

## **Současné trendy ražby tunelů v tuhých jílech**

**Ing. Matouš Hilar, Ph.D., D2 Consult Prague, s.r.o.  
Zelený pruh 95/97, 140 00, Praha 4, Česká republika**

This contribution discusses current options for the tunnel construction in stiff clays. Possibilities of mechanized excavation using various shields and tunnel boring machines with the pressure on the face (TBMs) are discussed, also opportunities of conventional excavations with a sprayed concrete lining (SCL) are examined. Beside commonly used methods also the most advanced technologies practically verified in recent period were considered.

### **Úvod**

Následující text se zabývá současnými možnostmi výstavby tunelů v tuhých jílech. Jedná se o problematiku, která je v současnosti v České republice velmi aktuální. Velmi komplikovaná ražba tunelu Březno v prostředí jílu a jílovců (Hilar a kol. 2008) byla nedávno úspěšně dokončena, naopak ražby tunelu Dobrovského v Brně v prostředí jílu byly nedávno zahájeny. V dané problematice je na špičce vývoje v současné době Spojené království, což je způsobeno především skutečností, že velká část Londýna leží na překonsolidovaných tuhých jílech a problematika ražeb v tomto prostředí musela být řešena v souvislosti s výstavbou metra a dalších potřebných podzemních staveb. Proto je i tento příspěvek zaměřen zejména na tunelování v prostředí londýnských jílu.

### **Konvenční ražba s využitím OSB**

OSB bylo poprvé použito pro náročné stavby staničních tunelů v prostředí londýnských jílu na stavbách Heathrow Express (HEX) a prodloužení trasy metra Jubilee (JLE). Jelikož metoda OSB byla ve Spojeném království novou technologií, navíc relativně novou pro aplikaci v zeminách, tak bylo rozhodnuto vyrazit zkušební tunely. Oba tyto tunely (jak pro HEX tak pro JLE) byly realizovány v tuhých jílech. Po úspěšných ražbách zkušebních tunelů začaly v roce 1994 práce na vlastních stavbách. Pojmu OSB je v tomto příspěvku dána přednost, jelikož je zcela popisný. Pojem OSB, na rozdíl od pojmu Nová rakouská tunelování metoda (NRTM), nezahrnuje žádná filozofická tvrzení o projektování tunelu. Observační přístup NRTM není vhodný pro ražby v tuhých jílech, při kterých je nutné klást důraz na minimalizaci deformací masivu.

Havárie tří souběžných tunelů na Heathrow během ražeb v říjnu 1994 způsobila značnou škodu na pozemních konstrukcích. Všechny ražby jak na stavbě HEX, tak i na ostatních tunelech realizovaných pomocí OSB v Londýně, byly zastaveny (i když se na ostatních stavbách neobjevovaly žádné problémy). Důsledkem havárie byla velká revize ražeb pomocí OSB. Byly zjištěny nedostatky v kontrole kvality a v řízení prací.

Ražby s OSB byly nejprve obnoveny na stavbě JLE, poté i na HEX. Obě stavby byly úspěšně dokončeny. Podzemní stavitelství bylo nepochybně zkušeností z havárie na HEX posíleno. Doporučená zlepšení byla přijata do běžné praxe, a to jak pro ražby pomocí OSB, tak i pro všechny druhy ostatních ražeb. Integrovaný přístup k řízení staveb s těsnější spoluprací mezi projektantem, stavebním dozorem investora a dodavatelem podpořil týmového ducha, který značně pomohl zdárné rekonstrukci stavby HEX. Obecně zkušenosti z Londýna (po havárii v Heathrow) potvrdily, že ražby v tuhých jílech s použitím OSB mohou být bezpečné a ekonomické.

Tunely s OSB se tradičně skládají z primárního ostění, které má uvnitř sekundární ostění z monolitického betonu. Použití stříkaného betonu pro sekundární ostění může snížit náklady realizace tunelů s OSB. Dalším vylepšením je použití tzv. jednoplášťového ostění. U jednoplášťového ostění ze stříkaného betonu tvoří všechny nastříkaný beton součást trvalého ostění. Beton lze nanášet v několika vrstvách. Tento způsob jednoznačně šetří čas a peníze ve srovnání s tradičním postupem. Při stavbě zavazadlového tunelu na letišti Heathrow v roce 1996 bylo jednoplášťové ostění použito pro velké nestandardní profily a pro šachty, což bylo první použití jednoplášťového OSB v prostředí tuhých jílu.

