

VYUŽITÍ VLÁKNOBETONU PRO VÝSTAVBU TUNELŮ POD LETIŠTĚM HEATHROW

USE OF STEEL FIBRE REINFORCED CONCRETE FOR CONSTRUCTION OF TUNNELS UNDER THE HEATHROW AIRPORT

Matouš Hilar^{1,2}

ABSTRAKT

Londýnské letiště Heathrow je nejvytíženější mezinárodní letiště na světě. V roce 2008 byl pro cestující veřejnost otevřen nový terminál 5, v rámci jeho výstavby bylo vyraženo i několik tunelů. Jednalo se o tunel pro odvedení dešťové vody (SWOT), prodloužení trasy metra Piccadilly (PiccEx), prodloužení železničního tunelu Heathrow Express (HEXEx), o silniční tunel Airside Road Tunnel (ART). Tunely SWOT, HEXEx, PiccEx byly raženy pomocí plnoprofilových štítů, ve všech případech bylo použito prefabrikované segmentové ostění z vláknobetonu zcela bez běžné prutové výztuže. Na uvedených tunelech byl použit pro výrobu segmentů vláknobeton, množství oceli (drátků) bylo 30 kg/m^3 , do betonu segmentů byla přidána polypropylenová vlákna pro zvýšení požární odolnosti. Šachty, propojky, únikové štoly a přístupové tunely byly na tunelech pro terminál 5 raženy konvenčně pomocí metody LasershellTM. Jednalo se o jednoplášťové ostění ze stříkaného betonu, kde veškerý nastříkaný beton tvoří součást trvalého vodotěsného ostění. Tunelové ostění bylo realizováno pomocí stříkaného vláknobetonu bez ocelových sítí a bez příhradových ráků.

ABSTRACT

London Heathrow Airport is the busiest international airport in the world. New Terminal 5 was opened for public in 2008, construction of the new terminal included construction of several tunnels: Storm Water Outfall Tunnel (SWOT), Piccadilly Line Extension (PiccEx), Heathrow Express Extension (HEXEx), and Airside Road Tunnel (ART). Tunnels SWOT, HEXEx, and PiccEx were excavated using tunnel boring machines (shields), precast segmental lining generated from steel fibre reinforced concrete (SFRC) without traditional steel cages was used on all three projects. Segments were generated from fibre reinforced concrete with 30 kg/m^3 of steel fibres, moreover polypropylene fibres were added to concrete to increase fire resistance of the lining. Shafts, cross passages and access tunnels of tunnels for Terminal 5 were constructed conventionally using sprayed concrete lining (SCL) method LaserShellTM. The method has a single-shell lining, all sprayed concrete is a part of the impermeable final lining. The lining was generated from sprayed concrete reinforced with steel fibres without steel meshes and without steel ribs.

doc. Ing. Matouš Hilar, PhD.

