

**České Vysoké Učení Technické v Praze  
Fakulta Stavební**

**Czech Technical University in Prague  
Faculty of Civil Engineering**

**Ing. Matouš Hilar, M.Sc., Ph.D., C.Eng., M.I.C.E.**

**Možnosti výstavby tunelů v tuhých jílech**

**Options of tunnel construction in stiff clays**

## Summary

Tunnelling in the stiff clays is currently a frequently discussed topic in the Czech Republic. The reasons are significant complications during the Brezno tunnel construction which resulted in a serious collapse in 2003 and expected potential complications during recently commenced the Dobrovskeho tunnel construction.

Options of the tunnel construction in stiff clays were solved in detail namely in United Kingdom. The reason is fact that majority of London has been constructed on overconsolidated stiff clays and many underground structures had to be excavated during the historical development of the city. The London Underground construction started in the middle of 19<sup>th</sup> century and its extension continues till present. The excavation had been executed manually from beginning, latterly tunnelling shield with the segmental pre-cast concrete or cast-iron lining had been used as standard solution.

At the end of 20th century New Austrian Tunnelling Method (NATM) has been used for the first time for excavation in stiff clays. A milestone in application of this Method in stiff clays has been year 1994, when during excavation of three parallel tunnels of Heathrow Express in London a significant collapse occurred. Causes of the collapse were investigated in detail and results of examination had a significant impact on approach to design and construction of tunnels in similar geological conditions. A very significant development has been ongoing since 1994 which notably moved current options of construction.

This document discusses current options for the tunnel construction in stiff clays. Possibilities of mechanized excavation using various shields and tunnel boring machines with the pressure on the face (TBMs) are discussed, also opportunities of conventional excavations with a sprayed concrete lining (SCL) are examined. Beside commonly used methods also the most advanced technologies practically verified in a very recent period were considered.

## Souhrn

Ražba tunelů v tuhých jílech je v současné době v České republice poměrně často diskutovanou otázkou. Důvodem byly značné komplikace při výstavbě tunelu Březno včetně rozsáhlé havárie v roce 2003 a očekávané komplikace při nedávno zahájené ražbě tunelu Dobrovského v Brně.

Možnosti výstavby tunelů v tuhých jílech byly podrobněji řešeny především ve Spojeném království. Důvodem je skutečnost, že většina Londýna bylo postavena na překonsolidovaných tuhých jílech a v průběhu historického vývoje města bylo nutné zbudovat značné množství podzemních staveb. V polovině 19. století byla zahájena výstavba londýnského metra, jehož rozšiřování průběžně pokračovalo až do současnosti. Z počátku byla ražba prováděna manuálně, postupně tunelovací štíty s ostěním z prefabrikovaných betonových nebo litinových dílců začaly být uplatňovány jako standardní řešení.

Koncem 20. století byla poprvé použita Nová rakouská tunelovací metoda (NRTM) pro ražby v tuhých jílech. Mezníkem v aplikaci této metody v jílech byl rok 1994, kdy došlo k havárii při výstavbě tří paralelních tunelů Heathrow Express v Londýně. Příčiny havárie byly důkladně vyšetřeny a výsledky šetření měly značný dopad na přístup k projektování a výstavbě tunelů v obdobných geologických podmínkách. Od roku 1994 proběhl výrazný vývoj, který značně posunul současné možnosti výstavby.

Tento dokument se zabývá současnými možnostmi výstavby tunelů v tuhých jílech. Jsou probrány možnosti mechanizované ražby (štíty s otevřenými čely, plnoprofilové tunelovací stroje s tlakem na čelbě), dále jsou probrány možnosti konvenčních ražeb s využitím ostění ze stříkaného betonu (OSB). Kromě běžně užívaných postupů jsou popsány i nejmodernější technologie, které byly ve velmi nedávné době ověřeny v praxi.

**Klíčová slova:**

Tunel, podzemní stavby, jíl, tunelování v zeminách, stříkaný beton, ostění ze stříkaného betonu, OSB, Nová rakouská tunelování metoda, NRTM, plnoprofilový tunelování stroj, TBM

**Key words:**

Tunnel, underground structures, clay, soft ground tunnelling, sprayed concrete, New Austrian Tunnelling Method, NATM, Sprayed Concrete Lining, SCL, tunnel boring machine, TBM

## Obsah

1. Úvod.....	6
2. Popis prostředí tuhých jíílů.....	6
3. Konvenční ražba s využitím OSB .....	7
4. Konvenční metoda LaserShell™ .....	10
5. Mechanizovaná ražba pomocí štítů s otevřeným čelem.....	13
6. Mechanizovaná ražba pomocí TBM s tlakem na čelbě.....	15
7. Závěr.....	18
8. Literatura .....	18
9. Odborný životopis .....	20

## 1. Úvod

Následující text se zabývá současnými možnostmi výstavby tunelů v tuhých jílech. Jedná se o problematiku, která je v současnosti v České republice velmi aktuální. Velmi komplikovaná ražba tunelu Březno v prostředí jílu a jílovce (Hilar a kol. 2008) byla nedávno úspěšně dokončena, naopak ražby tunelu Dobrovského v Brně v prostředí jílu byly nedávno zahájeny. V dané problematice je na špičce vývoje v současné době Spojené království, což je způsobeno především skutečností, že velká část Londýna leží na překonsolidovaných tuhých jílech a problematika ražeb v tomto prostředí musela být řešena v souvislosti s výstavbou metra a dalších potřebných podzemních staveb. Proto je i tento habilitační spis zaměřen zejména na tunelování v prostředí londýnských jílu.

Nejprve jsou probrány možnosti konvenčních ražeb s využitím ostění ze stříkaného betonu (OSB). Jsou probrány hlavní zásady ražeb s OSB v tuhých jílech. Kromě současného standardního přístupu jsou diskutovány i zásady metody LaserShell<sup>TM</sup>, která patří mezi konvenční způsoby výstavby s využitím OSB. Tato metoda byla vyvinuta a ověřena velmi nedávno právě pro ražby v tuhých jílech. Dále jsou také probrány možnosti mechanizované ražby, která dosud nebyla v ČR pro ražbu v tuhých jílech využita. Je probrán běžnější způsob ražby pomocí štítů s otevřeným čelem, dále však je probrána i možnost využití moderního zeminového štítu (EPB TBM) s tlakem na čelbě.

## 2. Popis prostředí tuhých jílu

Jelikož je tento text soustředěn především na technologie ověřené v prostředí tuhých jílu na území Londýna, tak je vhodné nejprve probrat vlastnosti tohoto prostředí. Formace londýnského jílu vznikla usazováním v podmínkách relativně mělkého moře během eocénu, v pánvi, která klesala současně se stoupající výškou mořské hladiny. Termín „londýnský jíl“ znamená překonsolidovaný, tuhý, rozrušený jíl, který někdy může mít proměnlivé vlastnosti. Často obsahuje vrstvy separovaného jílovce, které vznikly usazením a vysrážením z pórové vody bohaté na vápník v oblastech vápinitého jílu, který může být zvodnělý. Porušení je důležitý jev, který vede k charakteristickému vytváření nespojitých bloků, které se mohou při ražbě oddělovat. Typické vlastnosti londýnského jílu jsou uvedeny v tab.1.

