dotlačením krabice na betón pomocou dotlačácej rúrky (Vavrek, P., Hamrák, H., 2001).

### Meranie výšky hladiny podzemnej vody a pórovitého tlaku vody

Podstatnú úlohu pri riešení geotechnických úloh zohráva podzemná voda, t.j. voda, ktorá súvisle vyplňa dutiny (póry) horninového (skalného alebo zemného) masívu a podlieha len gravitácii (hydrostatickému tlaku). Piezometer je prístroj na meranie tlaku pórovej vody. Merací systém pre vyšetrenie potenciálneho poľa podzemnej vody musí spĺňať bezpodmienečne požiadavku presnej lokalizácie merania (obr. 5).



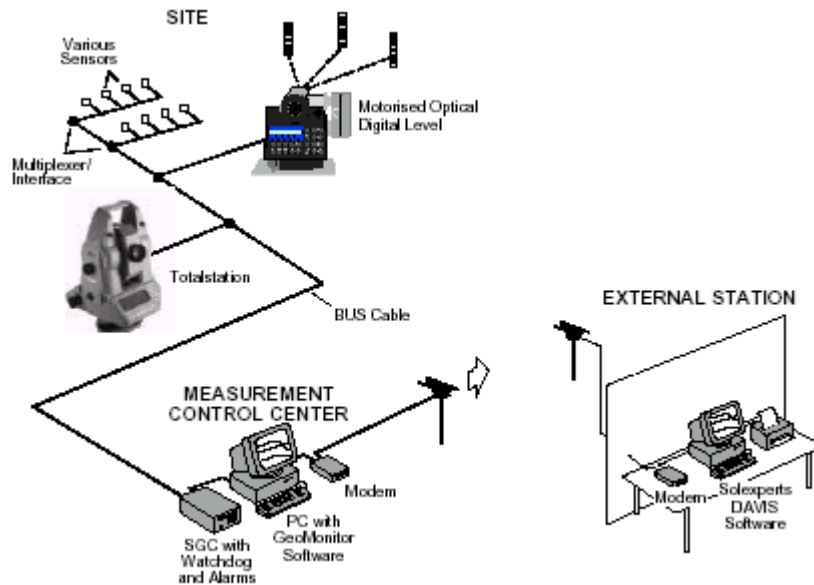
Obr. 5. Piezometer na meranie tlaku vody v póroch (Soleexperts AG, 2003).  
 Fig. 5. Piezometer For measuring porewater pressure (Soleexperts AG, 2003).

### Interpretácia výsledkov monitoringu

Poslednou etapou geotechnických meraní je ich správna analýza, vyhodnotenie a využitie. Za to zodpovedá projektant, ktorý by mal spolupracovať a konzultovať výsledky meraní s meračmi, ktorí mohli vizuálne spozorovať mnohé javy a vedieť projektanta upozorniť na hraničné faktory meracích prístrojov a použitých metód. V praxi sa často stáva, že ani nie sú určené hraničné hodnoty meraných veličín a tým investor aj ostatní zúčastnení na stavbe majú dojem, že vykonávanie meraní je do istej miery zbytočnou záťažou, ktorá časovo a hlavne finančne zdržuje postup výstavby, a preto je monitoring postavený na poslednej kladenej priečke v príprave projektu. Na druhej strane správna interpretácia meraní je náročnou úlohou (obr. 6), vyžadujúcou hlboké teoretické znalosti a praktické skúsenosti (Gróf, V., 2001).

Hodnoty získané z nameraných výsledkov sa priebežne analyzujú na meraní vykonávaných pri razení tunelov Novou rakúskou tunelovacou metódou. Pri posudzovaní stability podzemného diela sa najprv kontroluje deformačné správanie nosného systému hornina-primárne ostenie meraním deformácií, pričom

sa využívajú namerané výsledky z istého časového úseku priestoru. Výstupy sú väčšinou znázornené v grafickej forme. Zobrazený je čas a vzdialenosť meraného profilu od čelby. Pokiaľ sa priebeh deformačnej krivky asymptoticky blíži k horizontále, posudzuje sa dosiahnutý stav ako rovnovážny stav nosného systému. Ak deformácie odznegli, je možné proces prerozdelenia napätostí považovať za ukončený, ale nie je možné povedať, akú únosnosť má celý systém z reologického hľadiska. To je možné zistiť len ďalšími teoretickými výpočtami. V praxi sa to mnohokrát neuskutoční, pretože chýbajú potrebné výpočtové modely a postupy, materiálové charakteristiky striekaného betónu nie sú dostatočne známe, ale aj tým, že dodatočne dôjde k zabudovaniu sekundárneho ostenia, čo do istej miery zabezpečí dostatočnú rezervu únosnosti diela. V odborných kruhoch časť odborníkov zastáva stanovisko, že sekundárne ostenie má úlohu len niest' izoláciu (tlak vody), z toho dôvodu, že systém primárne ostenie-horninový masív prenesie horninový tlak. Druhá časť zastáva názor, že nosná úloha primárneho ostenia trvá len počas stavebného stavu a následne v prevádzkovom stave sekundárne ostenie musí preniesť plné zaťaženie (Baker, D.G., 1991).



