

NUMERICKÝ MODEL PRŮZKUMNÉ ŠTOLY A TUNELŮ LAHOVSKÁ

Běhal, O. a Mašín, D.

Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta, Oddělení inženýrské geologie, Albertov 6,
128 43 Praha 2, fax: 221951556, behy@centrum.cz, masin@natur.cuni.cz

1. ÚVOD

Součástí stavby č. 514, jež je JJZ součástí Silničního okruhu kolem Prahy (tzv. vnějšího nebo Pražského okruhu), je téměř 1660 metrů dlouhý dvoutubusový tunel Lahovská (zván též Marie a Lochkov). Každý tubus se skládá ze dvou hloubených úseků při portálech a středního raženého úseku. Ražené úseky jsou realizovány Novou rakouskou tunelovací metodou v horizontálním členění výrubu na kalotu, jádro (opěří) a případně u portálů i protiklenbu (invert). Tubus směr Slivenec je tříproudový (3PT) o šířce 16,4 m a výšce 10,0 m. Ve střední ose jeho kaloty byla v předstihu před ražbou tunelu vyražena průzkumná štola neobvyklého soudečkovitého tvaru (Obr. 1). Levý klesací tubus je dvoupruhový (2PT), při šířce 13,35 m a výšce 8,70 m.



Obrázek 1: Průzkumná štola a výhybna č. 8. ve staničení 12,906 km.

Účelem předkládaného článku je stručný popis geologie a monitoringu prováděného ve staničení hlavní trasy 12,906 km. Na základě těchto údajů byl sestaven 2D numerický model vystihující postup ražby v tomto profilu. Výsledky numerického modelování demonstrují některé aspekty, které je při modelování tunelů ražených ve skalních horninách nutno zohledňovat.

2. GEOLOGICKÉ POMĚRY

Tunely Lahovská prochází staropaleozoickými horninami svrchního ordoviku a spodního i svrchního siluru Barrandienu. Toto území leží v jihovýchodním křídle Pražské pánve, vrstvy tedy mají generelní sklon k severozápadu. V studovaném profilu následují pod deluviálními sedimenty horniny předkvartérního podkladu. Jedná se o jílovité vápnité břidlice s vložkami mikritických vápenců Kopaninského souvrství (silur). S hloubkou se značně mění stupeň zvětrání, od zcela zvětralých hornin W5 při povrchu, po zdravé horniny W1, jež vystupují ve spodních částech tunelových výrubů. Geologický profil je schématicky znázorněn na obrázku 2.

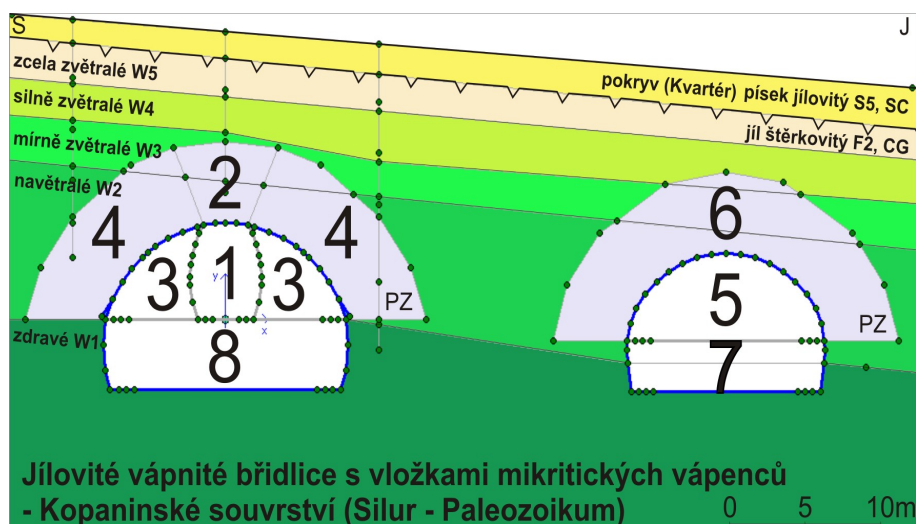
3. GEOTECHNICKÝ MONITORING VE STANIČENÍ 12,906 KM

Monitoring v tomto úseku lze rozdělit do dvou etap. První etapu představuje monitoring ražby průzkumné štoly. Ten sestává z nivelačního profilu a dále třech jádrových vrtů pro geologický popis, presiometrické zkoušky a extenzometrická měření. Další součástí monitoringu byl profil pro konvergenční měření pomocí pěti bodů upevněných do primárního ostění na stropu a stěnách štoly, posléze přestrojených do boků kaloty 3PT. Druhá etapa monitoringu byla spojena již s ražbou 2PT a jádra 3PT. Nivelační profil na terénu nemohl být z technických důvodů rozšířen nad 2PT. Proto byl v tomto staničení v 2PT osazen jen profil pro konvergenční měření a v 3PT byl doplněn konvergenční profil o další dva body na bocích jádra.

