

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

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

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

Současné trendy ve výstavbě ražených dopravních tunelů

Present trends in construction of mined transport tunnels

Summary

This publication is focused on the present trends in construction of the mined transport tunnels. Present methods of the mined transport tunnels excavation can be divided into two basic groups: conventional methods of excavation and mechanical tunnelling using tunnelling machines (technology TBM – Tunnel Boring Machines).

The following methods belong to the conventional tunnelling methods: the New Austrian Tunnelling Method (NATM), the Norwegian Tunnelling Method (NTM), British LaserShell method, Italian method ADECO-RS, French pre-cutting method, etc. The NATM is actually the most often used, however there are some experiences with other conventional methods in the CR, thus they are also briefly described. The in situ casted reinforced concrete together with sheet insulation is the most frequently used for the final (permanent) tunnel lining in case of conventional methods (especially NATM). The publication presents also alternative solutions as unreinforced final linings, permanent lining from sprayed concrete or sprayed impermeable membranes which can offer various advantages as cost reduction, shorter time schedule, lower risk of failure, etc.

Tunnelling machines (TBM technology) are advantageous (in comparison to conventional methods) namely for excavation of longer tunnels which is given by higher cost of these machines. The tunnelling machines allow excavation in soft ground (tunnelling shields) and in hard rock (hardrock TBMs). Modern tunnelling machines were firstly utilised in the CR in 2011 for the excavation of the Prague metro line A extension. In 2015 started excavation of the railway tunnel Ejpovice using convertible tunnelling machine with diameter 9.84 m. The segmental tunnel lining is usually installed during excavation by tunnelling shields, the lining is traditionally composed from precast concrete segments reinforced by steel bars. Due to presented mechanical excavations the steel fibre reinforced segments (SFRC) without steel bars could be tested and applied in the CR.

Souhrn

Tento inaugurační spis se zabývá současnými trendy při výstavbě ražených dopravních tunelů. Současné metody výstavby ražených dopravních tunelů lze rozdělit na dvě základní skupiny: konvenční metody ražby a mechanizované tunelování pomocí plnoprofilových tunelovacích strojů (technologie TBM – Tunnel Boring Machines).

Do skupiny konvenčních tunelovacích metod patří především dominující Nová rakouská tunelovací metoda (NRTM), dále pak Norská tunelovací metoda (NTM), britská metoda LaserShell, italská metoda ADECO-RS, francouzská metoda obvodového vrubu, atd. Z uvedených metod je v ČR v současnosti nejčastěji využívána NRTM, nicméně již jsou u nás také zkušenosti s dalšími konvenčními metodami, proto jsou tyto metody také stručně popsány. Pro definitivní (trvalé) ostění konvenčně ražených tunelů (zejména u NRTM) je standardně využíváno monolitické železobetonové betonové ostění, mezi primární a sekundární ostění je zpravidla vkládána mezilehlá fóliová izolace. V publikaci jsou uvedena alternativní řešení jako nevyztužená sekundární ostění, definitivní ostění ze stříkaného betonu či stříkané hydroizolace, která oproti tradičním řešením mohou přinášet různé výhody (nižší cena, kratší doba výstavby, nižší riziko porušení, atd.).

Plnoprofilové tunelovací stroje jsou oproti konvenčním metodám výhodné především při ražbách delších tunelů, což je dáno vyšší pořizovací cenou těchto strojů. Tyto stroje umožňují ražbu v zeminách (tunelovací štíty), tak v tvrdých horninách (hardrock TBM). Moderní tunelovací stroje byly v ČR poprvé nasazeny až v roce 2011 pro ražbu prodloužení trasy A metra v Praze. V roce 2015 byla zahájena ražba tunelu Ejpovice pomocí konvertibilního tunelovacího stroje průměru 9,84 m. Za tunelovacími štíty je během ražby zpravidla instalováno ostění kruhového tvaru, které je zpravidla skládáno z prefabrikovaných železobetonových segmentů. Vzhledem k uvedeným ražbám mohlo být v ČR ověřeno a aplikováno využití drátkobetonových segmentů bez prutové výztuže.

Klíčová slova:

Tunel, podzemní stavby, Nová rakouská tunelovací metoda, NRTM, plnoprofilový tunelovací stroj, TBM, stříkaný beton, segmentové ostění, vláknobeton, stříkané membrány

Key words:

Tunnel, underground construction, New Austrian Tunnelling Method, NATM, tunnel boring machine, TBM, sprayed concrete, segmental lining, steel fibre reinforced concrete, sprayed membranes

Obsah

1.	Úvod	5
2.	Konvenční metody ražby	6
2.1.	Nová rakouská tunelovací metoda	6
2.2.	Metoda LaserShell	7
2.3.	Norská tunelovací metoda	10
2.4.	Metoda ADECO-RS	11
2.5.	Metoda obvodového vrubu	13
3.	Definitivní ostění konvenčně ražených tunelů	14
3.1.	Standardní přístup	14
3.2.	Nevyztužená monolitická ostění	15
3.3.	Ostění ze stříkaného betonu	16
3.4.	Stříkané hydroizolace	17
4.	Mechanizované tunelování	19
5.	Segmentová ostění tunelů z drátkobetonu	21
6.	Závěr	23
7.	Literatura	23
8.	Strukturovaný životopis	25

1. Úvod

Tento inaugurační spis se zabývá současnými trendy při výstavbě ražených dopravních tunelů. Vzhledem k charakteru publikace jsou důkladněji probrány především trendy v České republice (ČR), na jejichž vývoji se autor publikace osobně podílel. Současné metody výstavby ražených dopravních tunelů lze rozdělit na dvě základní skupiny: konvenční metody ražby a mechanizované tunelování pomocí plnoprofilových tunelovacích strojů (technologie TBM – Tunnel Boring Machines).

