

# BETON V PODZEMNÍM STAVITELSTVÍ – SOUČASNÝ STAV A VÝVOJ

Pavel Šourek, Matouš Hilar

## 1 Úvod

Obor podzemního stavitelství zažívá v posledních letech nebývalý rozvoj, který je způsobený rostoucí poptávkou po kapacitních a komfortních dopravních trasách (vysokorychlostní železnice, dálnice, městské okruhy), potřebou většího využití urbanizovaného městského území a v neposlední řadě také moderními přístupy k ochraně přírody a životního prostředí vůbec. Proto je stále více staveb umísťováno pod povrch a ani v budoucnu to jistě nebude jinak. Nové průmyslové technologie, zvyšující se požadavky na bezpečnost a kvalitu (trvanlivost, statická funkce, estetika) a nové účely využití budovaných děl přirozeně vyvolávají zvýšené nároky na použité materiály. Beton je obecně nejpoužívanějším konstrukčním materiálem podzemních staveb, nejčastěji jako ostění zajišťující dočasně či trvale podzemní prostor. Vývoj podzemního stavitelství se tak promítá i do vývoje tohoto materiálu.

Pro přehlednost jsou úvodem zmíněny hlavní typy podzemních staveb a způsoby jejich výstavby. Následně jsou popsány formy využití betonu v podzemním stavitelství a současné vývojové trendy. Článek dále popisuje stříkaný beton použitý na ražených tunelech terminálu 5 (Heathrow), kde ostění realizované metodou LaserShell<sup>TM</sup> představuje v současné době vrchol vývoje stříkaných betonů. Z dalších zajímavých podzemních staveb z hlediska betonu jsou popsány tunel Strenger a Busan.

### Přehled některých významných tunelových staveb světa a České republiky

	Svět				Česká republika		
	název	délka/rozměry	země	rok zprovoznění	název	délka/rozměry	rok zprovoznění
Nejdelsí železniční tunely	Sei-kan tunnel	53 850 m	Japonsko	1988	Březenský tunel	1758 m	2007
	Eurotunnel (Channel)	50 450 m	Francie-Velká Británie	1994	Špičácký tunel	1747 m	1878
	Iwate-Ičinohe tunnel	25 810 m	Japonsko	2002	Vínohradský tunel I	1145 m	1871
Nejdelsí silniční tunely	Lærdall tunnel	24 510 m	Norsko	2000	Tunel Panenská	2168 m	2006
	St. Gotthard tunnel	16 918 m	Švýcarsko	1980	Strahovský tunel	2042 m	1997
	Arlberg tunnel	13 972 m	Rakousko	1978	Tunel Mrázovka	1300 m	2004
Historická díla	tunelový podchod Eufratu v Babylonu	cca 900 m	Irák	cca 2500 př.n.l.	Třebovický tunel (starý)	512 m	1845
	vodovodní štola na ostrově Samos	984 m	Řecko	540-523 př.n.l.	Tunel Slavič	258 m	1847
	vodovodní štola z Fucinského jezera	5653 m	Itálie	41-52 n.l.	Rudolfova štola	1100 m	1593
	silniční tunel Posilippo	900 m	Itálie	36 př.n.l.	Schwarzenberský plavební kanál	429 m	1822
Největší vyražený profil tunelu	Sentvid tunnel-rozplet	363 m <sup>2</sup>	Slovinsko	2006	Tunel Mrázovka-rozplet	340 m <sup>2</sup>	2004
	Milan-metro station	450 m <sup>2</sup>	Itálie	1997	Stanice metra Kobylisy	228 m <sup>2</sup>	2004
Největší podzemní prostor	Gjøvik hall cavern	61x24x91 m	Norsko	1993	PVE Dlouhé Stráně	1250 m <sup>2</sup> (25,5x50x87,1 m)	1996
	Hydropowerstation Baños	19,2x45,4x76,2 m	Ekvádor	-	Hydrocentrála Lipno I	690 m <sup>2</sup> (22,1x38,6x65 m)	1959
Dlouhé tunely ve výstavbě nebo v přípravě	Gotthard basistunnel	57 072 m	Švýcarsko	2010	Tunelový komplex Blanka	5502 m	2011
	Lötschberg basistunnel	34 600 m	Švýcarsko	2007	Berounské tunely	24 300 m	-
	Sierra Guadarrama tunnel	28 377 m	Španělsko	2007			

## 2 Typy podzemních staveb

Podzemní stavby lze rozdělovat především podle jejich převládajícího rozměru. U liniových staveb budovaných jako dopravní tunely (silniční, železniční, MHD, pěší), podzemní dráha (metro), energetické, vodohospodářské a komunální štoly a tunely (přivaděče, kolektory, kanalizace) převládá délka. U šachet (jam) je to rozměr svislý - hloubka. Naopak velkoprostorové podzemní objekty nemají dominantní žádný rozměr, ale jsou definovány nejmenším rozměrem výrubu 12m (šířka, výška). Nejčastěji jsou to kaverny pro umístění podzemních hydrocentrál a trafostanic u vodních elektráren, různé zásobníky, čističky, technologická centra, vojenské a civilní kryty, garáže a nebo např. úložiště nebezpečných odpad, případně i sportovní haly (Obr.1). Všechny podzemní stavby jsou realizovány buď ve variantě ražené (bez přemístění nadloží), hloubené (budované z povrchu) nebo případně v kombinaci obou variant.