4. NUMERICKÝ MODEL V PŘÍČNÉM SDRUŽENÉM GEOTECHNICKÉM PROFILU VE STANIČENÍ HLAVNÍ TRASY 12,906 KM

Pro numerické modelování byl využit MKP software Plaxis version 8. Výpočet proběhl ve 2D. Třírozměrné efekty byly do výpočtu včleněny pomocí tzv. β -metody (např. Karakus, 2007). Deformace v řešeném profilu probíhající předtím, než čelo výrubu dosáhne profilu (tedy předtím, než je aplikováno primární ostění) jsou v β -metodě simulovány postupnou redukcí uzlových sil podél výrubu. Při redukci odpovídající faktoru $(1-\beta)$ je generováno primární ostění, následná redukce uzlových sil až na nulovou hodnotu již tedy probíhá s podporou primárního ostění.

Detail geometrie úlohy je zobrazen na obr. 2. Pro realistické zohlednění postupu ražby byl numerický výpočet rozdělen do celkem osmi fází, jejich sekvence je též znázorněna na obr. 2. Uvažovalo se i zlepšení masivu nad tunely způsobené radiálními kotvami instalovanými z kaloty výrubu (viz též obr. 2).



Obrázek 2: Detail geometrie řešené úlohy s číselným označení jednotlivých výpočtových fází a uvažovanou geologií

Chování horninového masivu bylo ve výpočtech popsáno Mohr-Coulombovým konstitučním modelem. Hodnoty parametrů modelu jsou shrnuty v Tabulce 1. Parametry byly získány v průběhu geologického průzkumu na základě laboratorních a presiometrických zkoušek a odpovídají směrným normovým charakteristikám. Zlepšení masivu nad kalotou výrubu prokotvením se modelovalo pomocí zjednodušeného postupu, který uvažuje zvýšení soudržnosti horniny (Barták et al., 1992):

$$c = \frac{1 + \sin \varphi}{2 \cos \varphi} F_{red} \quad F_{red} = \frac{F_{kotev}}{ab} \quad (1)$$

kde ab značí plochu ostění odpovídající působení jedné kotvy.

Ostění bylo modelováno jako lineárně elastický materiál. Šířka ostění se uvažovala tak, aby odpovídala reálně aplikované mocnosti, tj. 30 cm pro ostění průzkumné štoly i pro ostění tunelu. Parametry ostění jsou v Tabulce 2.

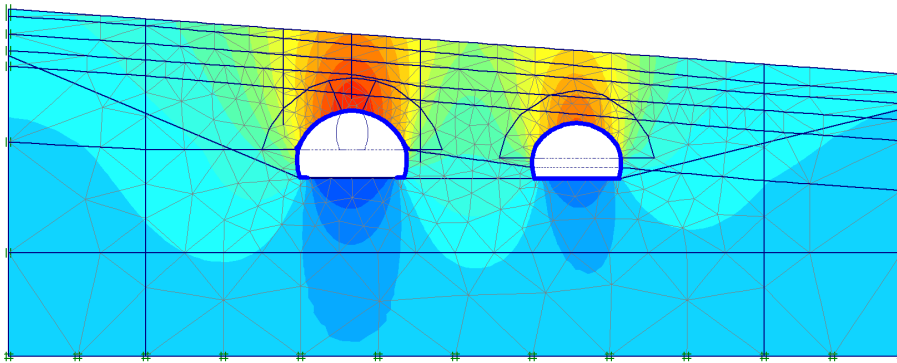
Tabulka 1: Materiálové parametry Mohr-Coulombova konstitučního modelu pro jednotlivé vrstvy (viz Obr. 2). „prok. z.“ značí soudržnost pro výpočet prokotvené zóny dle rovnice (1).

hornina	γ [kN/m ³]	E [MN/m ²]	ν [-]	c [kN/m ²]	φ [°]	ψ [°]	c [kN/m ²] prok. z. 3PT	c [kN/m ²] prok. z. 2PT	c [kN/m ²] prok. z. štola
pokryv	21,00	25	0,38	25,00	24,0	0	-	-	-
W5	22,00	25	0,41	22,50	21,0	0	-	-	-
W4	23,00	45	0,39	22,50	23,5	0	77,59	33,94	59,58
W3	24,25	80	0,37	27,50	26,5	0	82,42	35,96	63,13
W2	25,50	150	0,35	32,50	29,0	0	86,58	40,14	66,32
W1	26,00	330	0,32	45,00	31,0	0	-	-	-

