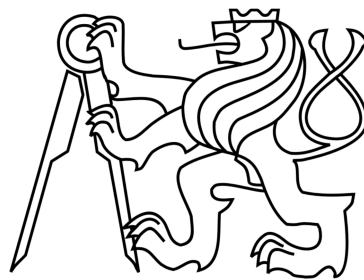


**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
FAKULTA STAVEBNÍ
Katedra betonových a zděných
konstrukcí**



**DIPLOMOVÁ PRÁCE
Návrh primárního a sekundárního
ostění kolektoru**

**Michal Šourek
2018**

Vedoucí práce: Ing. Hana Hanzlová, CSc.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem předkládanou diplomovou práci vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

V Praze

.....

Michal Šourek

Poděkování

Chtěl bych poděkovat především paní Ing. Haně Hanzlové, CSc. za dohled nad prací, odborné vedení, ochotu a cenné rady. Za neocenitelnou pomoc a rady ohledně geotechnických výpočtů děkuji doc. Ing. Janu Pruškovi, za rady ohledně vlastností a technologie stříkaného betonu Ing. Vladimírovi Veselému ze společnosti Betotech a za umožnění přístupu k materiálům a přímo na stavbu kolektoru Hlávkův most společnosti Kolektory Praha, a.s.



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Šourek	Jméno: Michal	Osobní číslo: 380896
Zadávací katedra: Katedra betonových a zděných konstrukcí		
Studijní program: Stavební inženýrství		
Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Návrh primárního a sekundárního ostění kolektoru	
Název diplomové práce anglicky: Design of primary and secondary lining of a utility tunnel	
Pokyny pro vypracování: Rozbor geotechnických podmínek v místě stavby kolektoru, výpočet napjatosti horninového masivu, stanovení vnitřních sil pro dimenzování jednotlivých průřezů kolektoru. Dimenzování primárního a sekundárního ostění ve variantách železobeton a železobeton v kombinaci s vláknobetonem. Výkresy tvaru a výztuže vybraných prvků kolektoru - vše pro úroveň DSP. Technická zpráva ke statické části.	
Seznam doporučené literatury: dostupná literatura k problematice návrhu kolektorů, normy pro vnitřní uspořádání kolektorů Krátký, Vodička, Trtík: Drátkobetonové konstrukce, Komentář a příklady normy pro zkoušení a značení vláknobetonů	
Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Hana Hanzlová, CSc.	
Datum zadání diplomové práce: 2.10.2017	Termín odevzdání diplomové práce: 7.1.2018 <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)
-----------------------	---------------------

Anotace

ŠOUREK, Michal, Návrh primárního a sekundárního ostění kolektoru, Praha, 2017. Diplomová práce, ČVUT, FSv.

Práce se zabývá návrhem primárního a sekundárního ostění raženého kolektoru. Cílem je na dané geotechnické podmínky nadimenzovat parametry konstrukce ostění a porovnat výsledky jednotlivých variant, zejména konstrukce železobetonové a konstrukce železobetonové v kombinaci s drátkobetonem.

Klíčová slova

- Kolektor
- Sdružená trasa vedení technického vybavení
- Betonové konstrukce
- Drátkobeton

Annotation

ŠOUREK, Michal, Design of a primary and secondary lining of a utility tunnel, Prague, 2017. Diploma thesis, ČVUT, FSv

The thesis deals with design of primary and secondary tunnel lining of a utility tunnel. The aim is to design the parameters of the lining structure and compare results of the variants, especially the reinforced concrete variant with the variant using reinforced concrete in combination with fibre reinforced concrete.

Keywords

- Utility tunnel
- Associated route of utility lines
- Concrete structures
- Fibre reinforced concrete

Obsah

1.	Úvod.....	7
2.	Kolektory	8
	2.1 Kolektory v centru Prahy	8
	2.2 Kolektor Hlávkův most.....	11
	2.3 Projekt	13
	2.3.1 Geotechnické poměry zemin.....	14
	2.3.2 Geotechnické poměry skalního podloží	14
3.	Nová rakouská tunelovací metoda	16
	3.1 Definice a princip NRTM	16
	3.2 Primární ostění	16
	3.3 Členění výrubu	17
	3.4 Technologické postupy na stavbě	18
	3.4.1 Rozpojování za použití trhavin	18
	3.4.2 Rozpojování bez použití trhavin	19
	3.5 Doplnková opatření	19
	3.6 Rizika	20
4.	Stříkaný beton.....	20
	4.1 Nárůst pevnosti mladého stříkaného betonu	21
	4.2 Další vlastnosti stříkaného betonu.....	23
	4.3 Způsoby nástřiku betonu	23
5.	Výsledky.....	25
	5.1 Primární ostění	25
	5.2 Sekundární ostění	25

1. Úvod

Tato práce se zabývá návrhem primárního a sekundárního ostění raženého kolektoru. Byly uvažovány stejné geotechnické podmínky, jako se vyskytují na místě stavby kolektoru Hlávkův most, který je v současnosti ve výstavbě.

Byl proveden statický výpočet vnitřních sil primárního a sekundárního ostění v několika reprezentativních řezech. U sekundárního ostění bylo posouzeno několik různých variant konstrukce s cílem zjistit, zda by bylo výhodnější použití jiných materiálů nebo způsobů vyztužení, než je v současnosti běžné.

V teoretické části práce je stručně naznačen stav kolektorové sítě v Praze a její předpokládaný vývoj do budoucna, základní informace o stavbě kolektoru Hlávkův most a místních geologických podmínkách, principy a výhody Nové rakouské tunelovací metody, její rizika a běžné technologické postupy a principy realizace konstrukcí ze stříkaného betonu.

Součástí práce je statický výpočet, protokoly z výpočtů v software GEO5, výkresová dokumentace a technická zpráva k vybrané variantě sekundárního ostění a fotodokumentace pořízená na stavbě kolektoru Hlávkův most.

2. Kolektory

Kolektor či kolektorová trasa je jednou z variant sdružených tras technického vedení. Podle normy ČSN 73 7505 je *sdružená trasa vedení technického vybavení výškově i směrově zkoordinované sjednocené vedení většího počtu vedení (minimálně dvou různých druhů) uložených obvykle pomocí ochranného tělesa a umožňující pohyb obsluhy uvnitř (průchod, průlez). Takto definované sdružené trase vyhovuje například kolektor, technická chodba, univerzální tvárniceová trať atd.*

Kolektor je liniový, zpravidla podzemní objekt, který je průchozí nebo alespoň průlezný a v němž jsou společně uložena vedení technického vybavení, a to minimálně dvě různého druhu. [3]

Sdružené vedení technického vybavení v trasách přímo k tomu účelu zbudovaných má velké výhody spočívající ve významném snížení náročnosti údržby či oprav případných havárií. Tato snížená náročnost má za následek menší dobu odstávek provozu inženýrských sítí, což je z hlediska jejich koncového uživatele klíčové. Důležitý je také fakt, že zejména v hustě zastavěných částech měst a jejich historických centrech není kvůli revizi a údržbě inženýrských sítí nutné provádět výkopové práce.

