

# ZAJIŠTĚNÍ SEGMENTOVÉHO OSTĚNÍ TBM TUNELŮ V OKOLÍ PROPOJEK ■ SUPPORT OF SEGMENTED LINER AT TBM TUNNEL CROSSPASSAGES



Petr Vítek, Karel Rössler

Tunely vystrojené segmentovým ostěním je zapotřebí v místech bočního výlomu vyztužit. K tomu lze použít různé metody. V článku je popsána nová inovativní metoda, kdy se jednotlivé segmenty v okolí výlomu spojí trny, které se následně zainjektují, čímž se vytvoří pevné spojení segmentů. Výhodami jsou jednoduchost řešení, nízké náklady, zachování průřezného profilu v tunelu a zároveň dostatečná únosnost i v těžkých geologických podmínkách. Spolehlivost navržených trnů byla ověřena na vzorcích skutečné velikosti. ■ Segmented tunnel liners have to be supported at the areas of lateral openings. There are different methods of support. A new innovative method of support uses steel dowels grouted into neighbouring segments to create a firm connection between the segments. The advantages of the method are simplicity, low cost, free tunnel profile for transport, and sufficient bearing capacity in difficult ground conditions. The reliability of the designed steel dowels was verified by real scale tests.

S mechanizovanou ražbou tunelů stroji TBM (Tunnel Boring Machine) souvisí kontinuální výstavba prstencového ostění skládáním jednotlivých segmentů. V případě, že je potřebné zřídit v ostění boční výlom, vytvoří se následně až po projetí razicího komplexu. Nejčastějším důvodem výlomu do boku tunelu je výstavba tunelové propojky, případně výklenku, nebo únikové cesty.

Ostění oslabené výlomem je zapotřebí zajistit, aby bylo schopné snášet tlaky horninového prostředí.

V mnohých případech se používají ocelové podpěrné rámy vložené dovnitř tunelu (obr. 1). Nevýhodou tohoto řešení je omezení profilu tunelu rámy, což působí problémy dopravě tunelem a např. znemožňuje zpětné protažení závěsu TBM stroje.

Jiné řešení využívá přikotvení ostění k hornině. To lze však realizovat jen za příznivých podmínek, kdy je okolní hornina dostatečně únosná.

Třetí typ řešení využívá vzájemné propojení jednotlivých prstenců ostění tak, aby se zatížení z výlomem oslabeného

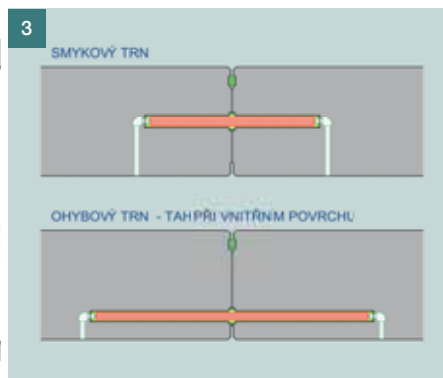
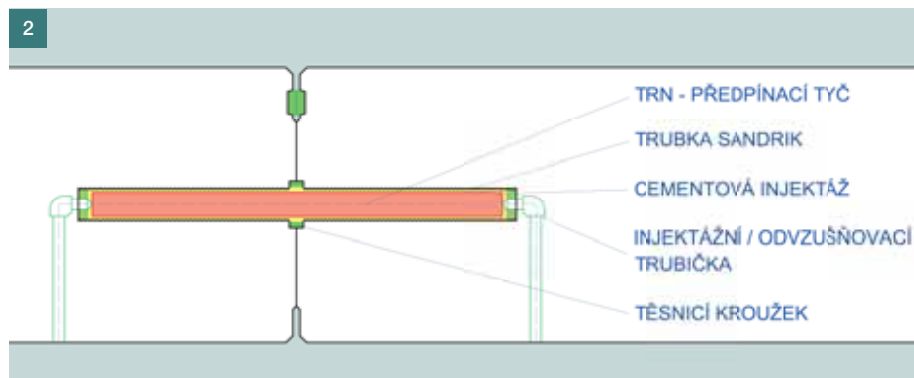
prstence přeneslo do sousedních prstenců. Propojení prstenců se realizuje např. s využitím ocelových kazet zabetonovaných při výrobě do segmentů, které se při montáži ostění propojí ocelovými šrouby se sousedními prstenci. Bohužel pro zajištění únosného spojení je výroba a instalace kazet velmi náročná na přesnost a její dosažení je značně obtížné.