Tabulka 2: Materiálové parametry ostění

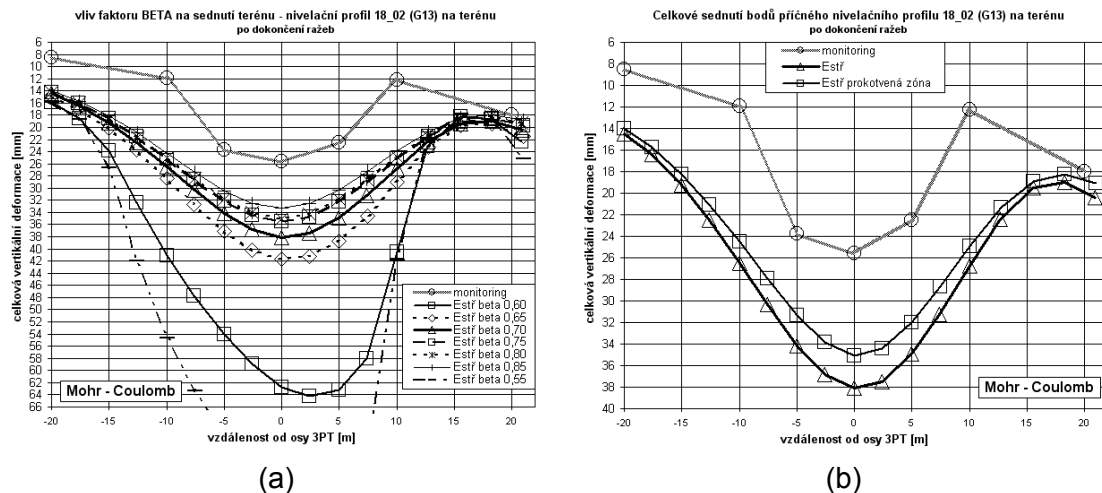
ostění	EA [kN/m]	EI [kNm ² /m]	d [m]	w [kN/m/m]	v [-]
štola i tunel	4500000	33750	0,30	7,5	0,2

Ve výpočtu se uvažoval vliv ražby tunelu na hladinu podzemní vody. Na počátku výpočtu byla hladina situována přibližně 6,5 m pod povrchem terénu, v průběhu odtěžování byla drenážní funkce tunelu zohledněna zaklesnutím hladiny do úrovně počvy tunelu a vytvořením depresního kužele (viz obr. 3). Vertikální napětí odpovídá objemové hmotnosti z Tab. 1, hodnota K_0 je počítána z Jákyho rovnice $K_0=1-\sin \varphi$. Obr. 3 dále znázorňuje použitou MKP síť, sestávající z 1043 15-uzlových trojúhelníkových elementů a kvalitativní znázornění výsledků výpočtu ve formě konturového diagramu vertikálních deformací.



Obrázek 3: Použitá MKP síť a kvalitativní znázornění vertikálních deformací v okolí výrubů

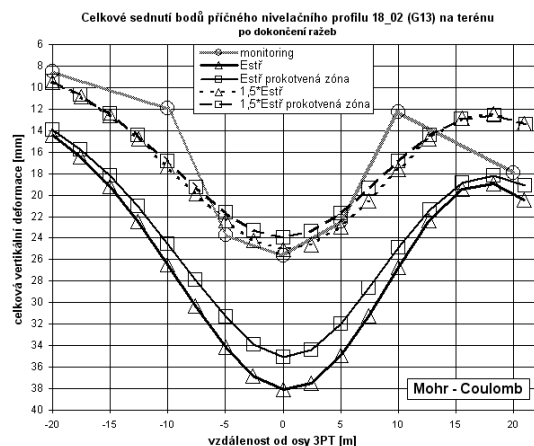
V prezentovaném příspěvku je kladem důraz na studium vlivu faktorů, které mohou výrazně ovlivňovat vypočtené deformace, a jejichž hodnoty jsou přitom nejisté a často jsou stanovovány pouze na základě zkušeností. Prvním takovým faktorem je faktor β zohledňující vliv 3D efektů. Jeho rigorózní stanovení je možné pouze na základě porovnání 2D výpočtů s plnou 3D simulací postupu ražby. Vliv faktoru β na poklesovou kotlinu po dokončení ražeb obou tubusů je zobrazen na obrázku 4a. Je zřejmé, že β ovlivňuje vypočtené výsledky v případě nízkých hodnot (0,55 a 0,6), kdy dochází k výraznému zplastizování hornin v okolí výrubu a *de facto* ke stavu blízkému kolapsu tunelu. Pro vyšší hodnoty ($\beta \geq 0,6$) má β méně významný efekt. Pro další výpočty byla uvažována hodnota $\beta = 0,7$. Studie na Obr. 4a zaručuje, že získané výsledky nejsou výrazně ovlivněny hodnotou tohoto empirického parametru.