Obr.1 Kaverna podzemní sportovní haly Gjøvik – Norsko

V současnosti jsou pro výstavbu tunelů využívány především následující technologie:

### Ražené tunely

**Konvenční ražba** (Nová rakouská tunelovací metoda - NRTM, sekvenční metoda, metoda LaserShell, atd.) využívá schopnosti přeskupování napětí v masivu a vytvoření přirozené horninové klenby. V průběhu ražby se nejdříve podle observačních principů instaluje dočasné vystrojení tunelu (primární ostění) tvořené nejčastěji vrstvou stříkaného betonu v kombinaci se systémem horninových kotev a svorníků. Po ustálení deformací výrubu se obvykle realizuje ostění definitivní (sekundární) z monolitického nebo i stříkaného betonu, které má trvalou nosnou funkci. Je třeba dodat, že podle specifických podmínek dané stavby mohou být primární nebo sekundární ostění i zcela vypuštěny. Konvenční ražba je ve světě velmi rozšířená (především v Alpských zemích). Je výhodná pro dispozičně

komplikované stavby, kratší tunely a pro měnící se geotechnické podmínky. V České republice byla metoda NRTM využita pro většinu dopravních tunelů realizovaných v posledních letech (tunely Mrázovka, Libouchec, Panenská, atd.).

**Mechanizovaná ražba** (použití razících štítů a TBM – Tunnel Boring Machine) pomocí stroje do zeminového či skalního prostředí je v podstatě několik desítek metrů dlouhá „továrna“ na tunel. Masiv je rozpojován mechanicky pomocí razícího stroje, za kterým je již prováděno definitivní kruhové ostění tunelu z betonových prefabrikovaných dílců (případně z monolitického či stříkaného betonu). V současnosti jde o dominantní metodu výstavby tunelů ve světě (např. dokončené tunely Eurotunnel, Vereina, ART, případně v současnosti realizované tunely Gotthard, Lötschberg, SMART, Guadarrama či Wienerwald - Obr.2). V České republice byly v minulosti razící štíty využívány na dílčích úsecích pražského metra, mechanizovaná ražba byla u nás také použita při ražbě desítek kilometrů vodovodních přivaděčů, kanalizačních stok a kabelových tunelů. V souvislosti s přípravou realizace železničních tunelů na trati Praha - Beroun (délka cca 24,3 km) či jiných tunelů je pravděpodobné, že v budoucnosti bude velkoprofilová ražba TBM využita i v ČR.



Obr.2 Sestavování TBM před ražbou železničního tunelu Wienerwald

**Metoda obvodového vrubu s předklenbou** spočívá ve vytvoření několik metrů hlubokého zářezu (vrubu), pomocí velké „řetězové pily“ do horninového masivu před čelbou tunelu. Po vyplnění vrubu prostým betonem tvořícím provizorní ostění se teprve provádí samotná ražba. Tato metoda je obecně použitelná pouze v homogenních poloskalních masivech. První nasazení v České republice při ražbě tunelu Březno u Chomutova však nebylo příliš úspěšné. Metoda zatím není ve světě příliš rozšířena, byla použita pouze na některých stavbách v Evropě (např. tunely Toulon či Ramsgate).

## Hloubené tunely

**Klasické hloubené tunely** jsou budované zpravidla jako monolitické betonové rámové konstrukce buď do otevřené stavební jámy nebo přímo na upravený povrch. Po dokončení jsou zasypány. Tímto v podstatě nejjednodušším způsobem se realizuje převážná část portálových úseků ražených tunelů a mělce umístěných podzemních staveb. Z České republiky můžeme jmenovat Zlíchovský tunel, pražské metro provozní úsek IV.C2 mezi stanicemi Střížkov a Prosek nebo hloubené úseky tunelu Mrázovka. Ve světě byly v poslední době hloubeny stanice metra (např. Amsterdam, Vídeň) či hloubené úseky tunelů (např. SMART, Hong Kong - Kowloon Southern Link, Strenger).

**Tzv. modifikovaná Milánská metoda** je založena na využití konstrukčních podzemních stěn jako trvalé opěrové části tunelu, rozepřené definitivní stropní konstrukcí. Pod jejich ochrannou je čelně odtěžován vlastní profil tunelu. Velmi často je využívána v městských aglomeracích pro svůj minimální plošný zábor a rychlost výstavby. Pro podzemní stěny i stropní konstrukci se využívá beton monolitický nebo prefabrikovaných dílců. V ČR byl tímto způsobem prováděn např. Husovický nebo Jihlavský tunel. Ve světě je v současnosti tímto způsobem realizováno například napojení prodloužení trasy metra Piccadilly v Londýně na stávající trasu.

**Tzv. metoda želva** spočívá ve vytvoření klenbové betonové konstrukce na vytvarovaný terén. Betonáž definitivní klenby tunelu se provádí přímo na zemní podklad, a následně se klenba zasype. Odtěžování profilu tunelu je prováděno až pod ochranou této trvalé nosné konstrukce. V České republice byly tímto způsobem realizovány portálové úseky železničních tunelů Malá Huba a Hněvkovský I na III. tranzitním koridoru. V zahraničí byla metoda želva použita pro portálové úseky tunelů Branisko, Euerwang či Schellenberg.

**Metoda plavení tunelů** je výhodná zejména pro přímořské státy budující komunikační trasy v ústí velkých řek nebo na mořském dně. Princip spočívá ve vytvoření jednotlivých betonových elementů uzavřeného tubusu tunelu v suchém doku. Po jejich dokončení se čela uzavrou, dok je zaplaven a elementy jsou postupně přeplaveny a uloženy v místě stavby. Asi nejvíce je tato metoda rozšířena v Holandsku, jmenujme např. tunely Caland, Piet Hein (Obr.3) a Benelux, využita byla rovněž na spojnici Dánska a Švédska při stavbě Øresund link. Originálním způsobem byly některé prvky této metody využity při výstavbě tunelů pražského metra trasy IV.C1 při přechodu Vltavy v Tróji. **Tzv. metoda vysouvaných tunelů** využila suchého doku vybudovaného přímo u řeky, ve kterém byl postupně vybetonován tubus tunelu. Po jeho dokončení a zaplavení doku byl celý tubus tunelu, částečně nadnášený prámem a částečně spočívající na připravené dráze, vyvlečen do svého umístění v připravené rýze ve dně Vltavy.

