

VPLYV PRESNOSTI A SPOĽAHLIVOSTI USMERŇUJÚCICH GEODETICKÝCH MERANÍ PRI PROJEKTOVANÍ A VÝSTAVBE TUNELOV

INFLUENCE OF THE ACCURACY AND RELIABILITY OF GEODETIC
MEASUREMENTS IN TUNNEL DESIGN AND CONSTRUCTION

Miroslav KRUPEC¹

Abstract:

The construction of several tunnels, which exceeds 1500 meters in length, is in progress in Slovakia today, Milochovo ~ 1770 m, Považský Chlmec ~ 2218 m, Prešov ~ 2244 m, Ovčiarsko ~ 2360 m, Čebrať ~ 3650 m and Višňové ~ 7520 m, and will follow by another. This article discusses the impact of decreasing accuracy and reliability of geodetic measurements - especially in the transverse direction with the increasing length of the shaded part of the tunnel. This has a direct impact on the projected technological overload of the primary blade in the given class. It is never considered explicitly in the design, but the responsible surveyor must this always re-evaluate and manage. At the length of the excavated part above 1500 m, this influence is significant and should be responsibly handled.

Abstrakt:

V súčasnej dobe prebieha na Slovensku výstavba viacerých tunelových diel, ktoré svojou dĺžkou presahujú 1500 m. Milochovo ~1770 m, Považský Chlmec ~2218 m, Prešov ~2244 m, Ovčiarsko ~2360 m, Čebrať ~3650 m a Višňové ~7520 m, pričom budú nasledovať ďalšie. Tento článok pojednáva o vplyve klesajúcej presnosti a spoľahlivosti usmerňujúcich geodetických meraní - hlavne v priečnom smere s rastúcou dĺžkou razenej časti tunela. Tento vplyv má priamy dosah na projektované technologické nadvýšenie primárneho ostenia v danej výrubovej triede. Nikdy sa s ním priamo (explicitne) v projekte neuvažuje, vždy si to zodpovedný geodet musí prehodnotiť a manažovať sám. Pri dĺžke razenej časti nad 1500 m začína byť tento vplyv významný a treba sa s ním zodpovedne zaoberať.

1 ÚVOD

Týmto príspevkom chceme vyskúšať možnosť modelovania distribúcie stredných chýb s overením na reálne vykonaných meraniach. Budeme analyzovať vplyv klesajúcej presnosti jednostranne pripojeného a orientovaného polygónového ťahu a jej vplyv na projektovanie a budovanie primárneho ostenia.

2 PROJEKTOVANIE PRIMÁRNEHO OSTENIA PRI CYKlickOM SPÔSOBE RAZENIA

Pod pojmom cyklické razenie rozumieme vrtno-trhací spôsob razenia. V strednej Európe a teda aj v našich geologických podmienkach je v súčasnosti najpoužívanejšia Nová rakúska tunelovacia metóda (NRTM). Princiipiálne však ku vrtno-trhacím metódam patria

¹ Krupec Miroslav, Ing., GEO-KOD, s.r.o., Žitná 21, 831 06 Bratislava, +421907712070, miroslav.krupec@geokod.sk

