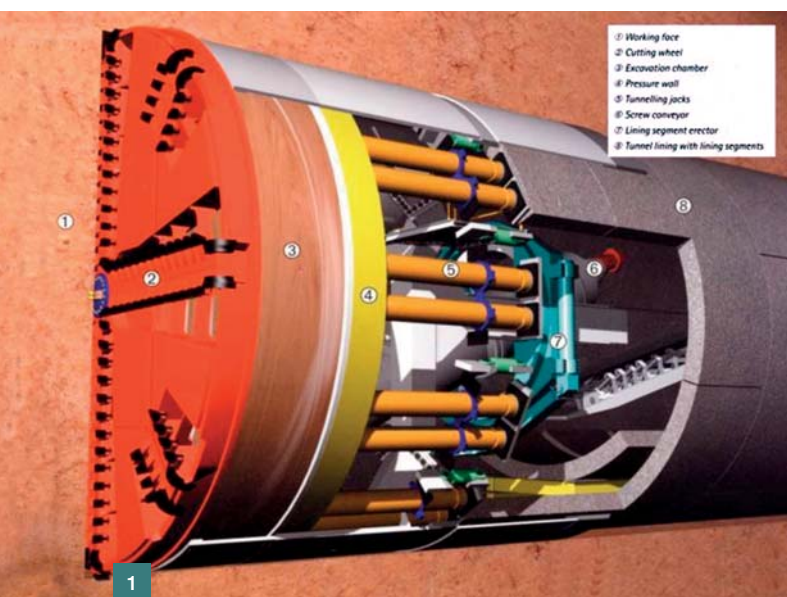


# PŘEHLED TUNELŮ S PREFABRIKOVANÝM SEGMENTOVÝM OSTĚNÍM Z DRÁTKOBETONU ■ OVERVIEW OF TUNNELS WITH THE PRECAST SEGMENTAL LINING FROM SFRC



## Matouš Hilar

Drátkobeton je konstrukční stavební materiál, který stále častěji začíná nahrazovat prostý beton a železobeton. Vhodným výběrem drátků, jejich zakomponováním do čerstvého prostého betonu při jeho výrobě, optimálním složením čerstvého betonu a optimálním postupem výroby je možné vyrobit prefabrikované drátkobetonové segmenty tunelového ostění, kterými je možné nahradit standardní železobetonové segmenty. Využití drátkobetonu pro segmentová ostění tunelů je obecně ve světě rostoucí trend vzhledem k výhodám oproti běžným železobetonovým segmentům. Zkušenosti s využitím drátkobetonu pro segmentová ostění tunelů jsou podrobněji probrány v následujícím článku. ■ **Steel fibre reinforced concrete (SFRC) is a structural material, which started to more frequently replace plain concrete and steel bar reinforced concrete. It is possible by means of the proper selection of wires, their incorporation into fresh plain concrete during its production, optimal composition of fresh concrete and optimal production procedure to produce pre-cast SFRC segments for tunnel lining, which can replace standard steel bar reinforced concrete segments. The use of steel fibre reinforced concrete (SFRC) for segmental linings of tunnels has become a worldwide growing trend due to the benefits if compared with common steel bar reinforced concrete segments. Experience with SFRC segments are discussed in the following paper.**

Mechanizovaná ražba pomocí plno-profilových tunelovacích strojů (technologie TBM) je stále častěji využívána pro výstavbu tunelů. Hlavním důvodem je vyšší rychlost ražby, což v případě delších tunelů znamená nižší cenu výstavby, dalším velmi důležitým aspektem je vyšší bezpečnost výstavby (minimalizace rizika nadměrných deformací). Nevýhodou je relativně vysoká pořizovací cena těchto strojů, čas potřebný pro jejich sestavení a obtížné řešení neočekávaných geologických podmínek (např. nebezpečí zablokování stroje v masivu).

S prováděním mechanizovaných ražeb pomocí štítů úzce souvisí realizace definitivní konstrukce ostění, která je budována bezprostředně na místě ražby přímo za tunelovacím strojem (obr. 1). Toto ostění kruhového tvaru je tvořeno prstenci, které jsou zpravidla složeny z prefabrikovaných železobetonových segmentů, jednotlivé dílce jsou umísťovány do požadované pozice pomocí erektoru (hydraulické rameno v zadní části tunelovacího stroje). Jeden prstenec bývá většinou složen z několika tvarově shodných dílců, závěrečný dílec (klenák) bývá často tvarově odlišný. Během výstavby jsou jednotlivé dílce zpravidla spojovány pomocí šroubů a prostor mezi ostěním a horninovým masivem bývá vyplňován injektážní směsí.

