



Metoda LaserShell

(přístup ke konvenčním ražbám v tuhých jílech)

Prof. Ing. Matouš Hilar, Ph.D.

3G Consulting Engineers s.r.o. a FSv ČVUT v Praze

Tunelářské odpoledne 1/2024 - 13.3.2024

Londýnské jíly

- Obecně dobrá stabilita, lokálně snížena zvodněnými diskontinuitami (greasy backs), jednoduché odtěžování a tvarování výrubu tunelbagrem
- HPV často blízko pod povrchem, nízká propustnost, redistribuce pórových tlaků v řádu měsíců
- $K_0 > 1$ blízko povrchu (překonsolidovanost), s rostoucí hloubkou se K_0 blíží k hodnotě 1



Parametr	Symbol	Jednotka	Hodnota
Vlhkost	w	%	22 – 30
Mez plasticity	w_p	%	20 – 30
Mez tekutosti	w_L	%	60 – 76
Index plasticity	I_p	%	35 – 50
Objemová hmotnost	γ	kN/m^3	19 – 21
Efektivní soudržnost	c'	kPa	0 – 10
Efektivní úhel tření	ϕ'	°	20 – 25
Neodvodněná smyková pevnost	C_u	kPa	$25 + 5Z^{(1)}$
Neodvodněný modul přetvoření ⁽²⁾	E_u	kPa	$400C_u$
Propustnost	k	m/s	$10^{-10} - 10^{-9}$
Součinitel tlaku v klidu	K_0	-	0,5 – 1,5

(1) Z je hloubka měřená od povrchu terénu

(2) Pro výpočty se obvykle používá nelineární analýza

(3) Hodnota K_0 obvykle roste od 0,5 do 1,5 v počáteční hloubce 0,5 až 1,5 m pod rozhraním štěrku a jílu a poté se rostoucí hloubkou přibližuje k asymptotě 1

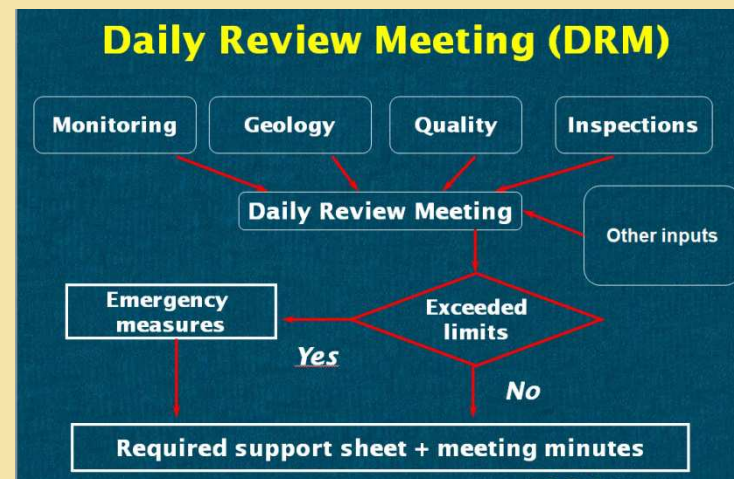
První NRTM ražby v tuhých jílech

- První projekty - Heathrow Express a prodloužení trasy metra Jubilee, ověřovací tunely pro obě stavby
- Havárie NRTM tunelů Heathrow Express 20.10.1994
- Výrazný vliv na harmonogram a cenu díla, byl narušen provoz londýnského letiště Heathrow
- Událost vedla k revizi vhodnosti NRTM do tuhých jílu



Konvenční tunelování v tuhých jílech

- Identifikovány důvody havárie Heathrow Express
- Doporučené změny součástí britské legislativy
- Požadavky a doporučení pro přípravu a výstavbu – např.
 - organizace výstavby (dozor 24/7, denní schůzky - DRM, požadované zajištění – RESS, důraz na smluvní vztahy)
 - důraz na bezpečnost (např. povinné rizikové analýzy)
 - nezávislá kontrola projektové dokumentace (cat. 3 check)
- Začala být používána metoda SCL (Sprayed concrete lining) zohledňující veškerá doporučení



Riziková analýza – britský přístup

- Identifikace a popis možných rizik
- Vytvoření seznamu (registru) rizik
- Stanovení pravděpodobnosti výskytu a závažnosti dopadu rizik
- Určení úrovně rizik (nízká, střední, vysoká)
- Stanovení zmírňujících opatření
- Určení výsledné úrovně rizik
- Určení způsobu zacházení s výslednými riziky
- Aktualizace registru během přípravy a výstavby