Od devadesátých let popularita ražeb v tuhých jílech pomocí OSB stále roste. OSB se osvědčilo jako ekonomicky efektivní a všestranná metoda. Metoda NRTM byla původně vyvinuta pro tunely ve skalních horninách, nyní se již stříkaný beton hojně používá i v zeminách včetně tuhých jílu. Během uplynulých deseti let se používání ražeb pomocí OSB v tuhých jílech rychle rozšířilo. Byly získány zkušenosti s následky špatné organizace stavby a nevhodného použití OSB, které však lze překonat použitím pevně stanovených procedur koordinace stavby.

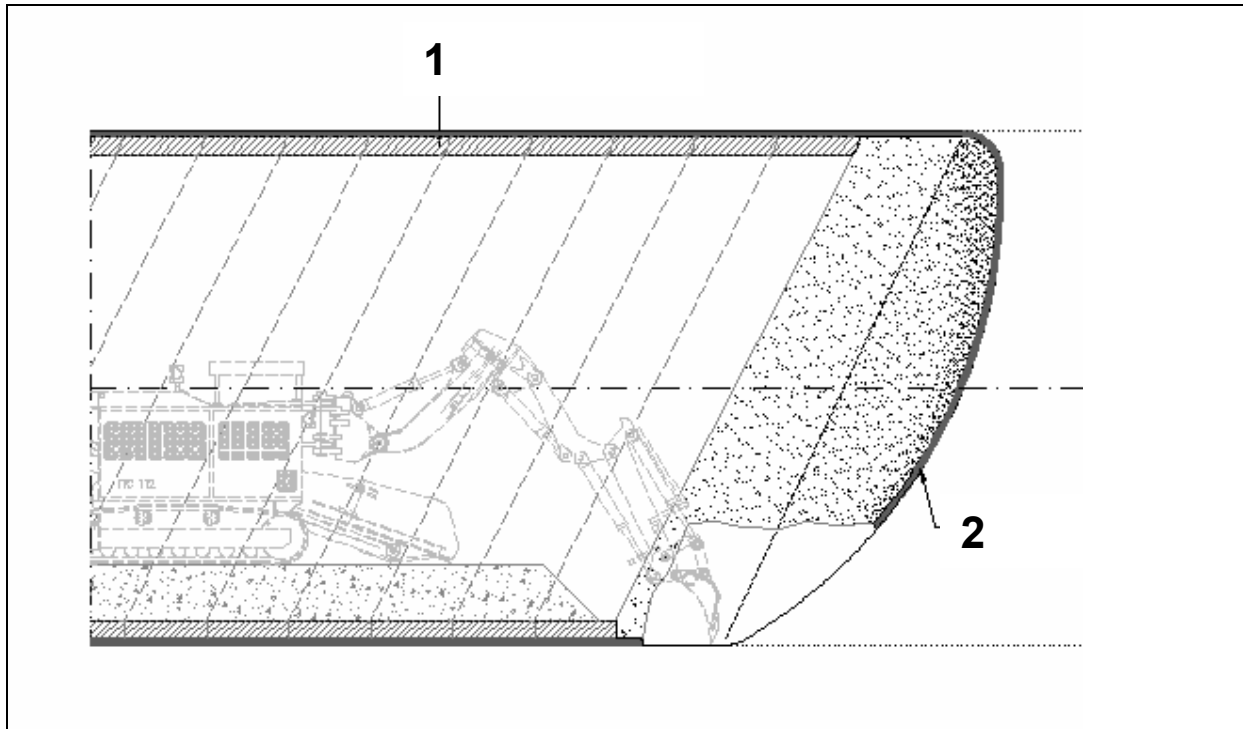
### **Konvenční metoda LaserShell™**

Metoda LaserShell™ patří mezi nejnovější metody ražby podzemních staveb. Koncepce této metody LaserShell™ byla vyvinuta společnostmi Morgan Est (Spojené království) a Beton-und Monierbau (Rakousko) pro stavbu výstavbu tunelů v tuhých jílech projektu terminálu 5 (T5) na letišti Heathrow v Londýně.

Hlavní charakteristiky metody jsou následující:

- Jedná se o jednoplášťové ostění. Prakticky veškerý nastříkaný beton tvoří součást trvalého vodotěsného ostění.
- Tunelové ostění tvoří stříkaný drátkobeton bez ocelových sítí a bez příhradových rámu. Tím je značně zvýšena bezpečnost, jelikož není nutné vstupovat do prostoru nezajištěné čelby. Navíc se tím zvyšuje kvalita ostění, protože se eliminují problémy stínování v oblasti žeber a koroze oceli. Výkony ražeb mohou být vyšší vzhledem k odpadající instalaci příhradových nosníků a sítí.
- Tvary výrubu a ostění jsou kontrolovány pomocí laserového dálkoměru TunnelBeamer™, kterým je měřena poloha libovolných bodů na povrchu výrubu nebo na vnitřním líci ostění. Údaje dálkoměru jsou průběžně ukládány do počítače umístěného v blízkosti provádění měření. Počítač obsahuje informace o prostorovém tvaru tunelu. Na monitoru se zobrazuje porovnání teoretické a skutečné polohy výrubu či ostění. Počítač ovládá inženýr, který komunikuje s obsluhou tunelbagru nebo či s operátorem trysky.

