

# RAŽBA TRAŤOVÝCH TUNELŮ PRAŽSKÉHO METRA TECHNOLOGIÍ TBM ■ EXCAVATION OF PRAGUE METRO RUNNING TUNNELS USING TBM TECHNOLOGY

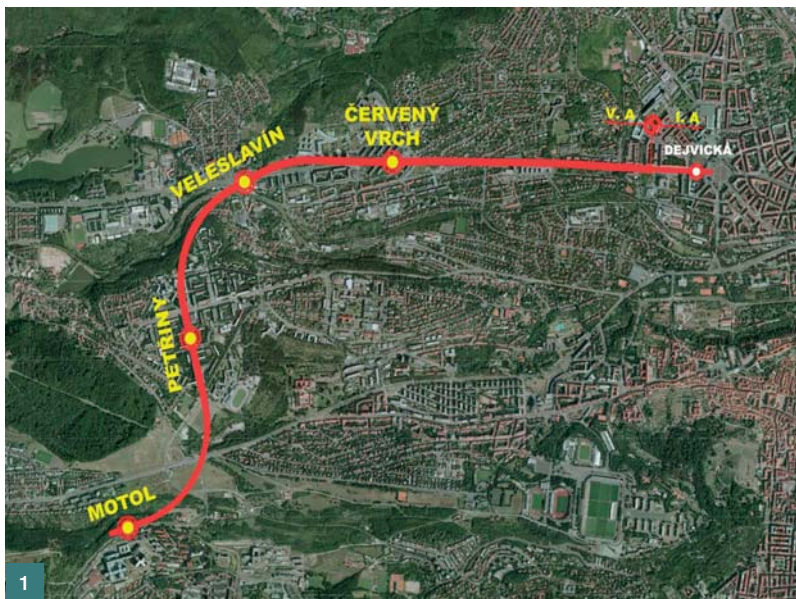
Petr Vítek, Boris Šebesta, Matouš Hilar, Radomír Pukl

Ražba traťových tunelů metra probíhá poprvé v České republice s využitím moderních plnoprofilových tunelovacích strojů (technologie TBM). V souvislosti s ražbou byla řešena řada souvisejících technologií, např. doprava rubaniny, zásobování stroje segmenty ostění, materiál výplňové injektáže za rubem ostění, postup montáže a demontáže stroje ve stísněných podzemních prostorech, přesuny stroje předražnými stanicemi atd. Stavební postupy si vyžádaly určité změny projektu oproti původnímu zadání, čímž se stavební práce zjednodušily, zvýšila se rychlost výstavby a stavba je šetrnější k životnímu prostředí. Zvláštní pozornost je věnována modernímu prefabrikovanému segmentovému ostění, které je charakteristické mimořádnou přesností výroby segmentů i jejich montáží. Na rozdíl od konvenčně ražených tunelů (technologie NRTM) bylo zapotřebí připravit návrh ostění v souladu s návrhem tunelovacího stroje, aby jednotlivé segmenty byly využity co nejefektivněji (při dodržení požadovaných podmínek spolehlivosti) a cena výstavby zůstala v přijatelných mezích. S ohledem na náročnost návrhu jednotlivých segmentů ostění, které jsou vyráběny ve velkém množství, byla pozornost věnována podrobné statické analýze doplněné řadou experimentů. Zatěžovací zkoušky byly prováděny na malých vzorcích (krychle a trámce) i na prvcích skutečné velikosti a zkoušky byly doplněny nelineárními výpočty metodou konečných prvků. Dále je třeba zmínit vývoj ostění vyrobeného z betonu s rozptýlenou výztuží, jehož vhodnost pro budoucí využití byla ověřena výstavbou zkušebního úseku. ■ Excavation of new running tunnel for Prague metro is realised using modern tunnelling machines (technology TBM – Tunnel Boring Machine). Various related technologies had to be solved together with the excavation process such as transport of muck, supply of tunnel segments to the machine, grouting material, assembly and disassembly of the tunnelling machines in confined underground space, shifting of machines through the stations constructed in advance, etc. The construction techniques required some changes of the original project, which brought simplification of the construction process. Changes also allowed faster excavation progress and construction became more friendly to the environment. Special attention is devoted to the modern precast segmental lining, which is characterized by extreme precision of segment production and installation. The lining design had to be coordinated with the design of machines, which is different in comparison to the conventional tunnelling (NATM technology). The individual segments should be utilized effectively (fulfilling all required reliability conditions) to keep construction cost within acceptable limits. Special attention was paid to the detailed structural analysis of segmental tunnel lining supplemented by a number of experiments. The reason was a significant demand on the segmental lining design caused by high number of produced segments. Both small samples (beams and cubes) and full size segments were tested in laboratory. Realised experiments were accompanied by nonlinear calculations using the finite element method. We have also to mention the development of the segments generated from the steel fibre reinforced concrete (SFRC), their convenience for future utilization was successfully verified by construction of the test section in the realised tunnel.

Obr. 1 Situace trasy Metra A: Dejvice – Motol ■ Fig. 1 Plan of the Prague underground line: Dejvice – Motol

Obr. 2 Zeminový štít (TBM) ■ Fig. 2 EPB shield (TBM)

Obr. 3 Montáž rezné hlavy stroje ■ Fig. 3 Cutting head assembly



## HISTORIE MECHANIZOVANÉ RAŽBY V ČR

V prosinci roku 2009 se sen mnoha českých tunelářů stal skutečností, neboť byla podepsána smlouva mezi objednatelem Dopravním podnikem hl. m. Prahy, a. s., a zhotovitelem Sdružení metro V. A (Dejvická-Motol) složeným z firem Metrostav, a. s., a Hochtief CZ, a. s., pro zhotovení prodloužení trasy metra V. A v úseku mezi stanicemi Dejvická (mimo) a Motol (včetně).

Za radostnou událost můžeme jistě označit jakýkoli obdobný projekt, který má schopnost zlepšit dopravní obslužnost, a tím i životní komfort dotčené komunity. Pro nás staře a tune-láře je dosažením a naplněním zmiňovaného snu realizace traťových tunelů pomocí moderních plnoprofilových tunelovacích štítů (technologie TBM – Tunnel Boring Machine), kde zodpovědnost za danou technologii převzal vedoucí účastník vítězného sdružení firma Metrostav, a. s.

Ačkoliv historie českého tunelářství nemá v porovnání se světovým podzemním stavitelstvím tak bohatou a košatou zkušenost s využitím technologie TBM, tak je jistě vhodné uvést, že v letech 1970 až 1990 ražby tunelů pomocí plnoprofilových tunelovacích strojů na našem území již probíhaly. Lze zmínit firmy Subterra, Metrostav a IPS, které v uvedené době poměrně úspěšně zrealizovaly několik projektů v profilech od Ø 2,4 do Ø 5,8 m.

Období minulých ražeb, kdy bylo u nás prvně využíváno principů strojního ražení, není možné srovnávat se současnou kvalitou používaného technologického vybavení. Proto je možné prohlásit, že technologie TBM je v ČR v současnosti nasazena poprvé.

### POPIS PROJEKTU METRA V. A

Projekt na prodloužení metra A v Praze počítal s protažením linky až na letiště Ruzyně, jako logického propojení letecké a městské hromadné pod povrchové dopravy.