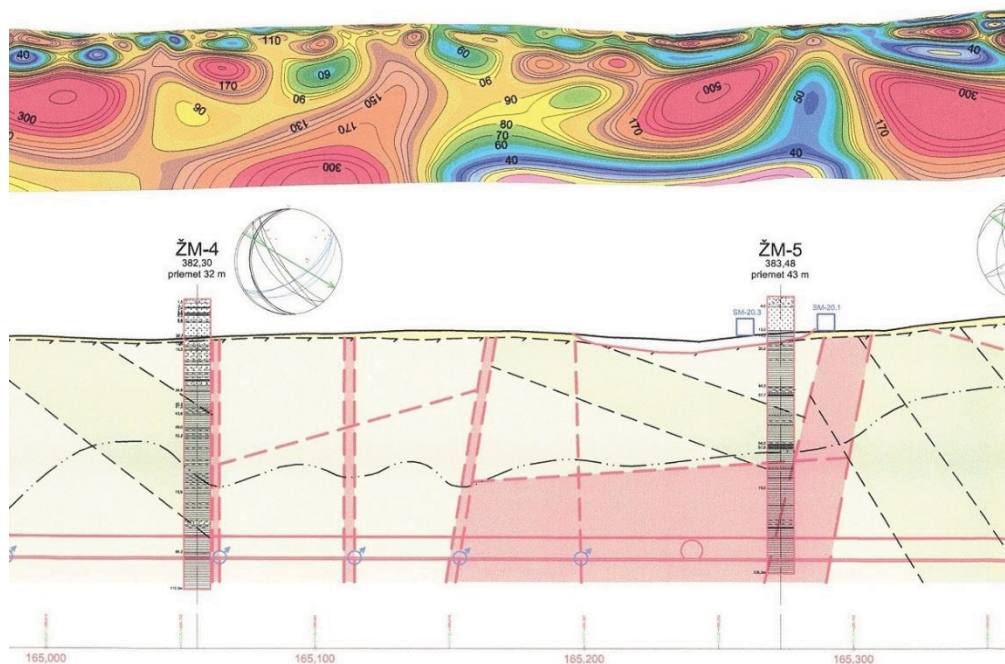
aj Lunardiho metóda (známa tiež pod názvom ADECO-RS), alebo škandinávske tunelovacie metódy - tieto však neobsahujú definitívne ostenie a meranie konvergencií. Proces, na základe ktorého prebieha projektovanie primárneho ostenia pri cyklickom spôsobe razenia (NRTM) možno jednoducho popísať nasledovne. Základným podkladom pre projektovanie je v prvom rade výsledok inžinierskogeologického prieskumu, na základe ktorého sa navrhujú vystrojovacie triedy.

2.1 INŽINIERSKOGEOLOGICKÝ PRIESKUM

Na základe odsúhlaseného variantu trasovania sa v mieste budúceho tunela vykoná geodetické mapovanie a inžinierskogeologický prieskum. Geodetické mapovanie slúži predovšetkým ako podklad na podrobný projekt portálov, pričom geologický prieskum slúži na upresnenie vnútornej horninovej skladby masívu – je to účelová klasifikácia horninového prostredia. Vykonáva sa prostredníctvom priamych prieskumných diel inžinierskogeologické (IG) vrtov v kombinácii s geofyzikálnymi metódami. Výsledkom inžinierskogeologického prieskumu je zhodnotenie horninového masívu a špecifikácia homogénnych celkov, na základe ktorých sa navrhuje zabezpečenie výrubu tunelovej rúry.

2.2 NÁVRH VYSTROJOVACÍCH TRIED – PRIMÁRNEHO OSTENIA

Projektant posúdi jednotlivé homogénne celky (výrubové triedy) a priradí im vystrojovacie prvky a vzniknú vystrojovacie triedy (VT). Tieto sa svojím počtom môžu zhodovať ale aj líšiť od výrubových tried.



Obr. 1 Inžinierskogeologický pozdĺžny profil – geofyzikálna metóda a IG vrtvy



Obr. 2 Inžinierskogeologický pozdĺžny profil – s vystrojovacími triedami a typom základov

Každá VT je navrhnutá na mieru pre daný horninový typ, rozdielne sú:

- horizontálne členenie čelby (delená čelba na kaplnky, s protiklenbou a iné),
- odstup čelby od jadra (stupňa),

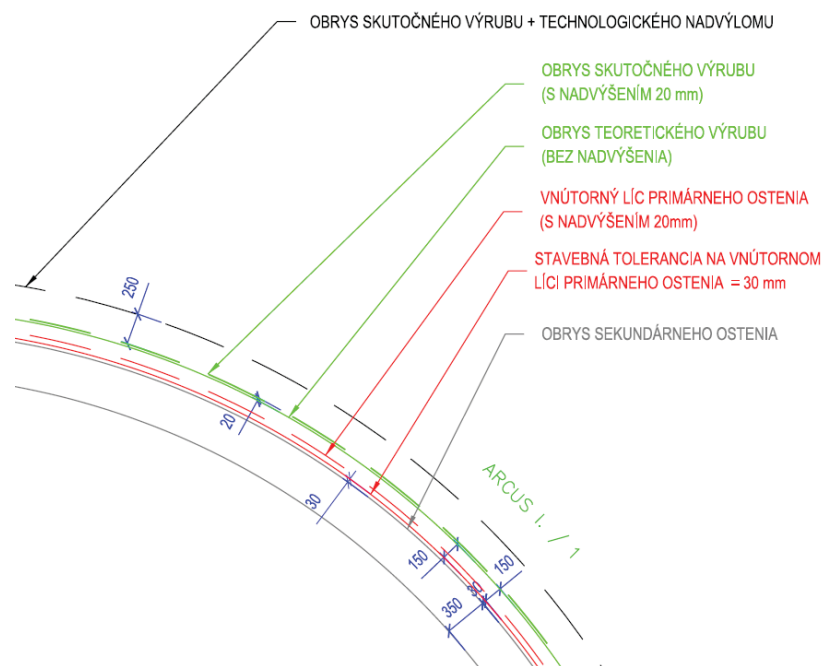
- maximálna dovolená dĺžka záberu,
- hrúbka primárneho ostenia,
- počet zabezpečovacích prvkov (ihly, IBO svorníky a iné),
- rozdielna hrúbka technologického nadvýšenia (TN).

