

Zkušenosti s využitím tunelových ostění z prefabrikovaných drátkobetonových segmentů

M. Hilar

3G Consulting Engineers s.r.o. a FSv ČVUT v Praze, Praha, Česká republika

J. Beňo

Metrostav a.s. a FSv ČVUT v Praze, Praha, Česká republika

ABSTRAKT: Drátkobeton začíná v současné době stále častěji nahrazovat standardní beton a železobeton. Rovnoměrně rozptýlené drátky ztužují strukturu prostého betonu a mění tak křehký prostý beton na houževnatý drátkobeton. Vhodným výběrem drátků, jejich zakomponováním do čerstvého prostého betonu při jeho výrobě, optimálním složením čerstvého betonu a optimálním postupem výroby je možné vyrobít prefabrikované drátkobetonové segmenty ostění, kterými je možné nahradit standardní železobetonové dílce. Využití drátkobetonu pro segmentová ostění tunelů je obecně ve světě rostoucí trend vzhledem k možným výhodám oproti běžným železobetonovým segmentům. Mezi hlavní výhody patří následující aspekty:

- Možnost snížení ceny konstrukce ostění tunelu
- Jednodušší a rychlejší výroba (odpadá výroba a osazení armokošů)
- Nižší nároky na prostor při výrobě (menší plochy potřebné pro skladování výztuže)
- Úspora oceli (úspora energie a omezení produkce CO₂)
- Jednodušší osazení vybavení tunelu (odpadá nebezpečí navrtání výztuže)
- Snížení nebezpečí ulamování rohů a hran segmentů při manipulaci (nižší nároky na opravy)
- Nižší nároky na údržbu během doby životnosti
- Předpoklad delší životnosti (odpadá nebezpečí koroze výztuže)

Z uvedených důvodů 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, Neapol). Nejrozsáhlejší využití drátkobetonových segmentů bylo na tunelech pro vysokorychlostní železnici Paříž – Londýn (projekt Channel Tunnel Rail Link - CTRL), kde bylo pomocí plnoprofilových tunelovacích strojů postaveno 2 x 24 km jednokolejných tunelů, jejichž prefabrikované ostění bylo složeno z drátkobetonových segmentů bez použití běžně užívané ocelové výztuže. Problematika využití drátkobetonu pro segmentová ostění tunelů včetně dosavadních aplikací je v příspěvku podrobněji probrána.

1 OSTĚNÍ Z PREFABRIKOVANÝCH SEGMENTŮ

Vývoj moderních tunelovacích metod a materiálů zásadně zefektivnil, zatraktivnil a v neposlední řadě zrychlil výstavbu podzemních konstrukcí. Počet realizovaných staveb rok od roku stoupá. V závislosti na geologických podmínkách, výšce nadloží, hladině podzemní vody, průměru tunelu a jeho délce se v dnešní době především používá buď tzv. konvenční ražba (zpravidla NRTM) nebo mechanizovaná ražba pomocí plnoprofilových tunelovacích strojů (technologie TBM).

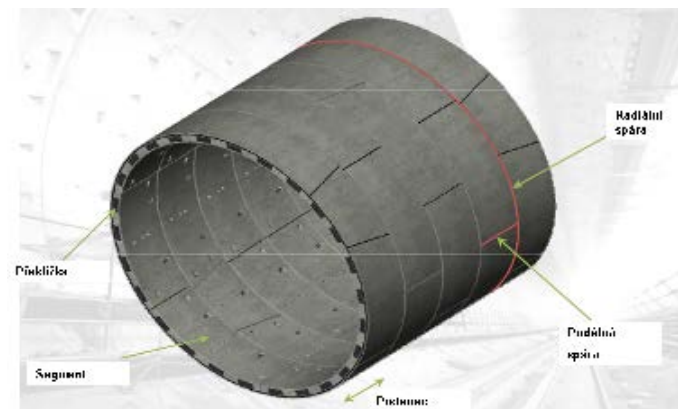
S prováděním mechanizovaných ražeb pomocí štítů úzce souvisí realizace definitivní konstrukce ostění, která je budována bezprostředně na místě ražby přímo za tunelovacím strojem (obrázek1). Toto ostění kruhového tvaru je tvořeno prstenci, které jsou zpravidla složeny z prefabrikovaných železobetonových segmentů, jednotlivé dílce jsou umísťovány do požadované pozice pomocí erektoru (hydraulické rameno v zadní části tunelovacího stroje). Jeden prsteneček bývá většinou složen z několika tvarově shodných dílců, závěrečný dílec (klenák) bývá větší

nou tvarově odlišný. Během výstavby jsou jednotlivé dílce spojovány pomocí šroubů a prostor mezi ostěním a horninovým masivem bývá vyplňován injektážní směsí.