Celý úsek mezi Dejvicemi a letištěm Ruzyně byl rozdělen do několika částí, z čehož soutěž byla vypána na prodloužení metra A až do stanice Motol (obr. 1). V tomto úseku se nachází tři ražené stanice (Petřiny, Veleslavín a Červený Vrch) a jedna hloubená stanice (Motol). Z pohledu technologie ražeb se nová trasa rozdělila na úsek Dejvice–Vypich, kde jsou nasazeny dva stroje TBM (obr. 2) a úsek Vypich–Motol, s ražbou pomocí konvenční

technologie NRTM (Nová rakouská tunelovací metoda).

Traťové tunely ražené pomocí dvou zeminových štítů (technologie TBM) se razí od Vypichu, směrem ke stávající stanici Dejvická, kde bude ražba brzy ukončena. Na zařízení staveniště před stanicí Petřiny proběhla základní montáž jednotlivých dílů TBM a jeho návěsů, které byly postupně spuštěny šachtou do montážní komory. Sestavení technologického celku proběhlo v montážní komoře (obr. 3) s následným zahájením ražeb směrem ke stanici Petřiny. Tunelovací štíty již byly protaženy všemi třemi stanicemi, které byly vyraženy pomocí NRTM před příjezdem štítů. Za stanicí Veleslavín je situována stavební jáma, ve které došlo k přepojení veškeré logistiky pro zásobování a obsluhu obou strojů. Tím se uvolnil úsek Vypich–Veleslavín pro pokračování ve výstavbě obou stanic i vystrojení traťového úseku. Po přepojení logistiky v jámě za Veleslavínem se překročilo k vyražení úseku Veleslavín–Červený Vrch a po protažení strojů stanicí Červený Vrch nastala ražba posledního a nejdelšího traťového úseku ke stávající stanici Dejvická, která byla dokončena 26. listopadu.

### ZMĚNY OPROTÍ PŮVODNÍMU PROJEKTU

V průběhu zpracovávání nabídky došla firma Metrostav, a. s., k některým technickým úpravám projektu. Jednalo se především o přidání přístupové štolky do stanice Petřiny, změnu ve způsobu ražby stanice Petřiny, vývoj systému segmentového ostění a změnu systému odvozu rubaniny z kolejového na pásovou dopravu.

Na zařízení staveniště na Vypichu byly postaveny dvě přístupové štolky, První štola, ústící do traťových tunelů, byla určena pro zásobování tunelovacích štítů a také pro ražbu NRTM směrem do Motola. Druhá přístupová štola ústila do stanice Petřiny a umožnila ražbu stanice v předstihu před příjezdem štítů. Štola se bude při provozu metra zčásti využívat pro obratovou kolej.

Uvedené řešení vedlo k úspoře cca 2 × 200 m segmentového ostění, které by bylo nutné dodatečně vybourávat, a k eliminaci komplikované rozrážky stanice přes vyražené traťové tunely. Současně změna pořadí ražeb umožnila optimalizovat výstavbu stanice.

Odvoz rubaniny byl původně navržen pomocí kolejové a svislé dopravy, kde měly být jednotlivé kolejové vozy

vytaženy pomocí portálových jeřábů na povrch a vysypány na mezideponii. Vzhledem k hloubce šachty, resp. stavební jámy (cca 27 m), se jednalo o časově velice náročnou a z pohledu nutnosti strojního vybavení i o poměrně nákladnou operaci. Po zvážení všech možných kombinací volby způsobu odvozu rubaniny bylo nakonec jako nejlepší řešení zvoleno použití dopravníkových pásů přímo od tunelovacích štítů. Dopravníky jsou od štítů vedeny kontinuálně v celé délce tunelů až na povrch s výsypem na mezideponii. Tento způsob odtěžby zcela oddělil hlavní logistické procesy, což je doprava segmentového ostění do vnitř ke stroji a transport rubaniny ven na povrch. V prostoru zařízení staveniště na Vypichu je tento systém ještě doplněn o přesyp z tunelového pásu na nezávislý pás v přístupové štolce zaústěné do traťového dvoukolejného tunelu. Získáním nezávislosti obou dopravních proudů byla zajištěna i maximální podpora pro dosažení optimálních výkonů ražeb, navíc změna cyklické dopravy rubaniny na kontinuální výrazně zjednodušuje manipulaci s rubaninou.

Na rozdíl od původního předpokladu, kdy měla být v blízkosti stanice Dejvická vybudována jáma pro rozebrání štítů, byla koncepce změněna a v prostoru obratových kolejí stávající stanice Dejvická je vyklizen a připraven prostor pro demontáž štítů. Zde jsou v současnosti oba stroje postupně rozebrány na manipulovatelné díly. Jednotlivé díly budou nově vybudovanými tunely postupně přepraveny zpět do otevřené jámy na Červeném vrchu. Nové řešení vedlo k úspoře nákladů i k mnohem menší zátěži životního prostředí města.

### POPIS NASAZENÝCH PLNOPROFILOVÝCH TUNELOVACÍCH ŠTÍTŮ

Hlavními výhodami ražby pomocí technologie TBM jsou její rychlost a bezpečnost. Kritériem rychlosti při realizaci tunelů je vytvoření definitivní obezdívky odolné tlakové vodě v jednom kroku při souběžně probíhající ražbě, a to s vysokou mírou bezpečnosti jak k povrchové zástavbě, tak i k pracovníkům v tunelu. Celá délka tunelu je zabezpečena buď vlastním pláštěm štítu, nebo nainstalovaným železobetonovým ostěním. Řízeným odtěžováním rubaniny se minimalizuje rozvolnění okolního prostředí, a tím se výrazně omezuje rozsah poklesové kotliny.



Porovnáním měsíčních postupů s metodou NRTM o adekvátních profilech se prokáže výrazná převaha technologie TBM. Pro TBM daného průměru již byl zaznamenán i špičkový postup více než 1 000 m za měsíc, což obnáší vyrazení i vystrojení tunelu definitivní konstrukcí. V případě tunelů pražského metra byl dosud zaznamenán nejvyšší měsíční výkon 627 m a nejvyšší denní výkon 33 m. Špičkový výkon pro NRTM se může pohybovat kolem 200 m za měsíc, ovšem pouze v primárním ostění, takže následují další operace v podobě reprofilace, realizace hydroizolace, armování a až poté je tunel dokončen betonáží definitivního ostění. Je samozřejmé, že vše nejvíce ovlivňuje zastížená geologie, avšak i v tomto ohledu je na tom lépe technologie TBM, neboť z pohledu ražeb má v případě TBM změna geologie výrazně menší dopad.

Pro výrobu tunelovacích strojů byla vybrána firma Herrenknecht, která celosvětově zaujímá čelní místo ve vývoji jejich produkce. Nasazeny byly dva nové zeminové štíty (typ EPB = Earth Pressure Balance), kde tlak horninového masivu na čelbě je eliminován protitlakem vytvářeným v komoře razicí hlavy stroje. Použité stroje mají průměr 6 m, délku vlastního štítu 8 m a délku závěsu 80 m.

Základními komponenty stroje jsou:

- rotační řezná hlava osazené soustavou valivých dlát a řezných nožů,
- štít chránící strojovnu a obsluhu stroje,
- strojovna,
- erektor – zařízení pro ukládání jednotlivých segmentů ostění,
- pásový dopravník rubaniny,
- závěs – soustavy návěsů tažených za strojem.