Do skupiny konvenčních tunelovacích metod patří především dominující Nová rakouská tunelovací metoda (NRTM), dále pak Norská tunelovací metoda (NTM), britská metoda LaserShell, italská metoda ADECO-RS, francouzská metoda obvodového vrubu, atd. Z uvedených metod je v ČR i v zahraničí v současnosti nejčastěji využívána NRTM. Pro definitivní (trvalé) ostění konvenčně ražených tunelů (zejména u NRTM) je standardně využíváno monolitické železobetonové betonové ostění, mezi primární a sekundární ostění je zpravidla vkládána mezilehlá fóliová izolace. V publikaci jsou uvedena alternativní řešení jako nevyztužená sekundární ostění, definitivní ostění ze stříkaného betonu či stříkané hydroizolace, která oproti tradičním řešením mohou přinášet různé výhody (nižší cena, kratší doba výstavby, nižší riziko porušení, atd.).

Plnoprofilové tunelovací stroje jsou oproti konvenčním metodám výhodné především při ražbách delších tunelů, což je dáno vyšší pořizovací cenou těchto strojů. Tyto stroje umožňují ražbu v zeminách (tunelovací štíty), tak v tvrdých horninách (hardrock TBM). Moderní tunelovací stroje byly v ČR poprvé nasazeny až v roce 2011 pro ražbu prodloužení trasy A metra v Praze [4]. V roce 2015 byla zahájena ražba tunelu Ejpovice pomocí konvertibilního tunelovacího stroje průměru 9,84 m. Za tunelovacími štíty je během ražby zpravidla instalováno ostění kruhového tvaru, které je zpravidla skládáno z prefabrikovaných železobetonových segmentů. Vzhledem k uvedeným ražbám mohlo být v ČR ověřeno a aplikováno využití drátkobetonových segmentů bez prutové výztuže.

2. Konvenční metody ražby

2.1. Nová rakouská tunelovací metoda

Nová rakouská tunelovací metoda (NRTM) vychází z principů, které byly částečně historicky známe již od samých počátků tunelování a důlní činnosti. Jednalo se především o předpoklad, že součástí nosného systému výrubu tunelu může být i samotné horninové prostředí, které spolupůsobí s technickými prostředky zajištění výrubu. Dále také o poznatek, že umožnění deformace horninového masivu směrem do výrubu sníží napětí v masivu a tím i zatížení prvků zajištění výrubu (např. poddajné důlní výztuže). Teprve nové technologické prostředky a zajišťovací prvky vyvinuté v padesátých letech (především stříkaný beton a svorníky) umožnily plné využití těchto principů formulovaných Prof. Rabcewiczem v padesátých a šedesátých letech 20. století.



Obr.1 Výstavba tunelu Slivenec (SOKP 514) pomocí NRTM

NRTM je tunelovací metoda, která vědomě a cíleně využívá nosných vlastností horninového masivu s cílem optimalizovat proces ražení a zabezpečování výrubu a minimalizovat s tím spojené ekonomické náklady. Při výstavbě tunelů pomocí NRTM je obvykle stabilita výrubu zajištěna primárním ostěním a definitivní konstrukce tunelové trouby (sekundární ostění) je budována teprve po ustálení napětově-deformačního stavu v okolí výrubu. Hlavními konstrukčními prvky primárního ostění jsou

stříkaný beton (obr.1) a kotevní systém. Nedílnou součástí NRTM je geotechnický monitoring opírající se především o měření deformací tunelového výrubu. NRTM se tak z hlediska geotechnického řadí do skupiny observačních metod, u kterých je průběh výstavby průběžně sledován, a způsob ražby a zajištění výrubu primárním ostěním jsou upravovány podle skutečného chování výrubu a horninového masivu.

Vzhledem k politické situaci začala být NRTM využívána v ČR až po roce 1989, tudíž se značným zpožděním v porovnání s okolními západními státy. V současné době lze konstatovat, že principy NRTM již byly v ČR technicky zvládnuty a NRTM je v ČR jednoznačně nejčastěji používanou metodou pro ražbu dopravních tunelů. Vzhledem k převažujícímu konzervativnímu přístupu investorských organizací je však prosazování nových trendů v ČR relativně obtížné, nicméně do jisté míry se daří držet krok s vývojem v zahraničí (nevyztužená sekundární ostění, využití stříkaných vodonepropustných membrán, jednoplášťová ostění ze stříkaného betonu, využití stříkaného drátkobetonu, atd.).

Autor publikace se osobně podílel na přípravě nebo výstavbě řady dopravních tunelů v ČR (např. tunely Mrázovka, Malá Huba, Hněvkovský I, Březno, Prackovice, SOKP 513, SOKP 514, Brusnice, atd.).

2.2. Metoda LaserShell

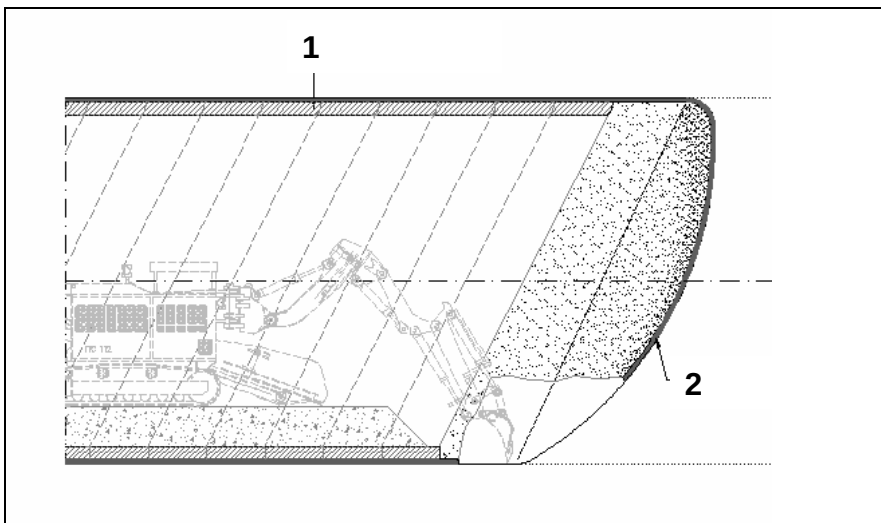
Metoda LaserShell [16] patří mezi nejnovější metody ražby podzemních staveb. Koncepce této metody LaserShell byla vyvinuta společnostmi Morgan Est (Spojené království) a Beton-und Monierbau (BeMo - Rakousko) pro stavbu výstavbu tunelů v tuhých jílech projektu Terminálu 5 (T5) na letišti Heathrow v Londýně [17]. Společnost BeMo je v současnosti vlastněna českou firmou Metrostav a.s. V ČR metoda LaserShell dosud využita nebyla, nicméně autor této publikace se přibližně 3 roky aktivně podílel na jejím vývoji a ověřování na stavbě v roli projektanta a zástupce projektanta na stavbě během svého působení ve Spojeném království, proto je zde tato metoda popsána podrobněji.