Pri návrhu VT existujú dva prístupy:

- primárne ostenie má slúžiť iba počas výstavby a postupne musí definitívne ostenie preniesť plnú záťaž horninového prostredia,
- primárne ostenie slúži počas celej životnosti stavby a pomáha definitívnemu osteniu v prenose záťaže horninového prostredia.

Početnosť jednotlivých VT v metroch má priamy dopad na cenu razenej časti tunela. Početnosť VT uvádzaných projektom je kvalifikovaný odhad, ktorý sa pri reálnom razení môže meniť lebo princíp technológie NRTM je dynamicky reagovať na aktuálne podmienky horninového masívu. V projekte navrhované typy zaistenia – vystrojenia a ich počet, sa môže na konci razenia líšiť od reality (vzhľadom na kvalitu inžinierskogeologického prieskumu). Pre nás geodetov je podstatné pri VT poznať tvar (geometriu) a technologické nadvýšenie primárneho ostenia. Dôvodom jeho vzniku sú prebiehajúce konvergencie v masíve počas razenia tunela. Technologické nadvýšenie sa pohybuje okolo hodnôt 0 mm až 150 mm - niekedy aj viac v závislosti od geologických podmienok. V tejto hodnote je často schovaná aj stavebná tolerancia veľkosti 20 mm až 30 mm, pozdĺž celého tunela konštantne. Práve tento fakt považujem zo strany projektanta za ukážku neznalosti geodetickej problematiky. Navyše pri realizácii projektov podľa žltého FIDIC-u často dochádza ku tlaku zhotoviteľa na projektanta o minimalizáciu technologického nadvýšenia. Vystrojovacie triedy na začiatku razenia majú obvykle vyšší počet zaisťovacích prvkov a aj väčšie technologické nadvýšenie. Napríklad VT Vb môže mať technologické nadvýšenie až 100 mm. Nižšie výrubové triedy majú nižšie technologické nadvýšenie lebo sa tu predpokladajú menšie konvergencie vďaka uplatneniu samonosného efektu.

Na obr. 3 môžeme vidieť ukážku návrhu geometrie primárneho ostenia vo vystrojovacej triede II.



Obr. 3 Geometria primárneho ostenia - vystrojovacia trieda II.

Primárne ostenie má hrúbku 150 mm a jeho technologické nadvýšenie je 20 mm – táto hodnota pokrýva prípadné konvergencie. Stavebná tolerancia má hodnotu 30 mm, v skutočnosti je táto hodnota znížená o geotextíliu a izolačnú fóliu, ktorá sa vkladá medzi primárne a sekundárne ostenie – s terčíkom táto vrstva môže dosiahnuť aj 10 mm.

Vystrojovacia trieda II sa nachádza obvykle v strede razeného masívu a pri 1000 metrovom tuneli, pri razení z jednej strany dosiahneme toleranciu na tvar primárneho ostena 20 mm až 30 mm na 500 m razenej dĺžky (stred tunela). Túto toleranciu s istotou „spotrebuje“ zhotoviteľ primárneho ostena pri striekaní mokrej betónovej zmesi na klenbu. Podľa TKP je tolerancia na hrúbku sekundárneho ostena v tvare +30 mm/-30 mm, táto je však prípustná len lokálne – bodovo.