**Tab. 1 Přehled základních parametrů Londýnského jílu**

Parametr	Symbol	Jednotka	Hodnota
Vlhkost	w	%	22 – 30
Mez plasticity	w <sub>p</sub>	%	20 – 30
Mez tekutosti	w <sub>L</sub>	%	60 – 76
Index plasticity	I <sub>p</sub>	%	35 – 50
Objemová hmotnost	γ	kN/m <sup>3</sup>	19 - 21
Efektivní soudržnost	c'	kPa	0 – 10
Efektivní úhel vnitřního tření	φ'	°	20 – 25
Neodvodněná smyková pevnost	c <sub>u</sub>	kPa	30 + 5z <sup>(1)</sup>
Neodvodněný modul přetvárnosti <sup>(2)</sup>	E <sub>u</sub>	kPa	400c <sub>u</sub>
Propustnost	k	m/s	10 <sup>-10</sup> – 10 <sup>-9</sup>
Součinitel tlaku v klidu	K <sub>o</sub>	-	0.5 – 1.5

(1) z je hloubka měřená od povrchu terénu

(2) pro výpočty se obvykle používá nelineární analýza

(3) hodnota K<sub>o</sub> 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.

Pevnost neodvodněného vzorku jílu s rostoucí hloubkou stoupá, typicky z cca 50 kPa jílu na povrchu s přírůstkem asi 7,5kPa na 1m hloubky. Youngův modul pružnosti neodvodněného vzorku ( $E_u$ ) se také s rostoucí hloubkou zvyšuje. Podle zpětné analýzy deformací kolem hlubokých ražeb ve středním Londýně je typický  $E_u$  (v MPa) řádově roven hodnotě  $(30 + 5z)$ , kde  $z$  je hloubka v metrech. Jelikož je jíl silně překonsolidovaný, jsou jeho vlastnosti anizotropní, díky čemuž je při jeho povrchu primární napětí a tuhost ve vodorovném směru vyšší než ve směru svislém. V hloubce, kde se nachází mnoho tunelů, ovšem tento materiál vykazuje téměř izotropní tuhost. Když se vlastnosti určují podle výsledků IG průzkumu, tak jsou výsledky ovlivněny použitou zkušební metodou (např. použitou polní nebo laboratorní zkouškou). Velmi dobrý souhrn této problematiky podává Van der Berg (1999).



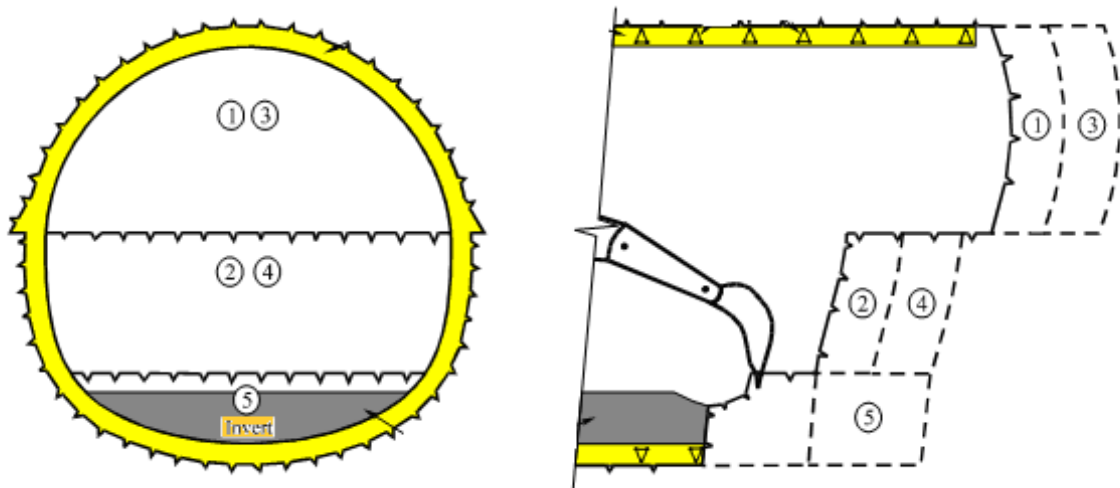
*Obr.1 Čelba tunelu v prostředí londýnského jílu*

Výrub v londýnském jílu má relativně dlouhou dobu samonosnosti, což znamená, že se dají bez problémů razit poměrně velké profily (obr.1). V praxi byly největší plochy výrubu u posledních staveb omezeny u kaloty na přibližně 40 m<sup>2</sup>. Tato velikost vyplývá z praktického požadavku na zvládnutí rizika klouzání nebo vypadávání jednotlivých bloků z čelby. Kromě toho je praktický závěr z hodnot tuhosti uvedených v tab.1 takový, že se tunely v tomto prostředí dají razit s relativně nízkými deformacemi čelby a nízkými radiálními deformacemi masivu, takže ve většině případů je sedání povrchu relativně malé.

### **3. Konvenční ražba s využitím OSB**

Poprvé byl stříkaný beton použit jako dočasné (a trvalé) zajištění výrubu v tunelech, ražených ve skalních horninách, v padesátých letech minulého století. Principy použití však fungují podobně i u měkkých hornin a zemin. V sedmdesátých letech byly úspěšně vyraženy mělce uložené tunely s OSB v zeminách jako součást výstavby metra ve městech jako Frankfurt a Mnichov. Ražba s OSB byla poprvé použita pro náročné stavby staničních tunelů v prostředí londýnských jílu na stavbách Heathrow Express (HEX) a prodloužení trasy metra Jubilee (JLE). Jelikož ražba tunelů s OSB byla ve Spojeném království novou technologií, navíc relativně novou pro aplikaci v zeminách, tak bylo rozhodnuto vyrazit zkušební tunely. Oba

tyto tunely (jak pro HEX tak pro JLE) byly realizovány v tuhých jílech. Po úspěšných ražbách zkušebních tunelů začaly v roce 1994 práce na vlastních stavbách (obr.2). Podrobnější hodnocení ražeb s využitím OSB v Británii je obsaženo v literatuře – Thomas (2003). Pojmu ražba s OSB je v tomto habilitačním spisu dána přednost, jelikož je zcela popisný. Pojem ražba s OSB, na rozdíl od pojmu Nová rakouská tunelovací metoda (NRTM), nezahrnuje žádná filozofická tvrzení o projektování tunelu. Observační přístup NRTM není vhodný pro ražby v tuhých jílech, při kterých je nutné klást důraz na minimalizaci deformací masivu (Thomas 2003).



