

# Statické výpočty tunelu SMART pomocí programu FLAC

Matouš Hilar, D2 Consult Prague s. r. o.

Při návrhu tunelu SMART bylo nutné zvolit vhodnou metodu pro realizaci ražeb. Vzhledem k nejasné poloze skalního podloží bylo nutné posoudit chování podzemní stavby v zeminách i skalních horninách. Následující příspěvek přináší informace o výpočtech, které vedly k volbě metody ražby.

An appropriate excavation method had to be elected for the SMART tunnel excavation. Tunnel behaviour in soft ground and hard rock had to be evaluated due to uncertain bedrock location. The following paper brings information about numerical calculations of the tunnel.

## 1. Úvod

Tunel SMART v Kuala Lumpur v Malajsií patří mezi největší a technicky nejnáročnější podzemní stavby současnosti. Jak vyplývá z anglického názvu (SMART = Stormwater Management And Road Tunnel), tento tunel délky 9,7 km bude sloužit jak pro automobilovou dopravu, tak pro odvedení přívalové srážkové vody při hrozících povodních.

Následující článek popisuje statické výpočty, které byly provedeny autorem článku metodou konečných diferencí (MKD) v programu FLAC. Výpočty byly provedeny jak pro alternativu ražby pomocí Nové rakouské tunelovací metody (NRTM), tak pro ražbu pomocí tunelovacího stroje (TBM). V průběhu přípravy bylo následně rozhodnuto realizovat většinu tunelu pomocí TBM.

## 2. Inženýrsko-geologické poměry

Geologie oblasti je tvořena vápenci, nad kterými je vrstva velmi měkkých aluviálních sedimentů. Vápence jsou náchylné k tvorbě krasových jevů. Poloha rozhraní skalního podloží a kvartérních sedimentů byla značně proměnná, v některých místech byly poklesy tohoto rozhraní několik desítek metrů. Vzhledem k poměrně nízkému nadloží tunelu bylo očekáváno, že tunel sice bude ražen převážně ve vápencích, nicméně díky zmíněným depresím aluvia nelze vyloučit ražbu celého profilu tunelu v zeminách. Vstupní hodnoty pro výpočty byly odvozeny z dostupných výsledků geotechnického průzkumu. Poloha jednotlivých jádrových vrtů v části podélného řezu tunelu je znázorněna na obr. 1. Pomocí piezometrů byla stanovena úroveň hladiny spodní vody mezi 0,8 a 2,8 m pod úrovní terénu.

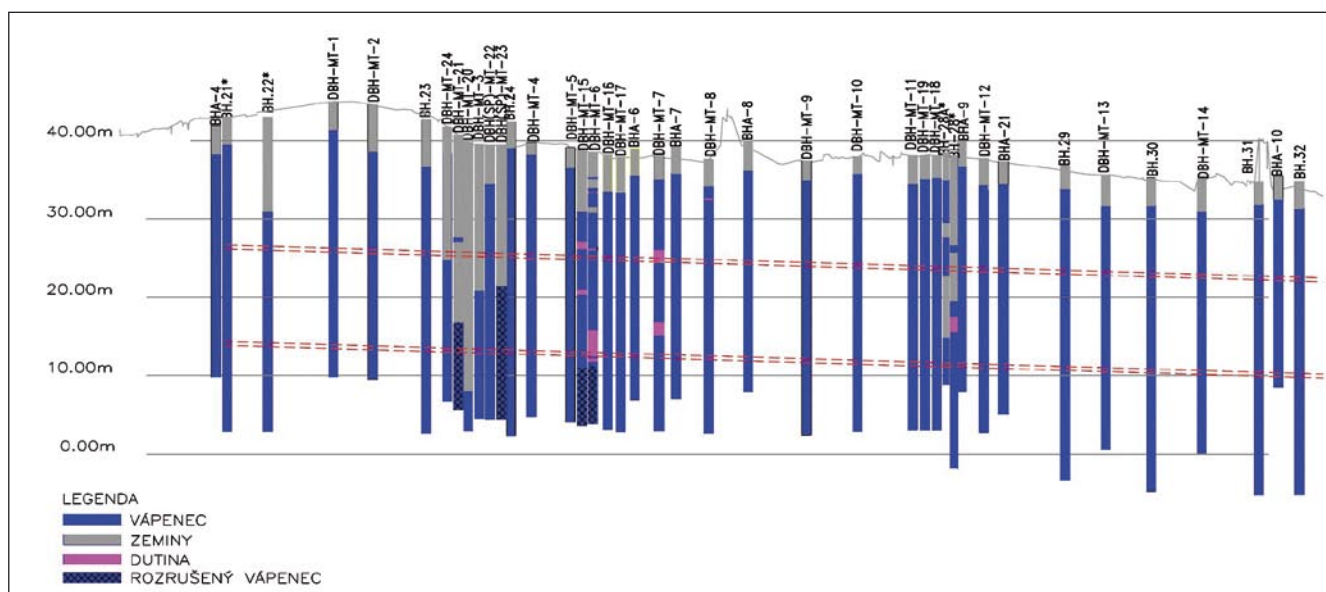
## 3. Vstupní parametry pro výpočty

### 3.1 Zeminy (aluviální sedimenty)

Aluviální sedimenty byly modelovány pomocí Mohr-Coulombova modelu. Na základě dostupných výsledků geotechnického průzkumu byly stanoveny vstupní parametry aluviálních sedimentů (tab. 1).