- Čelba je ukloněná a vyklenutá (obr.1), což zvyšuje stabilitu ve srovnání s klasickou svislou čelbou. Tvar čelby také snižuje sedání povrchu terénu.
- Tunel je ražen na plný profil (v Londýnských jílech do průměru 5m), což vede k minimalizování počtu pracovních spár a k zvýšení produktivity. Rychlé uzavření prstence ostění snižuje způsobené sedání povrchu terénu.



**Obr.1 Klenutý tvar čelby ražené metodou LaserShell™**  
**1 - Strukturální vrstva aplikovaná na počáteční vrstvu**  
**2 - Počáteční vrstva aplikovaná na klenutou čelbu**

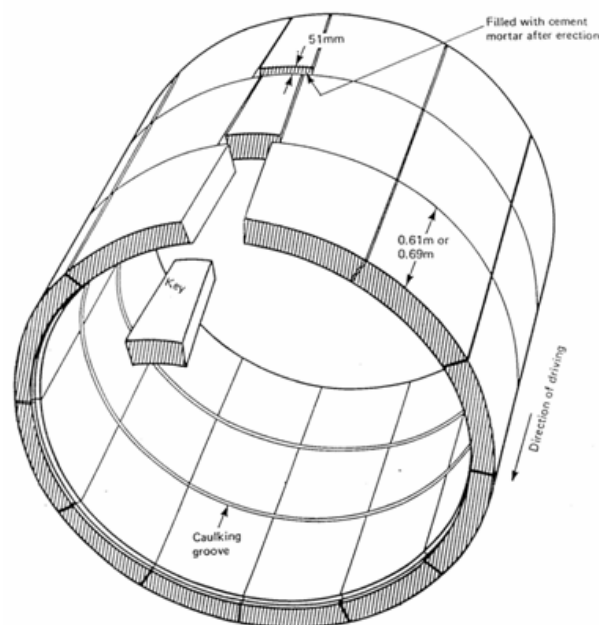
Jednoplášťové ostění je provedeno ve třech vrstvách:

- Počáteční vrstva (tl. 75mm, vyztužená ocelovými drátky) slouží pro okamžité konstrukční zajištění nově vzniklého výrubu a pro zlepšení vodotěsnosti ostění. Tato vrstva je považována za „ztracenou“ z hlediska statického návrhu, protože by mohla být vystavena působení síranů.
- Konstrukční vrstva (obecně 200 – 250mm silná, vyztužená ocelovými drátky) slouží pro vytvoření trvalé nosné konstrukce. Tuto vrstvu lze provádět v několika etapách (v závislosti na poloze a rozměrech tunelu).
- Dokončující vrstva stříkaného betonu (tl. 50mm, bez ocelových drátků) je aplikována po dokončení ražeb a její povrch je upraven ručně, aby bylo dosaženo hladkého profilu ostění. Pro tuto vrstvu je použito nižší množství urychlovače (přibližně 2%).

Před začátkem ražeb byly provedeny rozsáhlé průkazní laboratorní a polní zkoušky (Eddie a Neumann 2003). Zkoušky prokázaly, že stříkaný beton splňuje všechna předepsaná kritéria. Nicméně ražby pro T5 znamenaly první aplikaci metody LaserShell™ v plném rozsahu. Tunel Frontshunt s vnitřním průměrem 4,15m byl využit pro ověření metody. Realizace tunelu Frontshunt prokázala, že LaserShell™ je účinnou metodou budování tunelů pomocí OSB, a že chování tunelu bylo v souladu s předpoklady návrhu. Následné ražby pomocí LaserShell™ na stavbě T5 měly podobně dobré výsledky.