**Obr.2** Typické členění výrubu při ražbě s OSB v prostředí tuhých jílu

Havárie tří souběžných tunelů na Heathrow během ražeb v říjnu 1994 způsobila značnou škodu na pozemních konstrukcích. Všechny ražby jak na stavbě HEX, tak i na ostatních tunelech ražených s OSB v Londýně, byly zastaveny (i když se na ostatních stavbách neobjevovaly žádné problémy). Důsledkem havárie byla velká revize ražeb s využitím OSB (ICE 1996). Byly zjištěny nedostatky v kontrole kvality a v řízení prací. Některé z hlavních poznatků jsou stručně popsány níže:

- Je potřebný **integrováný přístup** k řízení velkých tunelových děl. Ten by měl zahrnovat organizaci stavby a její rozhodovací struktury, zkušené a kvalifikované klíčové pracovníky a zavedení mechanismů a procedur, které zajistí účinné zvládnutí bezpečnosti a rizik.
- Jak v průběhu projektu, tak v průběhu realizace by měly být využity preventivní nebo ochranné mechanismy, založené na principech **zvládnutí rizik**. Cílem těchto mechanismů v průběhu zpracování projektu je buď se rizikům vyhnout nebo je snížit do stavu, kdy dosáhnou nejnižší rozumně dosažitelné úrovně (As Low as Reasonably Practicable = ALARP). Zbytková rizika jsou pak zvládnuta během stavby pomocí sledování a pomocí předem připravených nouzových opatření.
- Chování tunelů ražených s OSB a chování horninového masivu musí být v průběhu stavby monitorováno, aby bylo ověřeno, že vše odpovídá předpokladům projektu. Výsledky **měření** musí být pravidelně vyhodnocovány v rámci komplexního procesu řízení stavby, který zaručí včasné zjištění abnormálního chování a včasné provedení předem připravených nouzových opatření.

Ražby s OSB byly nejprve obnoveny na stavbě JLE, poté i na HEX. Obě stavby byly úspěšně dokončeny. Podzemní stavitelství bylo nepochybně zkušeností z havárie na HEX posíleno.



Doporučená zlepšení (HSE 2000) byla přijata do běžné praxe, a to jak pro ražby s OSB, tak i pro všechny druhy ostatních ražeb (např. pro zvládnutí rizik na ražbách pomocí TBM – viz. Williams 2005). Integrovaný přístup k řízení staveb s těsnější spoluprací mezi projektantem, stavebním dozorem investora a dodavatelem podpořil týmového ducha, který značně pomohl zdárné rekonstrukci stavby HEX (Audsley a kol. 1999).

Ačkoliv došlo k obratu směrem ke konzervativnímu přístupu, tato otevřená atmosféra na stavbě HEX napomohla k zavádění nových postupů. Například 90 m dlouhá komora křížení železničních tratí Heathrow Express (obr.3) má proměnný profil s maximální výškou 12m a šířkou 16m. Primární OSB bylo vyztuženo ocelovými sítěmi, pro definitivní ostění byl použit stříkaný drátkobeton místo standardního monolitického betonu. Tím byl ušetřen přibližně jeden měsíc z harmonogramu stavby (Annett a kol. 1997). Pro potvrzení vysoké kvality a trvanlivosti stříkaného betonu bylo nutné realizovat podrobné průkazní zkoušky. Nástřik tenké dokončovací vrstvy betonu byl nutný pro překrytí vyčnívajících ocelových drátků a pro vytvoření výsledného hladkého povrchu. Definitivní ostění ze stříkaného betonu bylo použito i na dalších ražbách tunelů s OSB na projektech JLE a HEX. Tento postup se ukázal jako velmi efektivní především v místech nestandardních profilů, jelikož šetřil náklady na náročné bednění potřebné pro monolitický beton. Obecně zkušenosti z Londýna (po havárii v Heathrow) potvrdily, že ražby v tuhých jílech s OSB mohou být bezpečné a ekonomické.



***Obr.3 Komora křížení tunelu HEX s definitivním ostěním ze stříkaného drátkobetonu***

Tunely s OSB se tradičně skládají z primárního ostění, které má uvnitř sekundární ostění z monolitického betonu. Jak bylo poznamenáno výše, použití stříkaného betonu pro sekundární ostění může snížit náklady realizace tunelů s OSB. Dalším vylepšením je použití tzv. jednoplášťového ostění. U jednoplášťového ostění ze stříkaného betonu tvoří všechny nastříkaný beton součást trvalého ostění. Beton lze nanášet v několika vrstvách. Tento způsob jednoznačně šetří čas a peníze ve srovnání s tradičním postupem. Při stavbě zavazadlového tunelu na letišti Heathrow v roce 1996 bylo jednoplášťové ostění použito pro velké nestandardní profily a pro šachty, což bylo první použití jednoplášťového OSB v prostředí tuhých jílu.

Od devadesátých let popularita ražeb v tuhých jílech Metody využitím OSB stále roste. Ražba s OSB se osvědčila jako ekonomicky efektivní a všestranná metoda. Metoda NRTM byla původně vyvinuta pro tunely ve skalních horninách, nyní se již stříkaný beton hojně používá i v zeminách včetně tuhých jílu. Během uplynulých deseti let se používání ražeb s OSB v tuhých jílech rychle rozšířilo. Byly získány zkušenosti s následky špatné organizace stavby a nevhodného způsobu ražeb s OSB, které však lze překonat použitím pevně stanovených procedur koordinace stavby.

#### 4. Konvenční metoda LaserShell™

Metoda LaserShell™ patří mezi nejnovější metody ražby podzemních staveb s využitím OSB. Koncepce této metody LaserShell™ byla vyvinuta společnostmi Morgan Est (Spojené království) a Beton-und Monierbau (Rakousko) pro stavbu výstavbu tunelů v tuhých jílech projektu terminálu 5 (T5) na letišti Heathrow v Londýně.

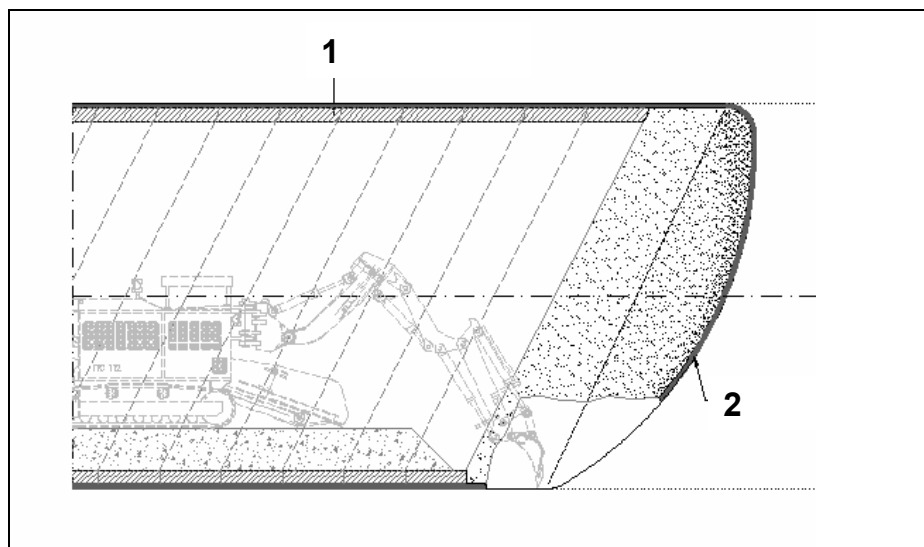
Hlavní charakteristiky metody jsou následující:

- Jedná se o jednoplášťové OSB. Prakticky veškerý nastříkaný beton tvoří součást trvalého vodotěsného ostění.
- Tunelové ostění tvoří stříkaný drátkobeton bez ocelových sítí a bez příhradových rámců. Tím je značně zvýšena bezpečnost, jelikož není nutné vstupovat do prostoru nezajištěné čelby. Navíc se tím zvyšuje kvalita ostění, protože se eliminují problémy stínování v oblasti žeber a koroze oceli. Výkony ražeb mohou být vyšší vzhledem k odpadající instalaci příhradových nosníků a sítí.
- Tvary výrubu a ostění jsou kontrolovány pomocí laserového dálkoměru TunnelBeamer™, kterým je měřena poloha libovolných bodů na povrchu výrubu nebo na vnitřním líci ostění. Údaje dálkoměru jsou průběžně ukládány do počítače umístěného v blízkosti provádění měření. Počítač obsahuje informace o prostorovém tvaru tunelu. Na monitoru se zobrazuje porovnání teoretické a skutečné polohy výrubu či ostění. Počítač ovládá inženýr, který komunikuje s obsluhou tunelbagru nebo či s operátorem trysky (obr. 4).