$\gamma_d$	Objemová hmotnost	1300 kg/m <sup>3</sup>
E'	Efektivní modul pružnosti	3 MPa
$\nu'$	Efektivní Poissonovo číslo	0,2
G	Smykový modul – $E / (2 + 2\nu)$	1,25 MPa
K	Objemový modul – $E / (3 - 6\nu)$	1,67 MPa
$\phi'$	Efektivní úhel vnitřního tření	24°
$c'$	Efektivní soudržnost	0 kPa
n	Pórovitost	0,5
k	Propustnost	$6,1 \times 10^{-6}$ m/s
$K_o$	Koeficient bočního tlaku v klidu	0.6

Tab. 1 Tabulka efektivních parametrů aluviálních sedimentů  
Tab. 1 Effective parameters of alluvial sediments



Obr.1 Výsledky vrtného průzkumu části trasy tunelu

Fig. 1 Results of test boreholes on the part of the tunnel route

Vzhledem k očekávané nutnosti zlepšovat zeminu v oblasti větších poklesů skalního podloží byly také stanoveny parametry zeminy po zlepšení pomocí injektáže (tab. 2).

$\sigma_c$	Pevnost v tlaku	1 MPa
$c_u$	Smyková pevnost ( $\sigma_c/2$ )	0,5 MPa
$\phi_u$	Úhel vnitřního tření	0°
$E_u$	Deformační modul (1000 x $c_u$ )	500 MPa
$\gamma$	Objemová hmotnost	2 000 kg/m <sup>3</sup>
$\nu$	Poissonovo číslo	0,2
G	Smykový modul – $E / (2 + 2\nu)$	208 MPa
K	Objemový modul – $E / (3 - 6\nu)$	278 MPa
n	Pórovitost	0,1
k	Propustnost	$1 \times 10^{-7}$ m/s

Tab. 2 Tabulka totálních parametrů aluviálních sedimentů po zlepšení pomocí injektáže

Tab. 2 Total parameters of alluvial sediments after a ground treatment

### 3.2 Horniny (vápenec)

Z laboratorních zkoušek byly určeny průměrné hodnoty neporušených vzorků horniny (tab. 3).

$\gamma$	Objemová hmotnost	2 700 kg/m <sup>3</sup>
$\sigma_c$	Pevnost v jednoosém tlaku	56 MPa
$\nu$	Poissonovo číslo	0,27
E	Modul pružnosti	61 GPa

Tab. 3 Tabulka parametrů vzorků neporušené horniny

Tab. 3 Intact rock samples parameters

Horninový masiv byl zaříděn pomocí klasifikace podle indexu Q (Rock Mass Quality Rating). Byly stanoveny očekávané průměrné hodnoty (nejlepší odhad) a nejhorší hodnoty (nejhorší uvěřitelný odhad). Index Q' předpokládá hodnoty SRF a  $J_w$  rovný 1. Průměrná hodnota indexu Q' byla 16 (s rozsahem od 9 do 35) a nejhorší možná hodnota byla 8 (s rozsahem od 1,4 do 23). Hodnoty Q' je nutné přepočítat na hodnotu Q v závislosti na hodnotách SRF a  $J_w$ . Hodnota  $J_w$  byla odhadnuta 0,66, což indikuje střední vodní tlak. Hodnota SRF byla odhadnuta 2,5, což indikuje nízký tlak blízko povrchu. Na základě těchto hodnot bylo stanoveno, že Q je rovno 75 % Q'. Pro výpočty chování horninového masivu byl použit Hoek-Brownův model:

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_c \times (m_b \times \sigma_3' / \sigma_c + s)^a$$

- $\sigma_1', \sigma_3'$  hlavní efektivní napětí
- $\sigma_c$  pevnost v jednoosém tlaku
- s,  $m_b$ , a parametry horninového masivu

Vstupní parametry pro výpočet byly vypočteny pomocí indexu GSI (Geological Strength Index):

$$GSI = 9 \log_e Q' + 44$$

$$a = 0,5$$

$$m_b / m_i = \exp(((GSI - 100) / 28))$$

$$s = \exp(((GSI - 100) / 9))$$

$$m_i = 9 \text{ (neporušený vzorek)}$$

Deformační modul horninového masivu ( $E_m$ ) byl odvozen z indexu Q:

$$Q = 0,75 Q'$$

$$E_m = 25 \log Q$$

Dvě sady vstupních parametrů byly použity pro výpočty (tab. 4):