**Přesypávané tunely** tvoří obvykle podjezdy nebo tunely menšího rozsahu, ekodukdy, propustky apod. Jde převážně o prefabrikované, někdy i monolitické tenkostěnné klenbové konstrukce, budované spolu se zemními tělesy komunikací, které jsou systematicky zasypávány tak, aby docházelo ke spolupůsobení zemního zásypu s ostěním tunelu. Z ČR lze zmínit např. tunely Novosedelský, Dolní Újezd nebo Hvížd'alka. Ve světě je to velká řada tunelů realizovaných podle patentu firmy Matiere, např. tunel San Jose, Lagavooren.



Obr. 3 Plavení tunelového elementu - Piet Hein tunel

### 3 Beton - stavební materiál podzemních staveb

Beton, jako stavební materiál pro budování podzemních staveb, je obecně využíván ve třech základních formách:

- Monolitický beton
- Stříkaný beton
- Prefabrikovaný beton

Ve všech třech případech jsou betonové konstrukce uvažovány buď z prostého (nevztuženého) betonu nebo železobetonové (armované). Pouze výjimečně jsou navrhovány jako předpjaté konstrukce, obvykle jen u hloubených objektů. Stále většího využití se dnes u podzemních staveb dostává betonům obsahujícím vlákna - buď ocelová (drátkobeton) nebo umělá (polypropylenová, skelná, atd.).

**Monolitický beton** je v podzemním stavitelství používán především jako definitivní (trvalé) ostění. Obvyklým přístupem je odizolování definitivního ostění pomocí nepropustné fóliové membrány a vyztužení ostění pomocí betonářské výztuže. Nové přístupy v navrhování definitivních ostění, rozsáhlé možnosti současných betonových směsí, moderní bezpečnostní a ekologické požadavky a snahy o minimalizaci nejen investičních, ale i provozních nákladů tunelových staveb vedou k několika vývojovým směrům monolitických betonů užívaných v podzemním stavitelství. V prvé řadě je to možnost realizace nevztuženého trvalého ostění při zachování obdobných dimenzí jako u ostění armovaného. Největším problémem nevztuženého definitivního ostění je zajištění maximální povolené šířky trhlin, což může být ovlivněno např. vhodným složením betonové směsi, tvarem ostění nebo i přidáním ocelových vláken. Zkušenosti s takovým

typem ostění jsou již i v ČR (tunel Libouchec), ve světě u tunelů Strenger (Obr.4), Eurotunnel (komora křížení) či Heathrow Express (stanice pod terminálem 4).



Obr.4 Dokončený silniční tunel Strenger

Další prvkem moderního přístupu je možnost nahrazení tradičních fóliových izolací stříkanými membránami. Kromě zahraničních aplikací (např. Portela, Giswil či Nördoy) byly již stříkané membrány použity i na pražském metru (únikové východy). Dále jsou také využívány izolace na bázi bentonitů (bentonitové rohože). V některých případech jsou pro ostění využity vodotěsné betony bez další izolační vrstvy. Tento princip, který se již dlouho běžně využíval u hloubených tunelů, se dnes pomalu začíná využívat u definitivních ostění tunelů ražených. Kromě vodotěsného betonu je třeba v tomto případě zajistit těsnost pracovních a dilatačních spár osazením těsnicími prvky (těsnicí plastové pásy, bentonitové pásy, spárové plechy atd.), injektážními hadicemi, případně krystalizačními nátěry. Zdařilou ukázkou využití vodotěsných betonů na našem území jsou např. již zmiňované vysouvané tubusy metra pod Vltavou v Praze, ve světě již výše zmiňované tunely Caland, Øresund, vídeňské metro a mnoho dalších.

V neposlední řadě se vývoj betonů trvalých ostění podzemních staveb dnes velmi široce zabývá otázkou jejich požární odolnosti. Po několika závažných nehodách v alpských automobilových tunelech v nedávné době je požární bezpečnost tunelů prioritním předpokladem návrhu. Spolu s požadavky na technologické vybavení pro případ požáru jsou předpisy stanovována požární zatížení daleko přesahující intenzitou hoření a dosaženou teplotou (až cca 1400°C) hodnoty pro běžné pozemní stavby. Využití vláken je založeno na principu vzniku odprýsknutí krycí vrstvy betonu na základě strmého nárůstu teploty a tlaku páry v betonu při požáru. Odprýskem vrstvy betonu dochází ke skokové ztrátě únosnosti konstrukce a zároveň k jejímu trvalému poškození. Bylo prokázáno, že již přidáním 1kg polypropylénových vláken na m<sup>3</sup> betonu dochází pouze k částečnému nebo nepatrnému poškození konstrukce. Zde má vliv typ, délka a průměr vlákna. Jako optimální množství se jeví 2kg PP vláken s délkou vlákna 6mm a průměrem 0,018mm. V tomto

důsledku se dnes stává takřka standardem přidávání polypropylenových vláken do betonových konstrukcí ostění tunelů požárem namáhaných. Ve srovnání s nástřiky protipožárních izolací a obklady protipožárními materiály jde o způsob finančně výhodnější, avšak stále ještě nedostatečně ověřený. Polypropylenová vlákna pro zvýšení požární odolnosti byla použita do prefabrikovaných segmentů ostění několika tunelů na Channel Tunnel Rail Link (CTRL – Obr.5) či do trvalého stříkaného ostění tunelů pro terminál 5 na Heathrow. U nás na své první použití stále čekají a velmi pravděpodobně k němu dojde u definitivních konstrukcí ostění tunelového komplexu Blanka.