Ve sdružených trasách jsou nejčastěji vedeny vodovody, teplovody, plynovody, energetické kabely, telefonní kabeláž, optické kabely a v některých případech i kanalizace.

2.1 Kolektory v centru Prahy

Na území hlavního města Prahy se nacházejí dva typy kolektorů: kolektory hloubené a kolektory ražené.

Hloubené kolektory jsou budovány z povrchu, což zapříčiňuje velké nároky na zábor stavební plochy. Tento způsob budování kolektorů je v zastavěném území hlavního města prakticky nepoužitelný, proto byly

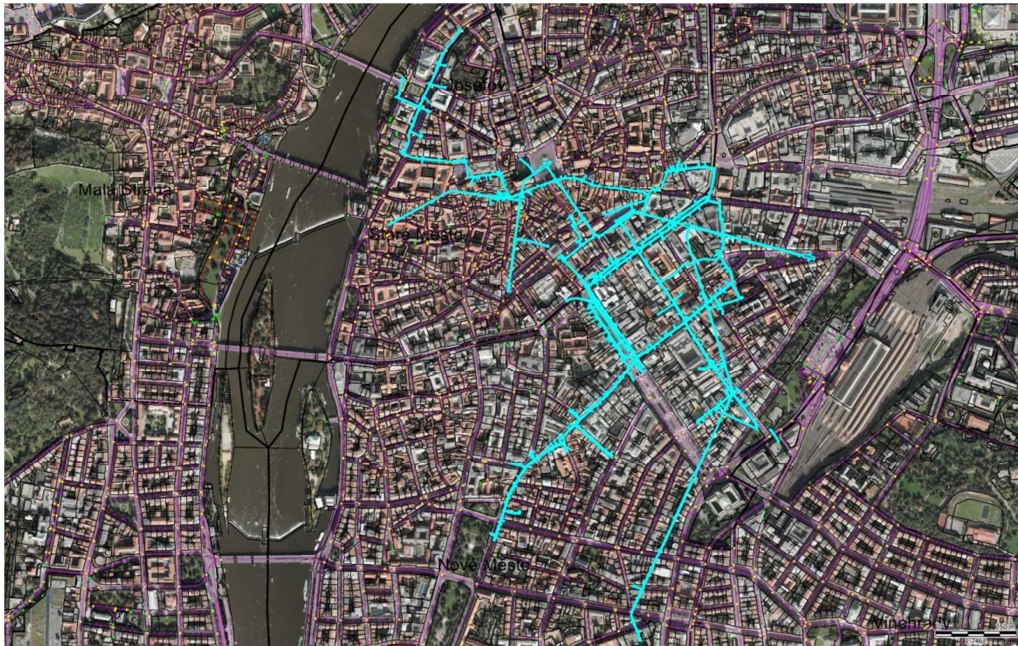
veškeré hloubené kolektory budovány současně s povrchovou zástavbou pražských sídlišť v sedmdesátých a osmdesátých letech.

Nebylo možné získat souhlas ke zveřejnění obrázku.
Práce včetně obrázků je k dispozici na katedře betonových a zděných konstrukcí na fakultě stavební ČVUT v Praze.

Délky kolektorových staveb

Zdroj: [1]

Kolektory ražené našly uplatnění pod historickým centrem Prahy, kde je ražení kvůli husté zástavbě prakticky jediným možným východiskem. Z ražených kolektorů byl do provozu jako první uveden kolektor Václavské náměstí trasa A již v roce 1977. Dále následovaly kolektory Žižkov I (1985), Celetná (1988), Tylovo divadlo (1992), Rudolfinum (1993), Rekonstrukce nábřeží Ludvíka Svobody, zkráceně RNLS (1997), Nová Radnice (1997), Centrum 1A (1998), Příkopy (2001), Centrum 1 (2003), Vodičkova (2007) a Václavské náměstí trasa B a C (2010). Do kolektorového systému v centru Prahy jsou zahrnuty i tři kolektorové podchody Smetanovo divadlo, Severní předmostí Hlávkova mostu (zkráceně SPHM) a Chotkova, které vedou pod významnými městskými komunikacemi.



Kolektory pod centrem Prahy

Zdroj: vlastní

Na rozdíl od kolektorů na sídlišťích jsou tyto kolektory vedeny v podstatně větší hloubce, což komplikuje zavedení přípojek sítí do napojovaných objektů. Ve většině případů je toto připojení zajištěno šikmými průvrty do suterénů nadzemních objektů.

Zatímco výstavba sídlištních kolektorů je prakticky zastavena (vyjímky tvoří odbočky nebo nové přípojky k nově budovaným objektům), v oblasti centra se počítá s významným rozšířením kolektorové sítě zejména v oblasti Pražské památkové rezervace a na ni navazující lokality (Smíchov, Karlín, Vinohrady, Holešovice).

Kolektory byly navrženy a vyztuženy s použitím Nové rakouské tunelovací metody. Bylo využito technologií stříkaného betonu a prefabrikované betonářské výztuže, přičemž ze stříkaného betonu je v některých případech zhotovena i definitivní konstrukce sekundárního ostění. Pokusy o výstavbu s použitím mechanizace s prefabrikovaným ostěním se neosvědčily, zatímco Nová rakouská tunelovací metoda se ukázala jako velice efektivní i na stavbách s komplikovanými

geotechnickými podmínkami jako kolektor Centrum 1A nebo kolektor Příkopy.

Nebylo možné získat souhlas ke zveřejnění obrázku.
Práce včetně obrázků je k dispozici na katedře betonových a zděných konstrukcí na fakultě stavební ČVUT v Praze.