*Obr. 4 Inženýr používající TunnelBeamer™ pro navádění operátora trysky*

- Čelba je ukloněná a vyklenutá (obr. 5), což zvyšuje stabilitu ve srovnání s klasickou svislou čelbou. Tvar čelby také snižuje sedání povrchu terénu.
- Tunel je ražen na plný profil (v Londýnských jílech do průměru 5m), což vede k minimalizování počtu pracovních spár a k zvýšení produktivity. Rychlé uzavření prstence ostění snižuje způsobené sedání povrchu terénu.



**Obr.5 Klenutý tvar čelby ražené metodou LaserShell™**  
 1 - Strukturální vrstva aplikovaná na počáteční vrstvu  
 2 - Počáteční vrstva aplikovaná na klenutou čelbu

Jednoplášťové ostění je provedeno ve třech vrstvách:

- Počáteční vrstva (tl. 75mm, vyztužená ocelovými drátky) slouží pro okamžité konstrukční zajištění nově vzniklého výrubu a pro zlepšení vodotěsnosti ostění. Tato vrstva je považována za „ztracenou“ z hlediska statického návrhu, protože by mohla být vystavena působení síranů.
- Konstrukční vrstva (obecně 200 – 250mm silná, vyztužená ocelovými drátky) slouží pro vytvoření trvalé nosné konstrukce. Tuto vrstvu lze provádět v několika etapách (v závislosti na poloze a rozměrech tunelu).
- Dokončující vrstva stříkaného betonu (tl. 50mm, bez ocelových drátků) je aplikována po dokončení ražeb a její povrch je upraven ručně, aby bylo dosaženo hladkého profilu ostění. Pro tuto vrstvu je použito nižší množství urychlovače (přibližně 2%).

Před začátkem ražeb byly provedeny rozsáhlé průkazní laboratorní a polní zkoušky (Eddie a Neumann 2003). Pro prokázání vhodnosti mokrého stříkaného betonu pro trvalé ostění byla stanovena následující kritéria:

- Životnost 120 let
- Pevnost 35 MPa po 28, 90 a 365 dnech
- Součinitel propustnosti vody nižší než  $10^{-12}$  m/s
- Schopnost přenášet zatížení po vzniku trhliny (ohybová tuhost)
- Dlouhodobá chemická stabilita
- Dobrá přílnavost mezi dvěma vrstvami (tj. pevnost v tahu betonu s pracovními spárami má být stejná jako pevnost betonu beze spár)
- Styky jednotlivých záběrů by neměly snižovat spojitost ostění.

Dále byla zahrnuta dvě krátkodobá kritéria pro tento materiál:

- Počáteční pevnost má vyhovět požadavkům horního oboru J2, popsaného v rakouské Směrnici pro stříkané betony.
- Zpracovatelnost a čerpatelnost betonové směsi by měla být zachována od doby zamíchání do doby zpracování (normálně 120 minut).

Zkoušky byly prováděny ve třech fázích:

- Laboratorní zkoušky ke stanovení kritérií pro vlastnosti složek směsi
- Polní zkoušky směsí s nejlepšími vlastnostmi, vyvinutými v laboratoři
- Zkoušky trvanlivosti vybraných vzorků

Zkoušky prokázaly, že stříkaný beton splňuje všechna předepsaná kritéria. Bylo splněno kritérium jak krátkodobé, tak dlouhodobé pevnosti. Styky vrstev a sousedních prstenců stříkaného betonu prokázaly dobrou spojitost a nízkou propustnost. Zkoušky pevnosti v tahu při rozštěpení (brazilská zkouška) a trámkové zkoušky prokázaly zanedbatelný rozdíl mezi vzorky stříkaného betonu s pracovními spárami a beze nich. Zkoušky trvanlivosti prokázaly, že stříkaný beton je stabilní a lze jej označit jako velmi trvanlivý (a to i při předávkování urychlovače). Z toho vyplývá, že vlastnosti stříkaného betonu jsou srovnatelné s vlastnostmi monolitického betonu.

Jak již bylo zmíněno, většina prvků metody LaserShell<sup>TM</sup> již byla v minulosti někde použita. Vhodnost stříkaného drátkobetonu pro definitivní ostění, nepropustnost a životnost stříkaného betonu již byly v minulosti prokázány. Průkazní zkoušky před ražbou potvrdily vhodnost složení směsi a styků. Nicméně ražby pro T5 znamenaly první aplikaci metody LaserShell<sup>TM</sup> v plném rozsahu. Tunel Frontshunt s vnitřním průměrem 4,15 m byl využit pro ověření metody.

Monitoring tunelového ostění a sedání povrchu je při ražbách tunelů s OSB běžným nástrojem pro ověření návrhu. Výsledky monitoringu byly porovnány s prostorovým numerickým modelem tunelu Frontshunt. Naměřené pohyby horniny byly menší než bylo předpokládáno. Sedání stropu tunelu se pohybovalo mezi 4 až 8 mm (ve srovnání s očekávanými 15 mm). Maximální sednutí terénu dosahovalo 8 mm, což odpovídá ztrátě objemu 0.7% (ve srovnání s předpokládanou hodnotou 18 mm). Nejvyšší rychlost postupu byla přibližně 4 m za den.

Tunel Frontshunt byl jednou z prvních staveb, na které byl použit systém TunnelBeamer<sup>TM</sup> jako nástroj pro určení geometrie. Proto byl souběžně použit i DIBIT systém, který sloužil pro ověření přesnosti systému TunnelBeamer<sup>TM</sup>. Profil ostění zjištěný pomocí obou systémů byl velice podobný. Přesnost záznamů o mocnosti ostění, zjištěných systémem TunnelBeamer<sup>TM</sup> byla také potvrzena pomocí hloubkových vrtů.

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

Realizace tunelu Frontshunt prokázala, že LaserShell™ je účinnou metodou budování tunelů s využitím OSB, a že chování tunelu bylo v souladu s předpoklady návrhu. Následné ražby pomocí LaserShell™ na stavbě T5 měly podobně dobré výsledky.

Konstrukce ze stříkaného betonu, vytvořené na stavbě terminálu 5 pomocí metody LaserShell™, patří mezi nejkvalitnější na světě. Ukázalo se, že velké úsilí, vynaložené na vývoj tohoto inovačního systému, se vyplatilo. Tato metoda je velmi vhodná pro budování podzemních staveb složitých tvarů (obr.6). Ražby způsobují pouze velmi nízké sedání povrchu, které vyhovuje přísným nárokům na ražby v prostoru městské zástavby. I záznamy o nehodách během realizace vyznívají velmi pozitivně.



