

NUMERICKÉ MODELOVÁNÍ TUNELU BRUSNICE

Ing. Jakub Nosek, Ing. Martin Srb

D2 Consult Prague s.r.o.

Doc. Ing. Matouš Hilar, PhD.

FSv ČVUT v Praze a D2 Consult Prague s.r.o.

Numerical modelling of the tunnel Brusnice

The tunnel Brusnice is a part of the Blanka tunnel complex. The paper is focused on numerical modelling of a mined section, which consists of two 3-lane tubes each about 550 m long. Tunnel face sequencing was discussed during the tunnel construction. A numerical modelling including back analyses was used as a part of the decision making process.

1. ÚVOD

1.1 Základní údaje

Tunel Brusnice je součástí tunelového komplexu Blanka, který bude po svém dokončení tvořit významný úsek severozápadní části městského okruhu Prahy. Budovaný tunelový komplex v délce přes 6 km tvořený dvěma jednosměrnými tunelovými troubami navazuje na stávající část okruhu v křižovatce Malovanka, kde ústí Strahovský tunel. Dál trasa pokračuje kolem stanice metra Hradčanská směrem k Letné, kde se stáčí pod park Stromovka. Po průchodu pod Vltavou trasa končí v úrovni mostu Barikádníků, kde se křižovatkou Pelc-Tyrolka napojuje na stávající komunikace.

Tunelový komplex Blanka je tvořen z části raženými tunely (cca 2,7 km) a z části hloubenými tunely (cca 3,3 km). Ražené tunely jsou budovány ve dvou částech. Jako první byla zahájena ražba 2,2 km dlouhého tunelu Špejchar - Pelc Tyrolka. Druhým raženým úsekem této stavby je tunel Brusnice. Ten spojuje dvěma cca 550 m dlouhými třípruhovými tunelovými troubami stavební jámy Myslbekova a Prašný most.

Obě tunelové trouby tunelu Brusnice byly raženy pomocí NRTM úpadně od portálu Myslbekova. Pouze část severní tunelové trouby (dále STT) byla po závalu pod zahradou ministerstva kultury ražena k místu havárie druhým směrem od portálu Prašný Most. Plocha výrubu jedné tunelové trouby je přibližně 170 m² a jejich nadloží se po většinu délky tunelu pohybuje kolem 25 m. Šířka horninového pilíře mezi troubami je cca 17 m.

Stavbu realizuje společnost Metrostav podle dokumentace projekční kanceláře Satra. Investorem je Hlavní město Praha.

1.2 Geologické poměry

Výsledky geotechnického průzkumu potvrdily, že geologické poměry na trase jsou poměrně složité a proměnlivé.

Z hornin skalního podloží se v zájmovém území vyskytuje souvrství letenské strukturně charakterizované jako písčité drobové břidlice s písčitymi závalky. Břidlice jsou jemně až hrubě slídnaté a tlustě deskovitě vrstevnaté. Často se vyskytují polohy pevných jemnozrných

křemenců o mocnosti 6 - 20 cm. Podle stupně tektonického narušení zde převládá středně až značně rozpukaná hornina. Jednotlivé stupně zvětvávání jsou označeny W5 - Rozložená břidlice, kterou tvoří vlastně soudržná zemina charakteru jílu s proměnlivým obsahem příměsí střípků břidlic, až W1 - Zdravá břidlice, kterou tvoří nezvětralé tlustě deskovitě vrstevnaté břidlice.

K pokryvným útvarům zájmového území patří antropogenní (AN), eolické (EO), deluviální (DE) a fluviální (FL) sedimenty.

Hranice horninového nadloží se po většinu délky tunelu pohybuje od 12 do 19 m. Přibližně za staničením 450 TM od portálu Myslbekova horninové nadloží výrazně klesá na hodnotu kolem 5 m.

Profil tunelu po většinu délky prochází vrstvami zdravých až navětralých břidlic (W1-W2). V blízkosti portálu Prašný Most klesá do profilu také vrstva zvětralé břidlice (W3-W4). V této oblasti jsou v STT podmínky pro ražbu výrazně obtížnější, kdy klesá do profilu i vrstva rozložené břidlice (W5).