Obr.5 Prefabrikované segmentové ostění tunelů CTRL s polypropylenovými vlákny

**Stříkaný beton** je nejčastěji využíván jako dočasné (primární) ostění zajišťující výrub při ražbě pomocí Nové rakouské tunelovací metody (NRTM). V posledních letech je stále markantnější snaha využít stříkaný beton i jako ostění trvalé (sekundární), což přináší podstatné zvýšení nároků na aplikaci a výsledné vlastnosti betonu (Heathrow Express, Jubilee Line Extension, atd.). Pozitivem tohoto přístupu je však zjednodušení technologického postupu a zkrácení doby výstavby. Ještě přísnější kritéria musí splňovat stříkaný beton použitý jako jednovrstevné ostění, se všemi parametry požadovanými pro trvalé ostění (pevnost, trvanlivost, nepropustnost, povrchové a estetické vlastnosti atd.). Jednovrstevné ostění bylo použito na tunelech pro terminál 5 na Heathrow.

**Prefabrikované betonové ostění** je zpravidla používáno při technologii výstavby pomocí tunelovacích strojů (TBM – Tunnel Boring Machine). Segmenty betonového ostění jsou připraveny ve výrobě, kde je kontrolním systémem zaručena požadovaná kvalita prefabrikátů (přesnost rozměrů, pevnost betonu, povrchové vlastnosti). Z tohoto důvodu nenastal v oblasti segmentových ostění v poslední době výraznější vývoj. Hlavními trendy v oblasti segmentových ostění jsou tak jako u ostatních typů trvalých ostění snaha o zvýšení požární odolnosti (CTRL) či aplikace nových tvarů segmentů (např. hexagonální segmenty umožňující kontinuální ražbu použité na tunelu Yellow River Diversion). V menší míře se projevují inovace při způsobu prefabrikace jednotlivých dílců (nové

způsoby prefabrikace, segmenty vyztužené ocelovými vlákny, využívání betonů vyšších pevností s omezením tloušťky segmentů, atd.).

#### **4 Terminál 5 Heathrow - stříkaný beton pro jednoplášťové ostění**

Inovace v oblasti stříkaných betonů bude popsána podrobněji na příkladu tunelů realizovaných pro terminál 5 (T5) na londýnském letišti Heathrow. Jde o nejvytíženější mezinárodní letiště na světě. Proto bylo rozhodnuto vybudovat nový terminál, čímž se podstatně zvýší kapacita letiště. Výstavba terminálu 5 s rozpočtem 4,2 miliardy liber byla zahájena v roce 2002, dokončena by měla být v roce 2008. Jedná se v současné době o jeden z největších a nejsložitějších stavebních projektů v Evropě. Stavba nového terminálu zahrnuje i přes 13 km dlouhou síť ražených tunelů a šachet. Při výstavbě T5 bylo nutné vybudovat následující tunely: tunel pro odvedení dešťové vody, kolektor pod silnicí A3044, silniční tunel na letištní straně, prodloužení trasy metra Piccadilly a prodloužení železničního tunelu Heathrow Express. Pro ostění tunelů na T5 byl vyvinut a aplikován nestandardně kvalitní stříkaný beton, jehož vlastnosti budou popsány podrobněji.

##### **Odlišnost od tradičních postupů**

Tunely realizované za pomoci stříkaného betonu (NRTM) se tradičně skládají z primárního stříkaného ostění a sekundárního ostění z monolitického betonu. Jak bylo poznamenáno výše, použití stříkaného betonu i pro sekundární ostění může snížit náklady realizace tunelů realizovaných pomocí stříkaného betonu. 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 ve srovnání s tradičním postupem šetří čas a peníze.

Při přípravě stavby T5 bylo jasné, že značnou část podzemních staveb bude nutné realizovat pomocí ostění ze stříkaného betonu (OSB). Jednalo se především o realizaci křížení tunelů a šachet či krátké propojky komplikovaných tvarů. Vzhledem ke špatným zkušenostem investora s NRTM (havárie v roce 1994) bylo rozhodnuto, že veškeré ražby pomocí OSB budou realizovány metodou LaserShell<sup>TM</sup>. Značně nestandardní stříkaný beton použitý pro trvalé jednoplášťové ostění realizované pomocí metody LaserShell<sup>TM</sup> tak musel uspokojit řadu velmi náročných kritérií.

##### **Principy metody LaserShell<sup>TM</sup>**

Koncepce metody LaserShell<sup>TM</sup> byla vyvinuta společnostmi Morgan Est (Británie) a Beton-und Monierbau (Rakousko). Hlavní charakteristiky metody jsou následující:

- Jedná se o jednoplášťové ostění. Prakticky veškerý nastříkaný beton tvoří součást trvalého vodotěsného ostění.
- Tunelové ostění tvoří stříkaný drátkobeton bez ocelových sítí a bez příhradových rámců. Tím se zvyšuje kvalita ostění, protože se eliminují problémy stínování nástřiku v oblasti žeber a tím i koroze oceli.
- Tvary výrubu a ostění jsou kontrolovány pomocí laserového dálkoměru TunnelBeamer<sup>TM</sup>, kterým je měřena poloha libovolných bodů na povrchu výrubu nebo na vnitřním líci ostění. Údaje dálkoměru jsou průběžně ukládány do počítače, který obsahuje



informace o prostorovém tvaru tunelu. Na monitoru se zobrazuje porovnání teoretické a skutečné polohy výrubu či ostění. Obsluha ovládající počítač komunikuje s obsluhou tunelbagru nebo s operátorem trysky (Obr.6).

- Čelba je ukloněná a vyklenutá, což zvyšuje stabilitu ve srovnání s klasickou svislou čelbou. Tvar čelby také snižuje sedání povrchu terénu.
- Tunel je ražen na plný profil, což vede k minimalizování počtu pracovních spár a ke zvýšení produktivity. Rychlé uzavření prstence ostění snižuje způsobené sedání povrchu terénu.



Obr.6 Nástřik betonu na terminálu 5 metodou LaserShell™

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%).

### Průkazní zkoušky

Před začátkem ražeb na T5 byly provedeny rozsáhlé průkazní laboratorní a polní zkoušky (Eddie a Neumann 2003). Na prokázání vhodnosti stříkaného betonu (mokrou cestou) pro trvalé ostění byla stanovena následující kritéria:

- Životnost 120 let.
- Pevnost 35MPa 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 přilnavost mezi dvěma vrstvami (tj. pevnost betonu v tahu s pracovními spárami by měla být stejná jako pevnost betonu beze spár).
- Styky jednotlivých záběrů by neměly snižovat spojitost ostění.