**Střední parametry** – založené na průměrných hodnotách (nejlepší střední odhad)

**Minimální parametry** – založené na nejnižších hodnotách (nejhorší uvěřitelný odhad).

		Střední parametry	Minimální parametry
$\gamma$	Objemová hmotnost	27 kN/m <sup>3</sup>	27 kN/m <sup>3</sup>
n	Pórovitost	0,001	0,001
k	Propustnost	$2,63 \times 10^{-7}$ m/s	$2,63 \times 10^{-7}$ m/s
$K_0$	Koeficient bočního tlaku	1	1
$\nu$	Poissonovo číslo	0,27	0,27
E	Deformační modul	26,98 GPa	1,03 GPa
G	Smykový modul – $E / (2 + 2\nu)$	10,6 GPa	405,5 MPa
K	Objemový modul – $E / (3 - 6\nu)$	19,6 GPa	746,4 MPa
s	Parametr horninového masivu	0,03192	0,00277
m	Parametr horninového masivu	2,975	1,356
a	Parametr horninového masivu	0,5	0,5
$\sigma_c$	Pevnost v jednoosém tlaku	56 MPa	32 MPa

Tab. 4 Tabulka parametrů horninového masivu

Tab. 4 Rock mass parameters

### 3.3 Ostění

Parametry ostění jsou uvedeny v tab. 5.

E	Modul pružnosti	15 GPa
$\gamma$	Objemová hmotnost	2 500 kg/m <sup>3</sup>
t	Mocnost ostění	200–600 mm

Tab. 5 Tabulka parametrů ostění

Tab. 5 Tunnel lining parameters

### 3.4 Kotvy

Parametry kotev jsou uvedeny v tab. 6.

L	Délka	3 m
s	Vzdálenost v podélném směru	1.0 m
D	Průměr kotvy	25 mm
d	Průměr vrtu	38 mm
G	Smykový modul injektáže	9 GPa
$\sigma_{c,gr}$	Pevnost v tlaku injektáže	20 MPa
$\tau_{peak}$	Pevnost ve smyku injektáže	10 MPa
E	Modul pružnosti	210 GPa
T	Tahová pevnost	550 kN

Tab. 6 Tabulka parametrů kotev

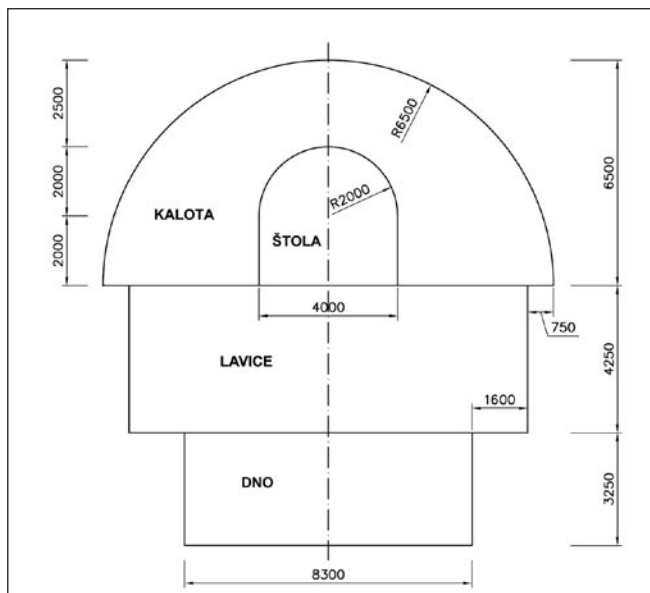
Tab. 6 Rockbolt parameters

## 4. Provedené výpočty

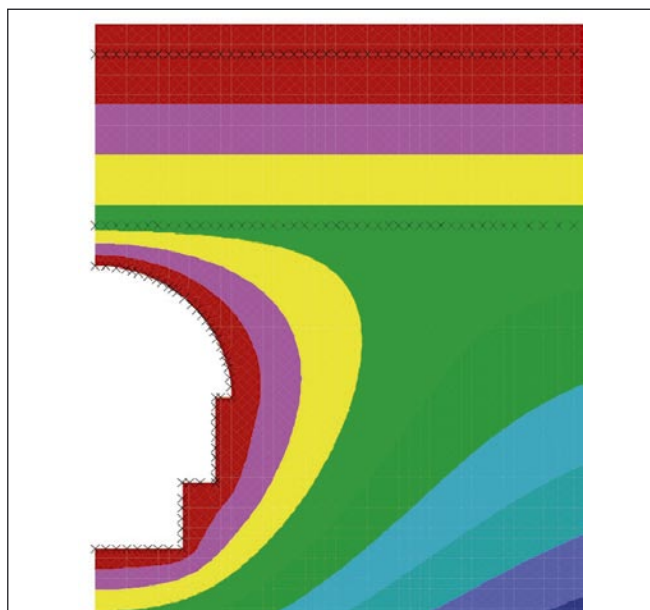
### 4.1 NRTM ražba v horninách

Tvar a členění tunelu navrženého pro NRTM ražbu v horninách je na obr. 2. Celkové nadloží bylo uvažováno 12 m. Výpočet byl rozčleněn na ražbu průzkumné štoly, kaloty, jádra a dna. Úroveň HPV byla uvažována 1,5 m pod úrovní te-