Segmenty z prefabrikovaného betonu mohou být instalovány do ostění tune-

lu po dosažení požadované pevnosti. Ostění tunelů ražených plno-profilovými tunelovacími stroji je kruhové, což je výhodný tvar z hlediska zamezení vzniku vyšších ohybových momentů. V běžných geotechnických podmínkách jsou tedy segmenty tvořící prstenec kruhového ostění tunelu namáhány především tlakovými normálovými silami.

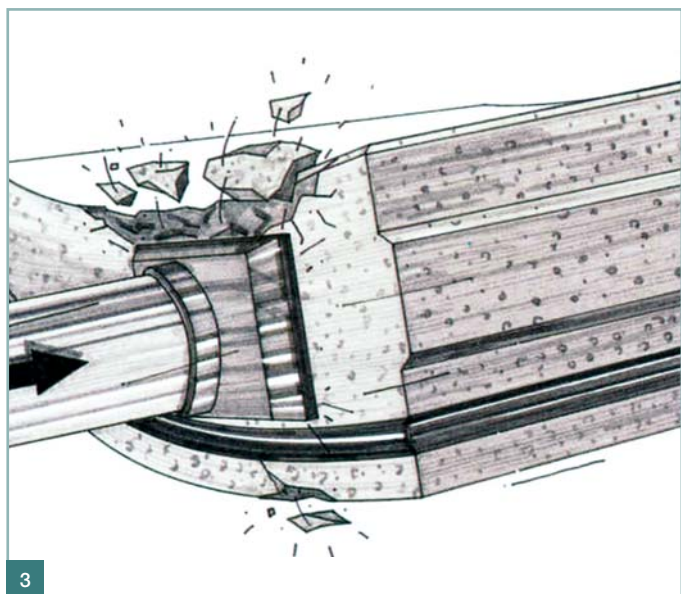
To však neplatí během výstavby. Segmenty musí odolávat namáhání ohybovými momenty během vyndávání z forem, během skladování (obr. 2) a přepravy. Dále musí odolávat silám vzniklým teplotním namáháním dílců, zejména však musí odolávat velkému zatížení hned po zabudování do ostění tunelu, které je vyvozeno hydraulickými lisami posouvajícími štít vpřed. Poslední ze zmiňovaných namáhání bývá často rozhodující pro jejich návrh.

## VLASTNOSTI DRÁTKOBETONOVÝCH SEGMENTŮ

Cena drátkobetonových segmentů obecně vychází lépe v porovnání se železobetonovými, přestože vlastní materiál (ocelové drátky) je dražší než klasická betonářská výztuž. Úspory vznikají především díky nižším nárokům na práci (odpadá výroba a osazování armokošů), dále také dochází k úspore potřebné oceli. Deformace drátkobetonu při dosažení pevnosti betonu v tahu neroste skokově, ale díky rov-

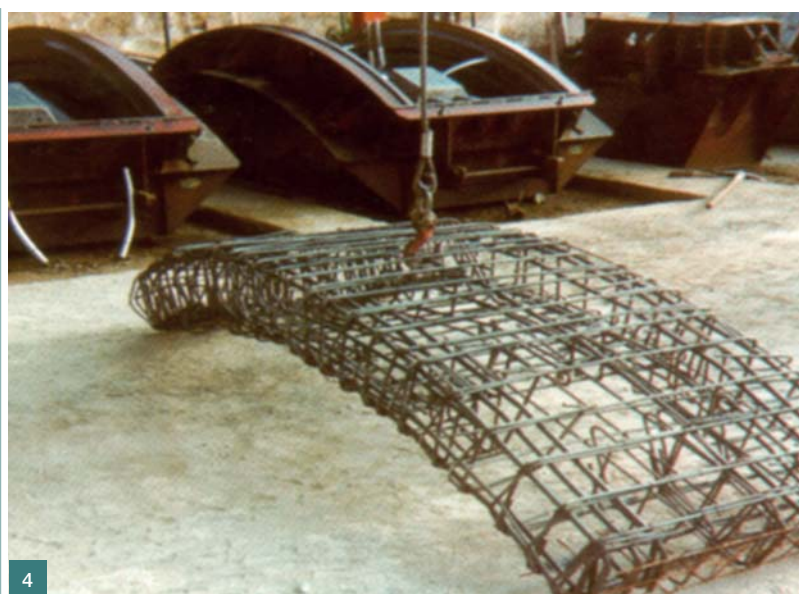
Obr. 1 Schéma tunelovacího štítu zatlačovaného lisy zapřenými o segmentové ostění ■ Fig. 1 Scheme of tunnelling shield pushed by rams supported by segmental lining

Obr. 2 Manipulace se segmenty ve výrobní hale (foto Hilar) ■ Fig. 2 Manipulation with segments in a production factory (photo Hilar)



Obr. 3 Odlamování krycí vrstvy železobetonových segmentů při zatížení lisy [10] ■ Fig. 3 Spalling of a cover zone of segments reinforced by steel bars [10]

Obr. 4 Armokoš před umístěním do formy [9] ■ Fig. 4 A steel cage prior placement to a mould [9]



noměrně rozmístěným drátkům narůstá deformace pozvolna. To je způsobeno průběžným aktivováním drátek a jejich postupným vytrháváním z betonu. Velikost trhlin zůstává nízká, což je příznivé z hlediska požadované vodonepropustnosti. Celková pevnost v tahu (ohybu) je však výrazně nižší než u železobetonu.