V praxi sa tento problém rieši tak, že väčšinou konvergencie dosiahnu iba 20% - 50% predpokladanej hodnoty, tým pádom sa vytvára priestor na väčšiu stavebnú toleranciu pre geodeta. V prípade, že konvergencie dosiahnu očakávané hodnoty, alebo sú jej očakávané hodnoty nízke, musí si geodet navýšiť technologické nadvýšenie. Toto je práve citlivá záležitosť, pretože každý navýšený centimeter má potom vplyv na spotrebu liateho betónu pri budovaní sekundárneho ostena – preto musí byť táto hodnota stanovená optimálne, prípadne musí byť geodetom obhájiteľná.

3 OPTIMALIZÁCIA MERANÍ V GEODETICKÝCH SIEŤACH

V minulosti, keď ešte neboli dostupné dnes bežné UMS tak meranie pozostávalo z optického merania horizontálnych smerov a zenitových uhlov bez automatickej registrácie a cielenia, pričom každé čítanie bolo potenciálnym zdrojom chýb. Elektronické meranie šikmých dĺžok, bolo tiež značne komplikované v porovnaní s dneškom, z optických metód sa používala hlavne paralaktika. Práve pre túto obťažnosť vznikli optimalizačné metódy na dosiahnutie požadovanej presnosti parametrov 1. a 2. radu, s pokiaľ možno, čo najmenším-optimálnym počtom jednotlivých meraní. Matematickým riešením tohto geodetického problému prostredníctvom diferenciálnych rovníc s podmienkami vzniklo niekoľko optimalizačných modelov spracovania. Najpoužívanejšie metódy boli:

- D-optimalita – minimalizuje determinant kovariančnej matice,
- A-optimalita – minimalizuje stopu kovariančnej matice,
- L-optimalita – minimalizuje lineárny funkcionál kovariančnej matice,
- STROPT-optimalita – štrukturálne optimalizuje plán s diferencovaním významu funkcií.

Výsledkom spracovania optimalizácie je plán merania s navrhnutou štruktúrou a počtom opakovaní jednotlivých meraní prvkov, vrátane odhadu prvkov kovariančnej matice štruktúry. Práve túto by sme chceli využiť na našu analýzu klesajúcej presnosti, priamo úmernej k dĺžke razenej časti jednosmerne pripojenej a jednosmerne orientovanej.

4 POROVNANIE OPTIMALIZÁCIE S REÁLNYM MERANÍM

V júli 2017 sme realizovali kontrolné meranie v severnej tunelovej rúre tunela Ovčiarsko. Toto meranie prebehlo cez celú severnú tunelovú rúru s prípojom na obidvoch stranách portálov, pričom cez priečne prepojenia nebolo vykonávané žiadne meranie. Vyrovnanie prebehlo v programe PLS RS prostredníctvom 2. lineárnu modelu s odhadom adičného a násobného člena diaľkomera. Toto meranie nám poslúži ako reálne meranie na overenie výsledkov optimalizácie a štruktúry jej kovariančnej matice. Situáciu s prehľadom rozmiestnenia vzťažných a pozorovaných bodov znázorňuje Obr. 4.

Parametre charakterizujúce presnosť reálneho merania:

- UMS Leica 1202+ TCRA,
- počet meraných skupín: 2 a viac,
- aposteriorna stredná chyba meraného smeru 1,00 mgon (z vyrovnania siete 0,76 mgon),
- aposteriorna stredná chyba meranej vzdialenosti (2,0 + 2,0 ppm) mm – (z vyrovnania siete 1.5 + 1,5 ppm) mm,
- oprava z rovnice diaľkomera o adičný člen +1,252692 mm,
- násobný člen +0.013131.

Parametre charakterizujúce presnosť simulácie merania:

- počet meraných skupín: 2,
- aposteriorna stredná chyba meraného smeru 0,76 mgon,
- aposteriorna stredná chyba meranej vzdialenosti (1.5 + 1.5 ppm) mm.

V Tab. 1 uvidíme porovnanie stredných chýb stanovísk polygónového ťahu (PŤ) obojsmerne pripojeného a orientovaného. Body 5001 až 5018 tvoria vrcholy PŤ, pričom bod 5001 sa nachádza pri západnom portáli približne na začiatku razenej časti tunela. Na východnom portáli je podobne stabilizovaný bod 5018 približne na začiatku razenej časti tunela. Medzi týmito bodmi je umiestnených celkovo 16 bodov (5002-5017) s dĺžkami strán 120 m až 150 m. Z hodnôt je zrejmé, že maximá dosahujú stredné chyby v súradnicových osiach v strede tunela, kde je vzdialenosť medzi vzťažnými bodmi na povrchu maximálna.