Dále byla zahrnuta dvě krátkodobá materiálová kritéria:

- Počáteční pevnost má vyhovět požadavkům horního oboru křivky J2, popsaného v rakouské Směrnici pro stříkané betony.
- Zpracovatelnost a čerpatelnost 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 stříkaného betonu.
- Polní zkoušky směsí s nejlepšími vlastnostmi vyvinutými v laboratoři.
- Zkoušky trvanlivosti vybraných vzorků.

Cekem se v laboratoři zkoušelo 38 různých betonových směsí. Vlastnosti směsí byly posouzeny na základě pevnosti v tlaku, konzistence a zpracovatelnosti jako funkce času od zamíchání. Potom následovaly polní zkoušky vybraných 24 směsí. Pro simulaci skutečných podmínek na stavbě byla použita kombinace ručního a mechanického stříkání. Tvar tunelu byl simulován pomocí jednoúčelového rámu, na který byl prováděn nástřik. Polní zkoušky vedly k výběru jedné směsi pro další zkoušení.

Ke splnění požadavků na počáteční pevnost bylo potřebné velké množství cementu ( $450\text{kg/m}^3$ ). Dlouhodobě je tím zajištěn velmi pevný beton. Tato výhoda je doprovázena jednou nevýhodou. Vysoká pevnost betonu znamenala nutnost použití ocelových vláken s vysokou pevností, které jsou poměrně drahé. Drátky z oceli s normální pevností při ohybových zkouškách praskaly křehkým lomem místo tvárného porušení tahem. Drátky z vysoce uhlíkaté oceli zaručují houževnatost, omezují vznik trhlin tepelným smršťováním, a zlepšují rázovou tuhost. Použitá směs stříkaného betonu mokrou cestou má výborné vlastnostmi, bohužel vysoká kvalita přináší vysokou cenu.

Přidání mikrosiliky výrazně zvyšuje trvanlivost a nepropustnost betonu. Umožňuje i dosažení velmi dobré zpracovatelnosti směsi bez segregace a zlepšuje přilnavost směsi. Polypropylénová vlákna zlepšují nástřikové vlastnosti betonu, snižují vznik trhlin plastickým smršťováním, a zvyšují požární odolnost ostění. Používal se nealkalický urychlovač Meyco SA 160. Doba použitelnosti směsi byla 180 minut od zamíchání.

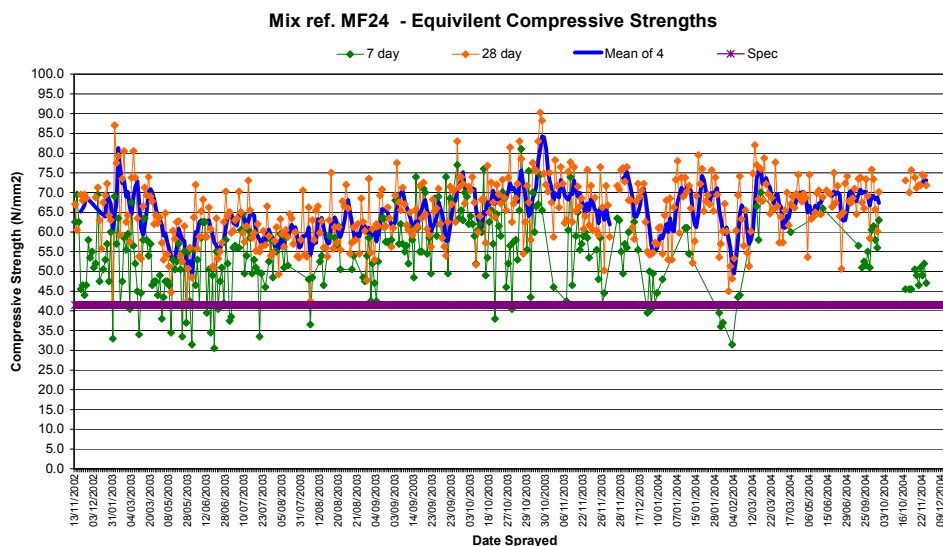
Pro hlubší pochopení rozdílů mezi stříkaným betonem a klasickým monolitickým betonem byla po skončení polních zkoušek na univerzitě v Innsbrucku odzkoušena trvanlivost vzorků. Zkoušky prokázaly, že stříkaný beton splňuje všechna předepsaná kritéria. Bylo splněno kritérium jak krátkodobé, tak dlouhodobé 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.

## Kvalita stříkaného betonu

Na stavbě terminálu 5 byly používány běžné postupy kontroly kvality OSB. Přidány byly některé zkoušky na kontrolu životnosti betonu.

Jako při většině ražeb pomocí OSB, i zde byly prováděny penetrační testy Hilti pro stanovení nárůstu pevnosti mladého stříkaného betonu. Zkoušky byly prováděny 1, 3 a 6 hodin po dokončení nástřiku. Počáteční pevnost stříkaného betonu musela vyhovět požadavkům na horní obor J2.

Z dokončeného ostění byly pravidelně odebírány jádrové vrtvy. Reprezentativní vzorky ostění byly odebírány rovnoměrně ze stropu, spodní klenby, stěn a ze spojů ostění. Jádra byla zkoušena na pevnost v tlaku a objemovou hmotnost po 7, 28, 90 a 365 dnech. Zkoušena byla nejméně jedna sada čtyř jader na 100m<sup>3</sup> nastříkaného betonu. Zkoušky propustnosti byly prováděny na jádrech po 28 dnech. Požadovaná propustnost byla 10<sup>-12</sup> m/s či nižší. Pro hodnocení laminace, dutin, spár, shlukování vláken a segregace kameniva byla jádra kontrolována vizuálně. Všechny otvory po odvrtech byly zabetonovány. Pevnost v tlaku základní směsi (bez urychlovače) byla také zkoušena na krychlích po 7 a 28 dnech. 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. Průměrná pevnost v tlaku u vzorků jader vrtů a krychlí na stavbě terminálu 5 byla výrazně nad požadovanou hodnotou 35MPa. Jádrové vzorky měly průměrnou 28-denní pevnost okolo 70MPa, s maximálními hodnotami okolo 90MPa (Obr.7). Pevnost mladého stříkaného betonu ověřená penetračními zkouškami též vyhověla požadavkům. Tato vysoká pevnost neměla žádné zjevné negativní účinky na dlouhodobé chování stříkaného betonu a ani nezpůsobovala závažné problémy při jeho nástřiku.