Obr. 6. Prenos informácií a výsledkov v procese výstavby (Solexperts AG, 2003.)

Fig. 6. Transmission informations and results in process of construction (Solexperts AG, 2003).

### Geotechnické merania vykonávané geodetickými metódami v tuneli Bôrik

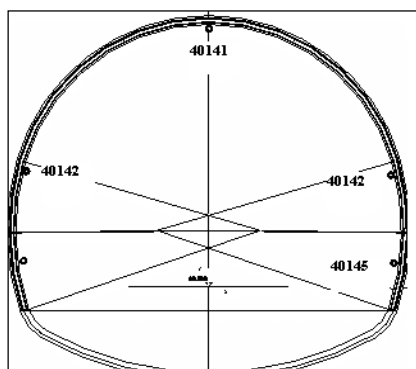
Geotechnické merania v tuneli Bôrik boli vykonávané podľa projektovej dokumentácie a boli zahrnuté do nasledovných skupín:

- Merania deformácie výrubu a primárneho ostenia v tuneli  
Tieto merania boli vykonávané podľa PD veľmi presným meraním polárnou metódou z voľných stanovísk. Pre meranie boli používané fixné body KVG profilov (obr. 7, 8), ktoré tvorili podrobnú vytyčovaciu sieť v tuneli. Merania boli vykonávané presným elektronickým tachymetrom - totálnou stanicou Leica TC 1800 s deklarovanou uhlovou presnosťou  $\pm 1''$  a presnosťou merania dĺžok  $\pm 1 \text{ mm} + 2 \text{ ppm}$ . Pozorované body boli zoradené do profilov tak, že v kalote bolo umiestnených 5 bodov profilu a na ústupku ďalšie 2 body. Počet meraní bol v zmysle PD deň po osadení profilu. Prvé meranie muselo byť vykonané max. do 3 hodín od fyzického osadenia bodov profilu v tuneli.

Merania boli vyhodnocované v programe ARC-TECH od firmy GEOID Berlín. Vyhodnotenie bolo uskutočňované formou grafov, pričom grafické výstupy definovali posuny sadania, priečne posuny, pozdĺžne posuny, konvergenciu medzi bodmi a vektorový diagram (Vrábel', P., Mokrý, M., Šutaríková, T., Mihál, H., 2008).

Deformácie bodov konvergenčného profilu sa ustalovali veľmi pomaly. Amplitúda výkyvov deformácií v jednotlivých smeroch sa v prvej etape pohybovala od  $-3 \text{ mm}$  do  $-6 \text{ mm}$ , po osadení spodných bodov od  $-3 \text{ mm}$  do  $4 \text{ mm}$ . Odčítané konečné deformácie v päte kaloty presahujú maximálne hodnoty stanovené ZTKP a projektom vo vstrojovacej triede VI-P –  $30 \text{ mm}$ . Maximálne sadnutie  $-27 \text{ mm}$  až  $-32 \text{ mm}$  bolo v smere osi „z“ (vertikálny smer) a posunutie  $13 \text{ mm}$  v pozdĺžnom smere von z tunela. Jedná sa o bod umiestnený na pravej strane v päte kaloty. Dosiahnuté deformácie pripisujeme konsolidácií glaciáluviálnych štrkov. Pri dočisťovaní päty kaloty pre osadenie priehradového nosníka na pravej strane kaloty dochádzalo k nakypreniu štrkov. Už pri prvých meraniach vznikli deformácie,

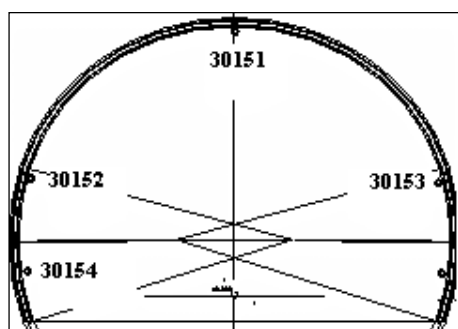
ktoré poukazovali na fakt, že zaťaženie od primárneho ostenia spôsobilo konsolidáciu nakyprených štrkov. Keďže ide o nakyprené hrubozrnné štrky, ich následná konsolidácia je dlhodobá. Z tohto dôvodu bol vo všetkých konvergenčných profiloch, ktoré boli osadené v tomto horninovom prostredí zrealizovaný, väčší počet etáp meraní. Po dosiahnutí ustáleného stavu bolo meranie ukončené. Výrub PTR je stabilný (Vrábel, P., Mokrá, M., Šutaríková, T., Mihál, H., 2008).



konečné meranie: 13.9.2007			
rozdiel konečné – nulté: 25.7.2007			
body	$\delta y$	$\delta x$	$\delta z$
	[ m ]	[ m ]	[ m ]
40141	0,000	0,003	-0,027
40142	0,000	0,004	-0,003
40143	0,013	-0,004	-0,032
40145	0,009	0,005	-0,003

Obr. 7. Konvergenčný profil č. 1 – pravá tunelová rúra – meranie.  
Fig. 7. Convergence profila no. 1 – right tunnel tube – measurement.