## PREFABRIKOVANÉ SEGMENTOVÉ OSTĚNÍ TRAŤOVÝCH TUNELŮ

### Základní popis

Využití prefabrikovaného segmentového ostění není nová myšlenka. Tento druh ostění byl u nás již v minulosti široce využíván při výstavbě metra a na dalších železničních i silničních tunelech. U traťových i staničních tunelů metra se využívaly nejprve ocelolitinové segmenty a následně pak betonové. Zásadním problémem, který prefabrikované ostění přinášelo, bylo těsnění tunelu proti účinkům tlakové vody. Těsnicí systémy byly nákladné (využívalo se např. olovo) a poněkud nespolehlivé.

Nová generace segmentového ostění



je charakteristická velmi vysokou přesností výroby prefabrikátů a systémovým osazováním těsnicích pásek přímo na vyrobené prefabrikáty. Geometrické odchylky jsou minimální, a proto těsnicí pásky vložené do speciálních drážek ve spárách ostění prvky kvalitně zatěsní proti účinkům tlakové vody. Volný prostor mezi vnějším povrchem ostění a výrubem se průběžně injektuje výplňovou injektážní směsí, čímž se minimalizuje negativní vliv ražby na deformace nadloží tunelu včetně povrchu.

Návrhu systému ostění byla věnována velká péče a systém byl posuzován z mnoha hledisek. Ve světě se využívá řada různých systémů montovaného ostění, většina byla podrobně posouzena a zhodnocena. Snahou bylo navrhnout optimální řešení pro dané podmínky, ne pouhé okopírování jiného systému s rizikem chyb – jiné systémy totiž v některých ohledech nerespektují dostatečně požadavky kladební na pražské metro.

### Geometrie

Ostění se skládá z jednotlivých prstenců (obr. 4).

Délka prstence ve směru tunelu se volí v závislosti na směrovém a výškovém vedení trasy a na profilu tunelu. Traťové tunely trasy V. A mají profil přibližně 6 m (5,8 m je vnější průměr ostění), délka prstence je navržena 1,5 m. Prstenec je rozdělen na šest segmentů. Dělení segmentů v rámci prstence se volí tak, aby bylo možné s jednotlivými prvky dobře manipulovat.

Prstenec ostění se buduje postupně po obvodě od osazení prvního segmentu s přikládáním dalších až po uza-

vírací segment klínového tvaru (klenák), který se vkládá ve směru podélné osy tunelu od stroje směrem k dokončenému ostění. Smontovaný prstenec se nejprve stabilizuje spojovacími šrouby, následně je poloha ostění zajištěna výplňovou injektáží ukládanou do prostoru mezi vnější povrch ostění a horninový masiv.

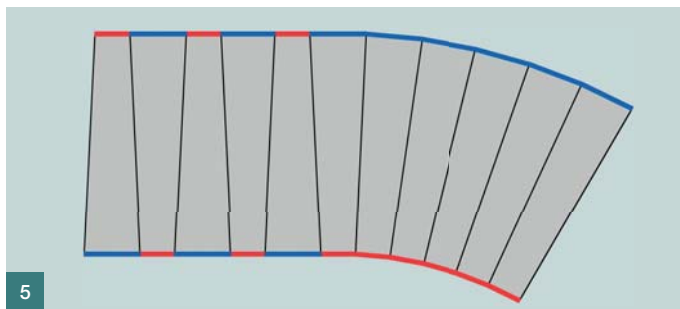
### Řešení směrových a výškových oblouků

S ohledem na typizaci výroby není vhodné měnit tvar prstenců tak, aby ostění tunelu kopírovalo směrové a výškové oblouky. Všechny prstence mají shodný tvar a jsou zkosené (podstavy válce opsaného prstenci nejsou rovnoběžné). Přímé vedení tunelu se zajistí střídavým ukládáním prstenců v určitých směrech. Oblouky libovolného poloměru (většího než je minimum dané úklonem) lze aproximovat postupnou rotací prstenců kolem podélné osy tunelu tak, aby odchylky oproti teoretické trase byly minimální (obr. 5).

Systém navržený pro metro A umožňuje zajistit vazbu mezi segmenty (obdobně jako u cihelného zdiva), tzn. eliminovat spojitou podélnou spáru. Zajištění vazby mezi segmenty zvyšuje tuhost ostění. Křížové stykování spár se považuje za rizikové z hlediska těsnosti styku izolačních pásek, a tedy vodotěsnosti celého tunelu.

### Vazba ostění na tunelovací štíty

Během ražby je přítlak stroje zajištěn tlakem hydraulických lisů na instalované ostění za strojem. Normálové zatížení ostění je poměrně velké. Pokud nejsou návrhy ostění a stroje kompatibil-

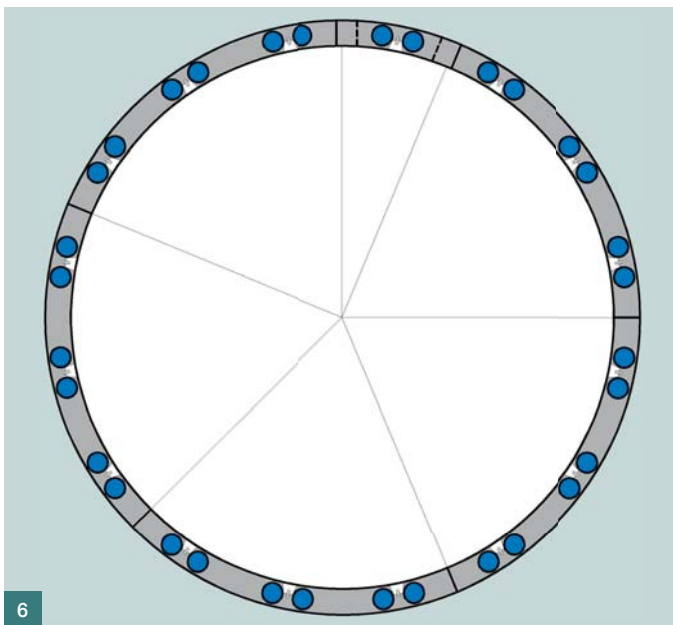


5

Obr. 4 Uspořádání segmentů v tunelu ■ Fig. 4 Arrangement of the segments in tunnel

Obr. 5 Schéma kladení prstenců v přímém a obloukovém úseku ■ Fig. 5 Scheme of ring layout in a straight and curved section

Obr. 6 Příčný řez tunelem, rozmístění lisů stroje ■ Fig. 6 Tunnel cross section, TBM rams layouts



6

ní, zatěžují se segmenty přítlakem stroje v libovolném místě, např. i přes podélnou spáru. Při návrhu ostění metra V. A bylo s ohledem na úsporu materiálu požadováno, aby zatížení lisů při ražbě působilo na segmenty vždy ve stejných místech nezávisle na rotaci prstenců. V tom případě je zapotřebí dodržet soulad počtu lisů na stroji s počtem spojovacích šroubů prstenců a členěním jednotlivých segmentů.

Vzhledem k omezenému prostoru pro lisů při užití ostění o tloušťce 250 mm je výhodné využívat lisů menšího profilu uspořádané do skupin – dvojic. Během přípravy stavby bylo zvažováno několik systémů uspořádání a nakonec byl vybrán systém s pěti velkými segmenty a jedním malým klenákem (velikosti 1/3 standardního), se šestnácti skupinami lisů a úhlem rotace prstenců v násobku  $22,5^\circ$  (obr. 6).

Systém umožňuje vazbu (střídání) podélných spár tak, aby žádná spára nebyla průběžná, a rovněž splňuje uvedená kritéria pro působení zatížení během ražby. Vzhledem k robustnosti konstrukce se považuje přítlak na již namontované segmenty pomocí lisů stroje za dostatečný ke stabilizaci segmentů v požadované poloze, dokud není celý prstencový smontován. Nedochozí proto k jejich sesedání a rovněž není problematické následné vložení uzavíracího segmentu (klenáku), ani pokud je vkládán v dolní části ostění.