Segmenty z prefabrikovaného betonu mohou být instalovány po dosažení požadované pevnosti. Ostění tunelů ražených plnoprofilovými 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.



Obrázek 3. Skladování prefabrikovaných železobetonových segmentů



Obrázek 1. Ostění tunelu z prefabrikovaných betonových segmentů

To však neplatí během výstavby. Segmenty musí odolávat namáhání ohybovými momenty během vyndávání z forem (obrázek 2), během skladování (obrázek 3) 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 posouvající štít vpřed. Poslední ze zmiňovaných namáhání bývá často rozhodující pro návrh segmentů.



Obrázek 2. Manipulace se segmenty během výroby

2 SEGMENTY Z DRÁTKOBETONU

Drátkobeton je beton s příměsí krátkých ocelových vláken (drátků) – obrázek 4. Ačkoliv je drátkobeton znám již delší dobu, jeho použití jako ostění tunelu je poměrně nové. Rovnoměrně rozptýlené krátké drátky ztužují strukturu prostého betonu a mění tak křehký prostý beton na houževnatý drátkobeton. Vhodným výběrem drátků, jejich zakomponováním do čerstvého prostého betonu při jeho výrobě, optimálním složením čerstvého betonu a optimálním postupem výroby je možné vyrobít prefabrikované drátkobetonové dílce ostění, kterými je možné nahradit standardní železobetonové dílce.



Obrázek 4. Čerstvý drátkobeton (délka drátků je 60 mm)

Délka drátků by měla odpovídat přibližně trojnásobku maximální velikosti zrna kameniva. Důvodem je dostatečné překlenutí trhlin, které se tvoří právě na hranicích jednotlivých zrn a zabránění vytrhnutí drátku z betonu při vzniku těchto trhlin. Aby byla zajištěna dostatečná odolnost proti vytrhnutí, bývají konce drátků ohnuté, rozšířené, apod. Nejběžnější je typ s oh-

nutými konci. Během vytrhávání drátku z betonu se musí ohnutý konec deformovat až do zcela rovného tvaru, čímž je odolnost proti vytrhnutí výrazně zvýšena. Díky jednoduššímu dávkování se někdy používají drátky slepené vodou rozpustným lepidlem. Tyto svazky se během míchání rozlepí a rovnoměrně rozmístí v betonové směsi.

Polypropylenová vlákna nemohou být použita jako výztuž nosných betonových konstrukcí, protože mají nízký modul pružnosti (nižší než beton) a i při nízkém zatížení se značně deformují. Navíc ztrácí mechanické vlastnosti při 50°C a při 165°C tají. Polypropylenová vlákna je však možné do drátkobetonu či železobetonu přidávat a to z důvodu zvýšení požární odolnosti.

Pro výrobu drátkobetonových segmentů se většinou používá beton třídy C40-C60. Velmi důležité je zajistit rovnoměrné rozmístění drátků, dobrou soudržnost drátků s betonem a dostatečnou zpracovatelnost směsi. Dávkování vláken se určuje pomocí teorie McKee, minimální množství vláken v kg/m³ betonu závisí na jejich délce a tloušťce. Vzdálenost mezi vlákny určuje hustotu drátků a tím kvalitu vyztužení a neměla by být nižší než 0,45 délky vlákna.

3 POROVNÁNÍ DRÁTKOBETONOVÝCH A ŽELEZOBETONOVÝCH SEGMENTŮ

Výrobní náklady drátkobetonových segmentů vycházejí mírně lépe než železobetonových, přestože vlastní materiál (ocelové drátky) je dražší než klasická betonářská výztuž. Úspory vznikají především díky nižším nárokům na práci, manipulaci a skladování. Počet segmentů poškozených při montáži je nižší. Dochází také k úspoře vlastní oceli, což má pozitivní vliv na redukci emisí vznikající při její výrobě.

Deformace drátkobetonu při dosažení pevnosti betonu v tahu nevzroste skokově, ale díky rovnoměrně rozmístěným drátkům narůstá deformace pozvolna. To je způsobeno průběžným aktivováním drátků a jejich postupným vytrháváním z betonu (obrázek 5). Velikost trhlin zůstává nízká. Celková pevnost v tahu (ohybu) je však výrazně nižší než u železobetonu.



Obrázek 5. Vytržení drátků z betonu při úplném porušení

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 rostou 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 lisami tunelovacích strojů. Neopatrnou manipulací může docházet k nárazům 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 droolí a odlamují. Aby byla zaručena návrhová 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 (obrázek 6).