V úseku pravej tunelovej rúry v razenej časti, bolo celkovo osadených 26 konvergenčných profilov. Tunelová rúra sa razila zo západného portálu, kde bolo osadených 11 konvergenčných profilov a z východného portálu, kde sa osadilo 15 konvergenčných profilov.



konečné meranie: 23.8.2007			
rozdiel konečné – nulté: 6.7.2007			
body	$\delta y$	$\delta x$	$\delta z$
	[ m ]	[ m ]	[ m ]
30151	-0,004	0,003	-0,041
30152	0,005	0,013	-0,050
30153	-0,007	0,015	-0,001
30154	0,005	0,009	-0,010

Obr. 8. Konvergenčný profil č. 1 – ľavá tunelová rúra – meranie.  
Fig. 8. Convergence profila no. 1 – left tunnel tube – measurement.

Deformácie bodov konvergenčného profilu sa ustalovali veľmi pomaly. Amplitúda výkyvov deformácií v jednotlivých smeroch sa v prvej etape pohybovala od 9 mm do – 10 mm, po osadení spodných bodov od – 5 mm do 5 mm. Jedine po osadení bola väčšia deformácia  $\pm 9$  mm v bode na stredovom pilieri. Odčítané konečné deformácie v päte kaloty presahujú maximálne hodnoty stanovené ZTKP a projektom vo vstrojovacej triede VI-P – 30 mm. Maximálne sadnutie – 41 mm až – 50 mm bolo v smere osi „z“ (vertikálny smer) – stropný a ľavý spodný bod, priečna deformácia „x“ 13 – 15 mm v spodných kalotových bodoch. V pozdĺžnom smere sa deformácie pohybovali od 2 mm do – 6 mm. Dosiahnuté deformácie pripisujeme konsolidácii glacifluviálnych štrkov. Pri dočisťovaní päty kaloty pre osadenie prihradového nosníka na pravej strane kaloty dochádzalo k nakypreniu štrkov. Už pri prvých meraniach vznikli deformácie, ktoré dokladovali, že zaťaženie od primárneho ostenia spôsobilo konsolidáciu nakyprených štrkov. Keďže ide o nakyprené hrubozrnné štrky, ich následná konsolidácia je dlhodobá. Z tohto dôvodu bol vo všetkých konvergenčných profiloch, ktoré boli osadené v tomto horninovom prostredí väčší počet etáp meraní. Pri porovnaní výsledných deformácií pred osadením spodného bodu a výsledných deformácií pri konečnom meraní, najväčšie deformácie boli zistené v prvej etape. Po dosiahnutí ustáleného stavu bolo meranie ukončené. Výrub LTR bol stabilný (Vrábel, P., Mokrá, M., Šutaríková, T., Mihál, H., 2008).

V úseku ľavej tunelovej rúry, bolo celkovo osadených 28 konvergenčných profilov. Tunelová rúra sa razila zo západného portálu, kde bolo osadených 10 konvergenčných profilov a z východného portálu, kde sa osadilo 18 konvergenčných profilov.