2. PRŮBĚH VÝSTAVBY

Původně byla ražba obou tunelových trub navržena v celé délce s vertikálním členěním. V průběhu upřesňování projektu směrem ke konečné RDS došlo ke snížení nivelety celého tunelu, a tím k jeho posunutí do kvalitnějšího horninového prostředí. Následně byla dokumentace doplněna o možnost horizontálního členění.

Ražba byla zahájena v říjnu 2009 otevřením kaloty STT z portálu Myslbekova s aplikací horizontálního členění. V lednu 2010 byla zahájena také ražba JTT ve stejném směru. Zde bylo použito vertikální členění na levou a pravou opěrovou štolu s následným dobíráním středového pilíře. Tyto dílčí výruby byly ještě horizontálně členěny. Po průchodu prvních 50-ti metrů bylo členění čelby změněno na horizontální shodně s STT.

Za probíhajících diskusí, zda je ještě možno pokračovat dál v ražbě s horizontálním členěním, došla ražba STT bez komplikací do st. 396 TM, kde bylo v důsledku zhoršující se geologie rozhodnuto o přechodu k vertikálnímu členění. Dne 6.7.2010 došlo k prolomení nadloží v úseku mezi staničeními 403 a 435 TM při dobírání jádra a bourání vnitřních stěn opěrových štol. Následně byly práce na obou tunelových troukách na několik měsíců zastaveny (JTT ve st. 374 TM). Zároveň s prováděním sanačních prací byla ražba STT dokončena z portálu Prašný Most pomocí vertikálního členění čelby. Poslední razicí práce byly ukončeny doražbou JTT s využitím horizontálního členění s vertikálně dělenou kalotou v srpnu 2011.

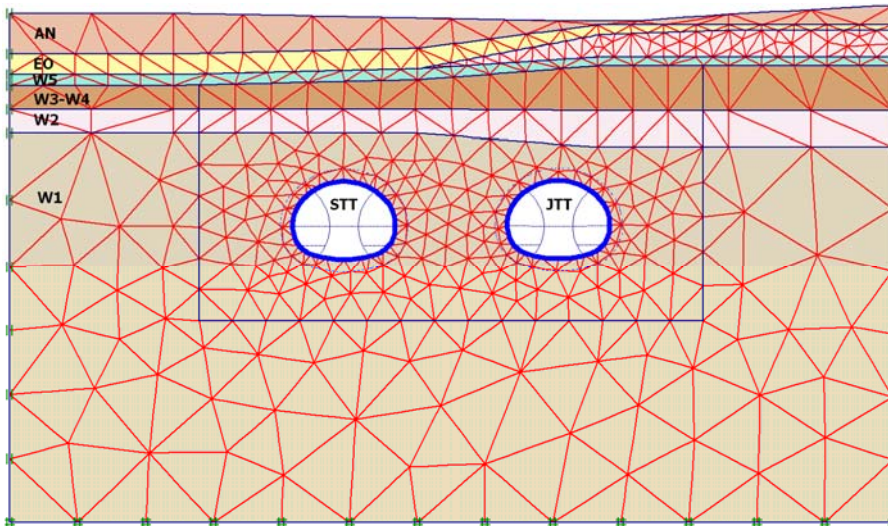
3. NUMERICKÉ MODELY

Vzhledem k faktu, že ražba od portálu Myslbekova k portálu Prašný Most směřovala do horších geotechnických podmínek, byl v jejím průběhu mnohokrát zvažován způsob členění čelby pro následující metry. Série numerických modelů ražby prováděných firmou D2 Consult sloužila jako jeden z podkladů pro tato jednání.

Všechny modely byly tvořeny v programu Plaxis V8. Síť konečných prvků byla tvořena 15-ti uzlovými trojúhelníky a chování zeminy bylo popsáno Mohr-Coulombovým elastoplastickým modelem. Pro prutové prvky reprezentující primární ostění tunelu byl použit elastický model.