Chování železobetonu je odlišné. Při dosažení pevnosti betonu v tahu nastane nárůst deformace až do plné aktivace výztuže. Tak vzniknou větší trhliny než u drátkobetonu. Nicméně poté se deformace ustálí a roste přibližně lineárně až do dosažení meze kluzu oceli. Ta je výrazně vyšší než pevnost drátkobetonu v tahu. Proto je drátkobetonové ostění vhodné především do podmínek s nízkým ohybovým namáháním, kam kruhové ostění z prefabrikovaných segmentů obecně patří. Pokud hrozí vznik většího ohybového namáhání segmentů, tak je nutné drátkobetonové segmenty opatřit i klasickou prutovou výztuží.

Segmenty jsou namáhány velkými zatíženími způsobenými hydraulickými lisy tunelovacích strojů. Neopatrnou manipulací může docházet k narázům do segmentů. Železobetonové segmenty jsou kvůli zajištění minimálního krytí výztuže při povrchu, hranách a rozích zcela nevyztuženy. Jejich namáhání je však v těchto místech nejkritičtější. Pokud dojde k nárazu nebo nadměrnému zatížení, pak se části železobetonových segmentů drojí a odlamují (obr. 3). Aby byla zaručena nároková životnost konstrukce, musí se poškozené segmenty opravit nebo vyměnit, což je časově, finančně a technicky velmi nepříjemné.

Použití ocelových drátků namísto klasické betonářské výztuže může být výhodnou alternativou. Drátky jsou po dílci rovnoměrně rozptýleny, minimální krytí výztuže pro zamezení koroze není relevantní. Orientace drátků je v prostoru chaotická, což umožňuje přenos tahových napětí všemi směry. Tím se výrazně zvyšuje odolnost segmentů proti odlamování, drolení a nárazu.

Do železobetonových segmentů se zpravidla umísťuje výztuž ve formě tzv. ocelového armokoše. Ten se skládá z výztužných sítí při vnějším a vnitřním povrchu segmentu oddělených přívažnými třmínky. Hlavní funkcí výztuže je přenos tahových napětí vzniklých při výrobě, skladování, přepravě a montáži. Tvar výztužného koše musí být kruhový, musí se bez problémů vejít do odlévací formy a respektovat minimální krytí výztuže (obr. 4). Vyztužení železobetonových segmentů dosahuje zpravidla hodnot okolo 100 kg/m<sup>3</sup>.

Drátkobetonový dílec je oproti tomu vyztužen pouze homogenně rozmístěnými drátky, všesměrně orientovanými. Tím dochází k bezproblémovému přenosu tahových sil všemi směry. Pracnost s přípravou a umísťováním výztužného koše tudíž zcela odpadá. Výroba je jednodušší, dávkovací zařízení namíchá vlákna do betonu a směsí se poté vyplní forma. Spotřeba ocelových drátků je většinou mezi 30 až 50 kg/m<sup>3</sup>, což je výrazně méně než u železobetonových segmentů.

Základem dobré ochrany proti korozi je kvalita betonu (malá pórovitost a propustnost), která se dá dosáhnout malým vodním součinitelem, plastifikátory nebo použitím popílku. Čím je beton kvalitnější, tím lépe odolává karbonataci a agresi chloridových iontů a sulfátů. Výhodou drátkobetonu oproti železobetonu je nemožnost vzniku koroze. Drátky jsou ve směsi rozmístěny nerovnoměrně, zpravidla se nedotýkají navzájem, jsou zcela obklopeny a chráněny alkalickým prostředím betonu. Šíření koroze je tímto účinně zabráněno. Navíc se tím i minimalizuje nebezpečí poruch v důsledku nárůstu objemu korodující oceli. Drátky na povrchu konstrukce korodují a mohou způsobovat neestetické zbarvení povrchu betonu. Ze statického hlediska to však nemá vůbec žádný význam. Pokud je z estetických důvodů žádoucí, aby ke korozi nedocházelo ani na povrchu konstrukce, tak je možné využít pozinkovaných vláken.