rénu. Díky nízké propustnosti prostředí bylo předpokládáno, že úroveň HPV během ražby tunelu nepoklesne, pouze dojde k redistribuci pórových napětí okolo výrubu (obr. 3). Výpočet redistribuce pórového napětí (flow analysis) byl proveden pro každý krok odděleně od výpočtu redistribuce efektivních napětí. Relaxace nevystrojeného výrubu byla uvažována 50 %. Byly provedeny výpočty s horninovým nadložím 0,5 m a 2 m, s různými tloušťkami ostění (50–200 mm) a s různými vstupními parametry (střední a minimální). Do výpočtu s minimálními parametry horninového masivu musely být zahrnuty kotvy pro dosažení rovnovážného stavu.



Obr. 2 Členění NRTM ražby v horninách  
Fig. 2 Tunnel face sequencing in hard rock

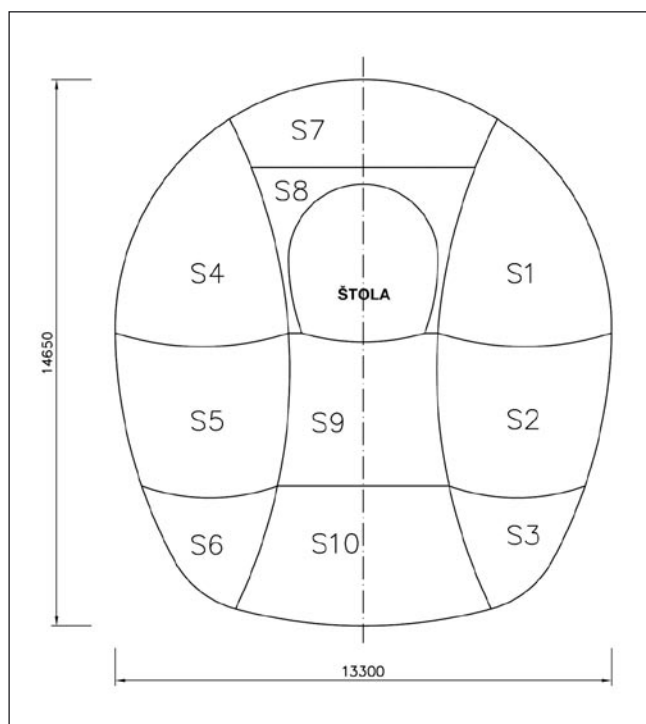


Obr. 3 Redistribuce pórových tlaků v okolí nevystrojeného výrubu  
Fig. 3 Redistribution of pore pressures in area close to excavation

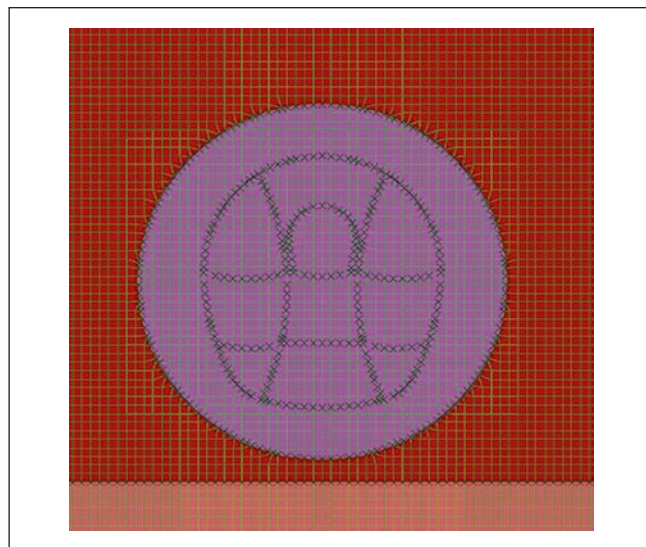
#### 4.2 NRTM ražba v zeminách

Tvar a členění tunelu navrženého pro NRTM ražbu v horninách je na obr. 4. V porovnání s tvarem ostění do hornin je tvar podstatně více zaoblený, aby bylo tunelové ostění co nejvíce