Obrázek 6. Odlamování hran železobetonových segmentů při zatížení lisy štítu (Herka & Schepers 2012)

Nebezpečné pro drátkobetonové segmenty je, pokud je překročena pevnost v tahu drátkobetonu. Pak se drátkobetonové dílce také odlamují. Z tohoto hlediska je především nutné zabránit vzniku geometrických nepřesností, jak při výrobě, tak především při instalaci ostění, aby ohybové momenty působící na ostění byly co nejnižší.



Obrázek 7. Ocelové armokoše umísťované do forem při výrobě železobetonových segmentů

Do železobetonových segmentů se zpravidla umísťuje výztuž ve formě tzv. ocelového armokoše (obrázek 7). Ten se skládá z výztužných sítí při vnějším a vnitřním povrchu segmentu oddělených přivařenými třmínky. Hlavní funkcí výztužných sítí je odolat napětím vzniklým 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. Vyztužení železobetonových segmentů dosahuje hodnot zpravidla mezi 65 a 120 kg/m³. 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 směs se poté vyplní formou. Spotřeba oceli dosahuje většinou 30-50 kg/m³, 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 agresí 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 nehraje vůbec žádný význam. Pokud z estetických důvodů není žádoucí, aby ke korozi nedocházelo ani na povrchu konstrukce, tak je možné využít pozinkovaných vláken.

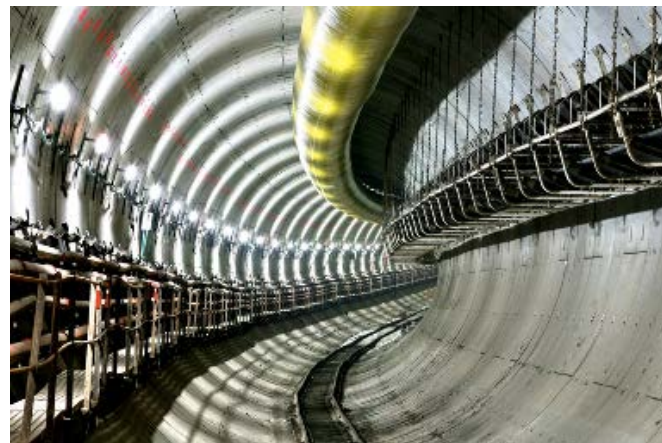
Homogenně a všesměrně rozmístěné drátky dokáží přenášet tahová napětí ve všech směrech. Drátky účinně zabraňují rozevírání plastických trhlin např. od smršťování, což má pozitivní vliv na životnost konstrukce (přidáním drátků se šířka trhlin zmenší).

4 PROJEKTY VYUŽÍVAJÍCÍ DRÁTKOBETONOVÉ SEGMENTY

První pokusy o využití drátkobetonu jako konstrukčního materiálu při výstavbě tunelů začaly v první polovině 70. let 20. století, kdy proběhlo několik zkušebních použití segmentového ostění z drátkobetonu. V roce 1982 nastal výraznější nárůst využití drátkobetonu pro prefabrikované segmentové 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.



Obrázek 8. Drátkobetonové segmenty vyrobené a zkoušené v Československu v letech 1984 - 1988



Obrázek 9. Trasa 9 metra v Barceloně s drátkobetonovými segmenty

Za zmínku stojí i výzkum drátkobetonových segmentů v Československu (Krátký a kol. 1999). V letech 1984 - 1988 byly provedeny série zkoušek na prefabrikovaném ostění sběrné kanalizační štol kruhového průřezu o průměru 3,6 m. Prstenec byl složen ze šesti dílů o tloušťce 200 mm, navzájem spojených na pero a drážku (obrázek 8). Dávkovalo se poměrně hodně drátka (98 kg/m^3), drátky byly hladké a přímé. Byly provedeny zkoušky jednotlivých segmentů i celých prstenců. Zkouškami bylo ověřeno několikanásobné překročení požadované únosnosti a únosnost srovnatelná s železobetonovými segmenty. Zkouškami oblasti styku jednotlivých prvků byla doložena mnohonásobně vyšší spolehlivost proti mechanickému poškození. Stejně zvýšení bylo prokázáno i v oblasti hran prvků. Tyto skutečnosti jednoznačně potvrdily podstatné snížení potřebných oprav.

Od té doby prvních zkoušek a aplikací byly drátkobetonové segmenty úspěšně nasazeny na několika desítkách projektů (Vandewalle 2005, Froněk 2011), 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 – obrázek 9, Neapol, Sao Paulo, Madrid, Janov) nebo o železniční tunely (Channel Tunnel Rail Link – obrázek 10, Oenzberg, atd.). Nicméně se již začínají objevovat první aplikace drátkobetonových segmentů pro silniční tunely - Brisbane Airport Link vnitřního profilu 11,34 m (Harding & Chappell 2012), Yokohama Circular Route Northern Section vnitřního profilu 11,5 m. Přehled některých projektů se základními údaji je uveden v Tab. 1 (Froněk 2011).