Hlavní charakteristiky metody jsou následující:

- Jedná se o jednoplášťové ostění ze stříkaného betonu (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.
- Čelba je ukloněná a vyklenutá (obr.2), 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 sedání povrchu terénu způsobené ražbou.



Obr.2 Klenutý tvar čelby ražené metodou LaserShell
 1 - Strukturní 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 (obr.3). Pro tuto vrstvu je použito nižší množství urychlovače (přibližně 2%).

Před začátkem ražeb byly provedeny rozsáhlé průkazní laboratorní a polní zkoušky [18]. 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 zkoušky na trámčích prokázaly zanedbatelný rozdíl mezi vzorky stříkaného betonu s pracovními spárami a bez 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.

Konstrukce ze stříkaného betonu, vytvořené na stavbě Terminálu 5 pomocí metody LaserShell, vykazují po uvedení do provozu vysokou kvalitu. Ukázalo se, že velké úsilí, vynaložené na vývoj tohoto inovačního systému, se vyplatilo. Tato metoda je velmi vhodná pro budování podzemních staveb složitých tvarů. Ražby způsobují pouze velmi malé sedání povrchu, které vyhovuje přísným nárokům na ražby v prostoru městské zástavby [13]. I záznamy o nehodách během realizace vyznívají velmi pozitivně.

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.



Obr.3 Ostění ze stříkaného betonu zhotovené metodou LaserShell

2.3. Norská tunelovací metoda

Norská tunelovací metoda (NTM) je využívána v posledních 40 letech zejména v severských zemích, kde jsou ražby zpravidla prováděny v tvrdých skalních horninách pomocí trhacích prací se záběry větší délky (až 5 m). Základním aspektem NTM (někdy nazývané metoda Drill & Blast) je použití provizorní výztuže, svorníků a stříkaného betonu s rozptýlenou výztuží (ocelové drátky, případně polypropylenová vlákna). Provizorní výztuž není separována od definitivního ostění a tvoří jeden celek. Definitivní vyztužení tvoří zpravidla další vrstva stříkaného betonu a doplnění svorníků do definovaného rastru. Návrh vyztužení díla se zpravidla provádí na základě norského klasifikačního systému Q.

V ČR vzhledem k místním geologickým poměrům a také vzhledem k výrazně vyšší hustotě dopravy nebyla dosud NTM využita. Česká firma

Metrostav a.s. již má s danou technologií zkušenosti z výstavby dopravních tunelů v Norsku (tunely Veitastrond a Joberg), Finsku (Länsimetro) a na Islandu (tunely Siglufjörður, Ólafsfjörður – obr.4, Norðfjörður) [2]. Délka dopravních tunelů realizovaných českou firmou Metrostav a.s. pomocí NTM již přesahuje 22 km.



Obr.4 Tlaková voda v tunelu Ólafsfjörður realizovaném NTM

2.4. Metoda ADECO-RS

Metoda ADECO-RS (zkratka Analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli), někdy také nazývaná Nová italská metoda (NIM) byla vyvinuta profesorem Lunardim v 80. letech minulého století a vychází z filozofie postavené na ochraně blízkého předpolí čelby (blok zeminy či horniny o profilu tunelu, který se nachází před čelbou tunelu) proti deformaci. Existuje přímý vztah mezi velikostí deformací probíhajících před čelbou, deformací čelby a velikostí deformací výrubu a primárního ostění měřených po průchodu čelby. Pokud pomocí předstihových opatření ochráníme předpolí tunelu před nežádoucími deformacemi, zamezíme deformacím na čelbě a omezíme velikost deformací v oblasti za čelbou.

Metodu charakterizují následující opatření vedoucí k omezení extruze čelby a konvergencí ostění:

- vyztužení předpolí čelby sklolaminátovými kotvami délky minimálně odpovídající průměru tunelu
- zlepšením předpolí čelby pomocí tryskové injektáže
- provedením obvodového vrubu s výplní z drátkobetonu
- provádění mikropilotových deštníků
- radiální kotvení obvodu výrubu pro zlepšení smykových parametrů prostředí,
- použitím tuhého primárního ostění vyztuženého např. válcovanými profily tuhých rámu

Mezi další charakteristické rysy metody patří:

- ražba tunelu prováděná na plný profil,
- betonáž tuhého definitivního ostění v technologicky minimálním odstupu od čelby s rychlým uzavíráním spodní klenby



Obr.5 Ražba tunelu Višňové pomocí metody ADECO-RS

Cílem metody je zachovat pokud možno původní stav blížící se primární napjatosti horninového masivu a zajistit tak odpovídající parametry horninového masivu jako stavebního materiálu tunelu.

Metoda ADECO-RS dosud nebyla v ČR využita, nicméně pomocí této metody probíhá v současnosti ražba nejdelšího slovenského dálničního tunelu Višňové (obr.5), na které nyní působí i řada odborníků z ČR.

2.5. Metoda obvodového vrubu

Metoda obvodového vrubu s předklenbou spočívá ve vytvoření cca 5 m hlubokého zářezu (vrubu), pomocí velké řetězové pily do horninového masivu před čelbou tunelu. Teprve po vyplnění vrubu prostým betonem tvořícím provizorní ostění se provádí samotná ražba. Tato metoda je obecně použitelná pouze v homogenních poloskalních horninových masivech. Metoda zatím není ve světě příliš rozšířena, byla použita pouze na některých stavbách v Evropě (např. tunely Toulon či Ramsgate). Jediné nasazení v ČR při ražbě jednokolejného železničního tunelu Březno u Chomutova (obr.6) bohužel nebylo příliš úspěšné, což bylo do značné míry způsobeno geologickými poměry masivu, ve kterém byla nasazena (prostředí jílovců nižší pevnosti ovlivněných tektonikou a historickou důlní činností) [12]. Mezi hlavní nevýhody této metody patří obtížné zajištění kvality a únosnosti primárního ostění, které je prováděno z nevyztuženého betonu do úzkého zářezu (cca 20 cm) na délku několika metrů. Dalším problematickým aspektem je nízká flexibilita metody v nepříznivých geologických podmínkách (prodleva při uzavírání spodní klenby a nemožnost členění čelby).