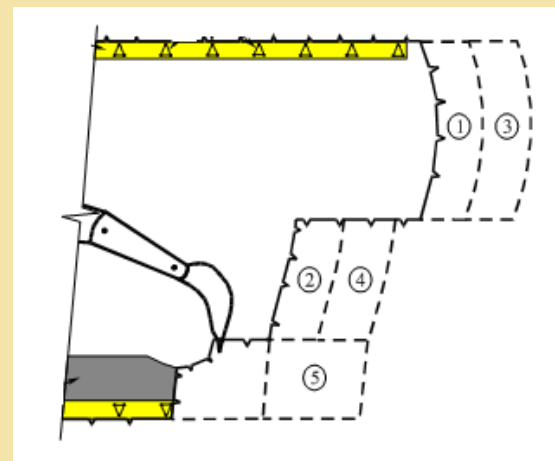
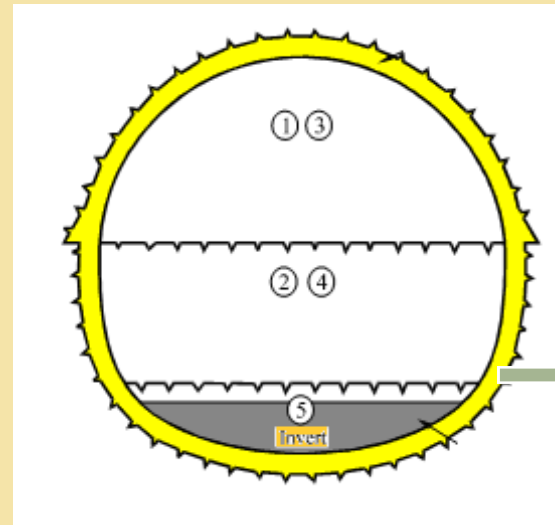
Pravděpodobnost výskytu	Závažnost dopadu				
	1	2	3	4	5
5	Yellow	Red	Red	Red	Red
4	Yellow	Yellow	Red	Red	Red
3	Green	Yellow	Yellow	Red	Red
2	Green	Green	Yellow	Yellow	Red
1	Green	Green	Green	Yellow	Yellow

Úroveň rizika	Bezpečnostní rizika realizace	Komerční rizika	Provozní rizika
Nízká	Kontrola, že riziko nelze eliminovat změnou návrh Pokračovat v návrhu	Hledání alternativních řešení, zvážit cenu prostředků pro omezení rizika (v závislosti na závažnosti důsledků rizika)	
Střední	Zvážit alternativní návrh či změnu metody realizace V případě nedostupnosti alternativ specifikace předběžných opatření, která budou použita Vyjmenování výsledných rizik v registru	Informovat o skutečnosti relevantní strany (řídící pracovníky projektu, dotčené majitele a provozovatele, atd.)	
Vysoká	Hledání alternativních řešení V případě nedostupnosti alternativ specifikace předběžných opatření, která budou použita. Informovat o skutečnosti relevantní strany Vyjmenování výsledných rizik v registru	Vyjmenování výsledných rizik v registru	