Drátkobetonový dílec je oproti tomu vyztužen pouze homogenně rozmístěnými drátky, všesměrně orientovanými. Tím dochází k bezproblémovému přenosu tahových sil všemi směry. Pracnost s přípravou a umísťováním výztužného koše tudíž zcela odpadá. Výroba je jednodušší, dávkovací zařízení namíchá vlákna do betonu a směsí se poté vyplní forma. Spotřeba ocelových drátků je většinou mezi 30 až 50 kg/m<sup>3</sup>, což je výrazně méně než u železobetonových segmentů.

Základem dobré ochrany proti korozi je kvalita betonu (malá pórovitost a propustnost), která se dá dosáhnout malým vodním součinitelem, plastifikátory nebo použitím popílku. Čím je beton kvalitnější, tím lépe odolává karbonataci a agresi chloridových iontů a sulfátů. Výhodou drátkobetonu oproti železobetonu je nemožnost vzniku koroze. Drátky jsou ve směsi rozmístěny nerovnoměrně, zpravidla se nedotýkají navzájem, jsou zcela obklopeny a chráněny alkalickým prostředím betonu. Šíření koroze je tímto účinně zabráněno. Navíc se tím i minimalizuje nebezpečí poruch v důsledku nárůstu objemu korodující oceli. Drátky na povrchu konstrukce korodují a mohou způsobovat neestetické zbarvení povrchu betonu. Ze statického hlediska to však nemá vůbec žádný význam. Pokud je z estetických důvodů žádoucí, aby ke korozi nedocházelo ani na povrchu konstrukce, tak je možné využít pozinkovaných vláken.

## TUNELY S DRÁTKOBETONOVÝMI SEGMENTY

První pokusy o využití drátkobetonu jako konstrukčního materiálu při výstav-

Tab.1 Přehled některých projektů tunelů s drátkobetonovými segmenty ■ Tab.1 Overview of some tunnelling projects with SFRC segments

	Název projektu	Země	Účel	Rok dokončení	Celková délka [km]	Vnitřní profil [m]	Tloušťka ostění [mm]	Množství drátků [kg/m <sup>3</sup> ]	Prutová výztuž
1	Abatamarco	Itálie	Vodovodní		18	3,5		40	ne
2	Fanaco	Itálie	Vodovodní		4,8	3	200		
3	Neapolské metro	Itálie	Metro	1995	5,2	5,8	300	40	ne
4	Metro Janov	Itálie	Metro			6,2		25	ano
5	Barcelona – linie 9	Španělsko	Metro	2014	43	12	350	30 a 25	ano
6	Madrid metro	Španělsko	Metro			10		25	ano
7	Heathrow – zavazadlový	Velká Británie	Zavazadlový	1995	1,4	4,5	150	30	ne
8	Jubilee Line Extension	Velká Británie	Metro	1999	2,4	4,45	200	30	ne
9	Channel Tunnel Rail Link	Velká Británie	Železniční	2007	48	7,15	350	30	ne
10	Heathrow – HexEx	Velká Británie	Železniční	2008	3,2	5,675	220	30	ne
11	Heathrow – PicEx	Velká Británie	Metro	2008	3,2	4,5	150	30	ne
12	Heathrow – SWOT	Velká Británie	Vodovodní	2006	4	2,9	200	30	ne
13	Prodloužení DLR	Velká Británie	Železniční	2009	3,6	5,3	250		
14	Portsmouth	Velká Británie	Vodovodní		8	2,9			
15	Sorenberg	Švýcarsko	Plynovodní	2002	5,2	3,8	250	40	ne
16	Oenzberg – TBM	Švýcarsko	Železniční	2004	0,1	11,4	300	30	ano
17	Oenzberg – štít	Švýcarsko	Železniční	2004	1	11,4	300	60	ne
18	Hachinger Stollen	Německo	Vodovodní	1998	7	2,2	180		
19	Hofoldingen Stollen	Německo	Vodovodní	2007	17,5	2,9	180	40	ne
20	Wehrhahlinie Düsseldorf	Německo	Metro	2014		8,3		30	ne
21	Teplovod v Kodani	Dánsko	Teplovodní	2009	3,9	4,2	300	35	ne
22	Kanalizace Big Walnut	USA	Kanalizační	2008	4,8	3,7		35	ano
23	San Vicente	USA	Vodovodní	2006	13,2	2,6	177	30	ne
25	Brightwater East	USA	Kanalizační	2010	4,2	5		35	ne
26	Brightwater Central	USA	Kanalizační	2010	9,7	4,7	325	40	ne
27	Brightwater West	USA	Kanalizační	2010	6,4	3,7	325	35	ne
28	La Esperanza	Ekvádor	Vodovodní	2002	15,5	4	200	30	ne
29	Sao Paulo metro	Brazílie	Metro		1,5	8,43	350	35	
30	Gold Coast	Austrálie	Průmyslový / vodovodní	2008	4,2	2,8	200	35	ne
31	Hobson Bay	Nový Zéland	Kanalizační	2009	3	3,7	250	40	ne
32	Lesotho Highlands	Jižní Afrika	Vodovodní	1995	0,1			50	ne
33	STEP Abu Dhabi	Spojené Arabské Emiráty	Kanalizační	2014	15,6	5,5		30	ano
34	Štoly MRT Line	Singapur	Technologický		1,4	5,8		30	ne
35	Železniční tunely Singapur	Singapur	Železniční			5,8		35	ne
36	Brisbane Airport Link	Austrálie	Silniční		4	11,34	400		