## Mechanizovaná ražba pomocí štítů s otevřeným čelem

Ražby v tuhých jílech pomocí štítů jsou zpravidla využívána pro kruhové tunely menších profilů, jako jsou tunely metra, kolektory či vodovodní tunely. Rameno osazené na štítu je vybaveno lžící či rotační frézou. Po dokončení jednoho záběru ražby je štít pomocí hydraulických lisů opřených o ostění za štítem posunut o 1 m vpřed. Vyražený profil bývá přibližně o 100 mm menší než průměr štítu, takže přední hrana stroje se při posouvání štítu vpřed zařezává do horniny. Potom jsou lisy zasunuty zpět a je sestaven prstenec ostění. Průřez výrubu je řízen velikostí řezací lišty osazené na přední hraně. Velikosti používaných lišt se pohybují od 0 mm do 25 mm, tak aby se sedání horniny přizpůsobovalo rychlosti ražby a horninovým poměrům. Větší rozměr lišty znamená na jednu stranu snadnější řízení, na druhou stranu ale i větší ztrátu objemu zeminy (tj. větší sedání). Pomocí štítů s otevřeným čelem je zpravidla běžné udržet velikost ztráty objemu zeminy do 2%. Průměrná rychlost ražeb se obecně pohybuje mezi 40 a 50 m za den.

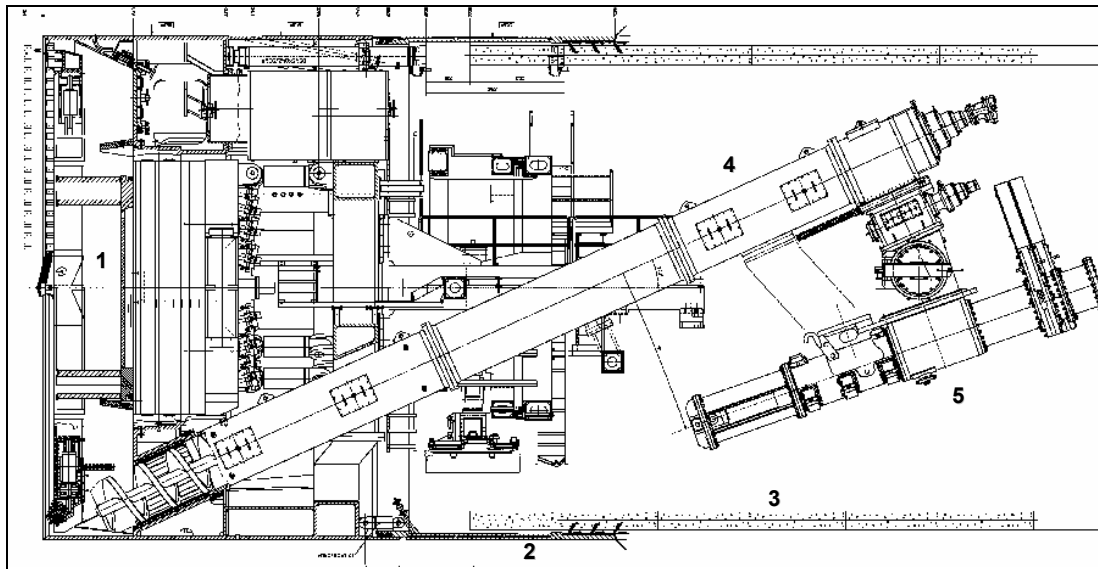


**Obr.2 Rozpírané ostění z prefabrikovaného železobetonu**

Rozpírané ostění či ostění z klínovým blokem je obecně používáno pro tunely menších kruhových profilů (s průměry do 6 m) v prostředí tuhých jílu. Tento typ ostění je velmi často používán při ražbách pomocí štítů s otevřeným (nezapaženým) čelem. Toto ostění je skládáno z prefabrikovaných železobetonových dílců, je možné využít také dílce z drátkobetonu. Mocnost dílců je zpravidla 200 - 300 mm, jejich délka bývá 1 m. Prstenec složený dílců je rozepřen do jílu pomocí klínového segmentu tak, že po vnějším obvodu nezůstala žádná dutina, kterou by bylo nutné injektovat a také nebylo nutné ostění šroubovat. Poslední segment uzamyká zbylé dílce jednoho prstence v dané poloze (obr.2). Při použití tohoto typu ostění je vhodné využít i šroubované dílce a to u prstenců u portálů či šachet. Prstence seskládané ze segmentů nejsou zpravidla zkosené. Oblouky na trase tunelu jsou realizovány pomocí překližkových vložek o různé tloušťce vkládané mezi sousední prstence. Při použití tohoto typu ostění je vhodné využít i šroubované dílce a to u prstenců u portálů či šachet.