Pri razení tunela a následnom vykonávaní usmerňujúcich meraní sme však v situácii, kedy sa vzdialenosť od fixných bodov na povrchu stále predlžuje, čím rastú stredné chyby. V tabuľke 2. vidíme ako narastá stredná chyba pri jednosmernom pripojení iba na západnom portáli (ZP).

Tab.1 Tunel Ovčiarsko - obojsmerné pripojené a orientované meranie

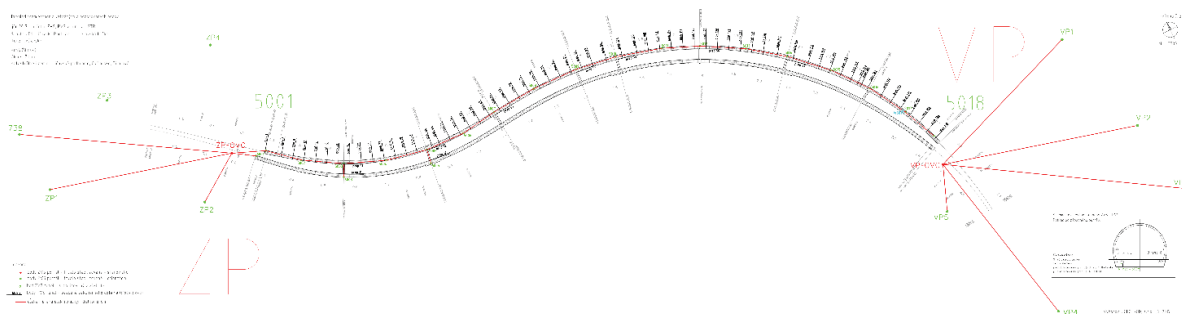
Vzdialenosť	REÁLNE MERANIE				SIMULÁCIA							
	Označenie bodu	2. lineárny model		D-optimalita				A-optimalita				
		s(X)	s(Y)	s(X)	s(Y)	2.LM - D-o		s(X)	s(Y)	2.LM - A-o		
[m]		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	
0.0	5001	0.67	0.69	0.68	0.81	-0.01	-0.12	0.68	0.81	-0.01	-0.12	
119.3	5002	1.18	1.05	1.15	1.08	0.03	-0.03	1.15	1.08	0.03	-0.03	
258.8	5003	1.89	1.50	1.72	1.40	0.17	0.10	1.72	1.4	0.17	0.10	
396.6	5004	2.61	1.87	2.26	1.63	0.35	0.24	2.26	1.63	0.35	0.24	
534.5	5005	3.24	2.13	2.68	1.77	0.56	0.36	2.68	1.77	0.56	0.36	
665.8	5006	3.69	2.31	2.98	1.83	0.71	0.48	2.98	1.83	0.71	0.48	
785.4	5007	3.96	2.45	3.10	1.86	0.86	0.59	3.10	1.86	0.86	0.59	
935.9	5008	4.11	2.64	3.12	1.91	0.99	0.73	3.12	1.91	0.99	0.73	
1086.6	5009	4.16	2.84	3.08	1.94	1.08	0.90	3.08	1.94	1.08	0.90	
1223.4	5010	4.05	3.03	2.88	1.97	1.17	1.06	2.88	1.97	1.17	1.06	
1374.9	5011	3.82	3.19	2.61	1.95	1.21	1.24	2.61	1.95	1.21	1.24	
1500.1	5012	3.54	3.14	2.39	1.92	1.15	1.22	2.39	1.92	1.15	1.22	
1650.8	5013	3.03	2.85	2.13	1.86	0.90	0.99	2.13	1.86	0.90	0.99	
1788.5	5014	2.50	2.51	1.85	1.75	0.65	0.76	1.85	1.75	0.65	0.76	
1938.9	5015	1.93	2.07	1.52	1.53	0.41	0.54	1.52	1.53	0.41	0.54	
2076.8	5016	1.41	1.62	1.27	1.29	0.14	0.33	1.27	1.29	0.14	0.33	
2217.1	5017	0.99	1.09	1.15	1.14	-0.16	-0.05	1.15	1.14	-0.16	-0.05	
2337.4	5018	0.58	0.37	0.64	0.43	-0.06	-0.06	0.64	0.43	-0.06	-0.06	