bě tunelů začaly v první polovině 70. let 20. století, kdy bylo několikrát zkušebně použito segmentové ostění z drátkobetonu. V roce 1982 nastal výraznější nárůst využití drátkobetonu pro prefabrikovaná segmentová ostění tunelů. V jižní Itálii a na Sicílii bylo vybudováno několik vodovodních tunelů právě s tímto systémem ostění (celkem cca 20 km). Tato technologie se osvědčila a v roce 1992 byl poprvé použit drátkobeton pro výstavbu dopravního tunelu. Jednalo se prodloužení Neapolského metra v Itálii.

Za zmínku stojí i výzkum drátkobetonových segmentů v Československu [7]. V letech 1984 až 1988 byly provedeny série zkoušek na prefabrikovaném ostění sběrné kanalizační štoly kruhového průřezu o průměru 3,6 m. Prstenec byl složen ze šesti dílů o tloušťce 200 mm, navzájem spojených na pero a drážku. Dávkovalo se poměrně hodně drátku (98 kg/m<sup>3</sup>), drátky byly hladké a přímé. Byly provedeny zkoušky jednotlivých segmen-

tů i celých prstenců. Zkouškami bylo ověřeno několikanásobné překročení požadované únosnosti a únosnost srovnatelná s železobetonovými segmenty. Zkouškami oblasti styku jednotlivých prvků byla doložena mnohánásobně vyšší spolehlivost proti mechanickému poškození. Stejně zvýšení bylo prokázáno i v oblasti hran prvků. Tyto skutečnosti jednoznačně potvrdily podstatné snížení potřebných oprav.

Od doby prvních zkoušek a aplikací byly drátkobetonové segmenty úspěšně nasazeny na několika desítkách projektů [1, 10], především v rámci Evropské Unie, ale i jinde ve světě (Austrálie, USA, Brazílie atd.). Převážně se stále jedná o tunely menších profilů (vodovodní, plynovodní či teplovodní tunely), v některých případech jde o úseky metra (Londýn, Barcelona, Neapol, Sao Paulo, Madrid a Janov) nebo o železniční tunely (Channel Tunnel Rail Link, Oenzberg atd.). Nicméně se již začínají objevovat první apli-

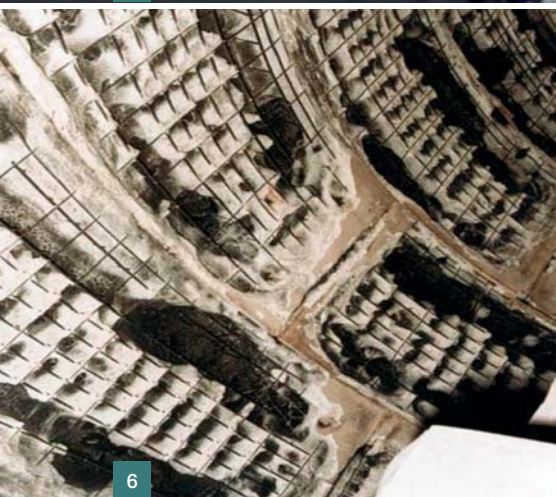
kace drátkobetonových segmentů pro silniční tunely – Brisbane Airport Link vnitřního profilu 11,34 m [2], Yokohama Circular Route Northern Section vnitřního profilu 11,5 m [12]. Přehled některých projektů se základními údaji je uveden v tab. 1 [1].

### Tunely na železniční trati mezi Londýnem a Eurotunelem (CTRL)

Prozatím nejvýznamnější nasazení vláknobetonového segmentového ostění proběhlo na části 112 km dlouhé trati Channel Tunnel Rail Link (CTRL nebo také High speed 1) spojující londýnskou stanicí St. Pancras s terminálem Cheriton na britském konci Eurotunelu. Návrhová rychlost trati je 230 km/h a umožňuje absolvovat cestu z Londýna do Paříže vlakem za 2 h. Úsek dlouhý 24 km, ve kterém byly vláknobetonové segmenty použity, je veden dvěma jednokolejnými tunelovými trubami (obr. 5). Výstavba probíhala v letech 2003 až 2004 a do provozu byl tunel uveden v roce 2007.