## Mechanizovaná ražba pomocí TBM s tlakem na čelbě

Využití plnoprofilových tunelovacích strojů (TBM – Tunnel Boring Machine), s tlakem na čelbě v prostředí tuhých jílu bývá využito v případech, kdy je důležité zvýšit stabilitu čelby či omezit deformace nadloží. Proto tato technologie bývá využívána především pro tunely větších profilů v prostředí městské zástavby. V úvahu přicházejí 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, první EPB TBM bylo poprvé v tomto prostředí použito velmi nedávno.



**Obr.3 Schéma TBM pro ražbu v tuhých jílech**

Při projektování tunelu ART na letišti Heathrow vzhledem k velice nízkému nadloží tunelu vznikly vážné obavy ohledně kontroly sedání oblasti ovlivněné ražbou. Větší sedání by mohlo velmi vážně narušit chod letiště a teoretické finanční ztráty by mohly dosáhnout velmi vysokých hodnot. Proto bylo nedávno vyvinuto a ověřeno ojedinělé TBM, jehož hlavním cílem bylo snížit veškerá rizika ražby na minimum (obr.3). 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). Bylo rozhodnuto vytvořit TBM schopné pracovat ve dvou režimech – APB a EPB. Důvodem pro použití EPB TBM byly možné deprese štěrkového nadloží až do prostoru profilu tunelu, které by v případě práce pod stlačeným vzduchem znamenaly riziko okamžité ztráty tlaku (tj. erupce nadloží). Možnost nasazení EPB TBM v prostředí londýnského jílu musela být ověřena pomocí testů. 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. Průměr sestrojeného TBM byl 9,15m, délka 6,5m. Čelo stroje bylo ze 70% uzavřené. Vlastní ražba tunelu probíhala po záběrech 1,7m. Vytěžený jíl byl pomocí šnekového dopravníku dopraven k pístům Putzmeister.

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)

Uvedené unikátní TBM postavené pro ražbu v tuhých jílech splnilo očekávání. Sedání způsobené tunelovacím strojem nepřesáhlo 20mm. Celková ztráta objemu zeminy byla pouze 0,35%. 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).

## Závěr

Ražby podzemních staveb v tuhých jílech přináší řadu obtíží, nicméně současné technologie již umožňují velmi výraznou redukci veškerých rizik. Řešení dané problematiky není v České republice příliš běžné, zkušenosti ze zahraničí a zejména ze Spojeného království však dokazují, že při správném přístupu je možné úspěšně zvládnout i ražby větších profilů v prostředí městské zástavby. Tento příspěvek přináší základní metody, které mohou být pro výstavbu podzemních staveb v těchto náročných podmínkách využity. Jak již však bylo zmíněno v této publikaci, úspěšná realizace je ovlivněna celou řadou faktorů, z nichž klíčovou roli hraje lidský faktor. Dostatečná zkušenost, otevřená spolupráce a zodpovědný přístup účastníků přípravy a výstavby jsou zpravidla klíčem úspěchu.

Příspěvek byl zpracován v rámci řešení grantu GAČR 205/08/0732.

## Literatura

- Eddie, C., Neumann, C. (2003): LaserShell leads the way for SCL tunnels. *Tunnels & Tunnelling*, June 2003.
- Hilar, M., Heřt, J., Smida, R. (2008): Pre-vaulting and Sequential Construction of the Brezno Tunnel. 5th International Symposium on Sprayed Concrete, Lillehammer, Norway, April 2008.
- Hilar, M., Thomas, A., Falkner, L. (2005): Nejnovější inovace v provádění ostění ze stříkaného betonu – metoda LaserShell. *Tunel*, 4/2005.
- Hilar, M., Thomas, A. (2005): Výstavba tunelů pod letištěm Heathrow. *Tunel*, 3/2005.
- Hilar, M., Thomas, A. (2006): Přístup k řešení definitivního ostění tunelových staveb ve Velké Británii. 2. Konference Beton v podzemních a základových konstrukcích. Praha.
- Hilar, M. (2006): Návrh a aplikace TBM pro ražbu tunelu ART. 34. Konference Zakládání staveb Brno 2006 - Sborník příspěvků.
- Jones, B. - Thomas, A., Hsu, Y., S., Hilar, M. (2008): Evaluation of a novel method of SCL tunnelling. *Geotechnical Engineering Journal*.
- Powell, D. B., Clayton, C. R. I. (2007): SCL Tunnelling in stiff clays: Recent experience and future needs. Collection of keynote lectures from the WTC 2007, Prague.
- Williams I. (2005): Managing risk at T5. *Tunnels & Tunnelling*, April 2005.
- Williams, I., Neumann, C., Jager, J., & Falkner, L. (2004): Innovative Shotcrete Tunnelling for London Heathrow's new Terminal 5, EUROCK 2004 & 53rd Geomechanics Colloquium, Schubert.