Příčný řez Typ A

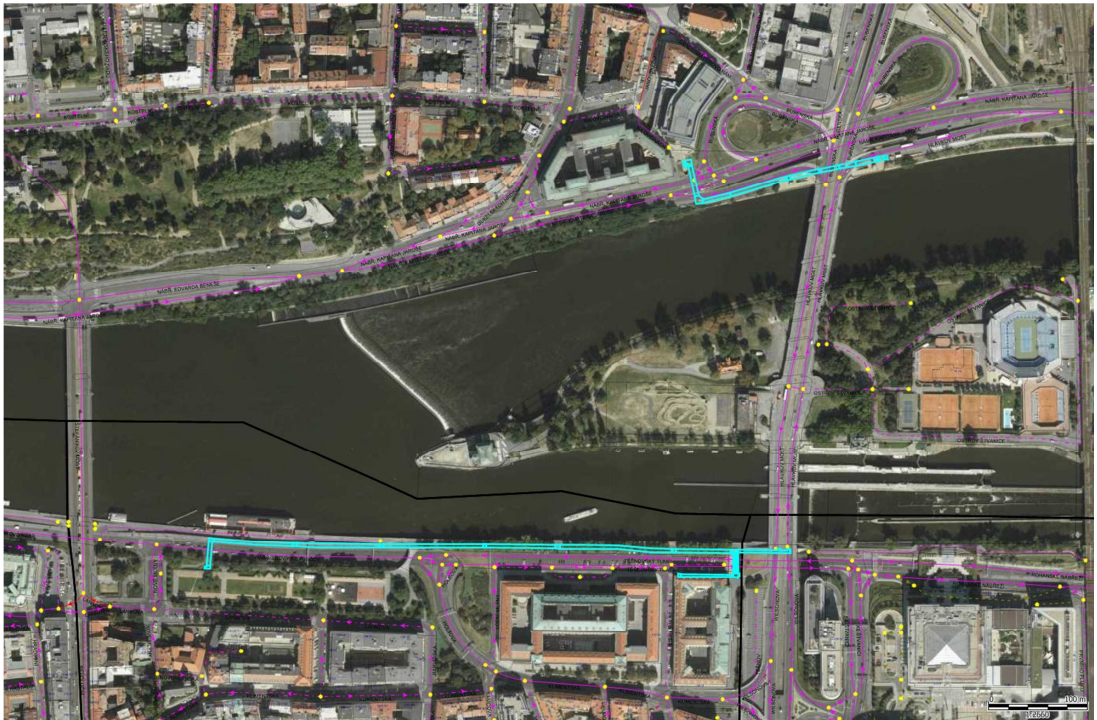
Zdroj: [1]

Příčný řez Typ B

Zdroj: [1]

2.2 Kolektor Hlávkův most

V souvislosti s dlouho plánovanou rekonstrukcí Hlávkůva mostu, která je nutná s ohledem na jeho špatný technický stav bylo rozhodnuto, že bude zbudován kolektor Hlávkův most. Hlavním důvodem je přeložení inženýrských sítí z tělesa mostu. Pokud by rekonstrukci mostu nepředcházela stavba kolektoru, bylo by nutné zbudovat provizorní most, přeložit vedení sítí na něj, poté Hlávkův most zrekonstruovat a sítě na něj vrátit. Toto řešení by cenově vycházelo na podobnou částku jako stavba kolektoru. Ačkoliv bylo stavební povolení vydáno už v roce 2006, z různých důvodů byla stavba již několikrát odložena.



Dnešní situace v okolí Hlávčkovy mostu

Zdroj: vlastní

V okolí Hlávčkovy mostu se v současnosti nacházejí dvě kolektorové stavby: Rekonstrukce nábřeží Ludvíka Svobody (RNLS) a Severní předmostí Hlávčkovy mostu (SPHM). Nová kolektorová stavba zajistí přechod inženýrských sítí z jednoho břehu na druhý a návaznost stávajících kolektorových staveb na obou březích.

Nebylo možné získat souhlas ke zveřejnění obrázku.
Práce včetně obrázků je k dispozici na katedře betonových a zděných konstrukcí na fakultě stavební ČVUT v Praze.

Situace kolektorů po rekonstrukci

Zdroj: [2]

Nebylo možné získat souhlas ke zveřejnění obrázku.
Práce včetně obrázků je k dispozici na katedře betonových a zděných
konstrukcí na fakultě stavební ČVUT v Praze.

Podélný řez kolektorem Hlávkův most

Zdroj: [2]

Po mnohaletých odkladech začala stavba kolektoru Hlávkův most na začátku roku 2017, dokončení stavebních prací je očekáváno v září roku 2018 a uvedení kolektoru do provozu během roku 2019.

2.3 Projekt

Základním zdrojem informací o geologických podmínkách v daném území byly nové a archivní průzkumné práce. Do průzkumných prací byl začleněn i průzkum reliéfu dna řeky a hydrologický průzkum k ověření vlivu podzemních vod.

Dle geomorfologického členění ČR patří území k Pražské kotlině, součásti České tabule. Morfologické poměry jsou zejména výsledkem erozní a akumulární činnosti Vltavy. Říční koryto se začalo zahlubovat do podkladních hornin, které (zejména komplex ordovických hornin) se vyznačují velkou pestrostí složení. V důsledku této pestrosti hornin a jejich pevnostních vlastností můžeme pozorovat projevy selektivní eroze, kde se řeka zahloubila do méně pevných vrstev, zatímco vrstvy s vyšší pevností tvoří březní partie údolí.

Všeobecně lze geologické poměry místa stavby charakterizovat jako proměnlivé a poměrně složité, což způsobuje vyšší obtížnost projektu, a přináší potřebu podrobnějšího geologického průzkumu.

2.3.1 Geotechnické poměry zemín

Nejsvrchnější vrstvu v pokryvných útvarech tvoří navážky. V jejich složení je převládající hrubý, špatně zrněný štěrk, případně s příměsí jemnozrné zeminy a písek se štěrkem. Spodní vrstvu tvoří fluviální sedimenty Vltavy, kde lze rozlišit dvě polohy – písky (většinou hrubozrné, místy jemnozrné) a štěrk (špatně zrněný, hrubý, místy s příměsí jemnozrné zeminy).

GEOTECHNICKÉ CHARAKTERISTIKY ZEMIN POKRYVNÝCH ÚTVARŮ (Doplňující inženýrskogeologický a hydrogeologický průzkum - Kolektor Hlávkův most, vypracoval PUDIS, a.s. - RNDr.Radovan Chmelař, Ph.D., srpen 2006, z.č. 3-3200-0278-06)	Symbol ve výkresech	Objemová tíha v přirozeném uložení γ [kNm ⁻³]	Přetvárné charakteristiky			Smyková pevnost efektivní		ČSN 73 1001		Třída těžitelosti ČSN 73 3050	Vrtatelnost pilot podle ceníka 800-2
			Modul přetvárnosti E_{def} [MPa]	Modul pružnosti E [MPa]	Poissonovo číslo ν [I]	Soudržnost c_{ef} [kPa]	Úhel vnitřního tření ϕ_{ef} [°]	Zatřídění	Výpočtová únosnost R_{ult} [kPa]		
Recent											
NAVÁŽKY - Různorodé navážky, místa s příměsí cihel, škváry a betonu	AN	19,0	4	10	0,40	5	28	Y		2-3	I-II
		21,0	15	30	0,37	15	20				
Kvartérní sedimenty - pleistocenní sedimenty (fluviální)											
PÍŠČITÉ ZEMINY - Písky a písky slabě hlinité/jílovité, s valouny, středně ulehlé	FL	20,5	25	50	0,34	0	34	S3, S2	300	3	I-II
ŠTĚRKOVÉ ZEMINY - Hrubé štěrky s písčitou příměsí	FL	22,0	60	120	0,32	0	38	G3, G2	500	4	II-III

Geotechnické charakteristiky zemín a pokryvných útvarů

Zdroj: [4]

2.3.2 Geotechnické poměry skalního podloží

Z hornin skalního podkladu se vyskytuje souvrství letenské, vinické a zahořanské. Souvrství letenské se dá charakterizovat jako prachovité a písčité s vložkami křemenných pískovců a křemenců, břidlice jsou jemně až hrubě slídnaté. Letenské souvrství tvoří nejpevnější horniny v trase kolektoru. Souvrství vinické tvoří jílovité břidlice s deseti až dvacetiprocentním podílem křemenného prachu. Břidlice vinického souvrství patří k měkčím a plastičtějším horninám. Souvrství zahořanské je tvořeno

zejména prachovitými břidlicemi, prachovci a písčitymi prachovci. Obsahuje i vločky vápenatých pískovců a vápenců.

