

NÁVRH A APLIKACE TBM PRO RAŽBU TUNELU ART

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

Design and Application of TBM for ART tunnel

Construction of tunnels under the Heathrow Airport was very complicated namely due to high demands on minimum settlement of the airport surface. The largest underground structure for the new Terminal 5 was Airside Road Tunnel (ART). This tunnel was driven through London Clay directly under taxiways. Strict demands on the surface settlement led to the construction of unique TBM, capable to work in two regimes – Air Pressure Balance (APB) and Earth Pressure Balance (EPB).

1. ÚVOD

Stavba nového terminálu 5 pro britské letiště Heathrow zahrnovala ražbu 13,5km tunelů. Největší realizovanou podzemní stavbou byl silniční tunel ART (Airside Road Tunnel). Tunel, jehož dvě trouby mají vnější průměr 9,15m a délku 2 x 1,3km, bude v budoucnu sloužit pro dopravní spojení mezi centrální oblastí letiště a terminálem 5. Ražba tunelu musela být realizována pod kritickou oblastí mezinárodního letiště, zahrnující například pojezdové plochy letiště či potrubí na palivo a vodu. Navíc obě trouby tunelu musely nadejít provozovaný železniční tunel Heathrow Express.

Vzhledem k velice nízkému nadloží tunelu vznikly vážné obavy ohledně kontroly sedání oblastí ovlivněné ražbou. Větší sedání by mohlo velmi vážně narušit chod letiště a teoretické finanční ztráty by mohly dosáhnout velmi vysokých hodnot. Proto byl vyvinut ojedinělý tunelovací stroj (TBM – Tunnel Boring Machine), jehož hlavním cílem bylo snížit veškerá rizika ražby na minimum (Obr.1).



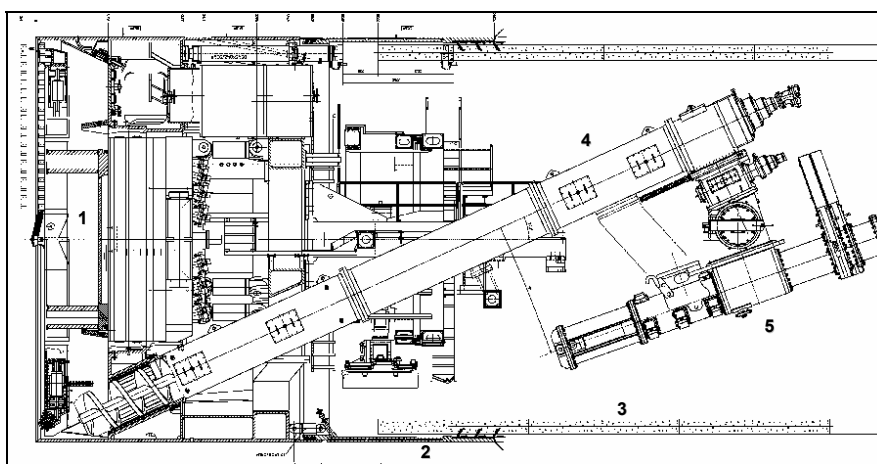
Obr.1 TBM použité pro ražbu tunelu ART

2. NÁVRH A PARAMETRY TUNELOVACÍHO STROJE

Tunel ART byl navržen tak, aby byl v celé délce ražen v londýnském jílu. Z geotechnických výpočtů vyplynulo, že tlak potřebný na čelbě stroje bude 150 – 200kPa (v závislosti na výšce nadloží). V úvahu přicházely dva typy strojů – zeminový štít (EPB – Earth Pressure Balance) a stroj na bázi stlačeného vzduchu (APB – Air Pressure Balance). Zatímco princip stlačeného vzduchu byl v prostředí londýnského jílu již mnohokrát použit, EPB TBM zatím v této geologii nasazeno nebylo. Důvodem pro použití EPB TBM byly možné deprese šterkového nadloží až do prostoru profilu tunelu, které by v případě práce pod stlačeným vzduchem znamenaly riziko okamžité ztráty tlaku (tj. erupce nadloží).

Proto bylo rozhodnuto vytvořit TBM schopné pracovat ve dvou režimech – APB a EPB. Možnost nasazení EPB TBM v prostředí londýnského jílu musela být ověřena pomocí testů, které byly provedeny přímo v továrně firmy Herrenknecht (německý výrobce tunelovacího stroje). Testy prokázaly, že bez přidání dalších přísad nelze vytvořit jílovou zátku ve šnekovém dopravníku, která by udržela tlak 200kPa. Pro udržení tlaku na čelbě byl firmou Putzmeister vyvinut systém dvou pístových pump umístěných na konci šnekového dopravníku. Systém se skládal ze dvou pístů o průměru 750mm (Obr.2) a byl schopen přemísťovat zeminu rychlostí až 400t/h. Následné testy potvrdily vhodnost použitého systému pro dané prostředí.