### Výroba segmentů

Segmenty se vyrábějí ve specializované výrobě ukládáním betonu do masivních, velmi přesných forem, které zabezpečují geometrickou přesnost vý-

robků. Formy jsou vybaveny vložkami pro vytvoření nik pro hlavy šroubů a fixaci hmoždin. Výztuž se vkládá do forem jako předem vyrobený svařený armokoš. Uložený beton je vibrován příložnými vibrátory připevněnými na konstrukci formy. Výrobu je možné uspořádat dvěma systémy:

- **Stacionární typ** – formy jsou ustaveny na místě a veškerý materiál je dopravován na jednotlivé pozice forem – rotuje dodávaný materiál a obsluha.
- **Karuselový typ** – formy se pohybují na kolejnicích mezi jednotlivými pracovišti, součástí bývá i proteplovací komora, kde beton zraje – rotuje forma.

V případě výroby segmentů pro metra V. A je užíván stacionární typ výroby, bez proteplování, odformování probíhá po 16 h.

Na vybetonované segmenty se osazuje těsnění proti tlakové vodě. Těsnění je předem vyrobeno ve tvaru uzavřeného rámu, který přesně odpovídá rozměrům daného segmentu. Těsnění se navlékne a nalepí do drážky v betonu. Na jednu stranu segmentů na styčnou plochu mezi prstenci se nalepují sololitové desky, které zrovnoměrní roznašení napětí mezi prstenci při přítlaku stroje.

Vystrojené segmenty se ukládají na skládku, v našem případě horizontálně v poloze „U“, kdy mohou být plně vystrojeny. Po zatvrdnutí betonu jsou segmenty připraveny pro montáž ostění.

### Dimenzace ostění

Během výstavby jsou betonové segmenty zatíženy různými typy zatíže-

ní, které můžeme rozdělit na dočasná a definitivní. Úsporný návrh ostění vychází z předpokladů, že pro dimenzi ostění jsou rozhodující definitivní zatížení – vliv horninového prostředí a zatížení definitivním provozem.

Pro ostatní dočasná zatížení, jaká představují zejména manipulace a skladování, je vhodné navrhnout taková opatření, aby tyto vlivy nevyžadovaly zesílení prvků ani navýšení procenta vyztužení. Výjimkou je lokální normálové zatížení lisů při ražbě stroje, které je jedním z rozhodujících návrhových stavů.

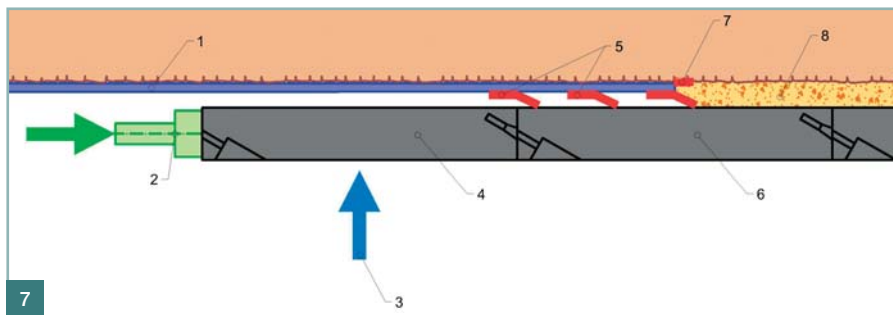
### Testování segmentů

Přestože byl vytvořen velmi podrobný materiálový i konstrukční numerický model betonového ostění, bylo přistoupeno k experimentálnímu ověření odezvy segmentu na zatížení během přítlaku stroje, kdy reálné segmenty plné velikosti byly zatěžovány ve zkušebním stroji.

Výsledkem testu bylo potvrzeno, že trhliny, kterými může pronikat voda (na plnou tloušťku ostění), vznikají při zatížení cca 1,25krát vyšším, než je návrhové zatížení (maximální síla vyvoditelná na lišech). Zkouškami byla ověřena i mezní únosnost při totálním porušení (cca 3krát vyšší než návrhové zatížení).

### Výplňová injektáž za rubem ostění

Volný prostor mezi rubem ostění a horninou je vyplňován injektážní hmotou (obr. 7). Hmotu je vpravována za rub ostění během ražby, tedy při posunu stroje. Za ostěním se průběžně udržu-



Obr. 7 Schéma uspořádání výstavby ostění v prostoru štítu, 1 – štít, 2 – přítláčný lis posunující štít, 3 – montáž segmentů, 4 – montovaný prstenec, 5 – těsnící kartáče nebo plechy, 6 – hotový prstenec, 7 – zpětná klapka, 8 – zainjektovaný prostor

Fig. 7 Arrangement of lining construction in shield space, 1 – shield, 2 – press shifting the shield, 3 – assembly of segments, 4 – mounted ring, 5 – sealing brushes or metal sheets, 6 – finished ring, 7 – valve, 8 – grouted space

je injektážní tlak odpovídající tlaku horninového prostředí. Toto je další z efektů minimalizujících rozvolnění horniny, a tedy poklesy povrchu.

Injektážní hmota je vháněna trubkami vedenými podél štítu za rub ostění. Není proto nutné injektovat skrz ostění, narušovat tak celistvost segmentů a vyvážet místa s nebezpečím průniku vody do tunelu. K injektáži existují dva základní typy materiálů:

- Jednosložková injektážní hmota na bázi běžných cementových malt, kde jsou hlavními složkami kamenivo, cement, voda a přísady upravující tuhnutí;
- Dvousložková injektážní hmota na bázi gelů, kde jsou hlavními složkami voda, cement, bentonit a gelovací přísada, která se přidává do směsi až v injektážní hlavici.

Hlavními výhodami gelové injektáže jsou její snadná doprava do tunelu čerpáním v potrubí a rychlé gelování směsi, které vede ke snížení rizika rozplavení uložené směsi podzemní vodou. Rovněž dojde k úspoře času nutného k čištění a údržbě stroje, čímž se minimalizují ztrátové časy.

Jelikož je značné množství vody ve směsi vázáno především gelovou strukturou, vznikly obavy z dlouhodobé objemové stability hmoty – zda nebude vázaná voda vlivem zatížení vytlačována do okolí. Dvousložková injektážní hmota byla dlouhodobě laboratorně zkoušena. Výsledky byly překvapivě příznivé, vzorky uložené v oedometru simulujícím skutečné prostředí se dotvarovaly jen minimálně.

## VYUŽITÍ DRÁTKOBETONU PRO SEGMENTOVÉ OSTĚNÍ

### Důvody pro využití drátkobetonu

Dosavadní výstavbou traťových tunelů byla získána řada cenných praktických zkušeností. Určitou výzvou bylo využití nových materiálů, od nichž lze očekávat lepší vlastnosti pro dané požadavky a také snížení výrobních nákladů. Tímto materiálem je beton s rozptýle-

nou ocelovou výztuží. Cílem uvedeného vývoje bylo:

- Zvládnout technologii výroby, zejména míchání betonové směsi s rovnoměrným rozdělením drátků.
  - Prověřit materiálové charakteristiky na prvcích reálné velikosti.
  - Sestavit odpovídající numerický model, který věrně a spolehlivě postihne odezvu materiálu na různá zatížení.
  - Vybudovat zkušební úsek, kde se prakticky ověří všechny obtížné definovatelné zatěžovací stavy, kterým jsou segmenty vystaveny od fáze výroby do fáze uložení do ostění.
- Zatěžovací zkoušky byly zpracovány v Kloknerově ústavu ČVUT v Praze, numerickou analýzou se zabývala firma Červenka Consulting.