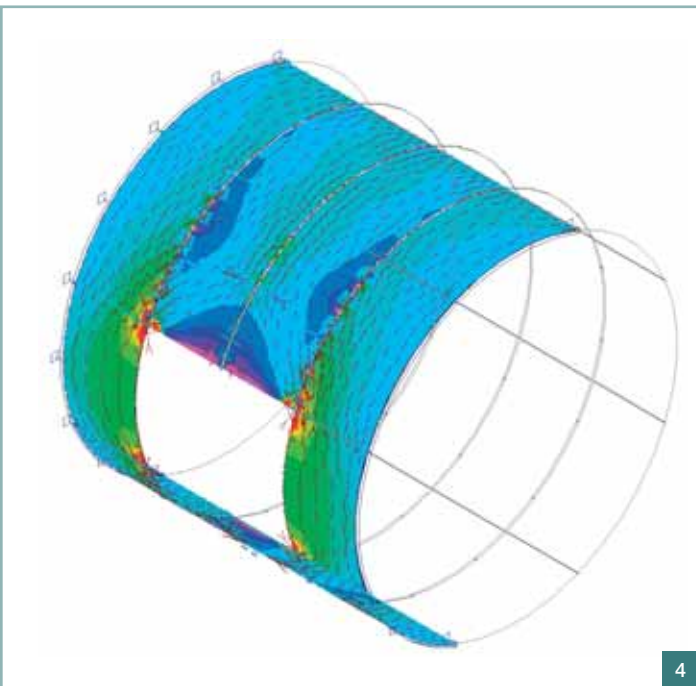
Následující text popisuje inovativní řešení pro spojení prstenců prostřednictvím zainjektovaných ocelových trnů, které bylo navrženo pro zajištění propojek tunelů Homolka a Chlum, jejichž stavba je plánována v rámci modernizace železniční trasy Rokycany-Plzeň. Trny nahrazují náročné a komplikované spojení prostřednictvím ocelových kazet.

## SPOJOVACÍ TRNY

Zajištění prstenců bylo navrženo tak, aby nenarušovalo plynulost ražby, neovlivňovalo manipulaci s jednotlivými segmenty a nezpomalovalo jejich výrobu.

Navrhované řešení je založeno na jed-





Obr. 1 Vyztužení ostění v okolí výlomu dočasnými ocelovými rámy ■ Fig. 1 Temporary steel bracing frame at the tunnel liner opening

Obr. 2 Uspořádání trny zainjektované do kanálku ■ Fig. 2 Steel dowel in the grouted channel

Obr. 3 Typický tvar trnů pro přenášení smyku a ohybu ■ Fig. 3 Dowels to resist shear and bending

Obr. 4 Trajektorie hlavního napětí  $\sigma_2$  v okolí výlomu do ostění ■ Fig. 4 Principal stress trajectories around the opening

Obr. 5 Uspořádání zkoušek trnů pro jednotlivé typy namáhání ■ Fig. 5 Tests arrangements for expected loading types

přenáší smykovými trny namáhanými v ploše ostění. Tyto trny však přenášejí i příčné síly působící kolmo na plochu ostění. Typický tok hlavních (normálových) napětí ( $\sigma_2$ ) v okolí otvoru je znázorněn na obr. 4.

V případě, že otvor přerušuje více než jeden prstenec (typicky dva), dochází v okolí otvoru k rozvírání spáry mezi přerušenými prstenci. Tomu lze zabránit instalací tahových trnů k povrchu ostění a jimi přenést ohybové namáhání působící v podélném směru tunelu.

### Numerická analýza

Sestavením vhodného dostatečně výstižného prostorového modelu segmentového ostění lze pro požadované zatížení určit axiální a příčné síly v jednotlivých trnech. V běžných případech postačuje jednoduchý model pro lineární analýzu.