Tab. 2 Tunel Ovčiarsko - jednosmerné pripojené a orientované meranie od ZP

Vzdialenosť	Označenie bodu	REÁLNE MERANIE		SIMULÁCIA			
		2. lineárny model		D-optimalita			
		s(X)	s(Y)	s(X)	s(Y)	2.LM - D-o	
[m]		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	s(X)	s(Y)
0.0	5001	0.70	0.70	0.85	0.79	-0.15	-0.09
119.3	5002	1.40	1.20	1.60	1.24	-0.20	-0.04
258.8	5003	2.60	1.90	2.64	1.79	-0.04	0.11
396.6	5004	3.90	2.50	3.81	2.24	0.09	0.26
534.5	5005	5.40	2.90	5.11	2.51	0.29	0.39
665.8	5006	7.00	3.20	6.45	2.57	0.55	0.63
785.4	5007	8.50	3.20	7.70	2.46	0.80	0.74
935.9	5008	10.50	3.40	9.36	2.40	1.14	1.00
1086.6	5009	12.70	3.70	11.10	2.45	1.60	1.25
1223.4	5010	14.70	4.10	12.72	2.64	1.98	1.46
1374.9	5011	17.00	4.70	14.53	3.02	2.47	1.68
1500.1	5012	18.90	5.40	16.00	3.53	2.90	1.87
1650.8	5013	21.10	6.60	17.71	4.39	3.39	2.21
1788.5	5014	23.00	8.10	19.19	5.45	3.81	2.65
1938.9	5015	24.90	10.00	20.70	6.89	4.20	3.11
2076.8	5016	26.60	12.00	21.94	8.48	4.66	3.52
2217.1	5017	28.10	14.30	23.02	10.39	5.08	3.91
2337.4	5018	29.10	16.50	23.72	12.19	5.38	4.31

Vzhľadom na to, že máme k dispozícii aj reálne meranie môžeme dosiahnuté stredné chyby overiť aj prostredníctvom súradnicových rozdielov na bodoch 5001 až 5018 porovnaním súradníc z obojstranne pripojeného a orientovaného PŤ a jednostranne pripojeného a orientovaného PŤ na ZP. Výsledky sú zobrazené v tabuľke 3.

Vidíme, že na bode 5018, vzdialenom 2337 m od posledného pripojeného bodu (5001) na body vytyčovacej siete pri ZP dosahujú súradnicové rozdiely v osi Y 91.8 mm a v osi X 36.4 mm. Keď tieto výsledky premietneme do osi tunela, tak zistíme, že reálna odchýlka v priečnom smere je v tomto bode 100 mm a v pozdĺžnom 2 mm. Podobný pomer dosiahneme na každom z bodov PŤ. (5017, 89 mm a 7 mm, atď).



Obr.4 Schéma meranej konfigurácie

Tab. 3 Tunel Ovčiarsko - porovnanie 3-sigmových stredných chýb zo súradnicovými rozdielmi