GEOTECHNICKÉ CHARAKTERISTIKY HORNIN SKALNÍHO PODLOŽÍ (Doplňující inženýrskogeologický a hydrogeologický průzkum - Kolektor Hlávkův most, vypracoval PUDIS, a.s. - RNDr. Radovan Chmelař, Ph.D., srpen 2006, z.č. 3-3200-0278-06)		Symbol ve výkresech/ stupně zvětrání	úroveň	Objemová tíha v přirozeném uložení γ [kNm ⁻³]	Převárné charakteristiky			Smyková pevnost efektivní			ČSN 73 1001		Třída těžitelnosti ČSN 73 3050	Vratnost pilot podle ceníku 800-2
					Modul převárnosti E_{def} [MPa]	Modul pružnosti E [MPa]	Poissonovo číslo ν [I]	Soudržnost c_{ef} [kPa]	Úhel vnitřního tření φ_{ef} [°]	Pevnost v tlaku σ_c [MPa]	Zatřídění	Výpočtová únosnost R_{dl} [kPa]		
Paleozoikum - ordovik, souvrství letenské LTN														
BŘIDLICE - Prachovitá a písčítá s vločkami pískovce a křemence	ZCELA ZVĚTRALÉ (ROZLOŽENÉ)	W5	povrch	20,5	8	20	0,40	25	21	< 0,5	R5,R6	225	3	I-II
			báze	22,0	25	50	0,37	15	24	0,5 - 3,0	R6,R5	300		
	ZVĚTRALÉ	W4/W3	povrch	22,0	25	50	0,37	15	24	0,5 - 3,0	R6,R5	300	3-4	II-III
			báze	24,0	100	200	0,34	25	28	3,0 - 10	R5,R4	450		
	NAVĚTRALÉ	W2	povrch	24,0	100	200	0,34	25	28	3,0 - 10	R5,R4	450	4-5	III-IV
			báze	25,5	300	600	0,31	60	33	10 - 30	R4,R3	700		
	ZDRAVÉ	W1	povrch	25,5	300	600	0,31	60	33	10 - 30	R4,R3	700	5-6	IV-V
			5,0m	26,0	400	800	0,28	100	36	30 - 50	R3	900		
15,0m			26,5	500	900	0,25	150	38	> 50	R3,R2	1200			
Paleozoikum - ordovik, souvrství vinické VNC														
BŘIDLICE - Prachovito-jílovitá	ZCELA ZVĚTRALÉ (ROZLOŽENÉ)	W5	povrch	21,0	8	20	0,42	30	19	< 0,5	R5,R6	200	3	I
			báze	22,0	20	40	0,38	20	22	0,5 - 2,0	R6,R5	250		
	ZVĚTRALÉ	W4/W3	povrch	22,0	20	40	0,38	20	22	0,5 - 2,0	R6,R5	250	3-4	II
			báze	24,0	60	120	0,36	25	26	2,0 - 8,0	R5,R4	350		
	NAVĚTRALÉ	W2	povrch	24,0	60	120	0,36	25	26	2,0 - 8,0	R5,R4	350	4-5	III
			báze	25,5	150	300	0,33	50	30	8,0 - 15	R4	500		
	ZDRAVÉ	W1	povrch	25,5	150	300	0,33	50	30	8,0 - 15	R4	500	5	IV
			5,0m	26,0	200	400	0,30	75	33	15 - 35	R3	600		
15,0m			26,5	350	600	0,28	100	35	35 - 50	R3	900			
Paleozoikum - ordovik, souvrství záhoňanské ZHR														
BŘIDLICE - Prachovitá s vločkami vápenného prachovce	ZCELA ZVĚTRALÉ (ROZLOŽENÉ)	W5	povrch	21,0	8	20	0,40	30	20	< 0,5	R5,R6	200	3	I
			báze	22,0	20	40	0,38	20	23	0,5 - 2,0	R6,R5	275		
	ZVĚTRALÉ	W4/W3	povrch	22,0	20	40	0,38	20	23	0,5 - 2,0	R6,R5	275	4	II
			báze	24,0	75	150	0,35	25	27	2,0 - 8,0	R5,R4	400		
	NAVĚTRALÉ	W2	povrch	24,0	75	150	0,35	25	27	2,0 - 8,0	R5,R4	400	4-5	III
			báze	25,5	200	400	0,32	50	32	8,0 - 20	R4,R3	600		
	ZDRAVÉ	W1	povrch	25,5	200	400	0,32	50	32	8,0 - 20	R4,R3	600	5	IV
			5,0m	26,0	300	600	0,29	80	35	20 - 40	R3	800		
15,0m			26,5	400	750	0,27	120	37	40 - 50	R3	1000			

Geotechnické charakteristiky hornin skalního podloží

Zdroj: [4]

3. Nová rakouská tunelovací metoda

3.1 Definice a princip NRTM

NRTM je tunelovací metoda, která je založena na využití nosných vlastností horninového masivu a jeho spolupůsobení s nosnou konstrukcí ostění podzemního díla. Ostění je obvykle budováno ve dvou fázích – nejprve je zbudováno ostění primární, které slouží k zajištění stability výrubu. Později je zhotoveno ostění sekundární, které tvoří definitivní konstrukci podzemní stavby.

NRTM se řadí mezi metody observační – během výstavby se zjišťují skutečné deformace konstrukce a jsou porovnávány s deformacemi projektovanými. Pokud skutečné hodnoty poklesů neodpovídají předpokladům, je pro další části výstavby způsob ražby a zajištění konstrukce upraven. To umožňuje výrazné snížení stavebních nákladů při zachování bezpečnosti oproti ostatním tunelovacím metodám.