**Obr.6 Definitivní ostění ze stříkaného betonu zhotovené metodou LaserShell™**

Jedna z hlavních novinek metody LaserShell™ je použití systému TunnelBeamer™ pro kontrolu profilu. Odstranila se tím potřeba příhradových nosníků, což následně odstraňuje závažná rizika bezpečnosti a životnosti. Používání systému TunnelBeamer™ vyžaduje jistou zkušenost, nicméně inženýři se s tímto nástrojem mohou seznámit poměrně rychle.

**Poznámka:** LaserShell™ a TunnelBeamer™ jsou obchodní známky firem Morgan Est a Beton- und Monierbau. Také evropské a americké patenty na TunnelBeamer™ platí pro firmy Morgan Est a Beton- und Monierbau společně.

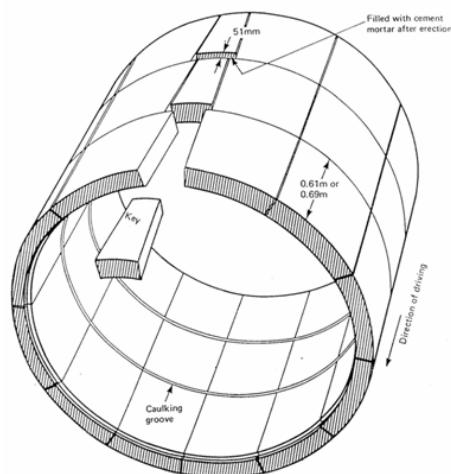
## **5. Mechanizovaná ražba pomocí štítů s otevřeným čelem**

Ražby v tuhých jílech pomocí štítů (obr.7) jsou zpravidla využívána pro kruhové tunely menších profilů, jako jsou tunely metra, kolektory či vodovodní tunely. Rameno osazené na štítu je vybaveno bagrovou lžící či rotační frézou. Po dokončení jednoho záběru ražby je štít pomocí hydraulických lisů opřených o ostění za štítem posunut o 1 m vpřed. Vyražený profil bývá přibližně o 100 mm menší než průměr štítu, takže přední hrana stroje se při posouvání štítu vpřed zařezává do horniny. Potom jsou lisy zasunuty zpět a je sestaven prstenec ostění. Průřez výrubu je řízen velikostí řezací lišty osazené na přední hraně štítu. Velikosti používaných lišt se pohybují do 25 mm, tak aby se sedání horniny přizpůsobovalo rychlosti ražby a horninovým poměrům. Větší rozměr lišty znamená na jednu stranu snadnější řízení, na druhou stranu ale i větší ztrátu objemu zeminy (tj. větší sedání). Pomocí štítů s otevřeným čelem je zpravidla běžné udržet velikost ztráty objemu zeminy do 2%. Průměrná rychlost ražeb se obecně pohybuje mezi 40 a 50 m za den.



**Obr.7 Štít s otevřeným čelem použitý pro ražbu londýnského metra**

Směrové a výškové navádění štítu bývá běžně realizováno pomocí laserového řídicího systému ZED. Tento systém byl složen z terče, řídicí jednotky a spojovací jednotky. Terč bývá použit k měření svislých a vodorovných posunů štítu od referenčního laserového paprsku. Přitom bývá měřeno i vodorovné a svislé natočení štítu a rotace štítu kolem podélné osy. Řídicí jednotka se skládá z hlavní obrazovky a počítače pro obsluhu. Obě tyto jednotky, terč i řídicí jednotka, bývají namontovány na štítu. Spojovací jednotka umožňuje zapojení laseru do systému. Laser i spojovací jednotka bývají osazeny na konzole připojené k ostění tunelu vzadu za štítem.



**Obr.8 Rozpírané ostění z prefabrikovaného železobetonu**

Rozpírané ostění či ostění z klínovým blokem je obecně používáno pro tunely menších kruhových profilů (s průměry do 6 m) v prostředí tuhých jílu. Tento typ ostění je velmi často používán při ražbách pomocí štítů s otevřeným (nezapaženým) čelem. Toto ostění je skládáno z prefabrikovaných železobetonových dílců, je možné využít také dílce z drátkobetonu. Tloušťka dílců je zpravidla 200 - 300 mm, jejich délka bývá 1 m. Prstenec složený dílců je rozepřen do jílu pomocí klínového segmentu tak, aby po vnějším obvodu nezůstala žádná dutina, kterou by bylo nutné injektovat a také aby nebylo nutné ostění šroubovat. Poslední segment uzamyká zbylé dílce jednoho prstence v dané poloze (obr.8). Při použití tohoto typu

ostění je vhodné využít i šroubované dílce, a to u prstenců portálů či šachet. Prstence seskládané ze segmentů nejsou zpravidla zkosené. Oblouky na trase tunelu jsou realizovány pomocí překližkových vložek o různé tloušťce vkládané mezi sousední prstence. Při použití tohoto typu ostění je vhodné využít i šroubované dílce, a to u prstenců u portálů či šachet.

Pro geometrii ostění bývají v případě železničních tunelů či tunelů metra stanoveny relativně přísné tolerance. V případě londýnského metra bývá požadováno, aby žádný bod, měřený kdekoli na dokončeném ostění, neležel více než cca 40 mm od své teoretické polohy. Tato tolerance obsahuje všechny možné druhy nepřesností, kterými jsou určení polohy nivelety, navádění štítu, nepřesnosti při sestavení prstence a také následné deformace prstence. Pro spodní hranici varovného stavu bývá určena hodnota 25 mm. Když rozdíl mezi teoretickou polohou nivelety a hodnotou ZED přesáhne 25 mm, tak je nutné přeměřit geometrii prstence. Pokud je nějaký bod ostění mimo toleranci 40 mm, tak je nutné štít zastavit a polohu ostění rektifikovat.

Pro dopravu dílců bývá v případě maloprofilových tunelů ražených štíty využívána úzkokolejná dráha či kolová doprava. Pro dopravu rubaniny lze použít pásové dopravníky. Pro dopravu rubaniny ze dna šachty lze použít systém zásobníku a pásového dopravníku pro vysoké dopravní úhly, který byl pro dopravu tuhého jílu poprvé použit při výstavbě T5 na letišti Heathrow.