Vzdialenosť	REÁLNE MERANIE							SIMULÁCIA			
	Označenie bodu	2. lineárny model						D-optimalita			
		d(X)	d(Y)	3s(X)	3s(Y)	d(X)-3s(X)	d(Y)-3s(Y)	3s(X)	3s(Y)	d(X)-3s(X)	d(Y)-3s(Y)
[m]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
0.0	5001	2.4	-0.6	2.1	2.1	0.3	-2.7	2.6	2.4	0	-2.97
119.3	5002	4.6	-1.5	4.2	3.6	0.4	-5.1	4.8	3.7	-0.2	-5.2
258.8	5003	7.5	-1.8	7.8	5.7	-0.3	-7.5	7.9	5.4	-0.4	-7.2
396.6	5004	10.3	-2.2	11.7	7.5	-1.4	-9.7	11.4	6.7	-1.1	-8.9
534.5	5005	13.0	-2.5	16.2	8.7	-3.2	-11.2	15.3	7.5	-2.3	-10.0
665.8	5006	15.8	-2.5	21.0	9.6	-5.2	-12.1	19.4	7.7	-3.6	-10.2
785.4	5007	18.4	-1.8	25.5	9.6	-7.1	-11.4	23.1	7.4	-4.7	-9.2
935.9	5008	21.1	-0.6	31.5	10.2	-10.4	-10.8	28.1	7.2	-7.0	-7.8
1086.6	5009	24.0	1.4	38.1	11.1	-14.1	-9.7	33.3	7.4	-9.3	-5.9
1223.4	5010	27.2	4.3	44.1	12.3	-16.9	-8.0	38.2	7.9	-11.0	-3.6
1374.9	5011	31.2	8.4	51.0	14.1	-19.8	-5.7	43.6	9.1	-12.4	-0.7
1500.1	5012	36.1	12.2	56.7	16.2	-20.6	-4.0	48.0	10.6	-11.9	1.6
1650.8	5013	43.2	17.7	63.3	19.8	-20.1	-2.1	53.1	13.2	-9.9	4.5
1788.5	5014	51.2	22.6	69.0	24.3	-17.8	-1.7	57.6	16.4	-6.4	6.3
1938.9	5015	61.2	28.1	74.7	30.0	-13.5	-1.9	62.1	20.7	-0.9	7.4
2076.8	5016	71.5	32.0	79.8	36.0	-8.3	-4.0	65.8	25.4	5.7	6.6
2217.1	5017	83.3	34.3	84.3	42.9	-1.0	-8.6	69.1	31.2	14.2	3.1
2337.4	5018	91.8	36.4	87.3	49.5	4.5	-13.1	71.2	36.6	20.6	-0.2

5 ZÁVER

Na základe tabuľky 3. môžeme povedať, že nielen konvergenie majú vplyv na technologické nadvýšenie, ale aj dĺžka jednostranne pripojenej a orientovanej razenej časti tunela. Ak tento vplyv rastie nad 30 mm až 40 mm v priečnom smere (1400 m - 1600 m) začínajú sa objavovať problémy v podobe nadmernej profilácie primárneho ostenia. Pri vytváraní rezervy zo strany geodeta na priehradových nosníkoch, ktoré sú vyrobené podľa schválenej projektovej dokumentácie je možné vykonať nadvýšenie tiež len do 30 mm až 50 mm. Tým myslíme vytyčovať nosník vyššie a rozťahnuť oblúk. Podľa nášho názoru by sa do technologického nadvýšenia mala zahrnúť aj rezerva pre geodeta, ktorá by sa získala modelovaním distribúcie stredných chýb na základe konkrétnej situácie, alebo z tabuľky. Toto je však vec, ktorá ostáva na strane projektanta a je len na ňom, či to akceptuje alebo nie.

Je dôležité si uvedomiť, že naše geodetické meranie prebiehalo už v tuneli, kde bola takmer dokončená horná klenba sekundárneho ostenia a bol takmer bez prevádzky. Usmerňovacie merania prebiehajú pred prerazením a po a s istotou môžeme povedať, že v takom prostredí a s takou prevádzkou výsledky aké ukazuje tabuľka 3. nemožno dosiahnuť. Vždy budú aspoň o 20-30% horšie.

LITERATÚRA

- [1] DOKUMENTÁCIA PRE REALIZÁCIU STAVBY (DRS), SO 44.33.35 PÚCHOV-POVAŽSKÁ BYSTRICA, TUNEL MILOCHOV, TUNELOVÁ RÚRA – INŽINIERSKO-GEOLOGICKÝ POZDĹŽNY PROFIL (REMING CONSULT, a. s.).
- [2] DOKUMENTÁCIA PRE REALIZÁCIU STAVBY (DRS), SO 44.33.30 PÚCHOV-POVAŽSKÁ BYSTRICA, TUNEL DIEĽ, – GEOMETRIA PRIMÁRNEHO OSTENIA – VYSTROJOVACIA TRIEDA II (REMING CONSULT, a. s.).
- [3] Elaborát fy. GEO-KOD, s.r.o. Z_2017.029.000, Určenie súradníc a výšok novozriadených bodov základnej a podrobnej vytyčovacej siete tunela Ovčiarsko v severnej tunelovej rúre STR (Ing. J. Hajabács).

Lektoroval: Prof. Ing. Alojz Kopáčik, PhD.

Katedra geodézie, Stavebná fakulta STU v Bratislave