Konvenční metoda SCL pro ražbu v tuhých jílech

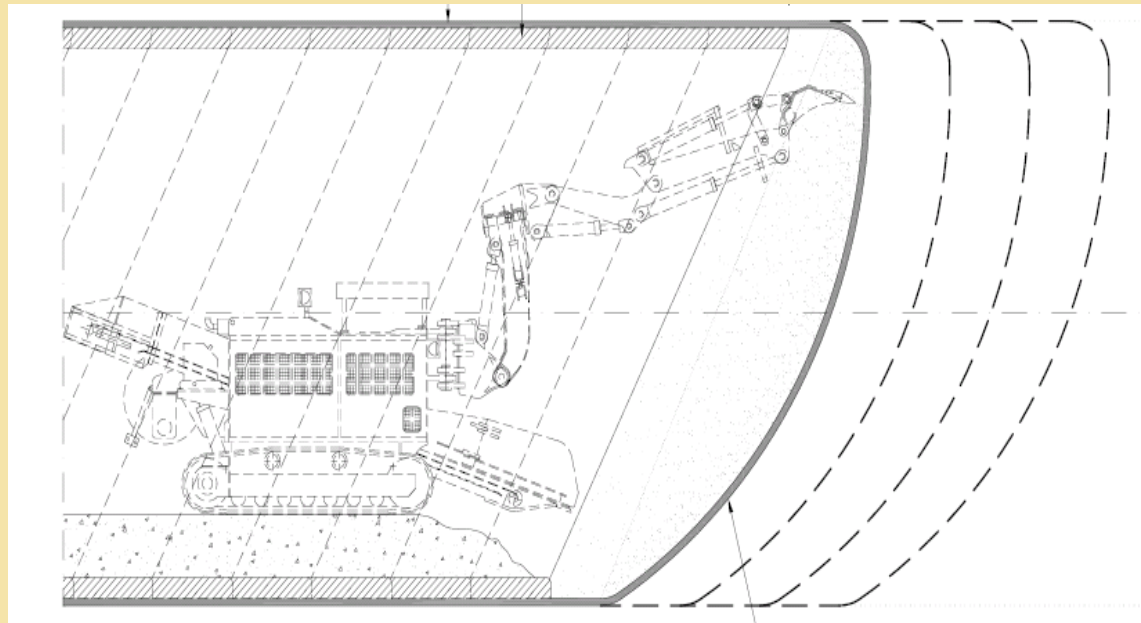


- Důraz na minimalizaci deformací
- Vhodný (klenutý) tvar ostění
- Dostatečná tuhost ostění
- Vysoké nároky na kvalitu (zejména spoje ostění)
- Urychlené uzavírání spodní klenby
- Členění a podpora čelby
- Podrobný monitoring
- Okamžitá reakce na neočekávané chování



Metoda LaserShell

- Vyvinuta firmami Morgan Est (Británie) a Beton-und Monierbau (Rakousko) **pro efektivní ražbu menších profilů v tuhých jílech**, ověřena při ražbách tunelů pro T5 na Heathrow
- **Jednoplášťové vodonepropustné ostění ze stříkaného vláknobetonu** (vyztuženo vlákny bez sítí a rámpů)
- **Zaoblená a ukloněná čelba** – vyšší stabilita čelby, nižší sedání
- Pracovníci nemusí vstupovat do prostoru čelby – vyšší bezpečnost během ražeb



Metoda LaserShell - geometrie



- Geometrie výrubu a ostění kontrolována a zaznamenávána **laserovým přístrojem (TunnelBeamer)**
- Pomocí TunnelBeamer je kontrolována mocnost ostění a nadvýlomy (porovnání předpokládané a skutečné geometrie)
- Striktně požadována **certifikace operátorů trysky** pro dosažení požadované kvality ostění (trvalé ostění)



Metoda LaserShell – začišťování spar

3G

PRAGUE
CONSULTING
ENGINEERS



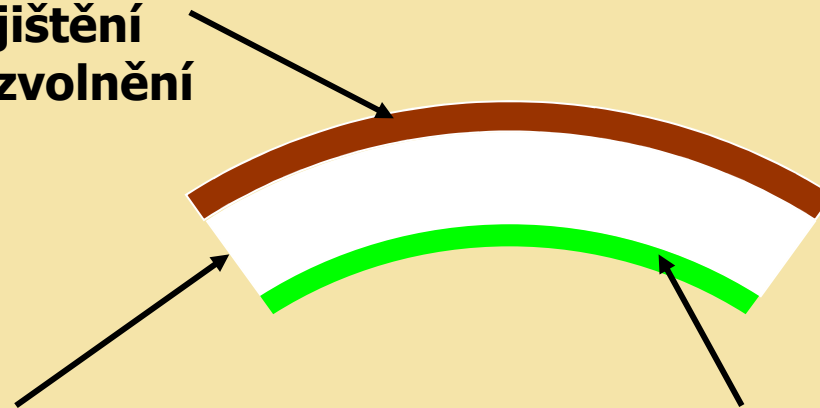
Začišťování ostění tlakovým vzduchem a vodou,
aby v ostění nevznikaly spáry

LaserShell - funkce vrstev ostění



Počáteční „obětní“ vrstva

- Mocnost 75 mm
- Okamžité zajištění omezující rozvolnění



Strukturní vrstva

- Mocnost dle projektu (175 až 250 mm)
- Trvalá nosná vrstva

Dokončující vrstva

- Mocnost 50 mm
- Bez ocelových vláken
- Upravena ručně

Metoda LaserShell – dokončující vrstva



Vrstva bez ocelových vláken s nižším množstvím urychlovačů
Ruční vyhlazení povrchu stříkaného betonu