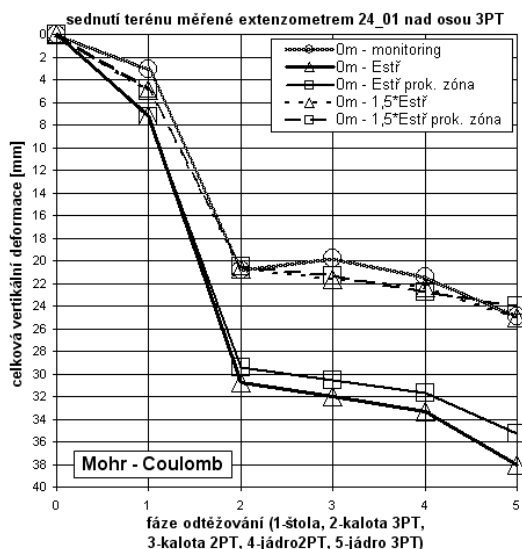
Obrázek 4: (a) vliv faktoru β na poklesovou kotlinu po dokončení ražeb. (b) vliv simulace prokotvené zóny na poklesovou kotlinu.

Dalším empirickým faktorem vstupujícím do výpočtu je využití zjednodušeného postupu z rovnice (1) pro vyjádření vlivu zlepšení horninového masivu. Obrázek 4b zobrazuje výpočty se zahrnutím vlivu prokotvené zóny, porovnané s vypočtenými deformacemi pro případ bez ní. Je zřejmé, že prokotvená zóna snižuje deformace povrchu, ale v daném případě, kdy je stav daleko od kolapsu, není vliv prokotvené zóny zásadní. V obou případech ovšem numerický model předpovídá o přibližně 40% vyšší deformace terénu, než jaké odpovídají naměřeným hodnotám.

Posledním studovaným parametrem, jehož hodnoty jsou obtížně stanovitelné na základě měření, je Youngův modul E . Problematičnost stanovení tohoto parametru v případě jednoduchého Mohr-Coulombova konstitučního modelu tkví v tom, že skutečné chování horniny je nelineární a tuhost E je závislá na úrovni přetvoření. Protože Mohr-Coulombův model nevystihuje pokles modulu E s přetvořením, musí jeho velikost odpovídat velikosti přetvoření, jež lze předpokládat v okolí budoucího výrubu. Je zřejmé, že tento způsob stanovení E je problematický. Z výše zmiňovaných důvodů byl výpočet zopakován s novou sadou materiálových parametrů, v níž byly hodnoty parametru E z Tab. 1 násobeny faktorem 1,5. Vypočtený průběh poklesové kotliny je zobrazen v obr. 5a, průběh deformací nad osou 3PT tunelu během jednotlivých fází ražby je v obr. 5b. Je zřejmé, že Youngův modul má významný vliv na vypočtené deformace a využití hodnot E navýšených faktorem 1,5 vede k relativně přesným předpovědím deformací terénu. Z předešlého lze vyvodit, že hodnoty tohoto parametru by měly být při predikcích chování nově navrhovaných tunelů voleny s ohledem na předchozí zkušenosti s ražbou tunelů srovnatelných parametrů v obdobných geologických podmínkách. Kalibrace parametru E na základě polních měření či normových hodnot je pro predikci chování tunelu ve skalních horninách nejistá.



(a)



(b)

Obrázek 5: Vliv velikosti Youngova modulu E na deformace terénu; (a) poklesová kotlina, (b) průběh deformací s fázemi odtěžování.

5. ZÁVĚR

V článku byl stručně popsána geologie a geotechnický monitoring prováděný ve staničení 12,906 km tunelu Lahovská. Na základě dat z monitoringu byl sestaven numerický model chování tunelu a byly studovány různé faktory ovlivňující výpočet. Ukázalo se, že pro daný případ kdy dochází pouze k malým plastickým deformacím v okolí výrubu, mají nevýznamný vliv na výsledky výpočtu parametry β (zohledňující 3D efekty) a modelování prokotvené zóny nad výrubem. Na druhou stranu jsou výsledky značně ovlivněny zvolenou hodnotou Youngova modulu E . Ten by měl být v případě modelování tunelů ve skalních horninách pomocí Mohr-Coulombova modelu stanovován se zohledněním zkušenosti a zpětné analýzy předchozích konstrukcí v obdobných geotechnických podmínkách.

PODĚKOVÁNÍ

Autoři děkují grantům GAČR 205/08/0732, GAUK 134907 a MŠM 0021620855 za finanční podporu výzkumu.

LITERATURA

Barták, J., Bucek, M. a Zapletal, A. (1992) Směrnice pro navrhování ostění tunelů budovaných NRTM, Praha.

Karakus, M. (2007). Appraising the methods accounting for 3D tunnelling effects in 2D plane strain FE analysis. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 22, 47–56.