Obr.6 Vrubovací stroj Perforex před zahájením ražby tunelu Březno

3. Definitivní ostění konvenčně ražených tunelů

3.1. Standardní přístup

Pro definitivní ostění konvenčně ražených tunelů (zejména u NRTM) je zpravidla využíváno monolitické betonové ostění, které je většinou vyztužené ocelovou betonařskou výztuží. Definitivní tunelová ostění musí splnit řadu často protichůdných požadavků jak ve fázi realizace, tak i během životnosti díla (zpracovatelnost směsi, omezení trhlin, rychlý nárůst pevnosti, odolnost proti vlivům prostředí) [15]. Dalším významným faktorem ovlivňujícím návrh definitivního ostění je skutečné deformační chování výrubu během ražby a po zajištění dočasným (primárním) ostěním. Návrh definitivního ostění by měl přihlédnout k průběhu ražeb (tj. především ke skutečnému stavu horninového masivu, k deformačnímu chování výrubu zajištěného primárním ostěním a dále i k chemickému složení průsakových vod, jejich agresivitě a množství). Tyto údaje jsou důležité pro posouzení dlouhodobé trvanlivosti a funkčnosti primárního ostění a tím i k definování nutné kapacity definitivního ostění.



Obr.7 Tradiční postup při výstavbě konvenčně ražených tunelů – instalace fóliové izolace a armatury pro definitivní ostění

Tradičním prvkem konvenčního tunelování je okamžité zabezpečení nevystrojeného výrubu pomocí primárního ostění ze stříkaného betonu. Toto ostění může, ale nemusí být považováno za dočasné. Sekundární ostění je zpravidla vytvořeno z monolitického železobetonu uvnitř

primárního ostění (obr.7). Jeho statickým účelem je během životnosti tunelu převzít zatížení horninovým masivem a podzemní vodou, pokud se tato předpokládají. Mezi primární a sekundární ostění je vložena foliová izolace a propustná geotextilie odvádějící případnou podzemní vodu do drenážního systému pod úroveň vozovky (v případě deštníkové izolace). V některých případech je používána celoplošná izolace umístěná kolem celého obvodu, jejíž použití znamená zvýšení zatížení ostění tunelu hydrostatickým tlakem.

3.2. Nevyztužená monolitická ostění

V některých případech je výhodné využít nevyztužené monolitické ostění. Nepoužití výztuže znamená nejen nižší cenu betonové konstrukce, ale i snadnější a rychlejší realizaci, snížení rizika poškození foliové izolace (nebezpečí propíchnutí izolace) a také odstraňuje nebezpečí koroze výztuže a s tím spojené porušení betonu [1]. Hlavními faktory umožňujícími použití nevyztuženého monolitického betonu je optimalizace tvaru a předpoklad zatížení vedoucí k minimalizaci ohybových momentů v ostění. Snížení ohybových momentů lze značně ovlivnit vhodnou volbou geometrie ostění (kruhový či oválný tvar).



Obr.8 Ošetřovací vůz využitý pro nevyztužené definitivní ostění tunelu
Povážský Chlmec

Riziko vzniku trhlin vlivem smršťování či dotvarování může být sníženo vhodným složením betonové směsi (omezením množství cementu a přidáním popílku pro zpomalení hydratačního procesu), ošetřováním

čerstvého betonu pomocí ošetrovacích vozů (obr.8), betonováním po kratších blocích a odbedňováním při nižších pevnostech betonu. Pokud není použita mezilehlá izolace, tak se doporučuje pro snížení rizika vzniku trhlin instalace plastické separační membrány, která sníží tření na kontaktu s primárním ostěním. Protože koncentraci napětí v ostění se nelze vždy vyhnout (např. oblasti portálů či křížení tunelů), pragmatickým přístupem je použít nevyztužené sekundární ostění pro maximální část tunelu s vyztuženým ostěním pouze v omezených oblastech.

V ČR již bylo nevyztužené definitivní ostění využito na některých dopravních tunelech (např. tunel Pisárky v Brně, dálniční tunel Libouchec na D8, železniční tunel Nové spojení v Praze nebo železniční tunely na trati Votice – Benešov). V současnosti česká firma Hochtief CZ, a.s. buduje nevyztužené definitivní ostění na slovenském dálničním tunelu Povážský Chlmec. Na dané stavbě se autor publikace dlouhodobě podílí v roli technické pomoci zhotovitele.

3.3. Ostění ze stříkaného betonu

Stříkaný beton je tradičně vnímán jako materiál nižší kvality a trvanlivosti [10]. Proto je ostění ze stříkaného betonu ve většině případů využíváno pouze jako primární (dočasná) a nejsou zohledněna při statických výpočtech definitivních ostění. Použitím moderních technologií, materiálů a zejména kontroly procesu výroby je možné dosáhnout stejné kvality stříkaného betonu jako betonu monolitického. Proto byl stříkaný beton v zahraničí úspěšně využit jako definitivní ostění na stále narůstajícím počtu dopravních tunelů.

Vzhledem k tomu, že na tunelech provedených od začátku používání OSB (tj. cca od padesátých let 20. století) byla prokázána skutečnost, že primární OSB nedegraduje úplně během životnosti ostění, jsou projektanti postaveni před úkol zahrnutí vlivu a funkce primárního ostění do návrhu definitivního ostění. Na mnoha projektech (např. Rakouské silniční tunely či CTRL North Downs tunel ve Spojeném království) byl vliv primárního ostění zahrnut do statických výpočtů definitivních ostění, což vedlo k významným úsporám.