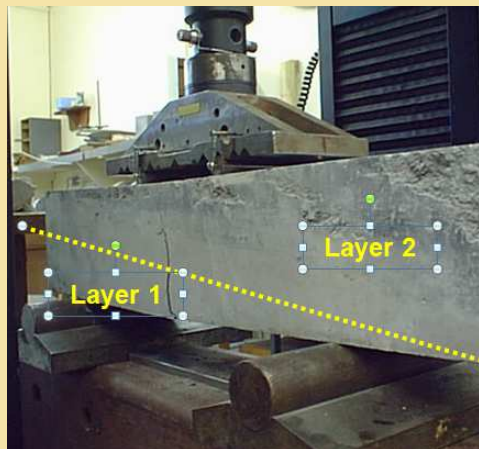
Průkazní zkoušky stříkaného vláknobetonu



Požadavky na beton:

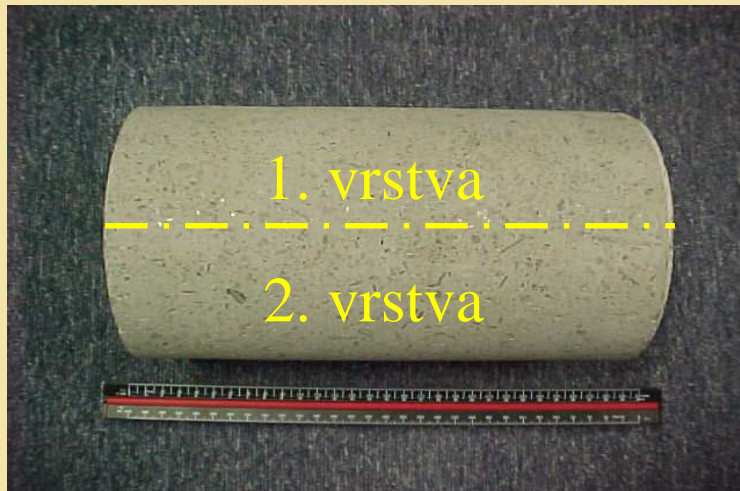
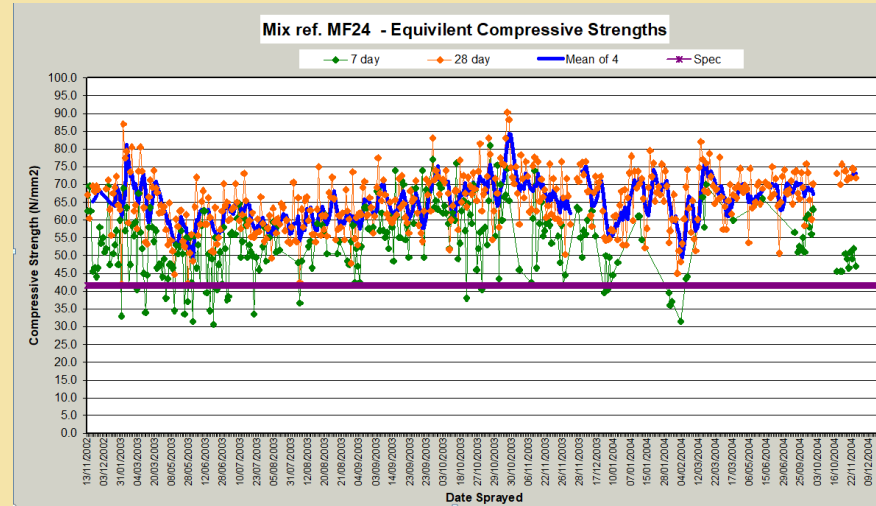
- Nárůst pevnosti (krátkodobá a dlouhodobá pevnost)
- Ohybová tuhost
- Spojení vrstev a styků
- Nízká propustnost (nižší než 10^{-12} m/s)
- Chemická stabilita
- Zpracovatelnost, čerpatelnost