Obrázek 10. Tunel CTRL s drátkobetonovými segmenty

5 ZÁVĚR

Drátkobeton jako materiál má z pohledu prefabrikované výroby segmentů ostění pro tunely ražené plnoprofilovými tunelovacími štíty některé výhodné vlastnosti, z nichž pramení výhody drátkobetonových segmentů oproti segmentům železobetonovým. 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, Neapol). Nejrozsáhlejší využití drátkobetonových segmentů bylo na tunelech pro vysokorychlostní železnici Paříž – Londýn (projekt Channel Tunnel Rail Link - CTRL), kde bylo pomocí plnoprofilových tunelovacích strojů postaveno 2 x 24 km jednokolejných tunelů, jejichž prefabrikované ostění bylo složeno z drátkobetonových segmentů bez použití běžně užívané ocelové výtzuže.

V současné době provádí FSv ČVUT ve spolupráci firmou Metrostav a.s. výzkum drátkobetonových segmentů pro tunelová ostění. V rámci výzkumu byly realizovány zatěžovací zkoušky drátkobetonových segmentů v Kloknerově ús

tavu, výsledky některých zkoušek byly porovnávány se zkoušením železobetonových segmentů využívaných při výstavbě prodloužení trasy V.A. pražského metra.

Tento příspěvek byl zpracován s podporou grantů GAČR P104/10/2023, TAČR TA01011816 a TA01031840.

REFERENCE

- [1] King, M. R.: The Design and Use of Steel Fiber Reinforced Concrete Segments. Proceedings
- [2] Rapid Excavation and Tunnelling Conference 2005.
- [3] Maidl, B.: Steel Fibre Reinforced Concrete. Ernst & Sohn. 1995
- [4] Moyson, D.: Precast Tunnel Segments with Steel Fibre Reinforced Concrete – A State of the Art. Bekaert Publication.
- [5] Rivaz, B.: Steel fiber reinforced concrete (SFRC): The use of SFRC in precast segment for tunnel lining. WTC 2008, Agra, India. 2008
- [6] Schnütgen, B.: Design of Precast Steel Fibre Reinforced Tunnel Segments'. in Proc., RILEM TC 162-TDF Workshop. Bochum (Germany). 2003
- [7] Vandewalle, M. Tunnelling is an Art. 2005.
- [8] Woods, E., Shuttleworth, P., Fesq, C.: Steel Fiber Reinforced Tunnel Linings. Proceedings Rapid Excavation and Tunnelling Conference 2005.
- [9] 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, Helsinki, Finland. 2011
- [10] Harding, A., Chappell, M.: Design of Steel Fibre Reinforced Segmental Linings – Reflections on Design Challenges. WTC 2012. Bangkok, Thailand. 2012
- [11] Krátký J., Trtík K., Vodička J.: Drátkobetonové konstrukce. Česká společnost pro beton a zdivo, ČKAIT, Praha. 1999
- [12] Froněk, M.: Ostění tunelů z vláknobetonových segmentů. Bakalářská práce. FSv ČVUT v Praze. 2011.
- [13] Rivaz, B.: Využití vláknobetonu v podzemním stavitelství. Seminář CzTA. 2010
- [14] Herka, P., Schepers, R.: Využití vláknobetonu v podzemním stavitelství. Seminář CzTA. 2012.

Tab.1 Přehled některých projektů tunelů s drátkobetonovými segmenty

Název projektu	Země	Účel	Rok	Celková délka [km]	Vnitřní profil [m]	Tloušťka ostění [mm]	Množství drátků [kg/m ³]	Prutová výztuž
1 Abatemarco	Itálie	Vodovodní		18,0	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	43,0	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	48,0	7,15	350	30	ne
10 Heathrow - HexEx	Velká Británie	Železniční	2008	3,2	5,675	220	30	ne
11 Heathrow - PiccEx	Velká Británie	Metro	2008	3,2	4,5	150	30	ne
12 Heathrow - SWOT	Velká Británie	Vodovodní	2006	4,0	2,9	200	30	ne
13 Prodloužení DLR	Velká Británie	Železniční	2009	3,6	5,3	250		
14 Portsmouth	Velká Británie	Vodovodní		8,0	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	1,0	11,4	300	60	ne
18 Hachinger Stollen	Německo	Vodovodní	1998	7,0	2,2	180		
19 Hofoldingen Stollen	Německo	Vodovodní	2007	17,5	2,9	180	40	ne
20 Wehrhahnlinie 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	3,0	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		