## 6. Mechanizovaná ražba pomocí TBM s tlakem na čelbě

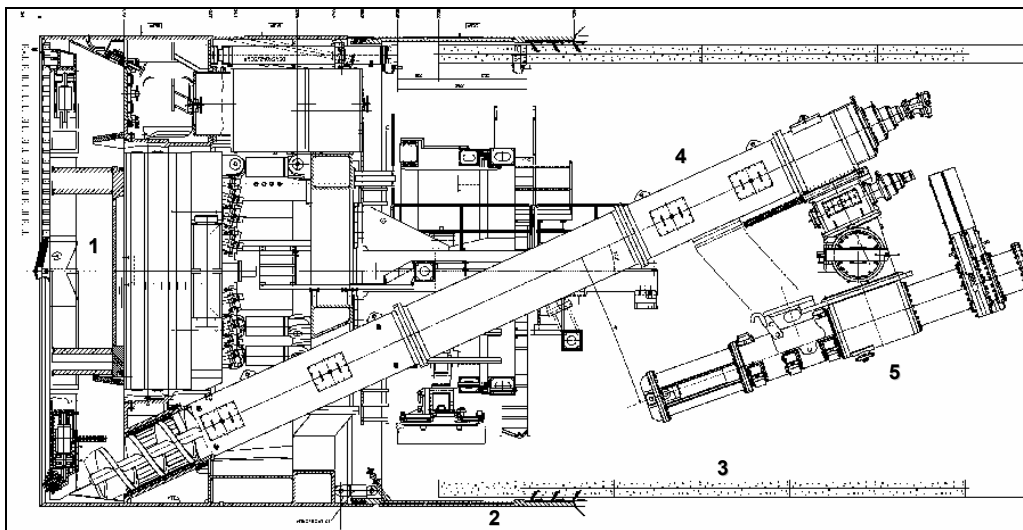
Využití plnoprofilových tunelovacích strojů (TBM – Tunnel Boring Machine), s tlakem na čelbě v prostředí tuhých jílu bývá využito v případech, kdy je důležité zvýšit stabilitu čelby či omezit deformace nadloží. Proto tato technologie bývá využívána především pro tunely větších profilů v prostředí městské zástavby. V úvahu přicházejí dva typy strojů – zeminový štít (EPB – Earth Pressure Balance) a stroj na bázi stlačeného vzduchu (APB – Air Pressure Balance). Zatímco princip stlačeného vzduchu byl v prostředí londýnského jílu již mnohokrát použit, první EPB TBM bylo poprvé v tomto prostředí použito velmi nedávno.



*Obr.9 TBM pro ražbu v tuhých jílech*

Při projektování tunelu ART na letišti Heathrow vzhledem k velice nízkému nadloží tunelu vznikly vážné obavy ohledně kontroly sedání oblasti ovlivněné ražbou. Větší sedání by mohlo velmi vážně narušit chod letiště a teoretické finanční ztráty by mohly dosáhnout velmi vysokých hodnot. Proto bylo nedávno vyvinuto a ověřeno ojedinělé TBM , jehož hlavním cílem bylo snížit veškerá rizika ražby na minimum (obr.9).

Tunel ART byl navržen tak, aby byl v celé délce ražen v londýnském jílu. Z geotechnických výpočtů vyplynulo, že tlak potřebný na čelbě stroje bude 150 – 200 kPa (v závislosti na výšce nadloží). Bylo rozhodnuto vytvořit TBM schopné pracovat ve dvou režimech – APB a EPB. Důvodem pro použití EPB TBM byly možné deprese štěrkového nadloží až do prostoru profilu tunelu, které by v případě práce pod stlačeným vzduchem znamenaly riziko náhlé ztráty tlaku (tzv. erupce nadloží). Možnost nasazení EPB TBM v prostředí londýnského jílu musela být ověřena pomocí testů, které byly provedeny přímo v továrně firmy Herrenknecht (německý výrobce tunelovacího stroje). Testy prokázaly, že bez přidání dalších přísad nelze vytvořit jílovou zátku ve šnekovém dopravníku, která by udržela tlak 200 kPa. Pro udržení tlaku na čelbě byl firmou Putzmeister vyvinut systém dvou pístových pump umístěných na konci šnekového dopravníku. Systém se skládal ze dvou pístů o průměru 750 mm (obr.10) a byl schopen přemísťovat zeminu rychlostí až 400 t/h. Následné testy potvrdily vhodnost použitého systému pro dané prostředí.



**Obr.10 Schéma TBM pro ražbu v tuhých jílech**

- 1 Přetlaková komora a řezná hlava**
- 2 Plášť štítu s těsněním na konci**
- 3 Smontované segmentové ostění**
- 4 Šnekový dopravník**
- 5 Dvoupístové čerpadlo Putzmeister**

Průměr sestrojeného TBM byl 9,15m, délka 6,5m, váha bez šnekového dopravníku 600 t. Čelo stroje bylo ze 70% uzavřené. Vlastní ražba tunelu probíhala po záběrech 1,7 m. Vytěžený jíl byl pomocí šnekového dopravníku dopraven k pístům Putzmeister. Skrz písty byl jíl vytlačen na systém pásových dopravníků, které zeminu dopravily na dočasnou skládku v blízkosti portálu tunelu. Po vyražení záběru byl sestaven prstenec ostění. Délka šroubovaných betonových dílců byla shodná s délkou záběru (1,7 m), tloušťka dílců byla 350 mm. Vnitřní průměr prstence byl 8,1 m. Každý prstenec byl ve svislém směru zkosený (rozdíl 75 mm). Různá poloha zavíracího segmentu zaručovala natočení ostění ve směru osy tunelu.



Prostor mezi ostěním a zeminou (mezera 175 mm) byl vyplněn cementovou směsí (injektáž skrz zadní část pláště). Pro dopravu segmentů, cementové směsi, bentonitu a dalšího materiálu byly použity dva italské kolové dopravníky.

Sedání nadloží tunelu bylo přímo ovlivněno volbou následujících tlaků:

- Tlak na čelbě TBM (tlak zeminy či vzduchu)
- Tlak na plášti TBM (tlak bentonitu)
- Tlak injektáže vnějšího líce segmentů (tlak cementové směsi)

**Tlak na čelbě:** Velikost tlaku na čelbě závisela na použitém režimu. Při EPB režimu byla čelba zaplněna vyraženým materiálem. Vytěžený jííl v prostoru čelby musel být značně „promazán“ pěnovou injektáží a byl vytlačován pomocí šnekového dopravníku a pístů Putzmeister jako pasta z tuby. Velikost tlaku závisela na rychlosti ražby a na rychlosti šnekového dopravníku. Při režimu APB byla čelba zaplněna vytěženým materiálem pouze ze 60%, zbytek prostoru na čelbě tvořil stlačený vzduch. Velikost tlaku vzduchu byla kontrolována regulační jednotkou. Při ztrátě tlaku vzduchu na čelbě byl až do obnovení tlaku na čelbu pumpován větší objem vzduchu. Pokud nebyl tlak rychle obnoven, tak byla řezná hlava zatlačena více do zeminy.

**Tlak na plášti:** Plášť TBM byl kónický, poloměr zadní části pláště byl přibližně o 25mm menší než poloměr přední části. Kónický tvar pláště umožňoval snadnější řízení stroje. Oblast mezi pláštěm a zeminou byla tlakově injektována bentonitem. Injektáž byla původně prováděna skrz plášť pomocí deseti otvorů. Po úvodním testování stroje byl počet používaných otvorů snížen na čtyři (dva v koruně a dva po stranách). Ostatní otvory byly používány pouze pro kontrolu vyplnění celého prostoru. Řezná hlava oddělovala tlak bentonitu od tlaku na čelbě. Kartáče na konci pláště zaručovali, že bentonit neunikne do prostoru za segmenty. Na jeden prstenec ostění bylo použito přibližně 120 litrů bentonitu. Tlak bentonitu byl kontrolován snímači na plášti a manuálním měřáky na injektážních otvorech.