Rozpojení hornin je možné provádět všemi běžnými způsoby – výložníkovými frézami, bagry, střílnými pracemi, pneumatickými kladivy atd. Vyztužení výrubu se pak provádí technologií stříkaného betonu, jež bývá vyztužen sítěmi, které mohou být doplněny obloukovými nosníky (žebry). Spolupůsobení masivu s primárním ostěním pak přenáší zatížení vzniklá v masivu.

Největší výhodou NRTM je možnost při zajištění požadované bezpečnosti a kvality podzemního díla významně snížit stavební náklady – zkušenosti ukazují, že je možná úspora v řádu až desítek procent.

3.2 Primární ostění

Primární ostění je zhotoveno ze stříkaného betonu s použitím vyztužných oblouků a kotev. Stříkaný beton je vyztužen ocelovými sítěmi, existuje také možnost použití drátkobetonu. V případě použití drátků často

odpadá použití sítí. Podstatné je použití chemických přísad a příměsí, které zajistí rychlejší tuhnutí a dostatečnou zpracovatelnost betonu.

Výztužné oblouky se používají nejčastěji příhradové, svařené z betonářské oceli, nicméně je možné i použití nosníků plnostěnných.

Nebylo možné získat souhlas ke zveřejnění obrázku.
Práce včetně obrázků je k dispozici na katedře betonových a zděných konstrukcí na fakultě stavební ČVUT v Praze.

Řez plnostěnným obloukem korýtkové výztuže Detail spoje oblouků

Zdroj: [6]

Zdroj: [6]

Existuje velké množství kotev a kotevních systémů. Nejběžnější pak jsou SN kotvy z hřebínkové oceli aktivované maltou, HUS – hydraulicky upínané svorníky a IBO kotvy – vrtné tyče opatřené korunkou s otvorem uprostřed umožňující výplach během vrtání a následnou injektáž.

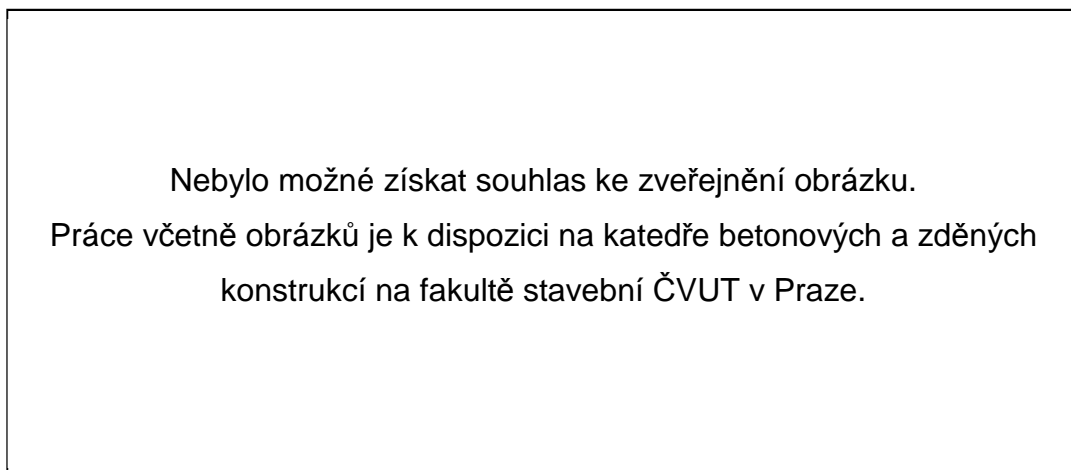
Pokud průzkum – většinou prováděný vrtem v čelbě vedoucím až několik desítek metrů před čelbu ve směru ražby – zjistí nepříznivé podmínky v horninovém masivu, je nutné přistoupit k opatřením vedoucím ke zlepšení jeho geotechnických vlastností. Mezi nejčastější patří kotvení horniny mechanickými svorníky, nebo předvrtávání mikropilot u stropu čelby.

3.3 Členění výrubu

Pokud je podzemní dílo menšího rozsahu a profilu, může se ražba provést na plný profil. U větších pozemních děl se však z několika důvodů často razí na několik částí. Tyto důvody mohou být jak geotechnické

(stabilita výrubu, velikost deformací, zmenšení plochy čelby), tak prováděcí (akční rádius mechanizace, příliš malé stroje na velikost celé čelby).

Členění se dělí na vodorovné a svislé.



Příklady možností členění výrubu

Zdroj: [5]

3.4 Technologické postupy na stavbě

NRTM je metodou univerzální – připouští různé metody rozpojování horniny. Základní rozdělení rozpojovacích metod je na metody za použití trhavin a metody bez použití trhavin.

3.4.1 Rozpojování za použití trhavin

Pro navrtání čela výrubu jsou využívány vrtací vozy s lafetami. Existuje velmi široké spektrum těchto vozů, přičemž konkrétní typ se vybírá vždy podle specifik stavby, zejména rozměrů výrubu. Vrty se dělí na záломové (ve středu čelby), obrysové (po obvodu čelby) a ostatní.

Rozpojení hornin se provádí pomocí průmyslových trhavin. Do jednotlivých vrtů jsou uloženy nálože, které jsou iniciovány zpravidla elektrickým roznětem. Nálože jsou časově odstupňovány pro maximální účinek trhacích prací a dosažení co nejpřesnějšího tvaru výrubu. První jsou odpáleny nálože v centrální části – takzvaný “zálom”, čímž dojde k uvolnění prostoru uprostřed čelby. Další nálože pak rozpojují horninu, která se uvolňuje do prostoru zálohu.

Rozpojování za použití trhavin je používáno zejména ve skalních horninách o pevnosti vyšší než 100 – 120 MPa.

3.4.2 Rozpojování bez použití trhavin

Rozpojování bez použití trhavin se provádí za použití následujících mechanismů:

- Frézy s výložníkem – výhodné zejména pro horniny s pevností do 50 MPa
- Hydraulická kladivy (impaktory)
- Tunelbagry

U kratších tunelů se na odvoz rubaniny používají nakladače s velkoobjemovými lžícemi, u delších se zpravidla rubanina přesouvá na mezideponii, odkud je jiným typem dopravy transportována do finálního uložště.

3.5 Doplnková opatření

Důležitou součástí NRTM jsou různá opatření, která jsou aplikována podle konkrétních podmínek na stavbě. Pro zajištění stability výrubu před konstrukcí primárního ostění se používají například následující typy opatření:

Jehlování – přes příhradové oblouky primárního ostění jsou dopředu přes čelbu do horniny hnané jehly z hřebínkové oceli o délce 3-6 metrů. Jejich vzdálenost v příčném směru závisí na geotechnických podmínkách stavby a pohybuje se zpravidla v rozmezí 10-20 cm.

Hnané pažení – v nesoudržných materiálech lze před čelbu zahánět plošné prvky (např. pažnice typu Union).

Mikropilotové deštníky – používají se deštníky z miropilot z ocelových trubek o délce 12-16 metrů.