3.1 Analýza ve staničení 220 TM

Ve vzdálenosti 220 m od portálu Myslbekova byl vytvořen model (viz obr.1) reprezentující předpokládané geologické prostředí a budoucí primární vystrojení tunelů. Nadloží nad tunelovými troubami bylo 25 m (STT) a 26 m (JTT). V řešené oblasti se čekávalo použití 3. technologické třídy, čemuž odpovídala síla ostění 30 cm. Výrub jedné tunelové trouby je široký 16,5 m a vysoký 12,7 m s celkovou plochou 169 m².



Obr.1) Model ražby ve staničení 220 TM

Tento model byl tvořen ještě před zahájením ražby v době, kdy bylo v platné RDS navrženo vertikální členění výrubu v celé délce obou tunelových trub. Z toho důvodu byly pro porovnání modelovány obě zvažované varianty členění.

Při výpočtu s **horizontálním členěním** byla nejprve modelována ražba kaloty STT a následně zároveň ražba lavice a dna STT. Tím byl simulován předpoklad co nejrychlejšího uzavírání celého profilu tunelového ostění. Shodně následovala simulace ražby JTT. Všechny zmíněné fáze byly ještě děleny na fázi nevystrojeného výrubu zatíženého 30 % nevyrovnaných sil a na fázi instalovaného ostění s plným zatížením.

Při výpočtu s **vertikálním členěním** byly opět modelovány nejprve níže zmíněné fáze ražby STT a následně stejné fáze pro JTT.

1. Kalota 1. postranní štoly
2. Dobírka 1. postranní štoly
3. Kalota 2. postranní štoly
4. Dobírka 2. postranní štoly
5. Střední kalota
6. Jádru a dno

Každá z fází byla opět ještě rozdělena na fázi nevystrojeného výrubu zatíženého 30 % nevyrovnaných sil a na fázi instalovaného ostění s plným zatížením.

Ražba tímto řezem nakonec prošla s využitím horizontálního členění, avšak vzhledem k dosavadním příznivým výsledkům monitoringu nebyl dán požadavek na rychlé uzavírání profilu. Z toho důvodu byl pro účely tohoto článku proveden ještě jeden výpočet horizontálního členění z rozdělením fází ražby lavice a dna. Ten je uveden v tabulce výsledků pod názvem "Realizované horizontální členění".

Použité geotechnické parametry vrstev horninového masivu uvádí tab.1.

Tab.1) Geotechnické parametry v řezu 220 TM

Jméno vrstvy	Hloubka [m]	γ [kN/m ³]	E [MPa]	c [kPa]	φ [°]	ν [-]	K_0 [-]
AN	0 - 4	20,0	11	10	19,6	0,399	0,66
EO	4 - 7	19,5	10	20	17,9	0,409	0,69
DE	4 - 7	19,5	20	8	23	0,379	0,61
W5	7 - 9	21,0	30	12	24,8	0,367	0,58
W4-W3	9 - 14	22,5	90	20	24,8	0,31	0,58
W2	14 - 18	24,5	220	40	26,6	0,25	0,55
W1b	18 - 80	26,3	500	140	32,9	0,23	0,46

Výsledky numerického modelování ukázaly jen malý rozdíl v konečných deformacích výrubu i povrchu, a to v řádu několika milimetrů, při porovnávání vertikálního členění s horizontálním členěním čelby při rychlém uzavírání profilu primárního ostění.

Dodatečně provedeným modelem skutečně realizovaného horizontálního členění se podařilo prokázat věrohodnost výpočtů v tomto řezu. Vypočtené a naměřené hodnoty se liší jen minimálně (viz. tab. 2).