**Tlak injektáže vnějšího líce segmentů:** Rychlé vyplnění prostoru mezi dílci ostění a zeminou (mezikružší 175 mm) bylo důležité pro zajištění výrubu a pro zaručení integrity segmentů. Injektáž byla provedena pomocí šesti čerpadel skrz zadní část pláště stroje. Po počátečním ucpávání spodních otvorů byly během další ražby používány pouze 4 otvory po stranách a v koruně. Na jeden prstenec bylo potřeba 9,5 m<sup>3</sup> směsi.

Po úvodním testování ražby v režimu EPB bylo zjištěno, že tunelovací stroj měl problémy při čelbě stroje zcela zaplněné zeminou (vysoký otáčivý moment řezné hlavy). Při režimu APB byl potřebný moment podstatně nižší (zaplnění prostoru pouze ze 60%). Navíc bylo možno vytěženou zeminu použít na zemní práce na jiných částech stavby (nižší obsah lubrikačních materiálů). Z těchto důvodů byla většina ražeb provedena v režimu APB.

Během ražby prvních 300 m bylo sedání nadloží monitorováno automaticky v reálném čase a hodnoty použitých tlaků byly přímo porovnávány s naměřeným sedáním. Měření ukázala, že tlak vzduchu na čelbě 0,5 barů je dostatečný (původní projekt předpokládal 1-2 bary). Tlak bentonitu na plášti byl zvolen 1 bar (řezná hlava dostatečným způsobem utěsnila prostor mezi pláštěm a čelbou). Tlak injektáže segmentů ostění byl zvolen jako 90% tlaku nadloží plus 0,5 barů (tj. hodnoty do 3 barů).

Měření sedání povrchu ukázaly, že první deformace povrchu byly zaznamenány při vzdálenosti čela TBM 12m od měřeného bodu. Při ražbě pod měřeným bodem bylo zpravidla zaznamenáno zvednutí do hodnot okolo 10 mm. Po projetí TBM pod měřeným bodem bylo zaznamenáno sedání (s hodnotami pod 20 mm). Výsledky měření sedání povrchu ukázaly, že pro 36% délky tunelů bylo realizované sedání povrchu v rozmezí  $\pm 5$  mm, pro 90% bylo realizované sedání povrchu v rozmezí  $\pm 10$  mm. Sedání způsobené tunelovacím strojem nepřesáhlo 20 mm. Celková ztráta objemu zeminy byla pouze 0,35%.

Uvedené unikátní TBM postavené pro ražbu v tuhých jílech splnilo očekávání. Realizace tunelu byla provedena v předpokládaném čase bez narušení provozu letiště, žádné naměřené hodnoty sedání nepřesáhly stanovené mezní hodnoty. Dosažení extrémě nízkých hodnot sedání nadloží bylo dáno jednak komplexností použitého TBM (možnost použití dvou režimů – EPB a APB, kontinuální monitorování tlaku na čelbě, pláště a za segmenty, možnost vysunutí řezné hlavy směrem k čelbě, atd.). Druhým velmi důležitým faktorem vedoucím k úspěchu ražeb byla vhodná koordinace veškerých prací a okamžitá reakce na nestandardní situace (např. změna parametrů stroje při vyšším nárůstu deformací).

## 7. Závěr

Ražby podzemních staveb v tuhých jílech přinášejí řadu obtíží, nicméně současné technologie již umožňují velmi výraznou redukci veškerých rizik. Řešení dané problematiky není v České republice příliš běžné, zkušenosti ze zahraničí a zejména ze Spojeného království však dokazují, že při správném přístupu je možné úspěšně zvládnout i ražby větších profilů v prostředí městské zástavby. Tento habilitační spis přináší základní metody, které mohou být pro výstavbu podzemních staveb v těchto náročných podmínkách využity. Jak již však bylo zmíněno v této publikaci, úspěšná realizace je ovlivněna celou řadou faktorů, jednu ze zásadních rolí hraje lidský faktor. Dostatečná zkušenost, otevřená spolupráce a zodpovědný přístup účastníků přípravy a výstavby jsou zpravidla klíčem úspěchu.

## 8. Literatura

- ABI/BTS (2003). The Joint Code of Practice for Risk Management of Tunnel Works in the UK. London: Association of British Insurers & The British Tunnelling Society.
- Annett, M., Earnshaw, G., Leggett, M. (1997) "Permanent sprayed concrete tunnel linings at Heathrow Airport", Tunnelling '97, IMM, pp 517 – 534.
- Audsley, R. C., Favaloro, G. & Powell, D. B. (1999). Design and implementation of the Heathrow Express Headshunt. Proc. Tunnel Construction and Piling '99, pp.382-398. London: IMM.
- Clarke, P., Thacker, S., Williams, I. (2003): Flying ahead at Terminal 5. Tunnels & Tunnelling, September 2003.
- Deane, A. P. & Bassett, R. H. (1995). The Heathrow Express trial tunnel. Proc. Instn. Civ. Engrs. Geotech. Engrg. 113, July, 144-156.
- Eddie, C., Neumann, C. (2003): LaserShell leads the way for SCL tunnels. Tunnels & Tunnelling, June 2003.
- Hilar, M a kol. (2008): Stříkaný beton v podzemním stavitelství. ČTuK ITA/AITES, Praha, 2008.

- Hilar, M., Heřt, J., Smida, R. (2008): Pre-vaulting and Sequential Construction of the Brezno Tunnel. 5th International Symposium on Sprayed Concrete, Lillehammer, Norway, April 2008.
- Hilar, M., Thomas, A., Falkner, L. (2005): Nejnovější inovace v provádění ostění ze stříkaného betonu – metoda LaserShell. Tunel, 4/2005.
- Hilar, M., Thomas, A. (2005): Výstavba tunelů pod letištěm Heathrow. Tunel, 3/2005.
- Hilar, M., Thomas, A. (2006): Přístup k řešení definitivního ostění tunelových staveb ve Velké Británii. 2. Konference Beton v podzemních a základových konstrukcích. Praha.
- Hilar, M. (2006): Návrh a aplikace TBM pro ražbu tunelu ART. 34. Konference Zakládání staveb Brno 2006 - Sborník příspěvků.
- HSE (1996). Safety of New Austrian Tunnelling Method (NATM) tunnels, Health and Safety Executive, 86pp. London: HSE Books, HMSO.
- HSE (2000). The collapse of NATM tunnels at Heathrow Airport. Norwich: Health & Safety Executive Books, HMSO.
- ICE (1996): Sprayed Concrete Linings (NATM) for tunnels in soft ground, Institution of Civil Engineers design and practice guides, Thomas Telford, London.
- Jones, B. - Thomas, A., Hsu, Y., S., Hilar, M. (2008): Evaluation of a novel method of SCL tunnelling. Geotechnical Engineering Journal.
- Jones, B. D. (2007). Stresses in sprayed concrete tunnel junctions. PhD thesis, University of Southampton, UK.
- Mair, R. J. (1998). Geotechnical aspects of design criteria for bored tunnelling in soft ground. In Tunnels and Metropolises, Proc. World Tunnel Cong. (eds. A. Negro Jr. and A. A. Ferreira), São Paulo, Brazil, pp.183-199. Rotterdam: Balkema.
- O'Reilly, M. P. & New, B. M. (1982). Settlements above tunnels in the United Kingdom – their magnitude and prediction. Proc. Tunnelling '82, pp.173-181. London: IMM.
- Powell, D. B., Sigl, O. & Beveridge, J. P. (1997). Heathrow Express – design and performance of platform tunnels at Terminal 4. Proc. Tunnelling '97, London, pp.565-593. London: IMM.
- Powell, D. B., Clayton, C. R. I. (2007): SCL Tunnelling in stiff clays: Recent experience and future needs. Collection of keynote lectures from the WTC 2007, Prague.
- Thomas A.H. (2003): Numerical modelling of sprayed concrete lined (SCL) tunnels, PhD thesis, University of Southampton, 2003.
- Thomas, A. H., Clayton, C. R. I. & Norris, P. (2001). The role of constitutive models in the analysis of shotcrete-based ground support systems. In Shotcrete: Engineering Developments, Proc. Int. Conf. Engineering Developments in Shotcrete, Hobart, Tasmania, Australia (ed. E. S. Bernard), pp.237-244. Rotterdam: Balkema.
- Thomas, A.H., Legge, N. B., Powell, D. B. (2004): The development of Sprayed Concrete Lined (SCL) Tunnelling in the UK, EUROCK 2004 & 53rd Geomechanics Colloquium, Schubert.
- Van der Berg, J. P. (1999). Measurement and prediction of ground movements around three NATM tunnels. PhD thesis, University of Surrey, UK.
- Williams I. (2005): Managing risk at T5. Tunnels & Tunnelling, April 2005.
- Williams, I., Neumann, C., Jager, J., & Falkner, L. (2004): Innovative Shotcrete Tunnelling for London Heathrow's new Terminal 5, EUROCK 2004 & 53rd Geomechanics Colloquium, Schubert.
- Williams, I., Thacker, S. (2003): The ART of success under Heathrow. Tunnels & Tunnelling, September 2003.