Injektáže – používá se často v kombinaci s ostatními metodami, hlavně mikropilotovými deštníky. V případě nízkého nadloží lze injektovat i z povrchu.

3.6 Rizika

Vzhledem k tomu, že při tunelování práce probíhají v prostředí, které nejsme schopni exaktně popsat, vždy se vyskytují určitá rizika. I při dodržení předepsaných technologických postupů mohou v důsledku nepřesnosti prognózy nastat následující situace:

- Ztráta stability portálu
- Zřícení horninové klenby
- Vypadnutí čelby tunelu
- Růst dna tunelu
- Nadměrný růst konvergencí, deformace primárního ostění
- Nadměrný přítok podzemní vody
- Průval vody, bahna
- Výron plynů do tunelu
- Nadměrné poklesy povrchu nad tunelem
- Škody způsobené tlakovými injektážemi do masivu

Většinu rizik se dá nejlépe předejít důsledným monitoringem, jejich včasným zjištěním a navržením technologických opatření, které zamezí jejich vzniku a dalšímu rozvoji.

4. Stříkaný beton

Podle definice se jedná o beton, který je na povrch ukládán pomocí proudu stlačeného vzduchu, čímž vytváří hutnou, homogenní vrstvu. Jeho zpracovatelnosti umožňující aplikaci stříkáním se dosahuje použitím přísad, také může obsahovat další příměsi nebo vlákna. Stříkaný beton rozlišujeme na:

- Nezhotněný čerstvý stříkaný beton – směs po opuštění trysky, před dopadem na povrch
- Zhotněný čerstvý stříkaný beton – směs po dopadu na podklad
- Mladý stříkaný beton – beton do stáří 24 hodin od nástřiku
- Nezralý stříkaný beton – beton do stáří 28 dní od nástřiku
- Zralý stříkaný beton – beton stáří více než 28 dní od nástřiku

4.1 Nárůst pevnosti mladého stříkaného betonu

Pro stříkaný beton používaný u podzemních stavem je klíčovou vlastností rychlost nárůstu jeho pevnosti. Beton musí začít staticky působit v řádu hodin a před provedením dalšího pracovního kroku ražby musí být schopen přenést definované zatížení.

Beton určený na aplikaci stříkáním není u betonáren běžně nabízený výrobek, ale vždy se připravuje jako speciální směs na základě požadavků projektanta a firmy realizující stříkání. Projektant musí specifikovat kromě finální pevnosti betonu i rychlost nárůstu pevnosti.

Podle nárůstu pevnosti rozdělujeme mladý stříkaný beton do třech oborů – J1, J2 a J3. Požadovaná hodnota pevnosti v daném čase je uvedena v následující tabulce:

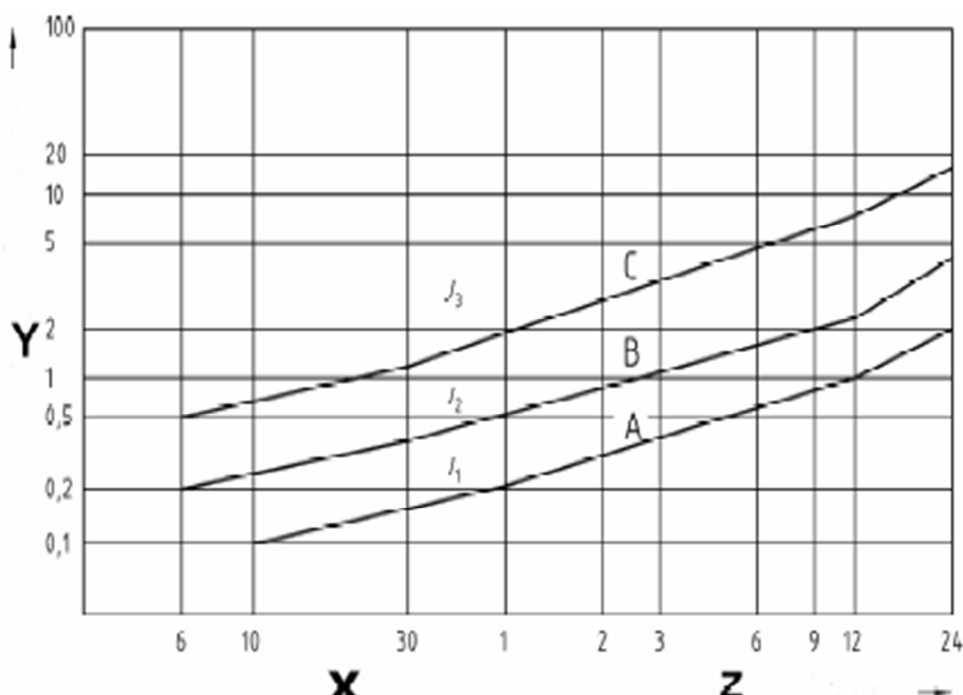
	6 min.	10 min.	30 min.	1 hod.	2 hod.	3 hod.	6 hod.	9 hod.	12 hod.	24 hod.
J1	0,1	0,14	0,18	0,25	0,3	0,5	0,7	1	2	
J2	0,2	0,25	0,33	0,5	0,75	1	1,6	2	2,5	5
J3	0,5	0,75	1,1	1,5	2	2,8	5	6	7,5	15

Minimální hodnota pevnosti betonu v čase t [MPa]

Zdroj: [7]

V grafu se dá požadovaná pevnost v čase vyjádřit takto:

ČSN EN 14487-1



Legenda

X Minuty

Y Pevnost v tlaku f_c v $\frac{N}{mm^2}$

Z Hodiny

Minimální hodnota pevnosti betonu v čase t [MPa]

Zdroj: [7]

Stříkaný beton oboru J1 se používá pro nástřík v tenkých vrstvách na suchý podklad v případech, kdy na beton nejsou v prvních hodinách kladeny vysoké nároky na statické působení. Oproti vyšším oborům je výhodný pro malou prašnost a nízký spád.

Stříkaný beton oboru J2 se používá v případech, kdy je potřeba nanést v krátkém čase silnější vrstvu betonu, a to i na povrch nad hlavou. Beton tohoto oboru je schopen přichytit se na povrch i při přítoku podzemní vody. Oproti oboru J1 má relativně rychlý nárůst počáteční pevnosti a používá se ve většině případů pro provádění primárních ostění podzemních staveb.

Stříkaný beton oboru J3 se používá pouze ve speciálních případech vzhledem k vysoké prašnosti provádění. Mezi tyto případy patří velice narušené horninové prostředí nebo nadměrné přítoky podzemní vody. Při použití alkalických urychlovačů tvrdnutí může dojít ke značnému snížení konečné pevnosti betonu.

Nárůst rané pevnosti je stanoven metodou penetrační jehly a nebo metodou vytahování nastřeleného hřebu.