Dalším ze současných trendů jsou jednoplášťová ostění ze stříkaného betonu. Pro jednoplášťová ostění platí, že část (zpravidla většina) nastříkaného betonu je uvažována jako trvalá nosná vrstva. Při použití jednoplášťových ostění odpadá aplikace izolace a realizace sekundárního

ostění, což vede k velmi významné úspoře času a ceny (a to i přes vyšší cenu stříkaného betonu oproti monolitickému). Na druhou stranu je zaručení a prokázání dlouhodobé únosnosti, nepropustnosti a trvanlivosti ostění značně obtížné. Jednoplášťová tunelová ostění jsou zpravidla prováděna bez výztužných rámtů či sítí, aby byl odbourán problém koroze výztuže. Pro zvýšení ohybové tuhosti jsou zpravidla přidávána ocelová vlákna.

Pro zajištění kvality výsledné kvality ostění ze stříkaného betonu je velmi důležitý způsob nástřiku betonu. V daném ohledu hraje zkušenost a zručnost operátora trysky zcela zásadní roli. Proto různé organizace v současnosti zavádějí certifikaci operátorů trysky. Společnost EFNARC začala provádět evropskou certifikaci (pouze pro nástřik mokrou cestou pomocí manipulátoru). První školení zkoušejících EFNARC proběhla v roce 2009, v roce 2010 pak proběhly první zkoušky operátorů trysky. Z ČR danou certifikaci zatím nikdo nezískal, nicméně do budoucna je to zvažováno.

V ČR je ve statických výpočtech zpravidla předpokládána plná degradace primárního ostění ze stříkaného betonu. Na dopravních tunelech v ČR zatím stříkaný beton pro definitivní ostění využit nebyl, pouze v ojedinělých případech na podzemních stavbách menších profilů (např. na kolektorech v Praze, pro podzemní koridory DFN Motol, atd.). Česká firma Metrostav a.s. využila jednoplášťová ostění ze stříkaného vláknobetonu na zahraničních projektech realizovaných NTM.

Autor publikace je od roku 2007 vedoucím pracovní skupiny České tunelářské asociace (CzTA) pro stříkaný beton. Tato skupina dlouhodobě v ČR prosazuje nové trendy v oblasti stříkaného betonu. V roce 2008 vydala skupina knihu Stříkaný beton v pozemním stavitelství [3], která představuje základní informace a nové trendy dané problematiky. Autor publikace je také od roku 2007 členem mezinárodní pracovní skupiny ITA-AITES WG12 (Sprayed concrete use).

3.4. Stříkané hydroizolace

Průsaky vody do podzemních staveb způsobují poškození nejen nosných konstrukcí, ale i vnitřního vybavení a znamenají tak výrazné náklady na opravy a údržbu. Zajištění vodotěsnosti podzemních konstrukcí je zpravidla cenově nejefektivnější cestou k dosažení jejich spolehlivosti, funkčnosti a návrhové doby životnosti. Tradičně se k zajištění vodotěsnosti podzemních

staveb používají hydroizolační materiály prefabrikované (především fólie z PVC), nicméně v posledních letech se v zahraničí rozšířilo používání hydroizolací vyrobených přímo na stavbě [3]. Proces výroby hydroizolace na stavbě spočívá v nanesení hydroizolační směsi v tekuté formě přímo na konstrukci, kdy po vyztužení této směsi vzniká plnohodnotná hydroizolační membrána. Podle podmínek prostředí a požadavků projektu se na konvenčně ražených tunelech aplikuje hydroizolační směs zpravidla nástřikem na primární ostění.

Vznikem spojení s vysokou tahovou pevností kontaktu mezi hydroizolační membránou a vrstvami betonu z obou stran je podstatně sníženo riziko proniknutí průsaků ostěním tunelu. Nedochází k pohybu vody po stykové ploše membrány a betonu a případné místo průsaku membránou se dá řešit přesně v místě výskytu průsaku, jelikož tento bod odpovídá průsakovému kanálku v betonu za membránou. Kompozitní ostění složené z membrány a betonu je mechanicky souvislá konstrukce, tudíž se dá celá tloušťka konstrukce považovat za část definitivního ostění. Stříkané hydroizolace je možné aplikovat na odlišné typy povrchů při zachování vysoké přilnavosti (PVC, ocel, atd.), což je velmi výhodné pro napojování různých izolačních systémů (řešení přechodových oblastí). Jednoduchost a rychlost aplikace stříkaných membrán může vést k časovým a finančním úsporám (zejména v geometricky komplikovaných oblastech).

Na druhou stranu jsou stříkané hydroizolace stále relativně novou technologií, která je předmětem výzkumu a vývoje. Stárí žádné z dosud realizovaných staveb se zatím neblíží konci své návrhové doby životnosti. Výroba stříkaných hydroizolačních membrán probíhá na stavbě, což přirozeně znamená nebezpečí nižší kvality výsledného produktu při nedodržení technologického postupu. Před samotným nástřikem hydroizolace je zcela zásadní zajištění pokladu bez aktivního přítoku vody, což může být časově a finančně náročné. Systém stříkaných hydroizolačních membrán je kompozitní systém, a tak není možné staticky posuzovat dílčí části samostatně, ale je nutné posuzovat chování tohoto systému jako celku, a to jak ve fázi výstavby, tak po celou dobu návrhové životnosti konstrukce.

Stříkané hydroizolační membrány jsou používány již několik let i na podzemních stavbách v ČR. První realizace proběhla na přečerpávací jímce na trase metra IV C 2 z Proseku do Letňan v roce 2005. Dalšími realizovanými projekty jsou například výtahové šachty na stanicích Florenc

a Národní třída nebo revitalizace stanice metra Stodůlky. Dále byly také stříkané hydroizolační membrány použity na sanaci tunelů - například starého železničního Žižkovského tunelu v Praze pod Vítkovem, sanace tramvajových tunelů v Praze pod Barrandovem nebo sanace starých zděných železničních tunelů Ošelínský a Pavlovický. Významnou realizaci v nedávné době představují stříkané hydroizolace trojlodní stanice Veveslavín (obr.9) na trase metra V.A, která byla spojena s řešením náročných technických detailů a přechodů do trat'ových tunelů.