5



6

Obr. 5 Šroubované segmentové ostění z drátkobetonu na tunelech CTRL [9]

■ Fig. 5 Bolted SFRC segmental lining of CTRL tunnels [9]

Obr. 6 Poničené železobetonové segmentové ostění Eurotunelu po požáru v roce 1996 [9] ■ Fig. 6 Destroyed bar reinforced segmental lining of the Eurotunnel after fire in 1996 [9]

Ražba byla prováděna zeminovými štíty.

Profil tunelů je 7,15 m. Prstenec je složen z devíti segmentů a závěrečného lichoběžníkového klenáku. Délka prstence je 1,5 m a tloušťka ostění je 350 mm. Segmenty jsou šroubované a injektované, nepropustnost ostění je zajištěna těsnícími pásy.

Pro výrobu segmentů byl použit nízko-propustný beton o návrhové pevnosti v tlaku 60 MPa, vyztužený 30 kg/m<sup>3</sup> ocelových vláken. Během stavby bylo spotřebováno celkem 6 500 t těchto vláken. Jedním z rozhodujících důvodů pro výběr právě vláknobetonového ostění bylo zaručení životnosti let při působení agresivní podzemní vody s vysokým obsahem chloridů. Při použití železobetonu by segmenty byly vystaveny vysokému riziku koroze výztuže.

Po špatných zkušenostech s požáry v Eurotunelu v roce 1996, kdy klasické železobetonové ostění tloušťky 500 mm bylo téměř zničeno (obr. 6),

byla požární odolnost ostění CTRL věnována zvýšená pozornost. CTRL bylo raženo ve zvodnělých píscích s vysokým hydrostatickým tlakem až 3 bary. Mechanické poškození segmentů při požáru by mělo za následek zatopení tunelu vodou i pískem. (Eurotunnel byl ražen především ve stabilní křídě s nízkou propustností, proto k zatopení při poškození ostění požárem v daném případě nedošlo). Proto bylo rozhodnuto přidat k ocelovým vláknům i 1 kg/m<sup>3</sup> polypropylenových vláken.

Jednou z velkých výhod použití vláknobetonu se po dokončení stavby ukázal být nízký podíl poškozených segmentů během výroby a instalace. Během výroby muselo být pouhých 0,8 % z celkových 260 tisíc kusů odstraněno a 2,8 % opraveno. Během instalace nebyl žádný segment zničen. 2,2 % bylo lehce poškozeno bez nutnosti opravy, 0,3 % bylo lehce poškozeno s nutností jednoduché opravy a pouze jeden segment, tedy 0,0004 %, vyžadoval opravu náročněj-

ší. Nejčastější poruchou byl vznik trhlin kolmých na osu tunelu. Ty se sanovaly postříkem nebo nátěrem epoxidovou pryskyřicí.

### Tunely pod londýnským letištěm Heathrow

Londýnské letiště Heathrow, které vlastní a provozuje firma BAA plc, je nejvytíženějším letištěm na světě. Geologie v oblasti Heathrow je relativně jednotná, veškeré tunely pod letištěm byly raženy v londýnských jílech.

První tunel využívající vláknobetonového ostění na území Velké Británie byl dostaven v roce 1995 právě na letišti Heathrow a slouží k přepravě zavazadel mezi terminály 1 a 4. Je dlouhý 1,4 km, s vnitřním profilem 4,5 m. Původní návrh uvažující použití 100 kg/m<sup>3</sup> klasické betonářské výztuže byl kompletně nahrazen novým, se spotřebou 30 kg/m<sup>3</sup> ocelových vláken. Mocnost ostění mohla být zmenšena z 200 mm na 150 mm. V daném případě je odhadováno, že se díky použití vláknobetonového ostění namísto železobetonového ušetřilo až 40 % výrobních nákladů.

Vzhledem k potřebnému navýšení kapacity letiště bylo nutné vybudovat nový Terminál 5, který byl pro cestující otevřen v roce 2008. V rámci výstavby nové budovy terminálu bylo vyraženo i několik tunelů [5]. Jednalo se o tunel pro odvedení dešťové vody (SWOT), který je 4 km dlouhý a má vnitřní průměr 2,91 m. Dále o prodloužení trasy metra Piccadilly (PiccEx) – dvě jednokolejné trouby délky 2 x 1,6 km vnitřního průměru 4,5 m (obr. 7). Dále bylo postaveno prodloužení železničního tunelu Heathrow Express (HexEx). Obě tunelové trouby HexEx, dlouhé 1,8 km a 1,4 km, mají vnitřní průměr 5,675 m.