Obr.7 Pevnost v tlaku zjištěná na odvrtch ostění ze stříkaného betonu

Ve spojích dokončující vrstvy ostění byly pozorovány trhlinky, avšak praskání konstrukční vrstvy bylo zcela výjimečné. Občasné vlasové trhlinky v konstrukční vrstvě byly problémem ohrožujícím vodotěsnost ostění. Tento problém byl úspěšně řešen dodatečnou injektáží za ostění. Zkoumáním jádrových vzorků bylo prokázáno, že dutin v konstrukčních spárách je velmi málo.

Značné úsilí, vynaložené na vývoj metody LaserShell™ se vyplatilo. Kromě očekávaného dopadu na vývoj podzemního stavitelství měla příprava a ověření této inovační metody také dopad na zvýšení kvality stříkaného betonu. Konstrukce ze stříkaného betonu vytvořené při stavbě terminálu 5 pomocí metody LaserShell™ patří v současnosti mezi nejkvalitnější OSB na světě.

## 5 Tunel Strenger

Automobilový tunel Strenger leží na rychlostní čtyřpruhové silnici S16 mezi rakouskými městy Landeck a Bludenzem. Délka tunelu zajišťujícího obchvat města Strengen je 5,8km. Pro každý jízdní směr byla pomocí technologie NRTM vyražena samostatná tunelová trouba o světlém profilu 55m<sup>2</sup> a výrubním profilu 77,1-88,4m<sup>2</sup>. Tunel prochází alpským hřbetem s maximálním nadložím cca 620m, v provozu je od konce roku 2005.

### Postup výstavby

Realizace tunelu je velmi zdařilá ukázka využití observačních možností nové rakouské tunelovací metody. Přes snahu navrhnout trasu tunelu mimo oblast porušených svahových sutí s potenciální nestabilitou se velká část ražeb potýkala s velkými deformacemi výrubu, několikanásobně překračujícími původní prognózy. Zastiženy byly tektonicky porušené metamorfované horniny, které byly místy zcela porušené a nesoudržné. Radiální deformace dosahovaly 700-800mm, maximální zdvihání počvy (dna) v kalotě bylo až 1000mm. Extrémní deformace vedly k odstřelování hlav svorníků, které musely být zahušťovány v několika cyklech. Pro absorpci deformací byly v betonu primárního ostění provedeny podélné niky, do kterých se osadily deformační prvky z ocelových ploten a válců (Obr.8). Ke snížení napětí v kotvách byly využívány upravené kompenzační podložky. Celý vnitřní líc primárního ostění byl z bezpečnostních důvodů proti odstřelování podložek a odpadávání porušeného betonu ochráněn svařovanou sítí.

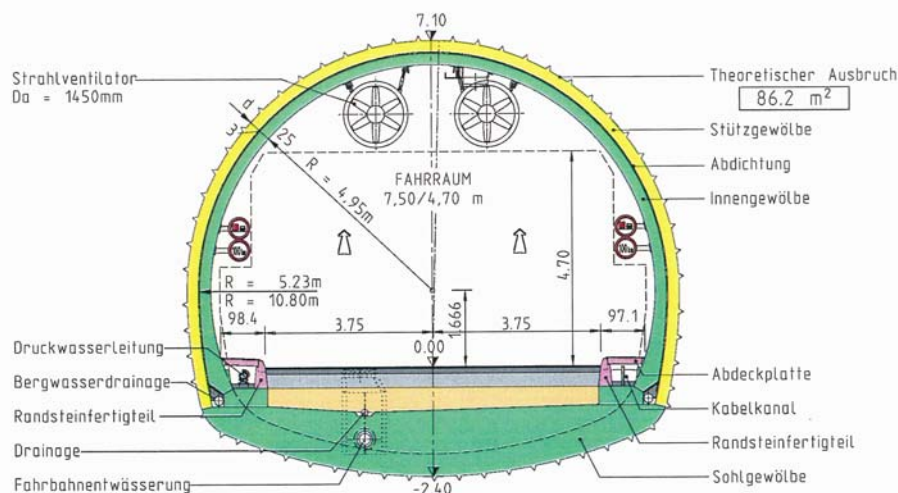


Obr.8 Zajištění výrubu tunelu Strenger proti deformacím

### Definitivní ostění

Definitivní ostění bylo budováno proudovou metodou jakmile se rychlost deformací priméru ustálila na hodnotě 1-2mm za měsíc. Před vlastní betonáží došlo v kritickém úseku s největšími deformacemi nejprve k přeprofilování tunelu. Definitivní ostění bylo

provedeno z monolitického betonu tloušťky pouhých 250mm (Obr.9), v nouzových zálivech 350mm. Navíc bylo ostění realizováno z prostého betonu, pouze v nejkritičtějších úsecích a atypických profilech zálivů z drátkobetonu. Jen opravdu vyjímečně se použilo výztužných ocelových sítí. Umožnění přeskupení napětí v masivu v etapě dočasného vystrojení poddajným primérem ostěním (observační princip) tak znamenalo výrazné snížení zatížení definitivního ostění. Plně se tak využilo schopnosti prostředí vytvořit nad tunelem nosnou horninovou klenbu, přenášející hlavní zatížení.