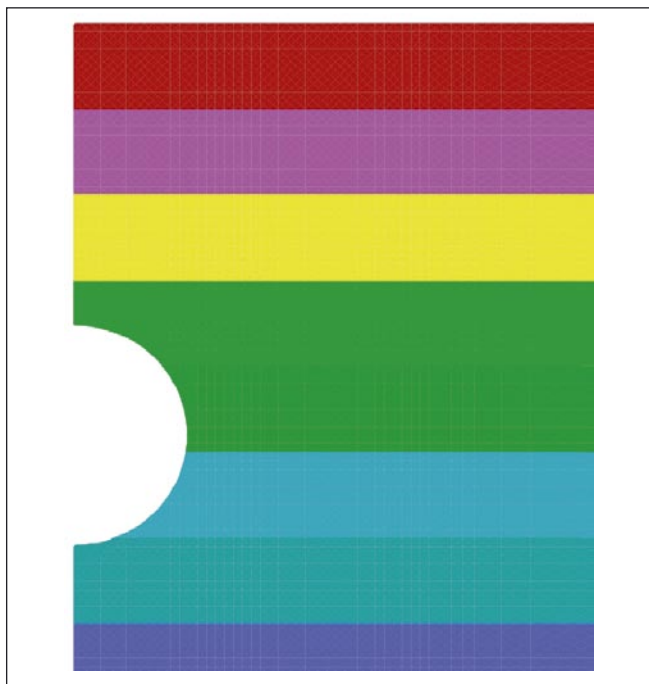
v tlaku. Pro zajištění stability čelby a pro minimalizaci deformací byla ražba rozdělena na ražbu bočních štol a ražbu středního pilíře. Celkové nadloží bylo uvažováno 12 m. Postup výpočtu byl obdobný jako výpočet NRTM ražby v horninách, ražba tunelu však byla rozdělena na více částí. Navíc byla provedena i dlouhodobá analýza s nastoupaným hydrostatickým tlakem. Vzhledem k nestabilitě úvodních výpočtů musely být provedeny výpočty ze zlepšenými vlastnostmi aluvia – obr. 5 (předpokládané zlepšení vlastností pomocí injektáže, které by bylo provedeno z průzkumné štoly). V analýze bylo uvažováno odvodněné chování aluvia (efektivní parametry) a neodvodněné chování proinjektovaného aluvia (totální parametry). Pro dlouhodobé chování proinjektovaného aluvia byly použity efektivní parametry (snížení deformačního modelu na původní hodnotu).



Obr. 4 Členění NRTM ražby v zeminách  
Fig. 4 Tunnel face sequencing in soft ground



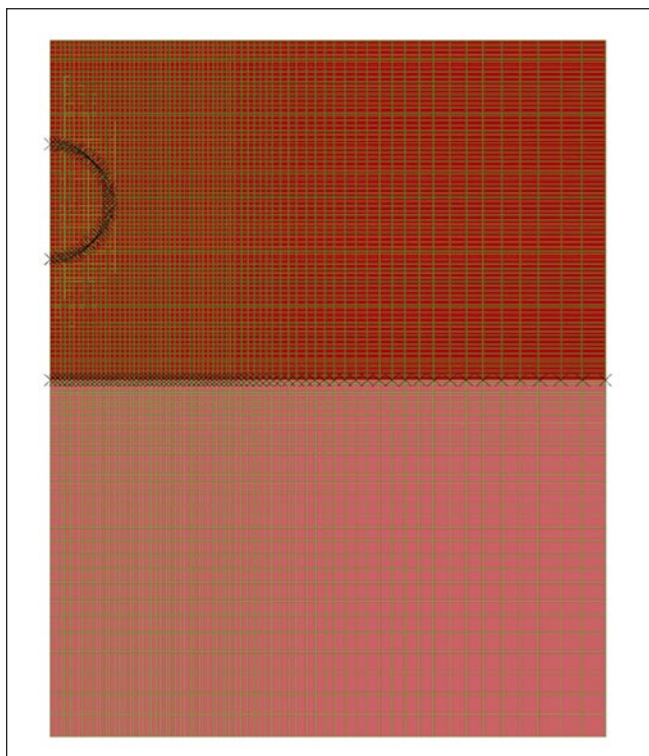
Obr. 5 Zlepšení parametrů aluvia v okolí tunelu  
Fig. 5 Ground treatment in area close to the tunnel



Obr. 6 Modelování TBM ražby bez ovlivnění pórových tlaků  
Fig. 6 TBM excavation modelling without impact on pore pressures

### 4.3 TBM ražba v horninách

Celkové nadloží bylo uvažováno 24 m od osy tunelu, z toho mocnost aluvia byla uvažována 11 m. Hladina podzemní vody byla uvažována v úrovni terénu. Poloměr tunelu byl uvažován 6,415 m, mocnost ostění byla uvažována 500 mm. Byla uvažována ražba pomocí TBM se zajištěním tlaku na čelbě i na plášti, proto nebyla uvažována relaxace masivu. Výpočty byly provedeny pro střední a minimální parametry horninového masivu. Dále



Obr. 7 Modelování TBM v zeminách  
Fig. 7 Modelling of TBM in soft ground

byly výpočty provedeny pro nepropustné ostění (bez ovlivnění pórových tlaků – obr. 6), tak pro propustné ostění (s redistribucí pórových tlaků).