Obr.9 Stříkaná hydroizolace ve stanici metra Nádraží Veveslavín

4. Mechanizované tunelování

Mechanizované tunelování pomocí plnoprofilových tunelovacích strojů je dynamicky se rozvíjející moderní způsob výstavby tunelů, který ve světě dominuje zejména u dlouhých liniových podzemních staveb kruhového příčného profilu.

Plnoprofilovými tunelovacími stroji se nazývají výkonné mechanismy, kterými je možno provádět kontinuálně rozpojování horniny v celé čelbě tunelu bez použití trhačích prací a současně téměř plynule budovat tunelové ostění. Ve skutečnosti i tunelovací stroje rozpojují horninu po záběrech daných maximálně možným výsuvem přitlačných axiálních lisů a po vyčerpání výsuvu je třeba stroj, resp. písty radiálních lisů, přemístit. V této fázi je rozpojování horniny v čelbě přerušeno. V pevných skalních

horninách se používají otevřené tunelovací stroje opatřené radiálními přítlačnými deskami (gripery), které stabilizují stroj a poskytují oporu pro přítlak stroje do čelby prostřednictvím axiálních lisů. Pokud je nutno, výrub se zajišťuje svorníkovou výztuží kombinovanou se stříkaným betonem. V málo pevných, poruchových a poloskalních horninách či v zeminách se používají tunelovací stroje opatřené ochranným štítem, který zajišťuje stabilitu výrubu při ražbě a umožňuje bezpečné provedení definitivní výztuže tunelu. Výrub je zajišťován ostěním ze segmentů skládaných do jednotlivých prstenců ostění. V současnosti jsou převážně používány prefabrikované železobetonové dílce, ve stále rostoucí míře se uplatňují i dílce z drátkobetonu. Měkké horniny a zeminy nedovolují použití rozpěrných desek (griperů), proto se stroj při ražbě opírá axiálními lisy o poslední prstenec budovaného segmentového ostění.

Mechanizované tunelování je výrazně ovlivňováno, obdobně jako konvenční tunelovací metody, zastiženými geotechnickými poměry. Na nich závisí konstrukce tunelovacího stroje, dosažitelná rychlost ražeb i konečná cena díla. Zásadním přínosem mechanizovaných postupů je zvýšení bezpečnosti pracovních procesů v podzemí, snížení vlivu ražeb na okolní prostředí (zejména na zastavěný povrch), dosažení vyšších kvalitativních parametrů díla a v neposlední řadě zkrácení doby výstavby s efektem nižší celkové ceny podzemní stavby oproti konvenčním metodám ražení. Zmíněné hlavní přínosy mohou být dosahovány jen při dobré přípravě, technické kompetenci a odborných znalostech hlavních účastníků projektu.

V 70. letech 20. století byl v ČR využit mechanizovaným štít TŠčB-3 pro ražbu metra v Praze. Moderní plnoprofilové tunelovací stroje byly v ČR poprvé úspěšně nasazeny až v roce 2011 pro ražbu prodloužení trasy A metra v Praze. Pro ražbu jednokolejných traťových tunelů od stanice Petřiny do stanice Dejvická byly použity dva zeminové štíty (EPBS) průměru 6,0 m vyrobené v Německu firmou Herrenknecht. V roce 2015 byla zahájena ražba dvojice jednokolejných tunelů Ejpovice délky 2 x 4,15 km. Pro mechanizovanou ražbu tunelu je používán konvertibilní plnoprofilových tunelovací stroj průměru 9,84 m (obr.10), který umožňuje provádět ražby v měkkých (EPB mode) i tvrdých horninách (hardrock mode). Na projektu jsou používány drátkobetonové segmenty bez prutové výztuže. Autor této publikace se podílel na přípravě a nyní i na výstavbě tunelu Ejpovice v roli technické pomoci investora. V dané roli se také podílel na projektové přípravě tunelu Praha – Beroun délky 25 km.



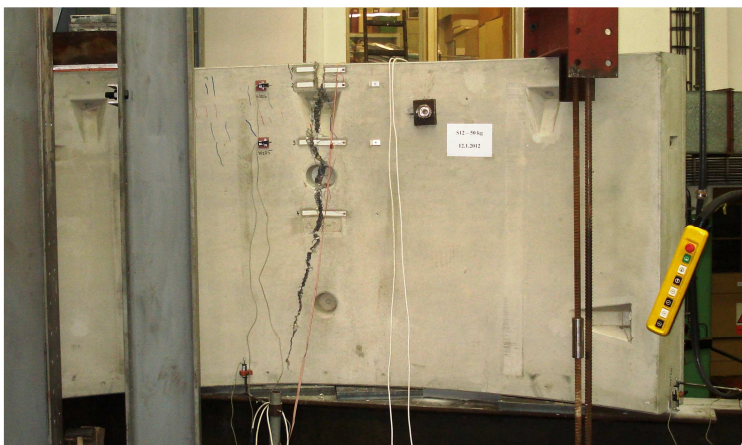
Obr.10 Konvertibilní plnoprofilových tunelovací stroj průměru 9,84 m před zahájením ražby tunelu Ejovice

5. Segmentová ostění tunelů z drátkobetonu

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

V současné době jsou v zahraničí stále častěji využívány segmenty z prefabrikovaného drátkobetonu bez tradiční prutové výztuže [5]. V ČR byl v letech 2010 až 2012 proveden výzkum zaměřený na problematiku drátkobetonových segmentů, aby danou technologii bylo možné využít i na dopravních tunelech v ČR [7]. Autor této publikace byl hlavním řešitelem tohoto grantu (GAČR P104/10/2023 - Vývoj a ověření vlastností vláknobetonu splňujícího současné požadavky pro prefabrikovaná ostění dopravních tunelů). V úvodních fázích výzkumu byla vyrobena a

odzkoušena řada vzorků pro porovnání a výběr vhodného složení drátkobetonové směsi. Byl porovnáván vliv různého dávkování drátků i různých typů drátků na výsledné chování drátkobetonu. Vlastnosti vzorků byly laboratorně zkoušeny a vyhodnoceny (pevnost v prostém tlaku zkoušená na krychlích, ohybová pevnost zkoušená na trámčích). Některé parametry drátkobetonu byly zpětně odvozovány pomocí pokročilého numerického modelování metodou konečných prvků v programu ATENA. V Kloknerově ústavu ČVUT v Praze byly zkoušeny železobetonové a drátkobetonové segmenty na různé typy zatížení (obr.11).