- Merania sadania a deformácie na povrchu (portálové steny)  
Tvar a vývoj poklesovej kotliny bol meraný prostredníctvom nivelačných bodov, stabilizovaných na povrchu terénu. Nivelačné značky sa osadili do betónových kvádrov cca 0,30 x 0,30 x 0,60 m zhotovených na mieste. Pokiaľ bol v mieste projektovaného osadenia skalný podklad, nivelačná značka sa spoľahlivým spôsobom zasadila do horninového masívu. Po osadení nivelačných bodov a zatvrdnutí betónu sa zrealizovalo tzv. nulté meranie - nivelačné meranie s presnosťou min.  $\pm 2$  mm. Základné nulté meranie bolo potrebné realizovať zásadne pred začatím raziacich prác. Početnosť meraní bola pri prechode čelby 3x za týždeň. Po vzdialení sa čelby na vzdialenosť 30 m od meraného profilu sa vykonávalo na profile jedno meranie týždenne a po vzdialení sa čelby (vrátane ústupku) na vzdialenosť 60 m od meraného profilu 1x za mesiac, až do úplného doznenia pohybov meraných bodov profilu. Vyhodnocovali sa len zložky sadania, priečnych a pozdĺžnych posunov (Žák, M., Vojčík, R., Ferančík, P., 2006).
- Kontrola profilu primárneho ostenia tunela - geodetické merania počas reprofiliácie  
Po doznení deformácií pod prípustnú rýchlosť zvyškových deformácií a s dostatočným predstihom pred zabudovaním izolácie sa geometria primárneho ostenia skontrolovala profilovým meracím systémom. Pre meranie na tuneli Bôrik sa používala totálna stanica Leica TCRM 1105 s aplikačným programom ProScan Plus od firmy Amberg. Vyhodnotenie bolo vykonávané v programe Prowin od tej istej firmy. V oblastiach, v ktorých bolo nutné profil upraviť, sa musela po preprofilovaní kontrola profilu opakovať. Profilovým meracím systémom sa zamerala priestorová konštrukcia primárneho ostenia v pozdĺžnom smere s odstupom maximálne 2 m a v priečnom smere maximálne 1 m, ako aj všetky, pre profil dôležité body (Vrábel, P., Mokrý, M., Šutaríková, T., Mihál, H., 2008).
- Geodetické merania počas zhotovovania sekundárneho ostenia tunela a vozovky  
Geodetické merania počas zhotovovania sekundárneho ostenia v tuneli ako aj ostatných objektov definitívneho charakteru sú rozdelené na vytyčovanie a dokumentáciu skutočného vyhotovenia (realizovania - TKP) stavby. Pre vytyčovanie sa využívaná nová podrobná vytyčovacia sieť v tuneli, ktorá bola prebudovaná z pôvodnej podrobnej vytyčovacej siete tunela v primárnom ostení do hornej klenby, alebo základových pásov sekundárneho ostenia tunela. Prakticky všetky vytyčovacie práce boli realizované za pomoci aplikačného programu od firmy Leica - Referenčnej priamky. Zameranie skutočného vyhotovenia stavby bude vykonávané štandardným tachymetrickým meraním. Kontrola vnútornej, t.j. lícnej strany sekundárneho ostenia je vykonávaná tak, že priečne profily sú merané len na styku a v strede blokov. Požadovaná presnosť zhotovenia priečného profilu sekundárneho ostenia je  $\pm 3$  cm ((Žák, M., Vojčík, R., Ferančík, P., 2006).

### Záver

Pomerne veľké nezrovnalosti v etape realizácie geotechnických meraní v podzemnom staviteľstve sú spojené s absenciou, resp. nízkou úrovňou ich plánovania. Projekt geotechnického monitoringu mnohokrát nie je vyhovujúci, resp. nepostačujúci. V prvom rade by táto činnosť mala byť prvou realizovanou pred zahájením výstavby diela, aby sa naštartoval kľúčový stav, pomocou ktorého sa identifikujú rizikové časti. V programe monitoringu musí byť jednoznačne rozvinutá jedna alebo viac teórií pracovných mechanizmov porušenia stavebného objektu a správania sa horninového masívu. Tieto teórie by mali byť založené na rozsiahlych znalostiach „in situ“, projektovej prípravy, ale aj technológie výstavby.

Návrh meracieho systému by mal byť koncipovaný podľa aktuálnej potreby, pretože zníženie resp. zvýšenie počtu meraní je vždy možné a závisí od skutočných geologických a geotechnických pomerov horninového masívu. Pre vyhodnotenie výsledkov by sa mala použiť vhodná mierka, aby nedošlo k poddimenzovaniu, resp. predimenzovaniu nameraných hodnôt obslužným personálom stavby.

### Literatúra - References

- Krepelka, F., Záhoranský, G.: Tunely, 2006.  
 Žák, M., Vojčík, R., Ferančík, P.: Technologický predpis, Technológia geodetických meraní v tuneli, *Marti Contractors Ltd, Civil Engineering & Managing Services, 11.10.2006.*  
 Gróf, V.: Cestné a železničné tunely, Projekt dištančného vzdelávania, Geotechnický monitoring, *Január 2001.*  
 Hoek, E.: Practical Rock Engineering, 2007.

Vavrek, P., Hamrák, H.: Tunelárstvo I, *Elfa, Košice 2001*.

Vrábel, P., Mokrý, M., Šutariková, T., Mihál, H.: Závěrečná správa z geotechnického dozoru tunela Bôrik, primárne ostenie-razená časť, *Inžinierske združenie MENGUSOVCE, 2008*.

Baker, D. G.: Wahleach power tunnel monitoring. Proc. 3rd Int. Symp. on Field Measurements in Geomechanics, *Oslo, Norway, 1991*.

Soleexperts AG: <http://www.soleexperts.com>, 2003.