Ve všech uvedených případech bylo využito rozpírané segmentové ostění s množstvím drátků 30 kg/m<sup>3</sup>. Rozpírané ostění (wedgeblock nebo expanded lining) není šroubováno, navíc rub ostění není injektován. Prstence segmentového ostění jsou rozepřeny do jílu pomocí klínového segmentu zatlačeného do výsledné polohy lisu stroje (obr. 8), po vnějším obvodu ostění tudíž nezůstane žádná dutina. Poslední segment uzamyká zbylé dílce prstence v požadované poloze.

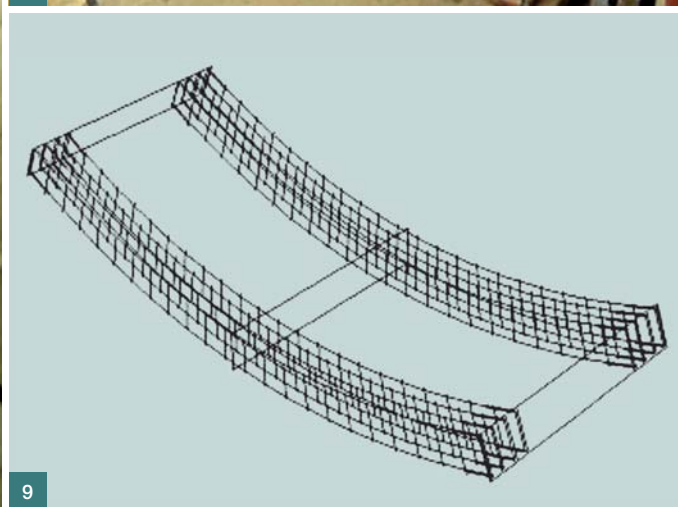
V uvedených případech bylo použito velmi subtilní ostění, v případě SWOT byla mocnost ostění 150 mm, v případě PiccEx 200 mm a v případě HexEx



7



8



9

220 mm. Během výstavby nevznikly žádné výraznější problémy s únosností segmentů (neobjevilo se žádné praskání segmentů).

### Trasa 9 metra v Barceloně

Nová trasa 9 barcelonského metra je momentálně ve výstavbě a po jejím dokončení v roce 2014 bude 43 km dlouhá se 43 stanicemi. Výška nadloží byla původně uvažována 35 až 60 m, nicméně kvůli závalu při předešlé stavbě linky 5 byl projekt přehodnocen a v místě křížení těchto linek dosahuje výška nadloží 90 m.

Geotechnické podmínky jsou velmi rozličné, mění se ze žuly přes jíly a písky až po štěrk. Převážná část tunelů bude mít průměr 12 m (70 %), některé části však pouze 9 m. 95 % ražeb probíhá pomocí pěti plnoprofilových tunelovacích strojů. Prstenec je dlouhý 1,8 m, 350 mm mocný a tvořen dohromady sedmi segmenty širokými 4,56 m a závěrečným klenákem.

Ostění tunelu je prefabrikované betonové, vyztužené kombinací ocelových

vláken a běžné betonářské výztuže. Původní návrh uvažoval vyztužení běžnou betonářskou výztuží ve formě armokoše o hmotnosti  $97 \text{ kg/m}^3$  doplněnou ocelovými vlákny pro zamezení vzniku trhlin v množství  $30 \text{ kg/m}^3$ . Původní návrh vůbec nepočítal s drátkou jako s nosným prvkem. Vyztužení bylo však po provedených laboratorních zkouškách optimalizováno.

Nakonec byl jako výztuž zvolen odlehčený armokoš hmotnosti  $31 \text{ kg/m}^3$  (obr. 9), ocelová vlákna při dávkování  $35 \text{ kg/m}^3$  a polypropylenová vlákna. Během výstavby také proběhlo úspěšné testování segmentů bez armokoše s obsahem ocelových drátků  $60 \text{ kg/m}^3$  na univerzitě v Bergamu v Itálii. Nicméně stavební sdružení dodavatelských firem segmentů bez armokošů prozatím nevyužilo. Celková spotřeba ocelových vláken během výstavby projektu bude přibližně 15 tisíc t.

Během instalace segmentů se počátku vyskytovaly problémy vzniku trhlin a mechanického poškození segmentů. Obojí bylo pravděpodobně

způsobeno excentrickým namáháním, zapříčiněným excentrickým umístěním či natočením hydraulických lisů. Dalším důvodem mohly být nerovnosti spojů mezi segmenty. Uvedené problémy byly během výstavby výrazně redukovány.