Obr.11 Zatěžovací zkouška drátkobetonového segmentu realizovaná v Kloknerově ústavu ČVUT v Praze

Po zohlednění výsledků provedeného výzkumu bylo rozhodnuto, že vyrobené drátkobetonové segmenty splňují veškeré požadavky kladené na ostění pražského metra. Následně mohly být proto vyrobeny a smontovány prstence (v počtu 10 prstenců tj. 15 m tunelu) zkušebního úseku ostění v trase A pražského metra z drátkobetonových segmentů (s dávkováním drátků 40 kg/m^3). Dané ostění bylo instalováno na traťovém tunelu uvedené stavby v červnu 2012 [6]. Na drátkobetonových segmentech nevznikly žádné trhliny, daný typ ostění se na zkušebním úseku osvědčil. Proto bylo při podání vítězné variantní nabídky uchazečem rozhodnuto o rozsáhlém využití drátkobetonových segmentů bez prutové výztuže na železničním tunelu Ejpovice délky $2 \times 4,15 \text{ km}$, jehož výstavba v současné době probíhá. I na tomto projektu se využití drátkobetonových segmentů bez prutové výztuže zatím osvědčuje.

6. Závěr

Podzemní stavitelství v ČR i v zahraničí zaznamenalo začátkem 21. století velký rozvoj. Daný trend byl především způsobený rostoucí poptávkou po přímějších dopravních cestách s vyššími návrhovými rychlostmi, nedostatkem prostoru v městských aglomeracích, ale také zvýšenými požadavky na ochranu přírody. Proto je stále více dopravních staveb umísťováno do podzemí. Rozvoj podzemního stavitelství se promítá do vývoje nových metod výstavby tunelů, ale i do vývoje nových stavebních materiálů. Jak je uvedeno v této publikaci, ve většině současných trendů drží ČR krok s vývojem v zahraničí (např. využívání NRTM a plnoprofilových tunelovacích strojů, aplikace drátkobetonových segmentů, stříkaných hydroizolací nebo nevyztužených sekundárních ostění). Některé inovativní postupy však na své první využití v ČR stále čekají.

Na rozvoji řady technologií uvedených v tomto inauguračním spisu se jeho autor osobně podílel v teoretických studiích, jako řešitel řady grantových projektů, i při spolupráci s praxí v rolích projektanta, technické pomoci investora nebo technické pomoci zhotovitele. V současné době je autor zástupcem vedoucího pracovního balíčku WP4 (Tunely) probíhajícího grantu CESTI (TAČR TE01020168 - centrum kompetence), který zkoumá a rozvíjí řadu představených technologií. V rámci své další vědecké i praktické činnosti plánuje autor aktivní zapojení do zavádění progresivních technologických postupů, které dosud v ČR použity nebyly.

Tato publikace vznikla s podporou grantu TAČR TE01020168.

7. Literatura

- [1] Hořejší, J. – Mařík, L. - Růžička, P. – Schaab, A. (2016): Návrh, realizace a podmínky provádění nevyztuženého definitivního ostění konvenčně ražených tunelů. Tunel 2/2016.
- [2] Mosler, J. – Pavlovský, V. (2015): Zkušenosti z realizace tunelových staveb v severských zemích (Tunel 2/2015)
- [3] Píšová, B. – Hilar, M. (2014): Využití stříkaných hydroizolačních membrán v podzemním stavitelství z pohledu projektanta. Geotechnika 3/2014.
- [4] Barták, J. – Hilar, M. – Pruška, J. (2013): Development of underground construction engineering in the Czech Republic. Geomechanics and Tunnelling 2/2013. Ernst & Sohn.

- [5] Hilar, M - Beňo, J (2012): Segmental tunnel linings from SFRC. *Tunel* 3/2012.
- [6] Vítek, P. – Šebesta, B. - Hilar, M. – Pukl, R. (2012): Ražba traťových tunelů pražského metra technologií TBM. *Beton* 6/2012, str. 34-42.
- [7] Hilar, M - Vítek, P (2012): Experimental loading tests of steel fibre reinforced and steel rod reinforced segments for tunnel linings. *Tunel* 4/2012.
- [8] Hilar, M a kol. (2011): Přehled terminologie podzemního stavitelství. *CzTA ITA-AITES*, Praha.
- [9] Beňo, J. - Pruška, J. - Hilar, M. (2011): Betonová ostění podzemních staveb - nové trendy. *Stavební obzor* 3/2011. *FSv ČVUT*, Praha.
- [10] Hilar, M a kol. (2008): Stříkaný beton v podzemním stavitelství. *ČTuK ITA/AITES*, Praha, 2008.
- [11] Hilar, M. (2008): Možnosti výstavby tunelů v tuhých jílech. *Habilitační spis*. *FSv ČVUT v Praze*, Praha.
- [12] Hilar, M. – Heřt, J. - Smida, M. (2008): Soft Ground Excavation of the Brezno Tunnel. *Proceedings of the World Tunnelling Congress*, Agra 2008.
- [13] Jones, B. - Thomas, A. - Hsu, Y., S. - Hilar, M. (2008): Evaluation of innovative sprayed-concrete-lined tunnelling. *Geotechnical Engineering Journal*. červen 2008, *Geotechnical Engineering*, str. 137–149.
- [14] Šourek, P - Hilar, M. (2007): Beton v podzemním stavitelství – současný stav a vývoj. *Kolokvium Světový beton 2002 – 2006*.
- [15] Srb, M - Hilar, M. (2006): Definitivní ostění konvenčně ražených tunelů v České republice – současnost a budoucnost. *Beton* 6/2006.
- [16] Hilar, M - Thomas, A - Falkner, L (2005): The Latest Innovation in Sprayed Concrete Lining - the LaserShell Method. *Tunel* 4/2005.
- [17] 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.
- [18] Eddie, C., Neumann, C. (2003): LaserShell leads the way for SCL tunnels. *Tunnels & Tunnelling*, June 2003.