4.2 Další vlastnosti stříkaného betonu

Odolnost proti průsaku vody – podle polohy hladiny podzemní vody a vlastností horninového masivu je možné požadovat odolnost proti průsaku vody. Odolnost se prokazuje na odvrtném tělese ze stříkaného betonu a posuzuje se podle norem platných pro běžný beton.

Odolnost proti chemické agresivitě – při zvýšené agresivitě prostředí je nutné použít vhodný typ cementu a případně i přísady. Příliš kyselé prostředí má vliv i na výběr kameniva. Při chemické agresivitě je navíc nutné i omezit hloubku prosáknutí vody na 30 mm.

Modul pružnosti – pokud modul pružnosti značně ovlivňuje statické chování konstrukce, je nutno in situ porovnat modul pružnosti betonu s návrhem.

Mrazuvzdornost – stříkaný beton vystavený agresivnějšímu prostředí musí splňovat požadavky na odolnost proti odlupování povrchu a mrazuvzdornost.

4.3 Způsoby nástřiku betonu

Rozlišujeme dva základní způsoby nástřiku – suchý a mokrý.

Suchý způsob nástřiku – směs pro suchý nástřik se k trysce stroje dopravuje hadicí pomocí stlačeného vzduchu. Směs se do proudu vzduchu dává zpravidla rotujícím válcem s komorami. Kvůli omezení vývinu

prachu je nutné důsledně kontrolovat těsnost strojního zařízení. Voda se do trysky přivádí pod tlakem vyšším než 4 bary a musí být umístěna ve stroji tak, aby došlo k dostatečnému promíchání vody se směsí.

Nebylo možné získat souhlas ke zveřejnění obrázku.
Práce včetně obrázků je k dispozici na katedře betonových a zděných konstrukcí na fakultě stavební ČVUT v Praze.

Schéma suchého nástřiku betonu

Zdroj: [8]

Mokrý způsob nástřiku – při použití čerpadla jsou použity stejné materiálové přívody jako při použití normálního čerpaného betonu. V trysce se ke směsi přidávají urychlovače tuhnutí a stlačený vzduch.

Nebylo možné získat souhlas ke zveřejnění obrázku.
Práce včetně obrázků je k dispozici na katedře betonových a zděných konstrukcí na fakultě stavební ČVUT v Praze.

Schéma mokrého nástřiku betonu

Zdroj: [8]

Při mokré technologii nástřiku se směs připravuje přímo na betonárně, tudíž je při nástřiku snažší udržovat konstantní vlastnosti směsi. Tento způsob také umožňuje vyšší výkon nástřiku, nanášení silnějších vrstev, omezuje o 5 až 15 procent spad a výrazně zlepšuje pracovní podmínky vzhledem k nižší prašnosti. Na druhou stranu klade vyšší nároky na zpracovatelnost směsi a logistiku. Dále je nutné důsledněji udržovat a čistit technologická zařízení. Také není možné na delší dobu přerušit nástřik, což klade dodatečné nároky na časovou organizaci práce a technologickou kázeň.

5. Výsledky

5.1 Primární ostění

Byla navržena a posouzena varianta používající příhradové rámy BRETEX s kari sítěmi v kombinaci se stříkaným betonem C25/30. Podmínky únosnosti splnila varianta o nejmenší možné tloušťce desky, kde osová vzdálenost rámu byla 600 mm. Konstrukce byla posouzena ve dvou časových bodech – v čase $t = 24$ hodin a po dosažení finální pevnosti stříkaného betonu.

Výpočet potvrdil, že navržená konstrukce je schopná přenést plné zatížení od horninové klenby již v čase $t = 24$ hodin, tedy před provedením dalšího pracovního záběru ražby kolektoru.

5.2 Sekundární ostění

Byly posouzeny čtyři varianty konstrukce sekundárního ostění:

- Konstrukce z betonu C30/37 o nejmenší tloušťce 300 mm za použití kari sítí
- Konstrukce z betonu C30/37 o nejmenší tloušťce 300 mm za použití kari sítí a vázané výztuže
- Konstrukce z betonu C30/37 o nejmenší tloušťce 200 mm za použití kari sítí a vázané výztuže

- Konstrukce z drátkobetonu C33/37 – FRC 3,2/2,8/0,8 o nejnižší tloušťce 300 mm za použití kari sítě a vázané výztuže

Všechny varianty konstrukce byly posouzeny na průběhy vnitřních sil získané výpočtem v software GEO 5. Uvažované mezní stavy únosnosti byly ohyb, kombinace tlaku a ohybu a smyk, mezní stavy použitelnosti pak šířka trhlin a omezení napětí v tlačeném betonu a ve výztuži. Vzhledem k možné proměnlivosti geotechnických podmínek ve směru ražby bylo provedeno i posouzení na hodnoty přenásobené modulovým součinitelem γ_m , které simulovaly zatížení na konstrukci v geologických zlomech nebo v částech masivu se značně porušenou horninou. Modulový součinitel také zohledňuje běžně používanou bezpečnostní rezervu návrhu.

Výsledky posouzení jednotlivých variant jsou uvedeny v následující tabulce:

		h=300mm, sítě	h=300mm, pruty	h=200	h=300, FRC
$\gamma_m = 1, MSÚ$	Ohyb	vyhoví	vyhoví	vyhoví	vyhoví
	Ohyb+tlak	vyhoví	vyhoví	vyhoví	vyhoví
	Smyk	vyhoví	vyhoví	vyhoví	vyhoví
$\gamma_m = 1, MSP$	Trhliny	vyhoví	vyhoví	vyhoví	vyhoví
	Omezení napětí	vyhoví	vyhoví	vyhoví	vyhoví
$\gamma_m = 3, MSÚ$	Ohyb	nevyhoví	vyhoví	vyhoví	vyhoví
	Ohyb+tlak	nevyhoví	vyhoví	vyhoví	vyhoví
	Smyk	nevyhoví	vyhoví	nevyhoví	vyhoví
$\gamma_m = 3, MSP$	Trhliny	nevyhoví	vyhoví	nevyhoví	vyhoví
	Omezení napětí	nevyhoví	vyhoví	nevyhoví	vyhoví

Z výsledků je vidět, že pokud by bylo bezpečně zjištěno, že geotechnické podmínky v celé délce stavby jsou jen minimálně proměnlivé a hornina má téměř konstantní vlastnosti bez žádných geologických poruch, dala by se konstrukce nadimenzovat buďto podstatně tenčí, nebo s výrazně nižším množstvím výztuže. Taková situace však v praxi z důvodu vysoké náročnosti provádění geologického průzkumu (např. nemožnost provést vrty v daném místě) i jeho finanční náročnosti nenastane. Pokud tedy konstrukci navrhujeme s bezpečnostní rezervou s ohledem na výskyt míst se značně

nepříznivějšími podmínkami, tenčí a méně vyztužená varianta již podmínky mezních stavů únosnosti a použitelnosti nesplní.