Tab.2) Porovnání výsledků numerických výpočtů a monitoringu

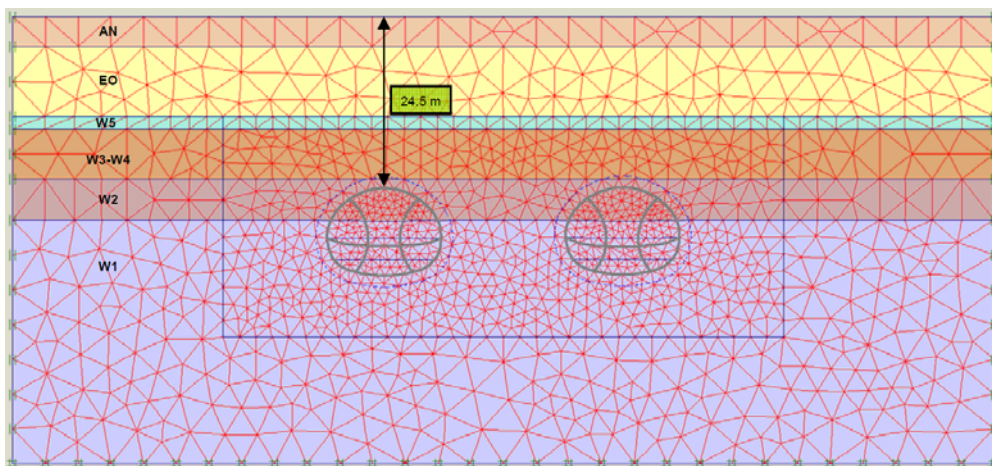
	Vertikální členění	Horizontální členění	Realizované horizontální členění	Výsledky měření	
Max. vertikální deformace	24	27	38	39	[mm]
Max. horizontální deformace	7	4	6	-	[mm]
Max. ohybový moment	87	55	68	-	[kNm]
Max. osová síla	2270	1280	1420	-	[kN]
Max. sedání na povrchu	13	15	26	33	[mm]

3.2 Analýza ve staničení 361 TM

Další provedená analýza se týkala řezu ve staničení 361 TM. Byla provedena v květnu 2010 v době, kdy ražba kaloty a lavice STT již tímto řezem prošla a zastavila se ve staničení 394 TM. V kalotě JTT bylo v té době vyraženo cca 220 m. Účelem těchto výpočtů byl co nejpřesnější odhad chování horninového masivu při průchodu ražby JTT včetně dokončení dna STT. Znovu byl pro JTT zvažován horizontální nebo vertikální způsob členění čelby.

Ve vzdálenosti 361 m od portálu Myslbekova byl vytvořen model (viz. obr. 2) reprezentující předpokládané geologické prostředí a budoucí primární vystrojení tunelů. Nadloží nad tunelovými troubami je 24 m. Povrch i geologické vrstvy jsou ve skutečnosti jen velmi mírně ukloněné, proto bylo možno model zjednodušit na horizontální. V řešené oblasti se očekávalo použití technologické třídy 5a, čemuž odpovídala síla ostění 40 cm. Výrub jedné tunelové trouby je široký 16,5 m a vysoký 12,7 m s celkovou plochou 174 m².

Pro úvodní výpočet ražby STT byly jednotlivým vrstvám přiřazeny charakteristické hodnoty jejich geotechnických parametrů (viz. tab. 3)



Obr.2) Model ražby ve staničení 361 TM

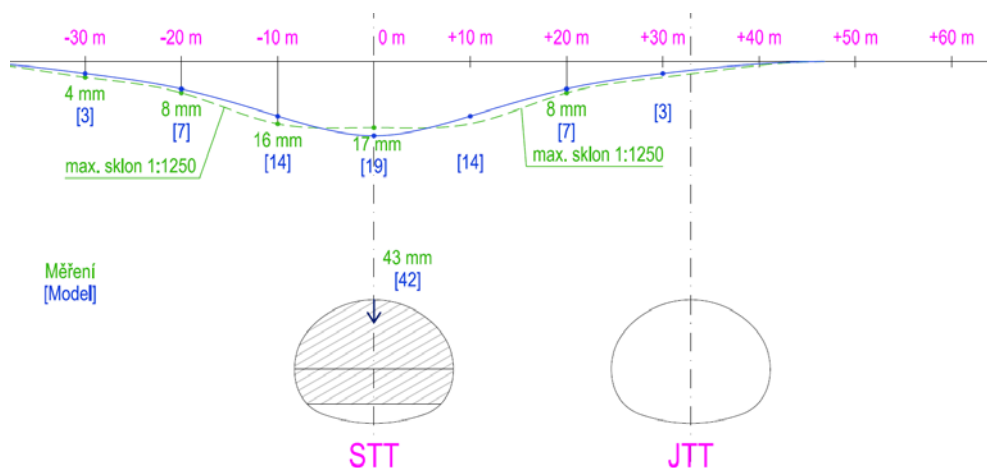
Tab.3) Geotechnické parametry v řezu 361 TM