¹ Katedra geotechniky, FSv ČVUT v Praze, Thákurova 7, 166 29, Praha 6, ČR

² D2 Consult Prague, Zelený pruh 95/97 (KUTA), 140 00, Praha 4, ČR

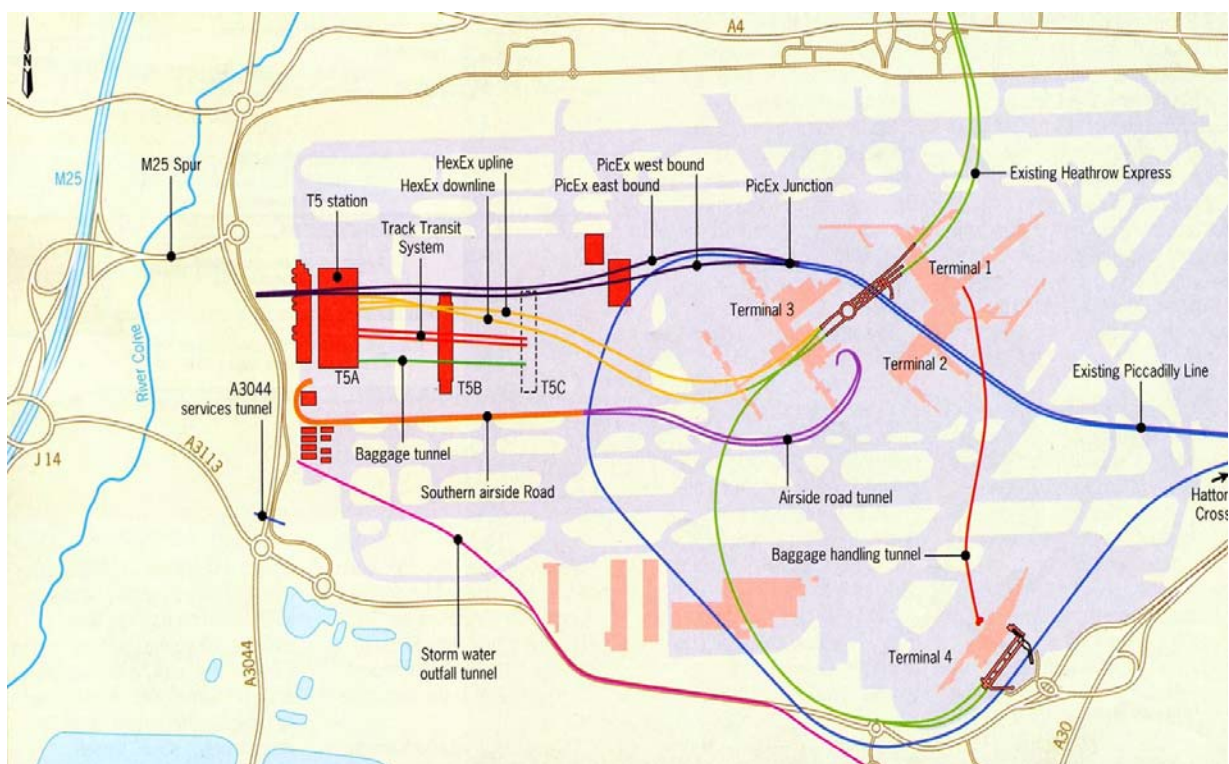
tel.: +420 604 862686, e-mail: m.hilar@seznam.cz

1. Úvod

Londýnské letiště Heathrow, které vlastní a provozuje firma BAA plc, je nejvytíženější mezinárodní letiště na světě. Heathrow dnes odbavuje přes 70 milionů cestujících ročně, nicméně jeho původní infrastruktura, skládající se ze čtyř terminálů, byla navržena na mnohem menší počty. V roce 2008 byl pro cestující veřejnost otevřen nový terminál 5, v rámci jeho výstavby bylo vyraženo i několik tunelů (obr. 1). Jednalo se o tunel pro odvedení dešťové vody (SWOT), prodloužení trasy metra Piccadilly (PiccEx), prodloužení železničního tunelu Heathrow Express (HEXEx), o silniční tunel Airside Road Tunnel (ART).

Investor, BAA plc, najal jako generálního projektanta všech podzemních staveb firmu Mott MacDonald a firmu Morgan = Vinci Joint Venture (MVJV) jako generálního dodavatele podzemních staveb. Všechny stavby, které zahrnují ostění ze stříkaného betonu (OSB), byly navrhovány rakouskou společností Beton- und Monierbau (BeMo) spolu s firmou Mott MacDonald. Obě společnosti, Mott MacDonald a BeMo, také odpovídaly za stavební dozor realizace veškerých podzemních prací. Autor článku se podílel na výstavbě uvedených tunelů jako zaměstnanec britské pobočky firmy Mott MacDonald.

Geologie v oblasti Heathrow je relativně jednotná. Na povrchu je asi 0,5 až 5,5 m mocná vrstva násypů, ležící na několika metrech terasových štěrků. Pod štěrky je mocná vrstva londýnského jílu (asi 50 m silná). Rozhraní mezi štěrky a jílem se nachází v hloubce 3 m až 10 m pod úrovní terénu. Hladina spodní vody se nachází v hloubce od 1 m do 2,5 m pod povrchem, takže většina ulehlých a písčitých štěrků je zvodnělá.