## 9. Odborný životopis

Jméno a tituly: Ing. Matouš Hilar, M.Sc., Ph.D., C.Eng., M.I.C.E.

Datum narození: 8.11.1973

Místo narození: Praha

Národnost: česká

Zaměstnání: D2 Consult Prague s.r.o.  
Zelený pruh 95/97 (KUTA), 140 00, Praha 4

Tel.: (+420 2) 41443411

Fax: (+420 2) 41443411

E-mail: hilar@d2-consult.cz

### Univerzitní a vědecké hodnosti:

- 2005 C.Eng. - Chartered Engineer - autorizovaný inženýr, Velká Británie (VB)
- 2004 Autorizovaný stavební inženýr pro obor geotechnika, ČR
- 2001 Ph.D. - Doctor of Philosophy - obor KD, FSv ČVUT v Praze, ČR
- 2000 M.Sc. - Master of Science v geotechnickém inženýrství, University of Glasgow, VB
- 1997 Ing. - Stavební inženýr - specializace geotechnika, obor KD, FSv ČVUT v Praze, ČR

### Semináře a školení:

- 2001 Eurosummerschool on Tunnelling Mechanics, Innsbruck, Rakousko
- 2001 International Course on Computational Geotechnics, Istanbul, Turecko

### Členství v odborných organizacích:

- ICE - Institution of Civil Engineers – člen (M.I.C.E.)
- ČKAIT - Česká komora autorizovaných inženýrů a techniků - člen
- BTS - British Tunnelling Society - člen
- ČTuK - Český tunelářský komitét – korespondent, vedoucí skupiny pro stříkaný beton
- World Tunnelling Congress 2007 - zástupce předsedy vědecké rady a člen organizačního výboru
- ITA - International Tunnelling Association - člen pracovní skupiny WG12 (Shotcrete Use)
- Odborný redaktor časopisu Tunel

### Profesionální dráha:

- 2006 - nyní D2 Consult Prague s.r.o., ČR – specialista pro podzemní stavby
- 2002 - 2006 Mott MacDonald, VB – projektant a koordinace výstavby podzemních staveb
- 2001 - 2002 D2 Consult, Rakousko – projektant podzemních staveb
- 2001 Satra s.r.o. – projektant podzemních staveb
- 1997 – 2000 FSv ČVUT, interní doktorand na katedře geotechniky

### **Výzkumné a profesionální zájmy:**

- Konvenčně ražené podzemní stavby (NRTM)
- Podzemní stavby realizované pomocí tunelovacích strojů (TBM)
- Numerické výpočty podzemních staveb a geotechnických konstrukcí

### **Spolupráce na projektech:**

- Tunel Praha - Beroun, Nové železniční spojení, ČR – technická pomoc investora
- Tunel Březno u Chomutova, ČR – technická pomoc investora
- Tunel Hindhead na silnici A3, VB – přípravná a realizační dokumentace
- Crossrail, Londýn, Anglie – přípravná dokumentace
- Terminál 5 (T5), letiště Heathrow, VB – příprava a koordinace realizace
- Dublin Port Tunnel, Irsko – nezávislá kontrola realizační dokumentace
- Channel Tunnel Rail Link (CTRL), VB – statické výpočty
- Tunel SMART, Kuala Lumpur, Malajsie – přípravná a realizační dokumentace
- Tunel Koralm, železniční spojení Graz-Klagenfurt, Rakousko – statické výpočty
- Tunel Mrázovka, ČR – realizační dokumentace

### **Vybrané prestižní publikace:**

- Hilar, M a kol. (2008): Stříkaný beton pro podzemní stavby v ČR. ČTuK ITA/AITES, Praha, 2008, ISBN 978-80-254-1262-6.
- Jones, B. - Thomas, A. - Hsu, Y., S. - Hilar, M. (2008): Evaluation of a novel method of SCL tunnelling. Geotechnical Engineering Journal.
- Hilar, M. (2007): SMART – jedinečný tunel pro Kuala Lumpur, Malajsie. Stavebnictví, roč. 1, č. 5. ISSN 1802-2030.
- Hilar, M. - Lyons, P. - Laimbeer, A. (2006): Automatický monitoring provozovaných železničních tunelů na Heathrow. Tunel, roč. 15, č. 2. ISSN 1211-0728.
- Srb, M - Hilar, M. (2006): Definitivní ostění konvenčně ražených tunelů v České republice – současnost a budoucnost. Beton, roč. 6, č. 6. ISSN 1213-3116.
- Hilar, M. - Thomas, A. - Falkner, L. (2005): Nejnovější inovace v provádění ostění ze stříkaného betonu – metoda LaserShell. Tunel, roč. 14, č. 4. ISSN 1211-0728.
- Hilar, M. - Thomas, A. (2005): Výstavba tunelů pod letištěm Heathrow. Tunel, roč. 14, č. 3. ISSN 1211-0728.
- Thomas, A. - Powell, D. - Hilar, M. (2004): Úloha numerického modelování při projektování tunelů. Tunel, roč. 13, č. 1, str. 25-28. ISSN 1211-0728.
- Hilar, M. (2003): NATM support in Prague's weak rock. Tunnel & Tunnelling International. September 2003. 35/9, s. 53-56. Londýn. ISSN 0041-414X.
- Barták, J. - Pruška, J. - Hilar, M. (2003): Statistical Analysis of Input Parameters Influence to the Tunnel Deformations Modelling. Computational Stochastic Mechanics. Rotterdam: Millpress Science Publishers, s. 23-28. ISBN 90-77017-74-7.

### **Jazykové znalosti:**

Anglicky, rusky