

# VYUŽITÍ VELKOPROFILOVÉHO TBM PRO RAŽBU V KRASOVÉ OBLASTI

**Ing. Matouš Hilar, MSc., PhD., CEng., MICE**  
D2 Consult Prague s.r.o.

## **Large-profile TBM Used for an Excavation in Karstic Area**

Kuala Lumpur in Malaysia has often been inundated by the floods from the Klang River. Road traffic congestions are also very common problem of the city. The SMART Project is an innovative solution that combines stormwater and road traffic congestion relief in one dual-purpose tunnel. The scheme is based on a 9.7km long, 11.8m internal diameter bored tunnel. Bedrock along much of the route is limestone affected by karstic features. It was decided to adopt two large slurry tunnel boring machines (TBM).

## **1. ÚVOD**

Kuala Lumpur, hlavní město Malajsie, bylo v minulosti často zaplavováno rozvodněnou řekou Klang. V posledních letech intenzita záplav rostla, což způsobovalo značné obtíže a finanční ztráty. Dalším problémem města byly dopravní zácpy. Tyto důvody vedly k myšlence realizace projektu SMART.

Projekt SMART zahrnuje 9,7km dlouhý tunel s vnitřním průměrem 11,8m. Tunel bude sloužit pro dva účely – pro odvedení vody a pro silniční dopravu. Střední část tunelu bude mít dvě mostovky rozdělující příčný profil tunelu na tři patra. Horní patro tunelu umožňuje silniční dopravu v jižním směru (dva pruhy + nouzový pruh), střední patro umožňuje při stejném uspořádání dopravu ve směru severním.

Tunel lze provozovat ve třech různých režimech, v závislosti na intenzitě záplav:

- Nezaplavený tunel otevřený pro dopravu
- Tunel se zaplaveným spodním patrem otevřený pro dopravu
- Zcela zaplavený tunel uzavřený pro dopravu

Umožnění zaplavování horních pater tunelu vodou přineslo velmi náročné požadavky na vybavení tunelu. Navržený systém by měl umožnit v případě záplav uzavření tunelu pro dopravu během 45 minut a znovuotevření pro dopravu během 52 hodin.

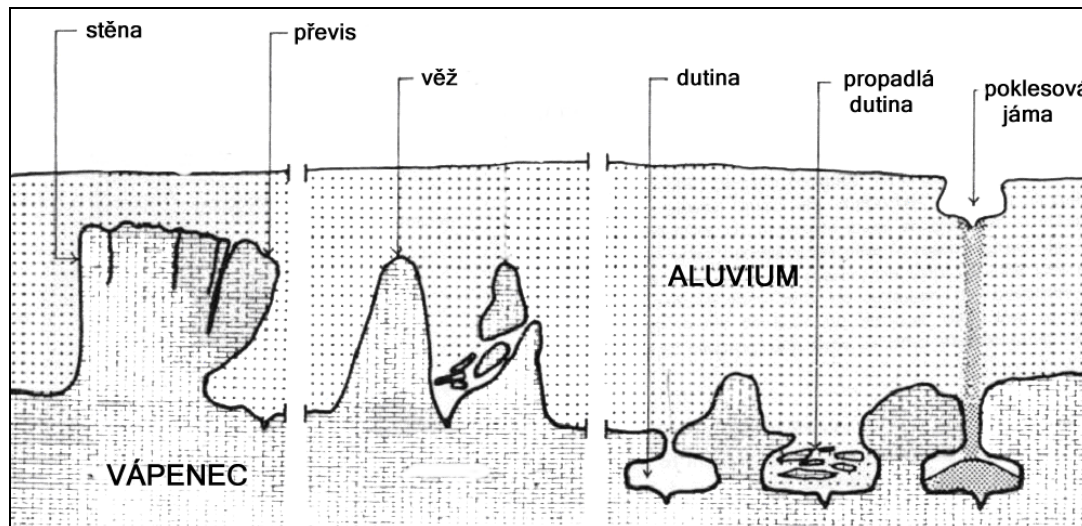
## **2. GEOLOGICKÉ PODMÍNKY**

Vyřešení dvojího účelu tunelu však nebylo jedinou výzvou projektu. Od počátku bylo zřejmé, že ražba tunelu o profilu 13,2m ve složité geologii pod městskou zástavbou bude také velmi náročná. Skalní podloží v oblasti trasy tunelu tvoří kuala-lumpurský vápenec. Tento vápenec obsahuje kalcit metamorfovaný na mramor.

V oblasti Kuala Lumpur byly pozorovány následující krasové jevy (Obr.1):

- Povrch vápence tvoří strmé věže a hluboká údolí
- Dutiny byly formovány rozpouštěním a mohou být srovnatelné s velikostí TBM

- Dutiny jsou propojeny podzemními vodními cestami, což přináší riziko pro objekty vzdálené od tunelu v případě, že by čerpání vody v tunelu snížilo hladinu spodní vody.
- Poklesové jámy byly vytvořeny v minulosti a neulehlý materiál může být zastižen během tunelování skrz horninu.
- Poklesové kotliny mohou být způsobeny odvodněním souvisejícím s podzemními pracemi.