Segmenty jsou vystaveny řadě zatěžovacích stavů. Počínaje odformováním, přes manipulaci, dopravu, osazování, včetně významného stavu, kdy je smontovaný prstenec zatížený účinky stroje během ražby, až po zatížení horninovým prostředím, které přenáší dlouhodobě. Významným požadavkem na ostění je kritérium odolnosti proti pronikání tlakové vody. Lze tedy říci, že pro návrh jsou rozhodující kritéria 2. skupiny mezních stavů, zejména omezení šířky trhlin.

Železobeton lze považovat za vynikající materiál zejména s ohledem na vysokou únosnost, kdy lze prvek poměrně snadno nadimenzovat uložením potřebného (i většího) množství výztuže. Beton však zůstává dále materiálem křehkým, který se již při relativně nízkých úrovních zatížení porušuje trhlinami, které výrazně snižují vodotěsnost prvku. Problematiké jsou trhliny zejména procházející celou tloušťkou ostění.

Naopak beton s ocelovou rozptýlenou výztuží (drátkobeton) má limitovanou únosnost, kdy do betonové směsi lze zamíchat jen určité množství drátků. Při správném promísení se drátky rozmístí rovnoměrně všesměrně. Tento materiál je tedy izotropní a oproti prostému betonu vykazuje větší duktilitu.

Ukazuje se, že v mnohých případech

návrhu segmentového ostění jsou uvedené vlastnosti velmi přínosné a drátkobeton je vhodné použít i přes to, že s ním nelze dosáhnout tak vysoké mezní únosnosti.

## ZKOUŠKY BETONU S ROZPTÝLENOU VÝZTUŽÍ

Běžně a dlouhodobě se testují vzorky drátkobetonu na malých trámcích, kdy se zjišťuje zejména pevnost v tahu za ohybu. Uvedené zkoušky rovněž proběhly a byly zjištěny veškeré důležité materiálové charakteristiky včetně lomové energie. Tyto hodnoty se staly pokladem pro sofistikovaný materiálový model, který vystihuje nelineární chování materiálů včetně šíření trhlin (software ATENA).

Jelikož zejména u drátkobetonu je odezva konstrukce na zatížení závislá na velikosti prvku, byly dále zkoušeny vzorky skutečné velikosti na základní způsoby namáhání, které charakterem odpovídají reálnému zatížení. Výsledky testů byly úspěšně predikovány numerickým modelem.

Přestože jsou segmenty tunelového ostění vystaveny účinkům řady zatěžovacích stavů (např. manipulace, skladování, doprava, instalace, definitivní zatížení atd.), jsou v praxi zaváděna opatření, aby rozhodující pro dimenzování prefabrikátů byly jen některé z nich. Zásadním návrhovým zatížením je při-

Obr. 8 Schémata uspořádání zkoušek

Fig. 8 Scheme of tests

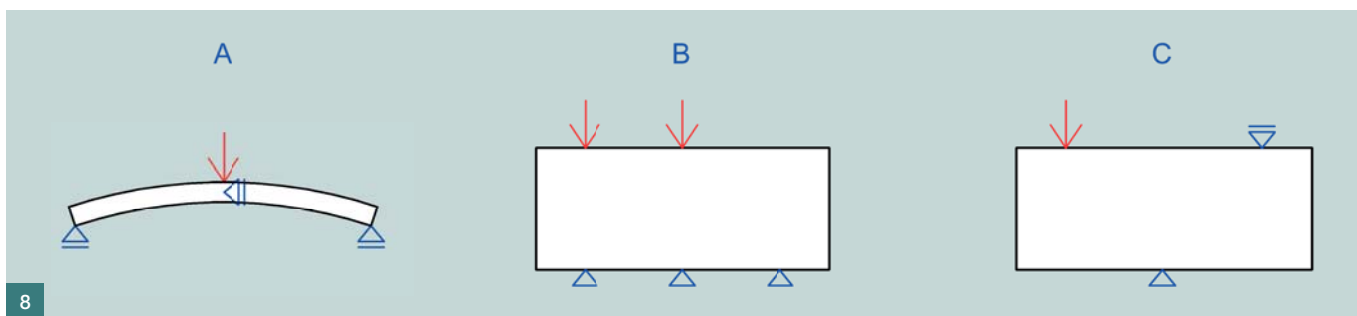
Obr. 9 Porušení drátkobetonového segmentu ohybem – uspořádání „klenba“

Fig. 9 Damage in fibre reinforced concrete segment loaded in bending arrangement „vault“

Obr. 10 Pracovní diagramy drátkobetonového segmentu namáhaného ohybem (uspořádání klenba)

Fig. 10 Response (load-deflection diagram) of the fibre reinforced concrete segments loaded in bending arrangement „vault“





rozně zatížení horninovým masivem, které působí po celou dobu životnosti konstrukce.

Dalším významným zatěžovacím faktorem je přítlak tunelovacího štítu, který je zatlačován do horninového masivu pomocí hydraulických lisů zapřemých o již smontované prstence ostění. Jedná se sice o dočasný stavební stav a krátkodobé zatížení, které by z hlediska co nejušpornějšího návrhu nemělo být podstatné, ale vzhledem k požadovaným vysokým hodnotám přítláčné síly stroje (závisí na očekávané geologii) hraje daný zatěžovací stav často rozhodující roli při návrhu segmentů. V dané souvislosti je však třeba posuzovat technologii TBM jako celek, kdy potřebná vyšší únosnost ostění je kompenzována řadou výhod razicí technologie.

Pro simulaci rozhodujících návrhových stavů byly navrženy tři typy zkoušek (označené A, B, C – obr. 8). Podružná návrhová zatížení, která lze mnohdy jen obtížně definovat a tedy modelovat, byla ověřena reálným odzkoušením na zkušební úseku délky 15 m, který byl na trase V. A realizován. V dalším jsou podrobně popsány postupy jednotlivých experimentů. Srovnatelné výsledky byly dosaženy i numerickou analýzou, čímž byla potvrzena dobrá shoda numerických modelů s realitou.