Obr. 1. Situace tunelů na letišti Heathrow
Fig. 1. Location of tunnels at the Heathrow Airport

2. Popis výstavby tunelů pro terminál 5

Prodloužení trasy metra Piccadilly (PiccEx): Letiště Heathrow je spojeno se sítí londýnského metra trasou Piccadilly, která tvoří smyčku se dvěma stanicemi pod stávajícími terminály. Účelem PiccEx je prodloužit londýnské metro k budově terminálu 5. Jedná se o 1,6 km dlouhý dvoutrubní tunel, který má vnitřní průměr 4,5 m. Napojení nových tunelů na stávající smyčku metra bylo zajištěno postavením betonové konstrukce realizované z povrchu. Součástí nových tunelů PiccEx je též šachta T5C PiccEx, která bude sloužit jako větrací a úniková šachta. Šachta má vnitřní průměr 12,5 m a hloubku 30 m. K šachtě patří několik propojovacích chodeb vedoucích do traťových tunelů. Traťové tunely se razily pomocí otevřeného štítu Dosco, který již byl použit v minulosti na stavbě trasy metra Piccadilly. Rameno osazené na štítu bylo vybaveno rotační frézou. Pro navádění štítu byl použit systém ZED. Betonové dílce 150 mm silné a 1 m dlouhé pro ostění s klínovým zámekem (obr. 2) se dopravovaly na čelbu úzkorozchodnými vlakovými soupravami. Průměrná rychlost ražby byla přibližně 50 m za den.



Obr. 2. Tunel PiccEx s rozpíraným segmentovým ostěním z vláknobetonu
Fig. 2. The PiccEx tunnel with the expanded SFRC segmental lining

Prodloužení trati Heathrow Express (HEXEx): Heathrow Express (HEX) je vysokorychlostní železniční trať spojující letiště Heathrow se stanicí Paddington v Londýně. Podobně jako v případě trasy metra Piccadilly, obsluhuje tunel všechny stávající letištní terminály, takže bylo potřebné tunely prodloužit k budově nového Terminálu 5. Ve srovnání s trasou Piccadilly byla trať Heathrow Express budována teprve nedávno, takže komory pro spojení HEXEx byly již připravené. Obě tunelové trouby HEXEx, dlouhé 1,8 km a 1,4 m, mají vnitřní průměr 5,675 m. Práce na HEXEx také zahrnovaly hloubení tří šachet (šachta T5C HEXEx o průměru 6 m, mezilehlá šachta T5C o průměru 8,5 m, a šachta T5D HexEx o průměru 10,5 m) se systémem propojovacích chodeb mezi šachtami a traťovými tunely. Šachty jsou až 30 m hluboké. Šachty a propojovací chodby budou sloužit jako únikové cesty pro cestující a pro větrání traťových tunelů. Stavba traťových tunelů se velmi podobala stavbě tunelů prodloužení trati Piccadilly, tj. s použitím renovovaného štítu Dosco, vybaveného rotační frézou (předtím byl štít použit na stavbě trati Heathrow Express). Segmenty ostění systému se zkoseným zámkovým dílcem (tloušťka 220 mm, délka 1 m) byly na čelbu dopravovány pomocí silničních dopravníků Paulo de Nicola (obr. 3). Pro navádění štítu byl použit systém ZED. Průměrná rychlost ražby byla asi 40 m za den.