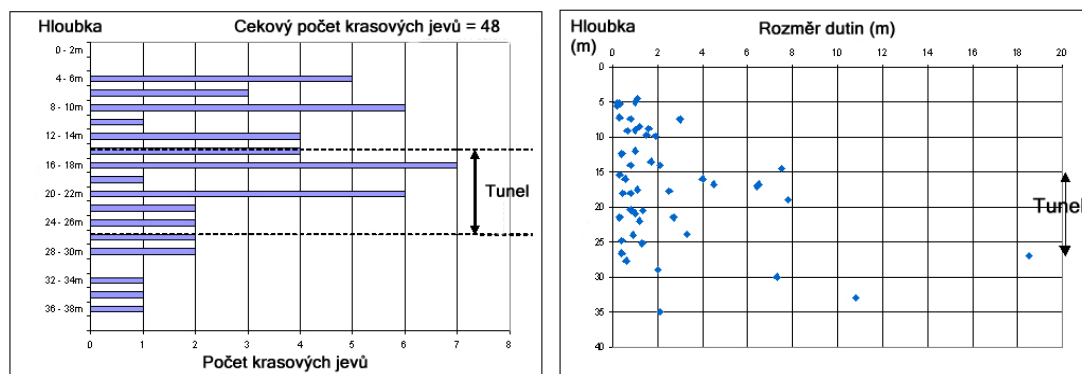
Obr.1 Krasové jevy v oblasti tunelu

Nadloží vápence je v Kuala Lumpur tvořeno aluviem ovlivněným starými doly na cín. Aluvium obsahuje neulehlý písek a štěrk. Staré doly byly buď vyplněny hlušinou či jinak přeměněny, aby umožnily výstavbu povrchové zástavby. Během vrtných prací realizovaných v rámci IG průzkumu byl problém odlišit původní aluvium od výplně starých dolů. Z vrtů realizovaných v rámci průzkumných prací byly odebrány jádrové vzorky skalního masivu a také v nich byly provedeny presiometrické zkoušky. Dále byly provedeny penetrační zkoušky aluvia (Standart Penetration Tests - SPT).

Z pohledu ražby největší znepokojení způsobovala velmi proměnlivá poloha skalního podloží a pravděpodobná přítomnost větších dutin. Proto byl proveden rozsáhlý geofyzikální průzkum. Tento průzkum upřesnil představu o poklesech skalního podloží či o oblastech s větším množstvím dutin (což nebylo možné rozlišit). V problematických místech byly provedeny další vrty, které ukázaly, že výsledky geofyzikálního průzkumu byly spíše indikativní. Dále byl proveden geoelektrický (odporový) průzkum k získání dalších informací o poloze skalního podloží.

Statistická analýza dutin zastižených během vrtných prací byla realizována pro lepší porozumění pravděpodobných rozměrů a četnosti veškerých dutin ve vápenci. Výsledky jsou prezentovány na Obr.2. Byly zjištěny pouze svislé rozměry dutin, což neumožnilo vytvoření celkové trojrozměrné představy. Ze 163 vrtů 25 narazilo na dutiny pod úroveň skalního podloží. Navrtné prostory byly vyplněny většinou vodou s měkkým bahnem. Hustější materiál podobný aluviu byl občas zastižen pouze ve větších prostorách.

Polohu spodní klenby tunelu nebylo možné změnit z hydraulických důvodů, proto musel být tunel ražen skrz geologii v dané hloubce, i když to nevyhnutelně znamenalo ražbu s čelbou složenou ze skály i ze zeminy.



Obr.2 Statistické vyhodnocení krasových jevů

### 3. VÝBĚR ZPŮSOBU RAŽBY

Jakmile bylo zjištěno příznivé stanovisko vlády k realizaci projektu, tak bylo provedena velmi podrobná studie, jejímž cílem bylo zjištění možností zkrácení doby výstavby a snížení ceny tunelování. Výsledky úvodního IG průzkumu ukázaly, že část tunelu mezi jižní křižovatkou a severní ventilační šachtou byla zcela ve skalním masivu s výškou skalního nadloží více jak polovina profilu tunelu. Protože zastižený vápenec byl považován za vhodný, s průměrnou hodnotou  $Q$  ze jádrových vzorků 22, ražba byla připravena pomocí trhacích prací s typickými třídami výstroje s použitím svorníků a stříkaného betonu.

Důraz byl kladen na snížení dvou hlavních rizik. Za prvé byly obavy z neočekávaného zastižení dutin obsahujících bahno či vodu. Velké kaverny by mohly velmi rychle vypustit vodu či bahno do tunelu, což by znamenalo značné ohrožení bezpečnosti pracovníků. Navíc by podobná událost mohla vést ke snížení hladiny podzemní vody, což by mohlo znamenat ohrožení pozemní zástavby. Proto byla vyžádána ražba průzkumné štoly v oblasti největších obav, která by vedla k prozkoumání a zlepšení geologických podmínek. Za druhé tunel je umístěn mělce pod městskou zástavbou, což by pravděpodobně znamenalo požadavek na omezení trhacích prací. Vibrační limity byly nastaveny 12m/s na budovách a 25m/s v ostatních oblastech. Trhací práce by musely být omezeny v oblasti 150m procházejících pod zástavbou.