Obr.9 Příčný řez tunelem Strenger

Hodnota dosažených deformací primárního ostění tunelu Strenger je naprosto vyjímečná a dá se říci, že jen dokonalé zvládnutí principů observačního postupu NRTM zabránilo možnému zhroucení dočasného vystrojení. Přesto se podařilo vybudovat trvalé ostění se zcela nekonzervativními dimenzemi a navíc bez použití betonářské výztuže.

## 6 Tunel Busan – Geoje Fixed Link

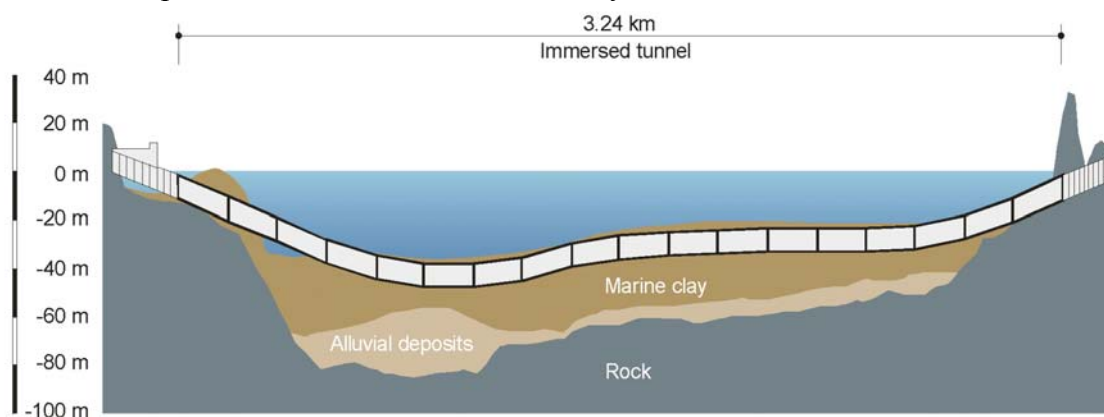
Korejské město Busan má v poslední době rapidně se zvětšující počet obyvatel. Tím rostou nároky i na dopravní infrastrukturu, na což reaguje výstavba nových kapacitních dopravních tras. Nově budované dálniční propojení nazvané Busan-Geoje Fixed Link celkové délky 8,204 km propojí Busan s atraktivní rekreační oblastí ostrova Geoje. Spojení je vedeno přes moře na zavěšených mostech, využívá několik mezilehlých ostrovů a rovněž pak vede plaveným (potopeným) tunelem délky 3,38km (Obr.10). Dokončení celé trasy se předpokládá v roce 2010.

### Konstrukce plavených tunelů

Celý tubus plavených (potopených) tunelů byl navrhován do poměrně komplikovaných podmínek, a to jak z hlediska možných vlivů při výstavbě, tak i během užívání. Podmínkami návrhu byly zejména:

- Hydrostatický tlak, hloubka tunelů pod hladinou moře dosahovala až 52m. Navíc bylo v dlouhodobém horizontu životnosti uvažováno se zvýšením hladiny moře vlivem globálního oteplování až o 40cm.
- Tajfun, vysoké vlny a mořské proudy, především v průběhu výstavby bylo třeba reflektovat na tyto přírodní vlivy. Z návrhového hlediska představovaly např. vysoké vlny zvýšení hydrostatického tlaku na ostění o výšku 6-7m vodního sloupce.
- Zemětřesení, celá oblast se nachází v aktivní seismické zóně.
- Náráz lodí, trasa tunelu se kříží s významnou trasou lodní dopravy a zejména konce tunelu mělčeji umístěné musejí být na náráz nebo potopení lodí navrženy.
- Životnost je uvažována minimálně v horizontu 100 let v prostředí trvalého obklopení mořskou vodou.

Na základě uvedených podmínek byly stanoveny kritéria pro nosnou betonovou konstrukci tunelů, kde vodotěsnost zajišťuje pouze beton bez jakékoliv vnější vodotěsné membrány. V obecné rovině bylo při návrhu postupováno podle předpisu Eurocode 2 a podle zkušeností s obdobnými díly ve světě. Samostatným výzkumným projektem (metodou DuraCrete) byla v DAEWOO E&C Institute of Construction Technology zkoumána životnost betonu se zohledněním možných vnějších vlivů. Základním určujícím parametrem spolehlivosti-životnosti byl koeficient difúze chloridů v betonu. Výsledkem tohoto zkoumání bylo určení složení betonové směsi vnějších stěn a desek (použit struskový cement a mikrosilika), podmínek a způsobu ukládání betonu, jeho ošetřování a kontrolování a určení požadavků pro statické výpočty. Statický návrh a dimenze vnějších konstrukcí musely zabezpečit maximální povolenou šířku trhliny 0,2mm a minimální tlačenou šířku průřezu 200mm, nebo 25% tloušťky.

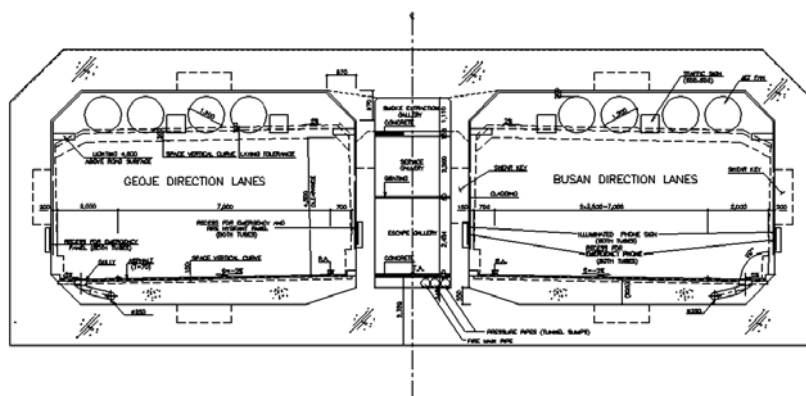


Obr.10 Podélný řez tunelu Busan

### Postup výstavby

V podélném směru je celý tubus tunelu rozdělen na celkem 18 elementů vyráběných v 36km vzdáleném suchém doku. Jednotlivé elementy délky 180m se betonují po 22,5m dlouhých segmentech, vždy čtyři elementy najednou. Každý element má na obou koncích ocelovou přírubu, na kterou je při přesunu osazena přepážka. Následně jsou elementy přepraveny do bezpečného čekacího prostoru pro 4-8 ks, odkud jsou při příznivých klimatických podmínkách přeplaveny do místa určení a uloženy na upravené dno moře. Po osazení je vždy mezilehlá přepážka odstraněna.