Známe-li požadované síly, je možné navrhnout profily trnů. To je jednoduché u tahových trnů za předpokladu, že o porušení rozhoduje výztuž, ale poměrně obtížné u smykových trnů. Analýzu smykového porušení betonu v okolí trnu lze řešit pouze nelineárními metodami se zohledněním prostorového působení.

noduchém principu – do sousedních segmentů jsou navrženy kanálky vstříčně proti sobě. Během montáže ostění se do vynechaných kanálků vloží ocelové trny. Po ukončení montáže se trny v kanálkách zainjektují. Zatvrdnutím injektážní hmoty dojde k pevnému spojení sousedních segmentů (obr. 2).

Kanálky jsou navrženy z tenkostěnných plechových trubek s profilovaným povrchem, čímž je zaručena soudržnost jak s betonem segmentu na vnější straně, tak s injektážní hmotou na straně vnitřní. Ocelové trny jsou navrhovány z betonářské výztuže, případně z vysokopevnostních předpínacích tyčí – to v případě, kdy je vhodné využít velký profil trnu a vysokou pevnost oceli. Trny jsou vybaveny přípravky pro centrální uložení v kanálku.

Injektážní hmota se do kanálku přivádí trubkou umístěnou na konci trnu a trubkou na druhém konci trnu se odvádí vzduch (obr. 2). Složení injektážní hmoty je na cementové bázi. Injektáž je shodná s hmotou pro vyplňování kanálků předpínacích kabelů. Problematika návrhu injektážní směsi je vzhledem k jejímu častému užívání pro injektování předpínacích kabelů pečlivě vyřešena, a proto lze směs s výhodou použít pro injektování trnů.

### NAMÁHÁNÍ TRNŮ

Trny lze využívat pro přenášení tahového nebo smykového namáhání (obr. 3).

V místech, kde dochází k ohybovému namáhání ostění, se navrhuje tahové trny, které se umísťují blíže k povrchu ostění, a to buď k vnitřnímu, nebo

k vnějšímu v závislosti na směru namáhání. Tlakové namáhání se pak přenáší kontaktem betonových ploch mezi segmenty.

Tahové trny je třeba zhotovit poněkud delší, aby byly zakotveny na dostatečnou délku. V mezním stavu by mělo dojít k přetržení trnu, nikoli k jeho vytažení z kanálku. Tahové síly z trnu se přenášejí do tahové výztuže segmentu přesahem, proto je vhodné tuto přesahovou délku vyztužit navíc šroubovicí, která přenáší vznikající příčné tahy.

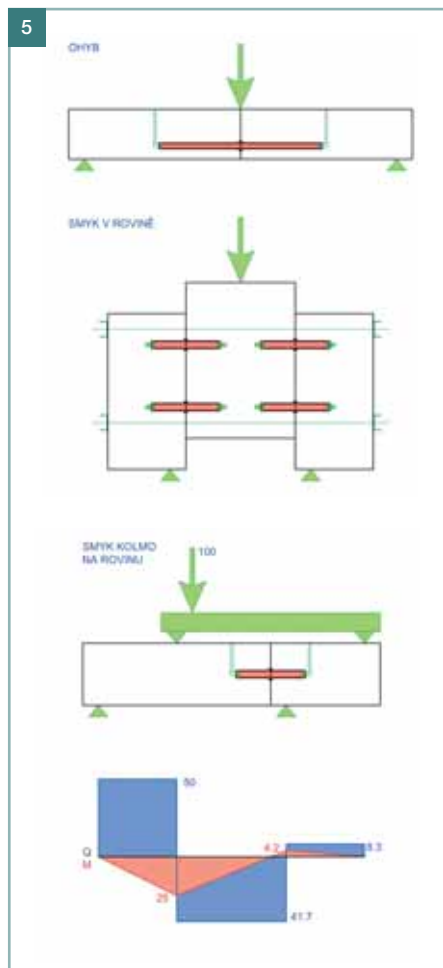
Axiální síly působící v ploše ostění a příčné síly působící kolmo na plochu ostění se přenášejí smykovými trny, které je vhodné umístit do střednice ostění.