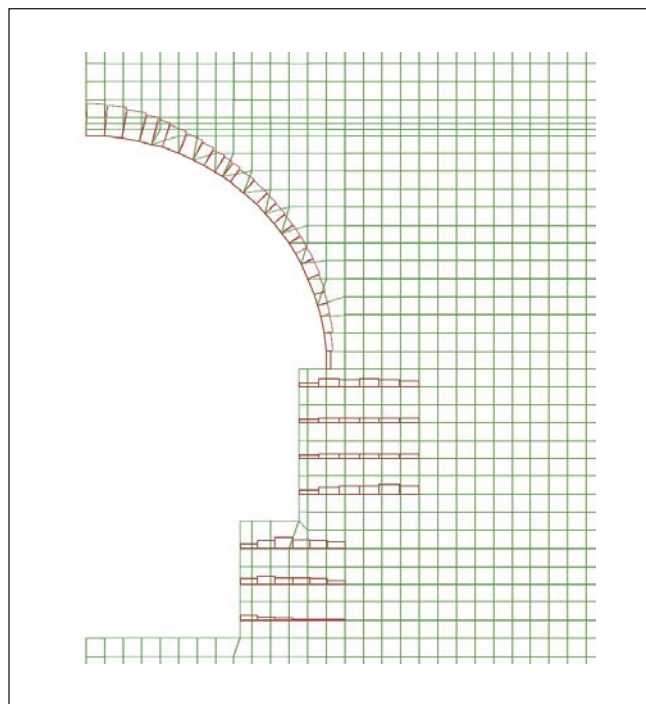
### 4.4 TBM ražba v zeminách

Celkové nadloží bylo uvažováno 18 m od osy tunelu, rozhraní aluvia a skalního podloží bylo uvažováno 20 m pod osou tunelu (obr. 7). Hladina podzemní vody byla uvažována v úrovni terénu. Poloměr tunelu byl uvažován 6,415 m, mocnost ostění byla uvažována 500 mm. Opět byla uvažována ražba pomocí TBM se zajištěním tlaku na čelbě i na plášti, proto nebyla uvažována relaxace masivu. Výpočty byly provedeny pro deformační modul aluvia 3 MPa a 6 MPa.

## 5. Výsledky modelování

### 5.1 NRTM v horninách

Vlastnosti horninového masivu jsou obecně velmi dobré, dokonce i masiv s nejhoršími očekávanými parametry má deformační modul okolo 1 GPa, což je obecně dostatečné i pro konstrukce větších rozměrů. Pro horninový masiv se středními parametry výsledky výpočtů ukázaly, že pro zajištění stability výrubu bude dostatečná mocnost ostění pouhých 50 mm i pro skalní nadloží pouhých 0,5 m. Výpočty s minimálními parametry horninového masivu vykazovaly vysoké horizontální deformace v oblasti svislých stěn tunelu (tahová pevnost masivu nebyla do výpočtu zahrnuta). Výsledky výpočtu indikovaly nestabilitu stěn. Proto musely být do výpočtu zahrnuty kotvy, které vedly k redukci vodorovných deformací a ke stabilitě výpočtu (obr. 8). Pro zajištění stability výrubu bylo nutné tloušťku ostění při minimálních parametrech zvýšit na 200 mm. Obecně výpočty NRTM v horninách prokázaly, že je možné ražbu provést s minimálními deformacemi (řádově milimetry) pro skalní



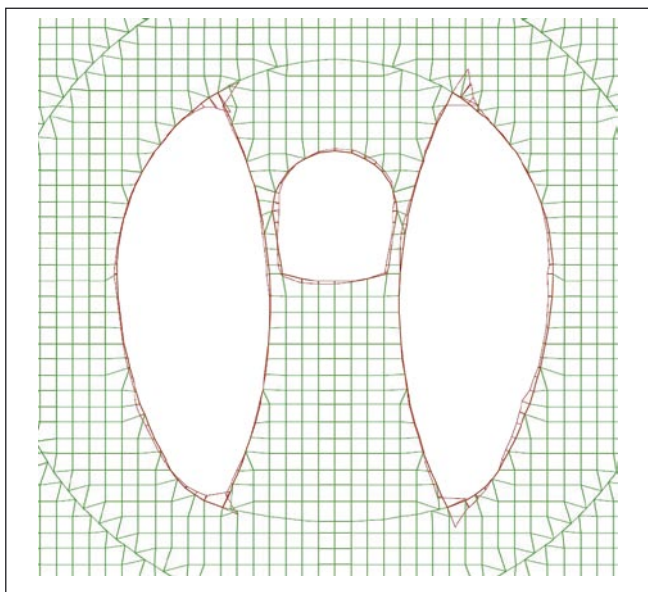
Obr. 8 Zavedení kotev do výpočtu (znázorněn průběh normálových sil v kotevách a ostění)

Fig. 8 Implementation of rockbolts to calculations (axial forces in rockbolts and lining are shown)