### Simulace zatížení horninovým masivem (uspořádání zkoušky A)

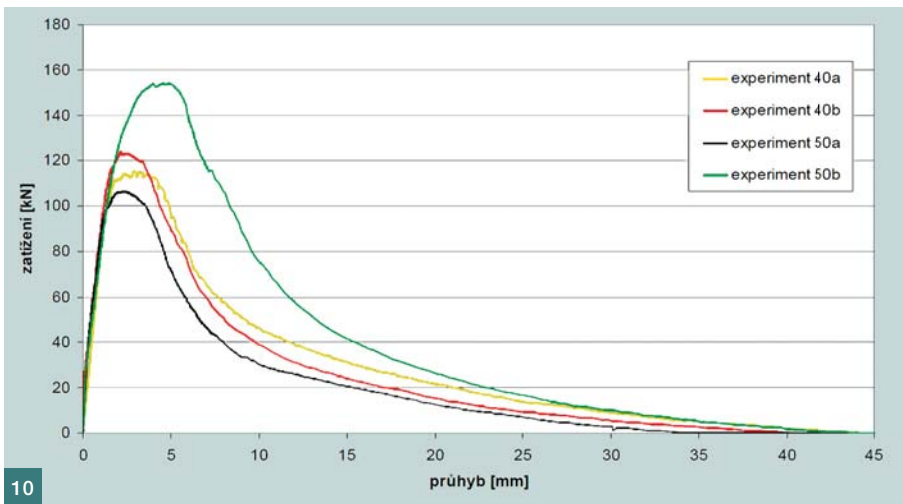
Při dané zkoušce byly segmenty zkoušeny v ohybu kolmo na rovinu segmentu, zkouška simulovala namáhání ohybovými momenty při manipulaci, dopravě, skladování a při zatížení tlakem horninového masivu. Segmenty byly položeny zakřivenou částí nahoru, spodní hrany byly podloženy kluznými podporami, které umožňovaly vodorovný pohyb a zabraňovaly svislému pohybu. Zatížení na segmenty vyvolávalo řízenou svislou deformaci po celé délce vrcholu klenby. Tzn. že zatěžovací síla vnášená hydraulickým válcem byla upravována tak, aby deformace na písku zatěžovacího lisu byla postupně rovnoměrně zvyšována. Zatěžovací síla tedy nejprve rostla a po vzniku trhlin byla snižována až do vyčerpání kapacity, tj. okamžiku rozlomení (obr. 9). Celý softwarově řízený systém byl řízen počítačem se speciálním softwarem. Nespornou výhodou zatěžování „řízenou deformací“ bylo získání celého pracovního diagramu včetně sestupné větve (obr. 10). K ukončení zkoušky bylo přistoupeno teprve tehdy, když prvek neunesl svoji vlastní tíhu.

Před dosažením maximální zatěžovací síly se v pásu proměnné šířky na spodní ploše segmentu začaly objevovat drobné trhliny, které se postupně rozvíjely a následně se lokalizovaly

do jediné trhliny. Ta se postupně rozevírala, čemuž odpovídal příslušný pokles zatěžovací síly. Během rozvírání trhliny bylo možné přímo v trhlíně sledovat postupné vytahování drátků. Bylo zaznamenáno typické šíření trhlin v betonu s rozptýlenou výztuží, kdy se v těsném okolí nejvíce namáhaného průřezu vytváří řada velmi tenkých trhlin, z nichž se jedna později propaguje dále.

Rovněž je zajímavé, že nevyšší a nejnižší únosnosti bylo dosaženo na vzorcích vyztužených  $50 \text{ kg/m}^3$ , zatímco vzorky vyztužené  $40 \text{ kg/m}^3$  vykazují podobnou únosnost. Hodnoty byly získány vždy jen na dvou vzorcích, nelze je proto považovat za statisticky průkazné. Přesto se nabízí vysvětlení, že beton s množstvím  $50 \text{ kg/m}^3$  drátků je již obtížněji mísitelný, lze tedy obtížněji zajistit rovnoměrné rozptýlení drátků, a proto dochází k většímu rozptýlení v únosnosti. V případě realizovaných zkoušek byl zřejmě testován jeden segment s velmi vhodným a druhý s velmi nevhodným rozptýlením drátků. Záměrně je použit termín vhodný místo rovnoměrný.

Vysoká únosnost může být dána soustředěním drátků při dolním povrchu prvku – tedy v tažené oblasti. To může být způsobeno např. intenzivní vibrací. Nejedná se tedy o jev veskrze příznivý, neboť lze usuzovat, že naopak únosnost při opačném směru namáhání (tah





v horní části prvku) bude úměrně snížena. Ve skutečnosti mohou být segmenty namáhány oběma způsoby.

#### Simulace zatížení axiálními lisy štítu – ideální stav (uspořádání zkoušky B)

##### Zatížení segmentů prostým tlakem

Na rozdíl od předchozí zkoušky byl segment zatěžován ve svislé poloze, a proto byl dobře pozorovatelný vznik trhlin na vnitřním i vnějším líci segmentu.

První trhliny se lokalizují na vnitřním povrchu nad nikou pro šroub. Dále se trhliny šíří nikou většinou podél jedné hrany. Je evidentní, že oslabení nikou působí nepříznivě a vede k lokalizaci napětí do hran. Lze tedy konstatovat, že hranatý tvar nik je nevhodný, oblé tvar by byl vhodnější. Během dalšího zatěžování se trhliny rozvíjely směrem dolů v jednom nebo více pásech pod nikou, nebo mírně stranou. Postupně se všechny trhliny rozevíraly, teprve poté se výrazně lokalizovala jedna z nich, kde následně nastalo rozštípnutí prvku příčnými tahy.

##### Zatížení v prostém tlaku dvěma břemeny

Uspořádání zkoušky bylo obdobné jako v předchozím případě, proto byl obdobný i charakter porušení. Zásadní výhodou této zkoušky byla možnost sledování namáhání segmentu v prostoru mezi zatěžovanými místy. Pro tento prostor byl charakteristický vznik tahových namáhání. Trhliny (nejčastěji jedna malá trhlinka) se v této části objevily v raných fázích zatěžování. S rostoucím zatížením se již trhli-

na nerozevírala, omezovala se výhradně na okraj segmentu a rovněž nebyla významná pro snížení únosnosti prvku.

Vznik trhliny mezi zatěžovacími místy byl pouze lokální záležitostí a to přesto, že tato trhlinka vznikala jako jedna z prvních. Další rozvoj trhlin byl prakticky identický s případem, kdy bylo zatěžováno jen jedno místo, pouze probíhal téměř paralelně pod oběma zatěžovacími místy. Zkouška končila možnostmi zatěžovacího stroje, který vyvine celkové zatížení do 9 MN, tedy na jedno zatěžovací místo připadala maximální síla 4,5 MN, což je nižší hodnota oproti únosnosti segmentu.

##### Srovnávací zkoušky železobetonových segmentů zatížených v prostém tlaku

Zkoušky byly uspořádány identicky jako v případech drátkobetonových segmentů.

Hodnoty zatížení při vzniku trhlin procházejících celou tloušťkou prvku jsou u železobetonových i drátkobetonových segmentů téměř shodné. Rovněž únosnost klasického železobetonového segmentu je srovnatelná s drátkobetonovým, nicméně způsob porušení je zcela odlišný (obr. 11 a 12).

Železobetonový segment byl ve všech dosud testovaných případech porušen v ploše rovnoběžné se střednicovou plochou. Došlo tedy k delaminaci materiálu, kdy se při vyčerpání únosnosti oddělila krycí vrstva a uvnitř prvku vzniklo jádro betonu sevřeného výztuží. Při krytí výztuže 50 mm a tloušťce segmentu 250 mm mělo jádro tloušťky pouhých 150 mm.

#### Simulace zatížení axiálními lisy štítu – nerovnoměrné uložení segmentu (uspořádání zkoušky C)

V daném případě bylo zkoušeno zatížení segmentů ohybem v rovině segmentu.

Tento typ zkoušek je charakteristický nízkými hodnotami sil, při nichž začaly vznikat trhliny. Trhliny se lokalizovaly v prostoru nad nikou pro šroub a se šířily dále směrem dolů. U segmentů vyrobených z drátkobetonu bylo možné pozorovat vznik řady nepatrných trhlin, z nichž se jedna postupně rozevírala a následně došlo ke ztrátě únosnosti (obr. 13).

Železobetonové segmenty byly porušeny odlišně, vznikla jedna trhlinka, která se rozevírala a začala se větvit teprve při dosažení vysokého zatížení. Meze únosnosti nebylo dosaženo, avšak takto zatížený prvek by s ohledem na rozevření trhlin byl v prstenci ostění zcela nevyhovující.