8. Strukturovaný životopis

Jméno: Matouš Hilar
Tituly: doc., Ing., M.Sc., Ph.D., C.Eng., M.I.C.E.
Datum narození: 8.11.1973
Místo narození: Praha
Národnost: česká

Vzdělání a autorizace:

2008 doc. - docent, FSv ČVUT v Praze, ČR
2005 C.Eng. - Chartered Engineer – Spojené království (UK)
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, University of Glasgow, UK
1997 Ing. - Stavební inženýr, obor KD, FSv ČVUT v Praze, ČR

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
CzTA (Česká tunelářská asociace) – zvolený člen předsednictva
ITA (International Tunnelling Association) - člen pracovní skupiny WG12
Pracovní skupina CzTA pro stříkaný beton – vedoucí od 2007
Redakční rada mezinárodního recenzovaného časopisu Tunel - člen
Autorizační komise ČKAIT pro obor geotechnika - člen

Vědecké rady konferencí:

Eastern European Tunnelling Conference 2016 – předseda vědecké rady
World Tunnel Congress 2015 - člen vědecké rady
Eastern European Tunnelling Conference 2012 a 2014 – člen vědecké rady
Underground Construction Prague 2010 a 2013 – předseda vědecké rady
World Tunnel Congress 2007 - místopředseda vědecké rady

Zaměstnání:

2009 – nyní	katedra geotechniky FSv ČVUT - docent
2012 – nyní	3G Consulting Engineers s.r.o. - partner, konzultant
2006 - 2012	D2 Consult Prague s.r.o., ČR – projektant, konzultant
2002 - 2006	Mott MacDonald, UK – projektant, stavební dozor
2001 - 2002	D2 Consult, Rakousko – projektant
2001	Satra s.r.o. – projektant
1997 – 2000	katedra geotechniky FSv ČVUT - interní doktorand

Vybrané praktické projekty:

Tunel Povážský Chlmec, SR - technická pomoc zhotovitele
Tunel Ejpovice, ČR – technická pomoc investora
Tunely Radejčín a Prackovice na D8, ČR – technická pomoc investora
Tunel Praha - Beroun, ČR – technická pomoc investora
Tunely na SOKP 513 a 514 – technická pomoc investora
Tunel Patnitop, Indie – projektová dokumentace
Tunel Březno u Chomutova, ČR – technická pomoc investora
Tunel Hindhead na silnici A3, UK – statické výpočty
Crossrail, Londýn, UK – přípravná dokumentace
Terminál 5 (T5), letiště Heathrow, UK – příprava, dozor výstavby
Dublin Port Tunnel, Irsko – nezávislá kontrola realizační dokumentace
Channel Tunnel Rail Link (CTRL), UK – statické výpočty
Tunel SMART, Kuala Lumpur, Malajsie – statické výpočty
Tunel Koralm, Rakousko – statické výpočty
Tunel Mrázovka, ČR – realizační dokumentace

Vybrané grantové projekty:

Grant GAČR P104/10/2023 - Vývoj a ověření vlastností vláknobetonu splňujícího současně požadavky pro prefabrikovaná ostění dopravních tunelů (řešitel grantu)

Grant TAČR TA01031840 - Vývoj a aplikace numerických metod pro zvýšení bezpečnosti tunelových dopravních staveb (řešitel grantu)

Grant TAČR TA01011816 - Pravděpodobnostní hodnocení vstupních parametrů horninového masivu a spolehlivostní analýza podzemních konstrukcí s využitím numerických metod (řešitel grantu)

Vybrané knihy:

Hilar, M a kol. (2011): Přehled terminologie podzemního stavitelství. CzTA ITA-AITES, Praha.

Hilar, M a kol. (2008): Stříkaný beton v podzemním stavitelství. ČTuK ITA/AITES, Praha.

Hilar, M (2008): Nejdelší světové železniční tunely, D2 Consult Prague, s.r.o., Praha.

Vybrané články v mezinárodních časopisech:

Svoboda, T. - Hilar, M. (2015): Probabilistic analysis of tunnel loads using variance reduction. Proceedings of ICE, Geotechnical Engineering Journal. Vol. 168, 2015, issue GE1, paper 1400062.

Beňo, J. - Hilar, M. (2013): Steel fibre reinforced concrete segments for tunnel linings – verification by extensive laboratory testing and numerical modelling. Acta Polytechnica 4/2013.

Barták, J. – Hilar, M. – Pruška, J. (2013): Development of underground construction engineering in the Czech Republic. Geomechanics and Tunnelling 2/2013. Ernst & Sohn.

Hilar, M. (2011): 3D Modelling of a Tunnel Re-excavation in Soft Ground. Acta Polytechnica. Vol. 51, 3/2011.

Hilar, M. - Pruška, J. (2008): Statistical Analysis of Input Parameters on the Modelling of Underground Structures. Acta Polytechnica. 5/2008.

Jones, B. - Thomas, A. - Hsu, Y., S. - Hilar, M. (2008): Evaluation of innovative sprayed-concrete-lined tunnelling. Geotechnical Engineering Journal. červen 2008, Geotechnical Engineering.

Hilar, M - Lyons, P - Laimbeer, A (2006): Automatic Monitoring of Operating Railway Tunnels at Heathrow. Tunel 2/2006.

Hilar, M - Thomas, A - Falkner, L (2005): The Latest Innovation in Sprayed Concrete Lining - the LaserShell Method. Tunel 4/2005.

Thomas, A - Powell, D - Hilar, M. (2004): The Role of numerical modelling in tunnel design. Tunel 1/2004.

Hilar, M. (2003): NATM support in Prague's weak rock. Tunnel & Tunnelling International. September 9/2003, London.

Jazykové znalosti:

Anglicky (plynně), rusky (pasivně)