Smykové trny mohou být oproti tahovým kratší, neboť síly přenášejí hmoždíkovým efektem. Důležité je však řádné vyztužení okolí trnů smykovou výztuží.

### STATICKÉ PŮSOBNÍ OSTĚNÍ

Segmentové ostění je tvořeno jednotlivými prstenci, ty jsou sestaveny vždy z několika segmentů (obvykle pěti až osmi). V prstenci vzniká axiální normálová síla, která rozhodující měrou přenáší účinky zatížení horninovým prostředím a podzemní vodou. Momentové namáhání kruhových prstenců rovnoměrně zatížených, nebo uložených v kompaktní hornině nebývá příliš významné.

Pokud je však prstenec přerušen (např. výlomem pro propojku), vzniklý neúplný prstenec ztrácí schopnost přenášet normálovou sílu. Tato síla se





Obr. 6 Tahové porušení trnu ■  
Fig. 6 Dowel failure in tension

Obr. 7 Detail tahového porušení trnu ■  
Fig. 7 Detail of dowel tension failure

Obr. 8 Porušení betonu při smykovém namáhání trnu v ploše ostění ■  
Fig. 8 Concrete failure during the test of shear parallel to the liner plane

Obr. 9 Smykové trny zlomené při velké deformaci ■ Fig. 9 Shear dowels broken at large deformation

Obr. 10 Porušení betonu při smykovém namáhání kolmo na plochu ostění ■  
Fig. 10 Concrete failure during the test of shear perpendicular to the liner plane

Protože se jedná o vcelku malé konstrukční prvky využívané ve velkém počtu, byla únosnost zjištěna experimentálními metodami.

#### Experimentální činnost

Spojovací trny mohou být vystaveny třem základním typům namáhání:

- tah
- smyk v ploše ostění
- smyk kolmo na plochu ostění

Pro zjištění únosnosti a charakteru porušení byly vyrobeny betonové vzorky z materiálu shodného s reálnou konstrukcí. Rovněž tloušťka prvků odpovídala skutečnosti, další rozměry byly upraveny (zmenšeny) pro laboratorní zkoušku. Uspořádání zkoušek pro jednotlivé typy namáhání je patrné z obr. 5.

Cílem zkoušky tahového trnu bylo především zjistit, zda je trn dostatečně zakotven a zda dojde k jeho porušení

přetržením a nikoliv vytažením z kanálku. Dva betonové dílce byly spojeny za injektovaným trnem umístěným při dolním povrchu dílců. Soustava byla uložena na podpory a uprostřed zatížena jako nosník. Zkouškou bylo prokázáno, že došlo k přetržení trnu (obr. 6 a 7), proto byla únosnost trnu stanovena odpovídající únosnosti ocelového prutu.

Smyková zkouška trnů namáhaných v ploše ostění byla uspořádána symetricky, kdy střední díl byl připojen ke dvěma krajním dílům vždy dvěma smykovými trny (celkem tedy čtyřmi trny). Během zkoušky byl střední díl zatlačován. Postupně s narůstající deformací se betonové dílce porušily trhlinami (obr. 8). Následně při vysoké hodnotě deformace došlo k zlomení ocelových trnů (obr. 9). Zkouškou byla stanovena mezní únosnost trnů i charakter porušení v závislosti na deformaci. Výpočtová smyko-

vá únosnost byla odvozena od experimentálně zjištěného mezního zatížení.

Smyková zkouška trnů namáhaných kolmo na plochu ostění byla uspořádána nesymetricky, kdy dva betonové dílce byly spojeny jedním smykovým trnem umístěným uprostřed tloušťky prvku. Zatížení bylo vnášeno přes vahadlo a to tak, aby ve spáře bylo jen smykové namáhání bez vlivu ohybu (obr. 5). Podle očekávání v mezním stavu došlo k porušení betonu (obr. 10). Obdobně jako v předchozím případě byla z naměřených hodnot odvozena výpočtová únosnost.

Z charakteru porušení je patrné, že únosnost smykových trnů je závislá jak na stupni vyztužení smykovou výztuží, tak na tloušťce krycí vrstvy. Je proto vhodné krycí vrstvu minimalizovat.