Obr. 3. Přeprava segmentů pro tunel HExEx
Fig. 3. Transport of segments in the HExEx tunnel

Tunel pro odvedení dešťové vody (SWOT): Stavba Terminálu 5 a zpevněných ploch značně zvýšila rozlohu nepropustného povrchu letiště Heathrow. Účelem tunelu SWOT bylo odvedení zvýšeného objemu dešťových vod z oblasti letiště do oblasti Clockhouse Lane Pit, nacházející se asi 2 km od letiště. Ražený tunel je 4 km dlouhý a má vnitřní průměr 2,91 m. K tunelu patří čtyři asi 20 m hluboké šachty. Vtoková a výtoková šachta mají průměr 10,5 m, dvě mezilehlé šachty mají průměr 6 m. Vzdálenosti mezi šachtami jsou přibližně 1 km. Kromě potřeby pro výstavbu byly šachty požadovány i pro údržbu a provoz dokončeného systému. Tunel byl ražen pomocí TBM Lovat 131. Ostění z klínovým blokem bylo skládáno z prefabrikovaných vláknobetonových dílců 200 mm silných a 1 m dlouhých (obr. 4). Prstenec byl složený z 8 dílců. Dlouhodobé výkony TBM ražby dosáhly 38 m za den (38 prstenců), s maximem 72 m za den.



Obr. 4. Tunel SWOT s rozpíraným segmentovým ostěním z vláknobetonu
Fig. 4. The SWOT tunnel with the expanded SFRC segmental lining

Silniční tunel ART: Účelem tunelu ART je propojení oblasti centrálního terminálu se vzdálenými parkovišti letadel na západě. Dvě tunelové trouby tohoto 1,3 km dlouhého tunelu mají vnitřní průměr 8,1 m. Spirálový východní portál, nacházející se u centrálního terminálu, obsahuje 140 m dlouhou obousměrnou vozovku, vedoucí dolů do 80 m dlouhého hloubeného tunelu. Západní portál je otevřená křižovatka ve tvaru T, která umožňuje vozidlům přístup ke vzdáleným místům stání letadel nebo k Terminálu 5. Hlavní tunelové trouby jsou spojeny 12 propojkami. Velmi mělce uložený velkopřífílový tunel ART musel podcházet letištní infrastrukturu včetně přístávací dráhy a míst stání letadel, proto pro výběr tunelovacího stroje byla rozhodující minimalizace deformací. Nakonec firma Herrenknecht vyvinula plnopřífílový tunelovací štít schopný pracovat ve dvou režimech (zeminový štít a pneumatický štít). Tunelovací stroj pracoval v polouzavřeném režimu během většiny obou ražeb. Ostění tunelu bylo z 1,7 m dlouhých a 350 mm silných šroubovaných betonových segmentů. Segmenty tunelu ART byly vyztuženy ocelovou prutovou výztuží, do betonu byla přidána polypropylenová vlákna pro zvýšení požární odolnosti. Průměrný výkon tunelovacího stroje byl přibližně 12 m za den, s maximy 25,5 m za den a 142,8 m za týden. Sedání a zdvihání terénu v důsledku ražby pomocí štítu nepřesáhly 15 mm. Propojky tunelu byly vyraženy metodou LasershellTM.

3. Využití segmentového ostění z vláknobetonu

Tunely SWOT, HExEx, PiccEx byly raženy pomocí plnopřífílových štítů, ve všech případech bylo použito prefabrikované segmentové ostění z vláknobetonu zcela bez běžné prutové výztuže. Pro výrobu segmentů byl použit beton třídy C60-S30-F1. Prstence složené z několika segmentů byly rozepřeny do jílu pomocí klínového segmentu (tzv. rozpírané ostění) 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. Šroubované byly pouze prstence přiléhající k šachtám či portálům, prostor za šroubovanými segmenty byl vyplňován injektáží. Šroubované segmenty byly vyztuženy standardně armokoši. Rozpírané prstence seskládané ze segmentů nebyly zkosené. Oblouky na trase tunelu byly realizovány pomocí překližkových vložek o různé tloušťce vkládané mezi sousední prstence. Na uvedených tunelech byl použit pro výrobu segmentů vláknobeton beton, množství ocelových vláken (drátků) bylo 30 kg/m³, do betonu segmentů byla přidávána polypropylenová vlákna pro zvýšení požární odolnosti. Polypropylenová vlákna zabraňují náhlému praskání segmentů při požáru v důsledku vývinu velkého množství par, které z málo propustného segmentu nemohou unikát a způsobují tak velká tahová namáhání uvnitř dílců.