Pro dvě varianty konstrukce, které splnily všechny podmínky mezního stavu únosnosti a použitelnosti bylo provedeno další kolo výpočtů zohledňující vznik trhlin od smrštění.

		h=300, smrštění	FRC, smrštění
$\gamma_m = 1, MSÚ$	Ohyb	vyhoví	vyhoví
	Ohyb+tlak	vyhoví	vyhoví
	Smyk	vyhoví	vyhoví
$\gamma_m = 1, MSP$	Trhliny	vyhoví	vyhoví
	Omezení napětí	vyhoví	vyhoví
$\gamma_m = 3, MSÚ$	Ohyb	vyhoví	vyhoví
	Ohyb+tlak	vyhoví	vyhoví
	Smyk	vyhoví	vyhoví
$\gamma_m = 3, MSP$	Trhliny	vyhoví	vyhoví
	Omezení napětí	vyhoví	vyhoví

Pro obě varianty bylo nutno upravit navržené množství výztuže v konstrukci. Vzhledem k proměnlivé tloušťce desky po obvodu kolektoru a průběhu ohybových momentů se pro vznik trhlin od smrštění ukázaly rozhodující jiné průřezy, než pro únosnost v ohybu a vznik trhlin od zatížení – zatímco u ohybu rozhodoval průřez v dolním rámovém rohu, který je zároveň nejvíce namáhaný a nejtenčí, u trhlin od smrštění rozhodovaly průřezy ve dně v ose kolektoru a v nejtlustším místě stěny, které mají zhruba o 50 % vyšší tloušťku.

V omezení vzniku trhlin od smrštění se ukázala největší výhoda drátkobetonu – vzhledem k tomu, že část tahového napětí od výztuže přebírají drátky, na omezení šířky trhlin na požadovanou hodnotu stačí menší množství výztuže než ve variantě z betonu C30/37. Navržené množství výztuže pro obě varianty je shrnuto v následující tabulce:

	Rámový roh	Podlaha	Stěna	Strop
C30/37	2670 mm ²	2670 mm ²	1649 mm ²	1257 mm ²
C33/37-FRC	2670 mm ²	1571 mm ²	1571 mm ²	1178 mm ²

Celkové množství betonu a oceli na jeden běžný metr konstrukce je následující:

Primární ostění	sítě	234,6 kg
	rámy	492,7 kg
	beton	3,35 m ³
Sekundární ostění Varianta z C30/37	sítě	500,2 kg
	vázaná výztuž	445,2 kg
	beton	5,57 m ³
Sekundární ostění Varianta z C33/37-FRC	sítě	500,2 kg
	vázaná výztuž	364,1 kg
	beton	5,57 m ³

Následuje cenové porovnání obou variant sekundárního ostění. Ceny byly uvažovány 22 Kč za 1 kg oceli na výztuž, 8 Kč za vázání 1 kg vázané výztuže, 2735 Kč za metr krychlový betonu C30/37 a 2977 Kč za metr krychlový drátkobetonu C33/37-FRC 3,2/2,8/0,8. [9]

	Varianta z C30/37	Varianta z C33/37 -FRC
Cena sítí	11 004 Kč	11 004 Kč
Cena vázané výztuže	9 794 Kč	8 010 Kč
Cena vázání	3 561 Kč	2 912 Kč
Cena betonu	15 233 Kč	16 582 Kč
Celková cena	39 592 Kč	38 508 Kč

Je tedy vidět, že i přes vyšší cenu speciální betonové směsi C33/37-FRC 3,2/2,8/0,8 je drátkobetonová varianta cenově výhodnější z důvodu úspory za betonářskou výztuž.

Seznam zdrojů a použitých norem a předpisů:

- [1] – a.s. Kolektory Praha. www.kolektory.cz, Kolektory hlavního města Prahy. 2013
- [2] – Stránky hlavního města Prahy, www.praha.eu
- [3] – ČSN 73 7505. Sdružené trasy městských vedení technického vybavení. 1994
- [4] – Inženýrskogeologický a hydrogeologický průzkum stavba č 8615, kolektor Hlávkův most, PUDIS, a.s, 2006
- [5] – Autorský kolektiv skupiny ČTuK, *Zásady a princip NRTM jako převažující metody konvenčního tunelování v ČR*, 1. vydání, 2006.
- [6] – <http://departments.fsv.cvut.cz/k135>, stránky katedry geotechniky na FSv ČVUT v Praze
- [7] – ČSN EN 14487-1 – Stříkaný beton
- [8] – Autorský kolektiv skupiny ČTuK, *Stříkaný beton v podzemním stavitelství*, 1. vydání, 2008.
- [9] – Ceník transportbetonu a značkových produktů, Českomoravský beton Heidelberg cement group
- [10] – Autorský kolektiv skupiny ČTuK, *Rakouská směrnice pro geotechnický návrh konvenčně ražených podzemních staveb*, 1. vydání, 2011.
- [11] – Jiří Krátký a kolektiv, *Experimenty a analýza chování konstrukčního vláknobetonu*, 1. vydání, 2011.
- [12] – ČSN 73 7505 – Sdružené trasy městských vedení technického vybavení
- [13] – ČSN EN 1992-1-1- Navrhování betonových konstrukcí, obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby
- [14] – Technické standardy společnosti Kolektory Praha, a.s.
- [15] – ČSN 73 7507 – Projektování tunelů pozemních komunikací
- [16] – EC 1997-1 – Navrhování geotechnických konstrukcí
- [17] – ČSN EN 10080 – Ocel pro výztuž do betonu
- [18] – ČSN EN 13670 – Provádění betonových konstrukcí
- [19] – TKP 24 – Tunely
- [20] – TKP D7 – Tunely, podzemní objekty a galerie

- [21] – ČSN 42 0139 – Svařitelná žebírková výztuž do betonu – Všeobecně
- [22] – ČSN EN 206 – Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda
- [23] – ČSN P 73 2450 – Vláknobeton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda
- [24] – ČSN P 73 2451 – Vláknobeton – Zkoušení čerstvého vláknobetonu
- [25] – ČSN P 73 2452 – Vláknobeton – Zkoušení zatvrdlého vláknobetonu

Seznam příloh

- 1 – statický výpočet
- 2 – technická zpráva
- 3 – výkresová část
 - 3a – výkres tvaru
 - 3b – výkres vázané výztuže
 - 3c – výkres sítí v podlaze – horní povrch
 - 3d – výkres sítí v podlaze – spodní povrch
 - 3e – výkres sítí v klenbě – spodní povrch
 - 3f – výkres sítí v klenbě – horní povrch
 - 3g – výkres příhradových rámců
- 4 – fotodokumentace
- 5 – výstupy ze software GEO 5