Charakter odezvy na zatížení byl u zkoušených materiálů zcela odlišný, ovšem z hlediska použitelnosti lze považovat materiály za srovnatelné.

Obecně lze v případě obou materiálů konstatovat, že segmenty jsou křehké a náchylné na porušení již při nízkých silách. Vznik trhlin při 300 kN a propagace trhlin na plnou tloušťku segmentu při 500 kN znamená v porovnání s návrhovým zatížením 2 400 kN značné problémy použitelnosti segmentů. Tomu odpovídá deformace (průhyb ohybaného prvku) cca 1 mm při vzniku trhlin a cca 2 mm při vzniku trhlin na plnou tloušťku prvku, což jsou hodnoty velmi nízké. Průhyb na mezi únosnosti drátkobetonových prvků se pohyboval ko-



13

Obr. 11 Porušení drátkobetonového segmentu tlakem ■ Fig. 11 Damage in fibre reinforced concrete segment loaded in copression

Obr. 12 Porušení železobetonového segmentu tlakem ■ Fig. 12 Damage of reinforced concrete segment loaded in copression

Obr. 13 Porušení drátkobetonového segmentu ohybem ■ Fig. 13 Damage in fibre reinforced concrete segment loaded in bending

lem 6 mm. Tuhost ostění jako podpory pro přítlak stroje je poměrně nízká, neboť se mohou dotlačovat spoje těsněné gumovými pásky.

Z výsledků experimentu vyplývá, že rozdíl v poloze (zatlačení) dvou sousedních segmentů 1 až 2 mm znamená tedy značné riziko vzniku trhliny v segmentu, která při propagaci na celou tloušťku segmentu může ovlivnit vodonepropustnost ostění. Během ražby je proto nezbytné zajistit rovnoměrné podepření zatěžovaných segmentů, což znamená co nejpřesnější instalaci ostění, aby nedošlo ke vzniku trhlin. Uvedený faktor by měl být také zohledněn při návrhu uspořádání segmentů, které může být v porovnání s posuzovaným uspořádáním výhodnější.

## NUMERICKÁ ANALÝZA SEGMENTŮ

Modely tunelových segmentů zkoušených v Kloknerově ústavu ČVUT byly souběžně analyzovány metodou konečných prvků s využitím nelineárních materiálových modelů betonu, výztuže a drátkobetonu. Pro numerickou simulaci odezvy a porušování segmentů podrobených různým typům zatížení dle výše uvedených schémat byl použit komerční software ATENA.

Nelineární numerická analýza modelu segmentu umožňuje podrobně sledovat porušování zkoumaného vzorku, zejména vznik a rozvoj tahových trhlin, stanovit jeho únosnost, duktilitu a další jevy během procesu zatěžování, a zachytí rovněž pokritické chování modelu po překročení mezního zatížení. Přitom je možno průběžně vyhodnocovat řadu charakteristik modelu, jako jsou pole hlavních napětí či přetvoření v betonu nebo drátkobetonu, šířky trhlin, plastické protažení výztuže apod. Takové podrobné sledování odezvy zkoušeného dílce je v reálném experimentu prakticky neuskutečnitelné.

Analyzovány byly tunelové segmenty zhotovené jak z klasického železobetonu, tak i z drátkobetonu s různým obsahem drátků. Mechanické vlastnosti betonu a drátkobetonu byly získány z doprovodných materiálových zkoušek, u drátkobetonu zčásti zpětnou identifikací z výsledků zkoušek drátkobetonových trámčů ve čtyřbodovém ohybu.

Numerická analýza a její výsledky byly v souvislosti s realizovaným experimentálním programem využity v několika souvislostech:

- Bylo ověřeno, že materiálové charakteristiky drátkobetonu získané z doprovodných zkoušek umožňují dobře vystihnout chování konstrukčních dílců vyrobených z drátkobetonu.
- Při dosažení velmi dobré shody numerické analýzy s provedenými experimenty bylo možné na numerickém modelu podrobněji sledovat odezvu chování těles a materiálu, zejména ve fázi jeho poškozování.
- Na modelech bylo možno vzájemně porovnat chování a charakter porušování segmentů vyrobených z klasického železobetonu a z drátkobetonu, případně vliv množství přídavných ocelových drátků.
- Složitější experimenty (uspořádání zkoušky C) byly nejprve simulovány na numerickém modelu, aby se předem stanovily potřebné charakteristiky (tuhosti, zatěžovací kapacita) zatěžovacího mechanismu a uložení tělesa.

Na obr. 14 až 17 jsou prezentovány numerické modely pro jednotlivé varianty uspořádání zatěžovacích zkoušek, získané odezvy modelů (zatěžovací křivky), a způsoby porušení modelu segmentu – obrazy a šířky trhlin při porušení. Porovnání s výsledky experimentů ukazuje vynikající shodu numerické simulace se skutečností.

## ZÁVĚRY

Využití moderní technologie ražby TBM poprvé v ČR bylo pro společnost Metrostav, a. s. výzvou. Příprava a aplikace jednotlivých dílčích technologií vyžadovala komplexní náhled na problematiku se zhodnocením širokého spektra vlivů.

Technologii plnoprofilové ražby TBM pro výstavbu traťových tunelů metra lze považovat za velký přínos zejména díky významnému zvýšení bezpečnosti ražeb a rovněž minimalizaci rozvolnění horninového prostředí, čímž se výrazně sníží sedání povrchu.

Velmi rozličná geologická struktura zájmové lokality vedla k návrhu univerzálních strojů, které zvládají ražbu jak v měkkých zeminách, tak i v horninách. Rovněž podmínky pro montáž a demontáž stroje ve stísněném podzemí jsou omezením určeným projektem.

Kromě vlastního stroje byl věnován důraz na řešení logistiky – odvoz rubaniny a zásobování stroje, kde rovněž existuje několik přístupů a výběr nejvhodnějšího je ovlivněn řadou faktorů.

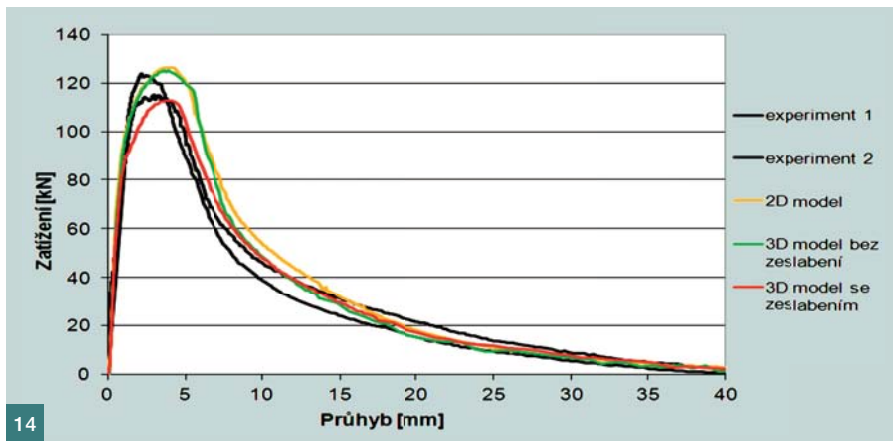
Prefabrikované segmentové ostění nové generace přináší řadu technologických problémů, které bylo třeba vyřešit. Nebylo efektivní pouze kopírovat zkušenosti ze států, kde je tento způsob výstavby již rozšířen, ale bylo potřebné technologii přizpůsobit našim podmínkám. Ať už se jedná o specifické podmínky horninového prostředí, nebo i výrobní možnosti v naší ekonomice.