### ZÁVĚR

Drátkobeton jako materiál má z pohledu prefabrikované výroby segmentů ostění pro tunely ražené plnoprofilovými tunelovacími štíty některé výhodné vlastnosti, které byly podrobně popsány v článku. Proto byl drátkobeton pro segmentová ostění využit na řadě projektů. Převážně se jednalo o tunely menších profilů (vodovodní, plynovodní či teplovodní tunely), v některých případech šlo o úseky metra (Londýn, Barcelona či Neapol). Nejrozsáhlejší využití drátkobetonových segmentů bylo na tunelech pro vysokorychlostní železnici Paříž–Londýn (projekt Channel Tunnel Rail Link), kde bylo pomocí plnoprofilových tunelovacích strojů postaveno 2 x 24 km jednokolejných tunelů, je-

## Literatura:

- [1] *Froněk M.*: Ostění tunelů z vláknobetonových segmentů, Bakalářská práce, FSv ČVUT v Praze. 2011
- [2] *Harding A., Chappell M.*: Design of Steel Fibre Reinforced Segmental Linings – Reflections on Design Challenges, WTC 2012, Bangkok, Thailand. 2012
- [3] *Herka P., Schepers R.*: Využití vláknobetonu v podzemním stavitelství, Seminář CzTA, 2012
- [4] Herrenknecht: Einfachschild-TBM: Sicher durch brüchigen Fels; 2010
- [5] *Hilar M., Thomas A.*: Výstavba tunelů pod letišťem Heathrow; časopis Tunel 3/2005
- [6] *Jones J.*: Steel and Synthetic Fibers in Tunnels and Mines; BASF, 2009
- [7] *Krátký J., Trtík K., Vodička J.*: Drátkobetonové konstrukce, Česká společnost pro beton a zdivo, ČKAIT, Praha. 1999
- [8] *Rivaz B.*: Steel fiber reinforced concrete (SFRC): The use of SFRC in precast segment for tunnel lining, WTC 2008, Agra, India, 2008
- [9] *Rivaz B.*: Využití vláknobetonu v podzemním stavitelství. Seminář CzTA, 2010
- [10] *Vandewalle M.*: Tunnelling is an Art., 2005
- [11] *Woods E., Shuttleworth P., Fesq C.*: Steel Fiber Reinforced Tunnel Linings, Proc. Rapid Excavation and Tunnelling Conference 2005
- [12] *Tsuno K., Ochiai E., Matsubara K., Kondo Y.*: Fireproof SFRC (Steel Fiber Reinforced Concrete) Segments -The first application to road tunnels in the world. WTC 2011, Helsinky, Finland. 2011

Obr. 7 Rozpírané drátkobetonové ostění tunelu PiccEx (foto Hilar) ■  
Fig. 7 Wedgeblock SFRC lining of the tunnel PiccEx (photo Hilar)

Obr. 8 Zatláčování závěrečného segmentu (klenáku) lisem štítu (foto Hilar) ■ Fig. 8 Pushing of a key segment by a shield ram (photo Hilar)

Obr. 9 Odlehčený armokoš použitý společně s drátky pro metro v Barceloně [6] ■ Fig. 9 Reduced steel cage used together with steel fibres on the Barcelona metro [6]

jichž prefabrikované ostění bylo složeno z drátkobetonových segmentů bez použití běžně užívané ocelové výztuže. V nedávné době bylo drátkobetonové segmentové ostění využito i pro silniční tunely (např. Brisbane Airport Link vnitřního profilu 11,34 m).

Využití dané technologie v ČR bylo podrobně zkoumáno. V rámci výzkumu byly realizovány zatěžovací zkoušky drátkobetonových segmentů v Kloknerově ústavu ČVUT v Praze a výsledky některých zkoušek byly porovnávány se zkoušením železobetonových segmentů. Vzhledem k příznivým výsledkům zkoušek bylo nainstalováno 15 m drátkobetonových segmentů na traťovém tunelu prodloužení trasy V. A. pražského metra. V budoucnu lze očekávat využití dané technologie i na jiných tunelech ražených plnoprofilovými tunelovacími štíty.

Tento příspěvek byl zpracován s podporou grantů  
GAČR P104/10/2023, GAČR P105/12/1705 a TAČR TA01031840.

Doc. Ing. Matouš Hilar, Ph.D.  
FSv ČVUT v Praze  
e-mail: matous.hilar@fsv.cvut.cz  
a 3G Consulting Engineers, s. r. o.  
e-mail: hilar@3-g.cz



# STAVÍME PROFESIONÁLNĚ



[www.smp.cz](http://www.smp.cz)



**MO Praha**  
**tunelový komplex Blanka**

**SMP**  
**SMP CZ**

Společnost skupiny **VINCI**  
CONSTRUCTION