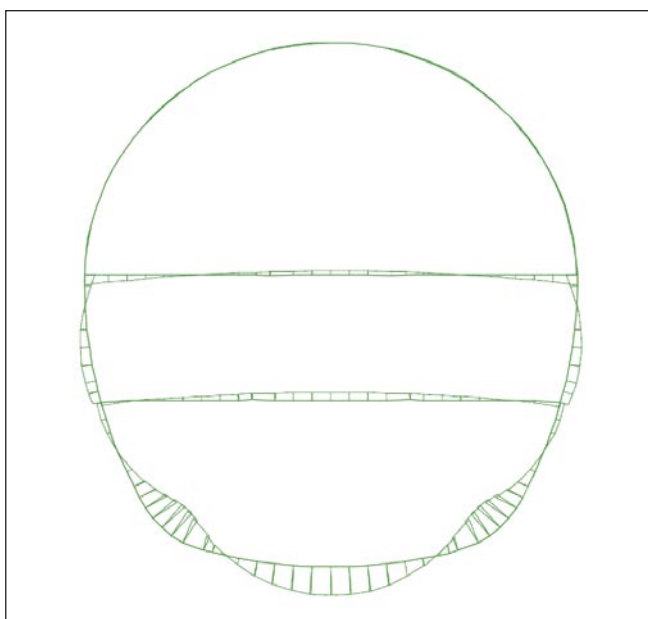
nadloží 2 m a více. Při dostatečné mocnosti skalního nadloží je hlavním nebezpečím sedání způsobeného odvodněním nadložíních aluvií. Proto je nutné minimalizovat redistribuci pórových napětí během ražby.

## 5.2 NRTM v zeminách

Vstupní parametry pro modelování aluvia byly velmi nízké (stanovení parametrů bylo značně konzervativní). Velikost deformačního modulu 3 MPa odpovídá rašelině. Díky tomu výpočty ukázaly, že NRTM ražba v tomto materiálu bez použití technik zlepšování zemin není realizovatelná. Proto byly další výpočty provedeny se zeminou zlepšenou injektáží v profilu tunelu a do 3 m od líce výrubu. Výsledky výpočtů poukázaly na dva problémy:



Obr. 9 Průběh ohybových momentů v primárním ostění během ražby  
Fig. 9 Distribution of bending moments in the primary lining during construction



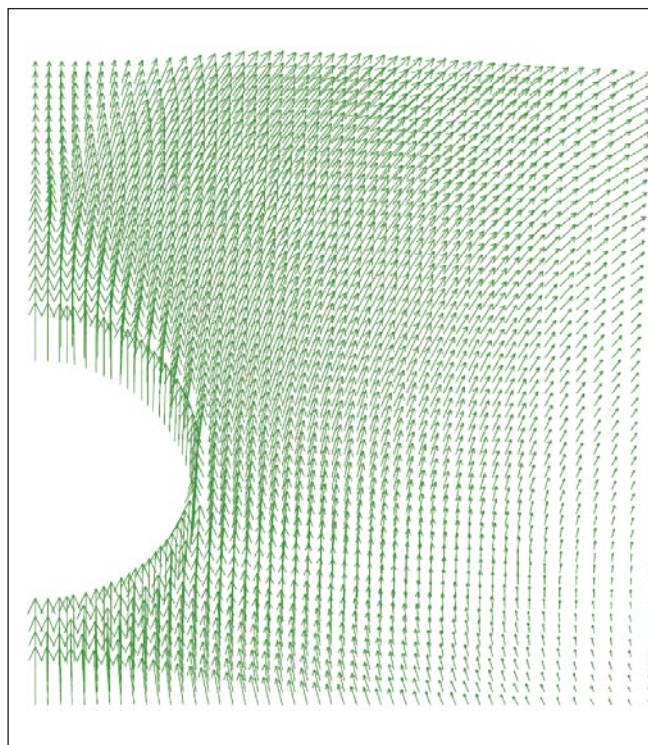
Obr. 10 Průběh ohybových momentů v definitivním ostění po zahrnutí mostovek  
Fig. 10 Distribution of bending moments in the secondary lining including slabs

**1. Vysoké ohybové momenty:** Během členěné ražby jsou poměrně vysoké ohybové momenty v ostění (až 180 kNm), což může vést k praskání ostění v místech malých poloměrů (obr. 9). To je celkem běžné chování stříkaného betonu a v případě drobných lokálních poruch nejde o závažnější problém. Nicméně ještě vyšší ohybové momenty vykazovalo i definitivní ostění (až 717 kNm), což je výraznějším problémem. Velikost momentů bylo možné značně redukovat zahrnutím mostovek oddělujících jednotlivá patra tunelu (obr. 10).

**2. Vztlak:** Druhým problémem byla velikost vztlakové síly. Výpočty ukázaly posun tunelu velikosti 240 mm směrem vzhůru (tunel je lehčí než odtěžená zemina, vzhledem k nízkým parametrům nadloží je pasivní odpor zeminy proti tomuto posunu velmi nízký). I když tato hodnota by byla při stavbě pravděpodobně výrazně nižší v porovnání s výpočty, musel být tento problém řešen podrobněji.