Požadavky byly splněny

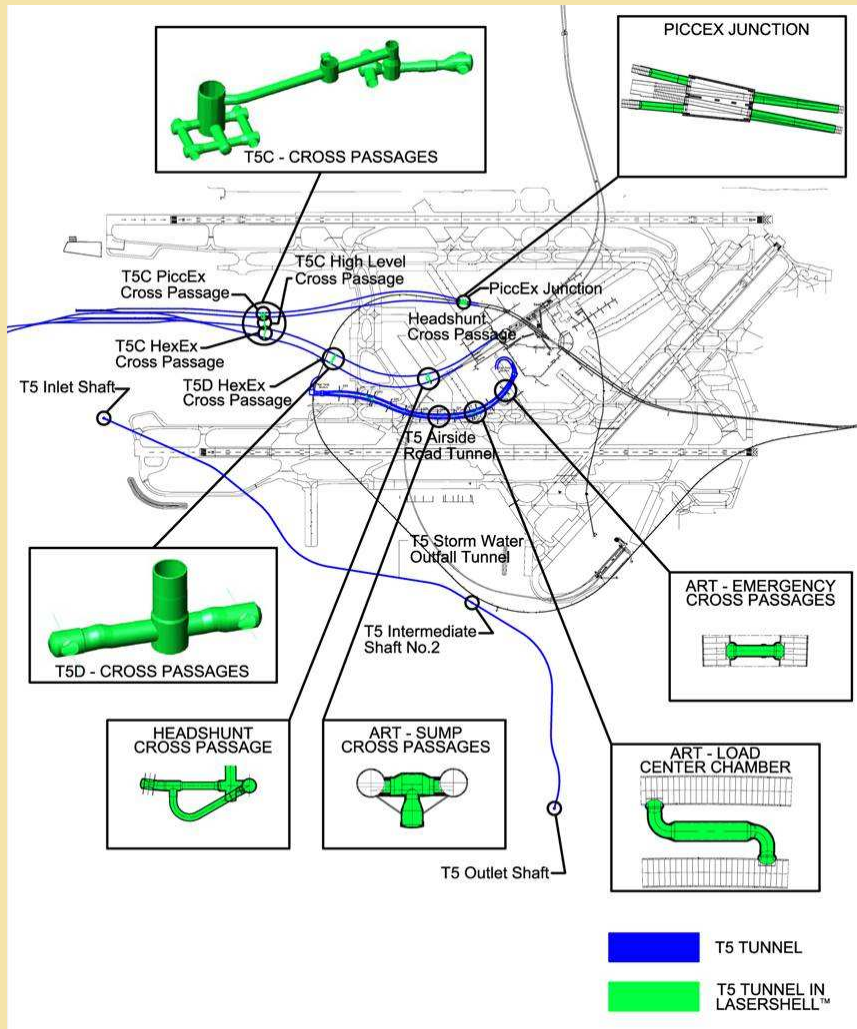


Výsledná kvalita stříkaného betonu

- Vysoká pevnost v prostém tlaku (mikrosilika)
- Kvalitní spojení jednotlivých vrstev
- Hladký povrch



Tvary a rozměry konstrukcí realizovaných pro T5 na Heathrow pomocí LaserShell



Structure	External Diameter (m)	Depth (m)	Length (m)
Storm Water Outfall Tunnel (SWOT)			
Inlet shaft	12	22	
Intermediate shaft 1	7.2	19	
Intermediate shaft 2	6.8	22	
Outlet shaft	11.5	20	
Frontshunt	4.7		41
A3044 Service Tunnel			
North Reception Shaft	6.7	14	
South Reception Shaft	6.7	14	
Airside Road Tunnel (ART)			
8 Emergency Cross-Passages (ECP)	3.7 to 5.5		140
2 Load Centre Rooms (LCR)	4.3 to 5.8		97
2 Emergency Cross-Passage Sumps (ECPS)	5.9 to 7.2		40
2 shafts in ECPS	4.7 to 6.9	22	
Terminal 5C (T5C)			
Piccadilly Extension (PiccEx) shaft	13.8	33	
Intermediate shaft	9.8	19	
Heathrow Express Extension (HEXEx) shaft	7.3 to 9.3	29	
Cross Passage	4.5 to 6.8		193
Terminal 5D (T5D)			
Heathrow Express Extension (HEXEx) shaft	12.5	35.3	
Cross Passage	8.0 to 9.0		68
Other			
HEXEx Headshunt	4.5 to 6.5		100
PiccEx Junction	4.5 to 8.5		200
		TOTAL	880 m

ZÁVĚR



- Původně byla NRTM používána pro konvenční ražby ve skalních horninách v horských oblastech (extravilán)
- Postupně začaly být principy NRTM využívány i v zeminách v prostředí městské zástavby (např. používání metody SCL pro ražby v tuhých jílech ve Spojeném království)
- Metoda LaserShell využívá jednoplášťové ostění ze stříkaného drátkobetonu bez příhradových rámců a bez prutové výztuže, což klade vysoké nároky na kvalitu stříkaného betonu (např. certifikace operátorů trysky)
- Při výstavbě T5 na letišti Heathrow metoda LaserShell splnila požadavky (vysoká bezpečnost, splněné limity sedání povrchu, dostatečná kvalita trvalého ostění ze stříkaného betonu). Následně byla metoda (nebo její principy) používána na jiných projektech (např. Crossrail).

DĚKUJI ZA POZORNOST