Problematika byla řešena velmi široce a veškeré možnosti byly pečlivě zvážovány a ověřovány. Pečlivá předvýrobní příprava byla zárukou úspěšnou realizací výstavby provedených traťových tunelů.

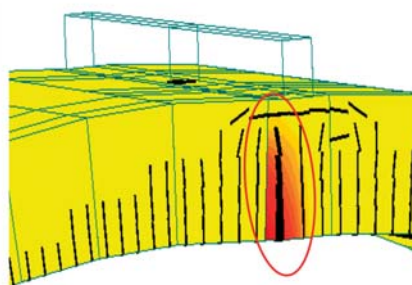
I přes úspěch dosavadního řešení bylo ostění nadále optimalizováno směrem k využití drátkobetonu. V souvislosti s tím byl realizován komplex experimentů na reálných prvcích doplněných podrobnou numerickou analýzou.

Provedené zkoušky tunelových segmentů byly modelovány nelineárním programem MKP ATENA. Bylo podrobně sledováno a vyhodnocováno zejména porušování modelů segmentů a jejich únosnost; porovnání s výsledky experimentů ukazuje vynikající shodu. Nelineární numerická simulace se ukázala být účinným a vhodným nástrojem pro analýzu tunelových segmentů vyrobených z klasického železobetonu i drátkobetonu; zejména se prokázala ideální kombinace reálných

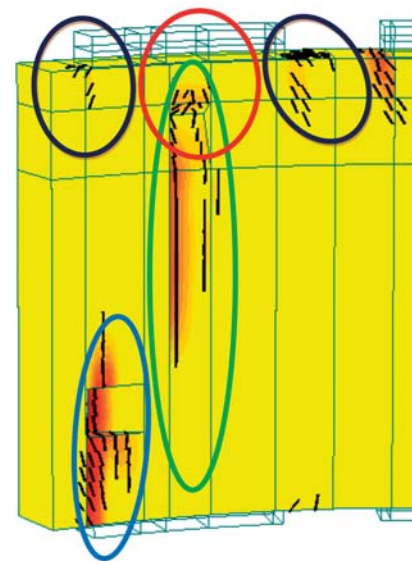
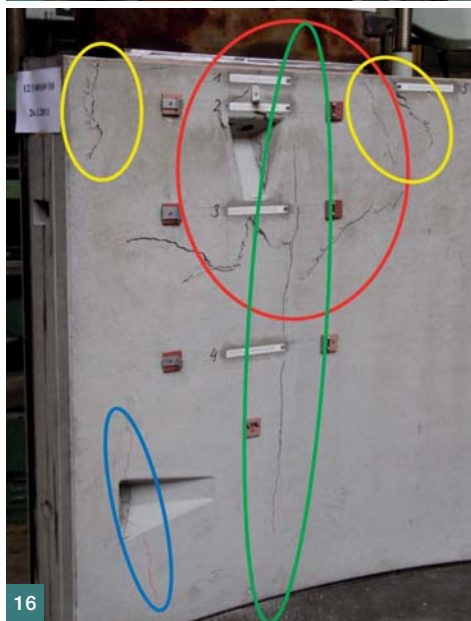




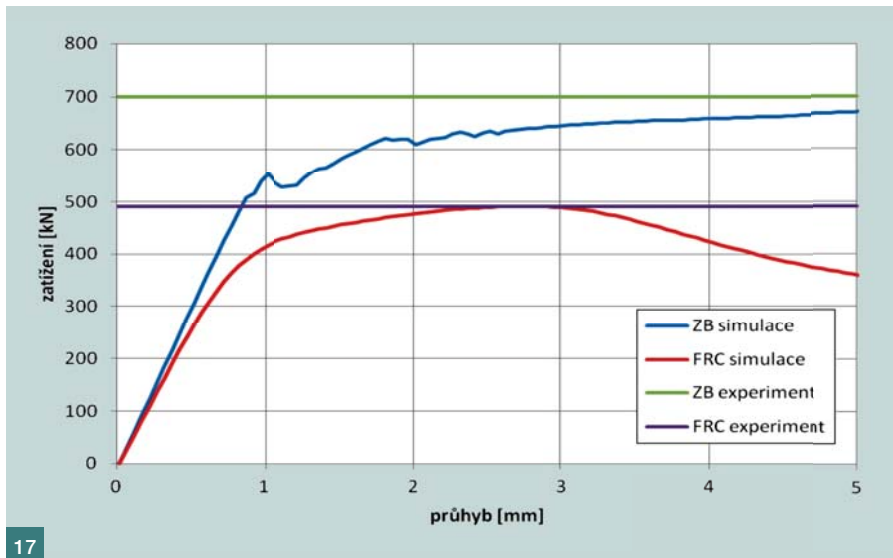
Obr. 14 Zátěžovací diagramy experimentů v porovnání s 2D a 3D modelem segmentu, zkouška v ohybu – „klenba“, drátkobetonový segment ■ Fig. 14 Load–deflection diagrams of experiments compared with 2D and 3D model in the bending test „vault“, fibre reinforced concrete segment



Obr. 15 Lokalizace trhlin při experimentu a počítačové simulaci, zkouška v ohybu – „klenba“, drátkobetonový segment ■ Fig. 15 Localization of cracks in experiment and in computer simulation, bending test – „vault“, fibre reinforced concrete segment



Obr. 16 Železobetonová varianta: porovnání obrazu trhlin zjištěného destruktivní zkouškou v KÚ a numerickou simulací v programu ATENA 3D ■ Fig. 16 Reinforced concrete variant: comparison of cracks pattern detected in the destructive test in lab and in the numerical simulation by ATENA 3D software



Obr. 17 Vypočtené pracovní diagramy v porovnání s experimentálně zjištěnou únosností pro železobetonový a drátkobetonový segment – uspořádání „příčný ohyb“ ■ Fig. 17 Calculated LD diagrams compared with experimentally determined load carrying capacity of the classically reinforced and fibre reinforced concrete segment – arrangement „lateral bending“

a numerických experimentů pro posouzení poměrně složité konstrukce namáhané různými typy zatížení.

Rozsáhlý výzkum problematiky drátkobetonového ostění byl završen výstavbou zkušebního úseku tunelu metra délky 15 m, na kterém byly nainstalovány drátkobetonové segmenty v reálných podmínkách.

Uvedené výsledky byly zčásti získány s finanční podporou z prostředků GAČR v rámci projektů 104/10/2023 „Vývoj a ověření vlastností vláknobetonu splňujícího současné požadavky pro prefabrikovaná ostění dopravních tunelů“ a 105/10/1156 „COMOCOS – Komplexní modelování“.

Dr. Ing. Petr Vitek  
e-mail: petr.vitek@metrostav.cz



Ing. Boris Šebesta  
e-mail: boris.sebesta@metrostav.cz



oba: Metrostav, a. s.  
Na Zátlance 13, 150 00 Praha 5

Doc. Ing. Matouš Hilar, Ph.D.  
Stavební fakulta ČVUT v Praze  
e-mail: matous.hilar@fsv.cvut.cz  
a 3G Consulting Engineers, s. r. o.  
e-mail: hilar@3-g.cz



Ing. Radomír Pukl, CSc.  
e-mail: radomir.pukl@cervenka.cz  
Červenka Consulting  
Na Hřebenkách 55, 155 00 Praha 5