## 5.3 TBM v horninách

I při minimálních parametrech horninového masivu bude TBM ražba tunelu se skalním nadložím aspoň 0,5 m stabilní, deformace budou pouze několik milimetrů. Podobně jako u NRTM výpočty poukázaly na nebezpečí výrazného sedání nadloží při odvodnění aluvií.



Obr. 11 Průběh deformací ostění a masivu ovlivněn vztlakem  
Fig. 11 Distribution of lining and ground deformations affected by heave

## 5.3 TBM v zeminách

Stabilita výrubu by v případě TBM ražby v aluviích musela být zajištěna tlakem na čele a plášti stroje, což obecně není problém. Výpočty ovšem dle očekávání také vykazovaly svislý posun tunelu směrem vzhůru – obr. 11 (340 mm). Výpočty s vyšším deformačním modulem prostředí následně prokázaly očekávanou závislost mezi velikostí svislého posunu a velikostí deformačního modulu (při dvojnásobné velikosti  $E$  byla velikost posunu zhruba poloviční).

## 6. Závěr

Výpočty tunelu SMART pomocí metody konečných diferencí v programu FLAC vedly k závěru, že by NRTM ražba v případě poklesů úrovně skalního do profilu tunelu (případně pod něj) prakticky nebyla realizovatelná. NRTM ražba by byla realizovatelná pouze po provedení značných sanačních prací, které by nemohly být prováděny z povrchu (vzhledem k výšce nadloží a k pozemní zástavbě). Další značnou obavou NRTM ražby bylo snížení HPV vedoucí k sedání povrchu, což bylo v prostředí městské zástavby nepřijatelné. Zmíněné důvody vedly rozhodnutí realizovat ražbu pomocí bentonitových TBM.

### Literatura

- /1/ BARTÁK, J. – HILAR, M. – PRUŠKA, J. (2002): Numerical Modelling of the Underground Structures. Acta Polytechnica. r. 42, č. 1, s. 53–58.
- /2/ THOMAS, A. – POWELL, D. – HILAR, M. (2004): Úloha numerického modelování při projektování tunelů. Tunel, r. 13, č. 1, s. 25–28.
- /3/ HILAR, M. (2006): Využití velkoprofilového TBM pro ražbu v krasové oblasti. Sborník 34. konference Zakládání staveb, Brno.
- /4/ HILAR, M. (2007): SMART – jedinečný tunel pro Kuala Lumpur, Malajsie. Stavebnictví, r. 1, č. 5.

## 34. světový tunelářský kongres ITA-AITES 2008

„Underground facilities for better environment & safety“

Termín a místo konání: **19.–25. září 2008, Agra, Indie**

Témata jednání kongresu:

*Planning, Investigation and Design of Tunnel, Cavern & Underground Projects*

- Planning, Investigation and Interpretation of Geological Data;
- Engineering Classification and Characterization of Rock Mass;
- Hydraulic and Structural Design of Tunnels;
- Stabilization and Support System for Tunnelling;
- Determination of In-situ Stresses for Underground Excavation;
- Instrumentation Monitoring, Back-analysis and Modelling Methodologies;
- Analysis and Design Methodologies including Effect of Seismicity on the Underground Structure.

*Tunnel & Cavern Construction Technologies and Equipment*

- Construction Methodologies for Tunnels, Caverns, Underground Storages including Remedial Measures for Large Collapses;
- Tunnelling in Urban Areas;
- Soft Ground Tunnelling including Shotcrete Methods;
- New Developments – TBM Performance and NATM Experiences;
- Micro Tunnelling;
- Trenchless Technology – Practice and Evaluation;
- Immersed Tunnels and Submerged Floating Tunnels.

*Risk Management*

- Better Preparedness against Tunnel Related Natural Hazards;
- Risk Analysis and decision-making Techniques for Large Underground Projects.

*Environmental and Social Impacts*

- Environmental and Social Impact Assessment of Underground Works and their Norms and Methodologies;
- Environmental Control in Tunnel/Cavern and Underground Spaces;
- Effective Ventilation in Tunnels and Practices.

*Safety Issues – Standards and Policies*

- Fire Safety Arrangement and Measures in Tunnels and Transport;
- Safety Standards and Policies in Different Countries and New Developments.

*Contract Management and Financing of Underground Construction Works*

- Costing and Contractual Practices in Tunnel and Underground Works including Aspects of Measurements and Payment;
- Experience and Structure of Model Contract Document;
- Project and Equipment Financing Build Operate Transfer (BOT) Projects;
- Securitisation and Risk Mitigation.

*Research & Development*

- Robotisation of TBM Tunnelling

[www.wtc2008.org](http://www.wtc2008.org)

## 35. světový tunelářský kongres ITA-AITES 2009

„Safe Tunnelling for the City and Environment“

Termín a místo konání: **23.–28. května 2009 Budapešť, Maďarsko**

[www.wtc2009.org](http://www.wtc2009.org)