Jméno vrstvy	Hloubka [m]	γ [kN/m ³]	E [MPa]	c [kPa]	φ [°]	ν [-]	K_0 [-]
AN	0-5	20,0	11,0	13	24	0,37	0,59
EO	5-14	19,5	10,0	25	22	0,39	0,63
W5	14-16	21,0	30	15	30	0,33	0,50
W3-W4	16-23	22,5	90	25	30	0,31	0,50
W2	23-29	24,5	220	50	32	0,25	0,47
W1a	29-65	25,8	300	125	37	0,25	0,40

Úvodní výpočet byl proveden v pěti fázích (v závorce vždy uvedené přisouzené zatížení):

1. Výrub kaloty STT (30%)
2. Instalace ostění kaloty STT (50%)
3. Instalace ostění dna kaloty STT (100%)
4. Výrub lavice STT (20%)
5. Instalace ostění lavice STT (100%)

Po provedení výpočtů pro fáze ražby kaloty a opěří STT byla analyzována aktuální data z příslušných měřících bodů na povrchu, na ostění a hlavně z blízkého extenzometru. Podle těch byly stanoveny maximální pokles na povrchu na 17 mm a max. pokles v koruně výrubu na 43 mm.



Obr.3) Porovnání naměřeného sedání povrchu s výsledky odladěného modelu

Poklesy podle modelu s původními parametry se pohybovaly mezi 140% a 170% naměřených hodnot. Na základě toho byl odladěn numerický model zvýšením deformačního modulu všech vrstev na 160 % původních hodnot, přičemž byla dosažena dobrá shoda výsledků s měřením (viz obr. 3).

S takto nastaveným modelem se pokračovalo simulací doražby dna STT a horizontální nebo vertikální ražby JTT. V případě horizontálního členění byl proveden výpočet v těchto fázích:

6. Výrub a instalace ostění dna STT (100%)
7. Výrub kaloty JTT (30%)
8. Instalace ostění kaloty JTT (50%)
9. Instalace ostění dna kaloty JTT (100%)
10. Výrub lavice JTT (20%)
11. Instalace ostění lavice JTT (100%)
12. Výrub a instalace ostění dna JTT (100%)

V případě vertikálního členění pokračoval výpočet fází 6. "Výrub a instalace ostění dna STT (100%)" a dále ražbou JTT shodně jako v případě vertikálního členění v řezu v 220 TM (viz výše).

Ve skutečnosti bylo v tomto řezu aplikováno klasické horizontální členění odpovídající modelovaným fázím. Výsledky výpočtů jsou shrnuty společně se skutečně naměřenými hodnotami v tab. 4.

Tab.4) Porovnání výsledků numerických modelů a monitoringu

Pokles v ose JTT	Horizontální členění	Vertikální členění	Výsledky měření
ostění	42	31	49 [mm]
povrch	21	15	22 [mm]

Výsledky modelování opět potvrdily předpoklad, že horizontální členění je v řešeném úseku tunelu proveditelné a že se sedání povrchu ve srovnání s vertikálním členěním zvýší jen v řádu 5 mm. Zmíněný nárůst sedání neznamenal žádné ohrožení pro objekty na povrchu, a proto bylo vzhledem k ekonomické i časové výhodnosti horizontální členění použito.

4. ZÁVĚR

Provedené numerické modelování kvantifikovalo vliv způsobu členění čelby na výsledné deformace horninového masivu. Použití horizontálního členění na řešených úsecích se ukázalo jako vhodné a deformace korespondovaly s vypočtenými hodnotami. Ražba tunelu Brusnice byla úspěšně dokončena včetně zmáhání oblasti havárie.

Tento příspěvek byl zpracován s podporou grantů TAČR TA01031840 a SGS11/034/OHK1/1T/11.

Titul, jméno, příjmení autora:	Ing. Jakub Nosek
Adresa firmy – pracoviště:	D2 Consult Prague, Zelený pruh 95/97, Praha 4
Telefon: 773 602 373	E-mail: nosek@d2-consult.cz