Průměr sestrojeného TBM byl 9,15m, délka 6,5m, váha bez šnekového dopravníku 600t. Čelo stroje bylo ze 70% uzavřené. Vlastní ražba tunelu probíhala po záběrech 1,7m. Vytěžený jíl byl pomocí šnekového dopravníku dopraven k pístům Putzmeister. Skrz písty byl jíl vytlačen na systém pásových dopravníků, které zeminu dopravily na dočasnou deponii v blízkosti portálu tunelu. Po vyražení záběru byl sestaven prstenec ostění. Délka šroubovaných betonových dílců byla shodná s délkou záběru (1,7m), tloušťka dílců byla 350mm. Vnitřní průměr prstence byl 8.1m. Každý prstenec byl ve svislém směru zkosený (rozdíl 75mm). Různá poloha zavíracího segmentu zaručovala natočení ostění ve směru osy tunelu. Prostor mezi ostěním a zeminou (mezera 175mm) byl vyplněn cementovou směsí (injektáž skrz zadní část pláště). Pro dopravu segmentů, cementové směsi, bentonitu a dalšího materiálu byly použity dva italské kolové dopravníky.



Obr.2 Schéma použitého TBM

- 1 Přetlaková komora ařezná hlava
- 2 Plášť štítu s těsněním na konci
- 3 Smontované segmentové ostění
- 4 Šnekový dopravník
- 5 Dvoupístové čerpadlo Putzmeister

3. ZPŮSOB KONTROLY SEDÁNÍ NADLOŽÍ

Sedání nadloží tunelu bylo přímo ovlivněno volbou následujících tlaků:

- Tlak na čelbě TBM (tlak zeminy či vzduchu)
- Tlak na plášti TBM (tlak bentonitu)
- Tlak injektáže vnějšího líce segmentů (tlak cementové směsi)

Tlak na čelbě: Velikost tlaku na čelbě závisela na použitém režimu. Při EPB režimu byla čelba zaplněna vyraženým materiálem. Vytěžený jííl v protoru čelby musel být značně promazán pěnovou injektáží a byl vytlačován pomocí šnekového dopravníku a pístů Putzmeister jako pasta z tuby. Velikost tlaku závisela na rychlosti ražby a na rychlosti šnekového dopravníku. Při režimu APB byla čelba zaplněna vytěženým materiálem pouze ze 60%, zbytek prostoru na čelbě tvořil stlačený vzduch. Velikost tlaku vzduchu byla kontrolována regulační jednotkou. Při ztrátě tlaku vzduchu na čelbě byl až do obnovení tlaku na čelbu pumpován větší objem vzduchu. Pokud nebyl tlak rychle obnoven, tak byla řezná hlava zatlačena více do zeminy.

Tlak na plášti: Plášť TBM byl kónický, poloměr zadní části pláště byl přibližně o 25mm menší než poloměr přední části. Kónický tvar pláště umožňoval snadnější řízení stroje. Oblast mezi pláštěm a zeminou byla tlakově injektována bentonitem. Injektáž byla původně prováděna skrz plášť pomocí deseti otvorů. Po úvodním testování stroje byl počet používaných otvorů snížen na čtyři (dva v koruně a dva po stranách). Ostatní otvory byly používány pouze pro kontrolu vyplnění celého prostoru. Řezná hlava oddělovala tlak bentonitu od tlaku na čelbě. Kartáče na konci pláště zaručovali, že bentonit neunikne do prostoru za segmenty. Na jeden prstenec ostění bylo použito přibližně 120 litrů bentonitu. Tlak bentonitu byl kontrolován snímači na plášti a manuálním měřáky na injektážních otvorech.

Tlak injektáže vnějšího líce segmentů: Rychlé vyplnění prostoru mezi dílci ostění a zeminou (mezikruží 175mm) bylo důležité pro zajištění výrubu a pro zaručení integrity segmentů. Injektáž byla provedena pomocí šesti čerpadel Schwing skrz zadní část pláště stroje. Po počátečním ucpávání spodních otvorů byly během další ražby používány pouze 4 otvory po stranách a v koruně. Na jeden prstenec bylo potřeba 9,5m³ směsi.