S podrobnějšími výsledky průzkumu bylo zřejmé, že původní předpoklad horninového nadloží byl zjednodušený. Byly zjištěny oblasti, kde úroveň skalního podloží byla v profilu tunelu. Speciálně v některých oblastech bylo dané rozhraní tak nízko, že by ražba pomocí NRTM byla velmi zdlouhavá a nákladná a vyžadovala by systematickou aplikaci tryskové injektáže z povrchu. Proto bylo rozhodnuto o použití TBM, které znamenalo mimo jiné podstatné snížení rizika ovlivnění životního prostředí.

Od počátku bylo zřejmé, že různorodým podmínkám čelby bude více než zeminový štít (EPB) vyhovovat štít bentonitový. Navíc již bylo použito více bentonitových štítů s průměrem nad 13m (narozdíl od jediného zeminového štítu). Zhotovitel se rozhodl hledat výrobce TBM, který by vyrobil stroj splňující podrobné požadavky na výkony stroje. Požadavky obsahovaly následující:

- Ražba 1,7m prstence během 70 minut (průměr pro 5 prstenců)
- Sestavení prstence ostění během 65 minut (průměr pro 5 prstenců)
- Použitelnost vyšší než 90%

- Postup 10 prstenců (17m) za 27 hodin
- Minimální poloměr trasy 250m
- Možnost realizace sondování a zlepšování prostoru před čelbou
- Zahrnutí geofyzikálního systému pro průzkum

#### 4. POUŽITÝ TUNELOVACÍ STROJ

Dva stejné bentonitové tunelovací stroje o průměru 13,2m byly vyrobeny německou společností Herrenknecht. Stroje byly dodány 12 a 15 měsíců od objednání. Řezná hlava byla uzpůsobena různorodé čelbě. Dvojitá rotační hlava umožňuje efektivní ražbu ve středně tvrdé skále, v měkké zemině či ve smíšených podmínkách. Kontrola tlaku na čelbě byla považována za velmi důležitou vzhledem k ražbě s nízkým nadložím pod hladinou podzemní vody. Velký důraz byl kladen na kulovitá hlavní ložiska, která umožňují natáčení řezné hlavy, což znamená snížení rozdílu tlaku na pístech tlačících na postavené ostění. Stroj také umožňuje odtlačení řezné hlavy zpět o 0,4m, což znamená možnost inspekce čelby a výměnu částí řezné hlavy.

#### 5. PROBLÉMY BĚHEM RAŽBY

V krasové oblasti je tlak na čelbě stroje považován za kritický. Rovnováha hydrostatického a zemního tlaku s tlakem bentonitu je udržena pouze v případě, že dutiny před tunelovacím strojem jsou vyplněny vodou či zeminou. V takových případech lze riziko vyplněných dutin kontrolovat. Pokud nedojde ke ztrátě bentonitu či ke zdvihání povrchu, tak vypočtený tlak na čelbě odpovídá potřebnému tlaku stroje. Tato skutečnost je potvrzena určením potřebného tlaku a následným monitoringem během ražby.

Nevyplněné nebo pouze částečně vyplněné dutiny znamenají značné riziko. Tyto dutiny mohou vést ke ztrátě tlaku bentonitu, což může vést ke kolapsu či k nadměrnému sedání. Použitým opatřením bylo vybavení stroje 1000m<sup>3</sup> čerstvého bentonitu a 1000m<sup>3</sup> použitého bentonitu pro zaplnění nevyplněných dutin. V případě zasažení dutin vyplněných vodou je hlavním nebezpečím snížení tlaku na čelbě. To způsobuje riziko pouze v případě, že je na čelbě aluvium (tj. v případě poklesu skalního podloží). V tomto případě je možné zvýšit tlak bentonitu na maximální hodnotu 13kN/m<sup>3</sup>. Podobné riziko může vzniknout v případě, že TBM narazí na volně vyplněnou šachtu či štolu v důlní oblasti. V těchto případech musí TBM snížit tlak na čelbě na hydrostatický tlak a musí být provedena injektáž z povrchu.

#### 6. ZÁVĚR

Projekt SMART patří mezi nejnáročnější podzemní stavby současnosti. Využití jedné tunelové trouby pro silniční dopravu a odvedení vody ze zaplavených oblastí je inovační řešení. Dalším důležitým aspektem projektu je ražba velkého profilu ve složitých geologických podmínkách pod zástavbou města Kuala Lumpur.

Tunel o celkové délce 9,7km je ražen v krasové oblasti pomocí bentonitového TBM. Dosavadní průběh ražeb potvrdil možnost realizace velkoprofilového tunelu v obdobných podmínkách a prokázal vhodnost použitého stroje (za předpokladu správného nastavení parametrů stroje). K úspěchu dosavadní realizace také velmi přispěl poměrně podrobný IG průzkum.