4. Využití ostění ze stříkaného vláknobetonu

Šachty, propojky, únikové štoly a přístupové tunely byly na tunelech pro terminál 5 raženy konvenčně pomocí metody LasershellTM (obr. 5). Koncepce metody LaserShellTM byla vyvinuta společnostmi Morgan Est (Británie) a Beton-und Monierbau (Rakousko). Hlavní charakteristiky metody jsou následující:

- Jedná se o jednovrstevné ostění. Prakticky veškerý nastříkaný beton tvoří součást trvalého vodotěsného ostění.
- Tunelové ostění tvoří stříkaný vláknobeton bez ocelových sítí a bez příhradových rámců. 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 TunnelBeamerTM, 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, což zvyšuje stabilitu ve srovnání s klasickou svislou čelbou. Tvar čelby také snižuje sedání povrchu terénu.
- Tunel je ražen na plný profil, což vede k minimalizování počtu pracovních spár a k zvýšení produktivity. Rychlé uzavření prstence ostění snižuje způsobené sedání povrchu terénu.



Obr. 5. Stříkané ostění z vláknobetonu realizované metodou LaserShellTM
 Fig. 5. Sprayed SFRC lining constructed by the method LaserShellTM

Jednoplášťové ostění ze stříkaného vláknobetonu je provedeno ve třech vrstvách:

- Počáteční vrstva (tl. 75mm, vyztužená ocelovými vlákny) 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 vlákny) 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 vláken) je aplikována po dokončení ražeb a její povrch je upraven ručně, aby bylo dosaženo hladkého profilu ostění (obr. 6). Pro tuto vrstvu je použito nižší množství urychlovače (přibližně 2%).

Zkušební krychle, vytvořené z betonové směsi, a jádra vrtů, odebrané z ostění v průběhu stavby tunelu, ukázaly, že stříkaný beton měl na dané stavbě soustavně vysokou kvalitu. Dosahovaná pevnost značně přesahovala pevnost běžných směsí stříkaného betonu. Jádrové vzorky ukázaly průměrnou 28-denní pevnost 68MPa, s maximálními hodnotami přesahujícími 80MPa. Pevnost mladého stříkaného betonu též vyhověla požadavkům. Tato vysoká pevnost neměla žádné zjevné negativní účinky na dlouhodobé chování stříkaného betonu, ani nezpůsobovala závažné problémy při jeho nástřiku.



Obr. 6. Dokončující vrstva ze stříkaného betonu
Fig. 6. The final layer from sprayed concrete

5. Závěr

Vláknobeton je materiál, který je stále častěji používán pro ostění podzemních staveb. Tento materiál je nejčastěji používán ve dvou základních formách: jako stříkaný vláknobeton pro ostění konvenčně ražených tunelů nebo jako prefabrikovaný vláknobeton pro segmentová ostění tunelů ražených plnoprofilovými tunelovacími štíty. Při výstavbě cca 13 km tunelů pro nový terminál 5 bylo ostění všech tunelů realizováno z vláknobetonu. Použití vláknobetonu se na dané stavbě osvědčilo, poruchy ostění byly zaznamenány pouze v několika výjimečných případech.

Tento příspěvek byl zpracován s podporou grantu GAČR P104/10/2023.

Literatura:

- P. Clarke, S. Thacker, I. Williams (2003): Flying ahead at Terminal 5. *Tunnels & Tunnelling*, September 2003.
- I. Williams, S. Thacker (2003): The ART of success under Heathrow. *Tunnels & Tunnelling*, September 2003.
- C. Eddie, C. Neumann (2003): LaserShell leads the way for SCL tunnels. *Tunnels & Tunnelling*, June 2003.
- I. Williams (2005): Managing risk at T5. *Tunnels & Tunnelling*, April 2005.
- M. Hilar, A. H. Thomas (2005): Tunnels Construction under the Heathrow Airport. *Tunel* 3/2005.
- M. Hilar, A. H. Thomas, L. Falkner (2005): Nejnovější inovace v provádění ostění ze stříkaného betonu – metoda LaserShell. *Tunel* 4/2005.