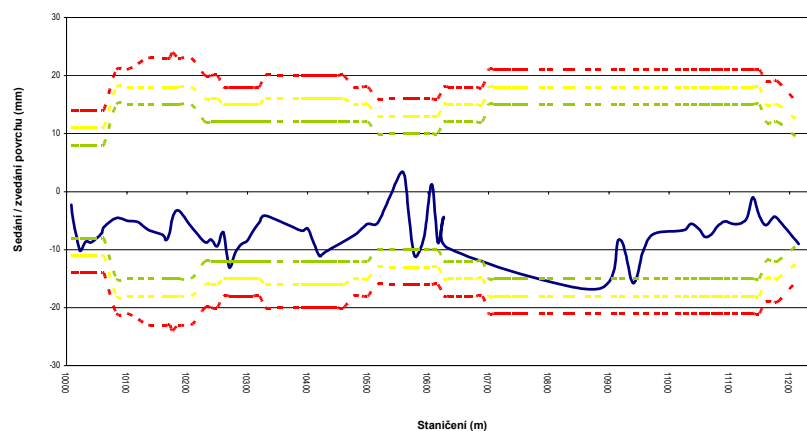
Po úvodním testování ražby v režimu EPB bylo zjištěno, že tunelovací stroj měl problémy při čelbě stroje zcela zaplněné zeminou (vysoký otáčivý moment řezné hlavy). Při režimu APB byl potřebný moment podstatně nižší (zaplnění prostoru pouze ze 60%). Navíc bylo možno vytěženou zeminu použít na zemní práce na jiných částech stavby (nižší obsah lubrikačních materiálů). Z těchto důvodů byla většina ražeb provedena v režimu APB.

Během ražby prvních 300m bylo sedání nadloží monitorováno automaticky v reálném čase a hodnoty použitých tlaků byly přímo porovnávány s naměřeným sedáním. Měření ukázala, že tlak vzduchu na čelbě 0,5 barů je dostatečný (původní projekt předpokládal 1-2 bary). Tlak bentonitu na plášti byl zvolen 1 bar (řezná hlava dostatečným způsobem utěsnila prostor mezi pláštěm a čelbou). Tlak injektáže segmentů ostění byl zvolen jako 90% tlaku nadloží plus 0,5 barů (tj. hodnoty do 3 barů).

4. REALIZOVANÉ SEDÁNÍ NADLOŽÍ

Tunel byl ražen v londýských jílech, které byly překryty zvodnělou vrstvou šterků o mocnosti 3-5m. Kritickým místem ražby byla ražba nad provozovaným tunelem Heathrow Express. V místě přechodu byla světlá vzdálenost tunelů 3,5m a jílové nadloží tunelu ART 3,0m (celkové nadloží 7,5m). Projekt předpokládal sedání do hodnoty ztráty objemu zeminy 1%. Tato hodnota byla použita pro stanovení vrstevnic sedání, které byly zakresleny do situace. Mezní hodnoty sedání a sklonů byly stanoveny v závislosti na objektech a sítích nad ražbou tunelu. Mezní hodnoty sedání se pohybovaly od 15mm do 30mm, mezní hodnoty sklonů byly od 1:100 do 1:60.

Pro prvních 300m tunelu bylo měření sedání prováděno automaticky každou hodinu. Během dalších ražeb byla měření prováděna manuálně jednou denně. Výsledky měření byly diskutovány na každodenních schůzkách zúčastněných stran a parametry stroje byly přizpůsobeny naměřeným hodnotám. Měření tunelu Heathrow Express při ražbě v jeho blízkosti bylo také prováděno automaticky. Měření sedání povrchu ukázali, že první deformace povrchu byly zaznamenány při vzdálenosti čela TBM 12m od měřeného bodu. Při ražbě pod měřeným bodem bylo zpravidla zaznamenáno zvednutí do hodnot okolo 10mm. Po projetí TBM pod měřeným bodem bylo zaznamenáno sedání (s hodnotami pod 20mm). Výsledky měření sedání povrchu ukázaly, že pro 36% délky tunelů bylo realizované sedání povrchu v rozmezí ± 5 mm, pro 90% bylo realizované sedání povrchu v rozmezí ± 10 mm. Sedání způsobené tunelovacím strojem nepřesáhlo 20mm. Celková ztráta objemu zeminy byla pouze 0,35%.



Obr.3 Sedání naměřené nad západní tunelovou troubou (naměřené hodnoty vyznačeny plně)

5. ZÁVĚR

Tunelovací stroj postavený pro ražbu tunelu ART pod britským letištěm Heathrow splnil očekávání. Realizace tunelu byla provedena v předpokládaném čase bez narušení provozu letiště, žádné naměřené hodnoty sedání nepřesáhly stanovené mezní hodnoty. Dosažení extrémě nízkých hodnot sedání nadloží bylo dáno jednak komplexností použitého TBM (možnost použití dvou režimů – EPB a APB, kontinuální monitorování tlaku na čelbě, plášti a za segmenty, možnost vysunutí řezné hlavy směrem k čelbě, atd.). Druhým velmi důležitým faktorem vedoucím k úspěchu ražeb byla vhodná koordinace veškerých prací a okamžitá reakce na nestandardní situace (např. změna parametrů stroje při vyšším nárůstu deformací). Díky tomu proběhla i ražba nad železničním tunelem Heathrow Express bez ovlivnění jeho provozu.