Postup vlastní betonáže v suchém doku představuje v ČR sice známé (vysouvané tunely metra), leč poměrně komplikované řešení. Oproti standardnímu postupu betonáže s pracovními spárami kdy se betonuje dno, dále stěny a potom strop byly jednotlivé segmenty plavených tunelů betonovány najednou v celé šířce i délce. Tento způsob byl tak jako v Praze využit z důvodu zamezení vzniku trhlin v betonu vlivem nestejného smršťování čerstvého a starého betonu u pracovní spáry. Při šířce celého tunelu 26,46m a výšce 9,97m (v příčném řezu se tunel skládá ze dvou jízdnicích prostorů a střední štolu – Obr.11) bylo k betonáži každého segmentu zapotřebí 2200m<sup>3</sup> betonu. Celý postup betonáže se musel časově sladit, aby tuhnutí směsi jednak zajistilo kontinuální betonáž, ale zároveň aby nedocházelo k vytlačování tekuté směsi z horního povrchu spodní desky do tunelu. Nejdříve se tedy betonovala spodní deska v místech středů obou jízdnicích směrů, následně pod střední štolou a potom rohy pod bočními stěnami. Dále navazovaly střední a boční stěny a nakonec celá stropní deska. Kontrole provádění i ošetřování byla věnována velká pozornost.



Obr.11 Příčný řez tunelem Busan

Výstavba plavených tunelů propojení Busan – Geoje Fixed Link v současné době stále pokračuje. Přípravě této rozsáhlé stavby byla věnována velká pozornost, která se jistě vyplatí v horizontu životnosti na bezproblémovém provozu a údržbě konstrukce tunelu umístěného v extrémních podmínkách.

## 7 Závěr

Beton byl, je a bude dominantním materiálem při realizaci podzemních staveb. Vývoj tohoto materiálu umožňuje realizovat stavby levněji, rychleji, kvalitněji či bezpečněji. Z výše uvedeného příspěvku je patrné, že možností způsobu provádění podzemních staveb je skutečně mnoho. Projektanti, ale i zhotovitelé a investoři by tak měli vždy hledat optimální technické řešení pro daný projekt, bez ohledu na zažitá tradiční postupy. Výběr optimálního řešení musí záviset pouze na daných podmínkách a případným inovativním nebo progresivním řešením by mělo být umožněno obhájit svůj přínos i přes konzervativní náhledy ze strany investorů a zhotovitelů. Na druhou stranu i samotný vývoj betonu by měl reflektovat potřeby tunelářského průmyslu tak, aby se v budoucnu realizovaly ještě kvalitnější a trvanlivější konstrukce.

*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.*

---

### Ing. Pavel Šourek

✉ Satra spol. s r.o.,  
Sokolská 32  
120 00 Praha 2  
☎ 296 337 149  
📠 296 337 100  
😊 pavel.sourek@satra.cz  
URL [www.satra.cz](http://www.satra.cz)

### Ing. Matouš Hilar, MSc., PhD., CEng., MICE

✉ D2 Consult Prague,  
Zelený pruh 95/97  
147 00 Praha 4  
☎📠 241 443 411  
😊 hilar@d2-consult.cz  
URL [www.d2-consult.cz](http://www.d2-consult.cz)

### Reference:

- Hilar, M; Srb, M. (2006): Definitivní ostění konvenčně ražených tunelů v ČR - současnost a budoucnost. Beton 6/2006.
- Hilar, M; Thomas, A. (2006): Přístup k řešení definitivního ostění tunelových staveb ve Velké Británii. Beton v podzemních a základových konstrukcích. Praha, únor 2006.
- Hilar, M; Thomas, A; Falkner, L. (2005): Nejnovější inovace v provádění ostění ze stříkaného betonu - metoda LaserShell. Tunel 4/2005.
- Williams, I; Neumann, C; Jager, J; Falkner, L. (2004): Innovative Shotcrete Tunnelling for London Heathrow's new Terminal 5, EUROCK 2004 & 53<sup>rd</sup> Geomechanics Colloquium, Schubert.
- Eddie, C; Neumann, C. (2003): LaserShell leads the way for SCL tunnels. Tunnels & Tunnelling, June 2003.
- Šourek, P; Barták, J. (2007): Focus on Czech Republic. Tribune 2007.
- Kol. autorů (2007): Podzemní stavitelství v České republice. Publikace SATRA spol. s r.o.
- Šourek, P; Barták, J; Dvořák, J. (2006): Underground Engineering in the Czech Republic. World Tunneling Congress Seoul 2006
- Pöttler, R; Starjakob, F; Spöndlin, D. (2006): Strenger Tunnel. Tunel 5/2006.
- Jensen, O.P; Olsen T.M; Kim, Ch.W; Heo, J.W; Yang, B.H. (2006): Construction of Immersed Tunnel in Off-Shore Wave Conditions Busan-Geoje Project South Korea. World Tunneling Congress Seoul 2006
- Odgaard, S.S; Jensen, O.P; Kasper, T; Yoon, Y.H; Chang Y; Park, R.Y. (2006): Design of Long Immersed Tunnel for Highway in Offshore Conditions – Busan – Geoje Fixed Link. World Tunneling Congress Seoul 2006