Výrobu zkušebních vzorků a veškerou experimentální činnost zajišťoval Kloknerův ústav ČVUT v Praze.

#### VYUŽITÍ TRNŮ

Navržené zajištění prstenců pomocí trnů je jen dočasné. Poté, co se výlom v ostění zajistí železobetonovým rámem (tzv. límec, collar), přenáší veškeré zatížení tento ztužující rám (umístěný např. v ústí propojky).

Pro případy, kdy je vhodné spojovací trny využít i pro přenášení dlouhodobého zatížení, by bylo zapotřebí trny vhodným způsobem zabezpečit proti korozi. V uvedené formě nejsou trny ve spáře mezi segmenty dostatečně a dlouhodobě chráněné proti účinkům vlhkosti.

#### VKLÁDÁNÍ TRNŮ

Předpokládá se, že ve spoji mezi segmenty je větší množství trnů (např. deset). Kdyby byly trny pevně fixovány,



## NUSELSKÝ MOST

Dne 21. října 2014 se v Národním technickém muzeu v Praze (NTM) uskutečnila vernisáž výstavy s názvem Nuselský most (historie – stavba – architektura) a představení stejnojmenné knihy autorky Šárky Hubičkové. Vernisáž připravilo NTM a Česká komora autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT).

Výstavu Nuselský most zahájil Karel Ksandr, generální ředitel NTM. Výstava, umístěná do Malé galerie NTM (Kostelní 42, Praha 7), bude pro veřejnost otevřena až do 11. října 2015.

Ing. Václav Mach, čestný předseda ČKAIT, spolu s autorkou Šárkou Hubičkovou představil její stejnojmennou knihu koncipovanou jako obrazovou publikaci s historickým výkladem, architektonickými soutěžemi a průběhem příprav a popisem prací na mostě. Součástí publikace je rozhovor s architektem Stanislavem Hubičkou a inženýrem Jiřím Hejnicem. Publikace je doplněna barevnou fotogalerií.

Unikátní, velkolepá stavba Nuselského mostu je pro Pražany důležitou dopravní tepnou severojižní magistrály, kterou se již 41 let přepravují po povrchu (automobilová doprava zahájena 22. února 1973), i uvnitř (tubusem mostu). Pro cestující v metru se dveře poprvé otevřely 9. května 1974



a po neuvěřitelných 40 let se trasa z Kačerova do nádraží Holešovice stala jejich každodenní součástí.

Ve své době byl most největší stavbou z předpjatého betonu v Československu. Na stavbu bylo použito cca 20 000 m<sup>3</sup> betonu. Ocelový rošt vložený do tubusu a roznášející zatížení vozů metra váží cca 700 t. Most je dlouhý 485 m a široký 26,5 m, podpírají ho čtyři pilíře, jež jsou v průměru více než 40 m nad údolím. Celková hmotnost mostu je 64 800 t. Výška vnitřního tubusu pro metro je 6,5 m, tloušťka stěn dosahuje od 300 do 1 100 mm. Šířka dna Nuselského údolí pod mostem nepřekračuje 330 m a niveleta magistrály je ve spádu 0,65 %. Délka trvání stavby byla největší. Finální účet za stavbu byl 152,7 mil. Kč. Denně přes Nuselský most projede 160 tisíc aut oběma směry.

Kniha Nuselský most má formát A4 na šířku, vazbu V8 s přebalem, 112 stran, 105 obrázků. Resumé je v německém a anglickém jazyce. Cena je 490 Kč. Vydavatelem je Informační centrum ČKAIT. Rok vydání je 2014. Knihu je možno zakoupit i v NTM.

Z tiskové zprávy ČKAIT připravila Jana Margoldová, redakce

bylo by značně problematické následující segment přesně osadit, aby všechny trny najednou zapadly do svých kanálků. Proto se trny vložily do kanálků segmentu předchozího prstence zcela volně. Následně montovaný segment se přiblíží k volným koncům trnů, každý trn se jednotlivě povytáhne z předchozího prstence a vloží do kanálku montovaného segmentu. Poté, co jsou všechny trny zasazeny do kanálků, lze montovaný segment přitlačit k předchozímu prstenci.

### ZÁVĚRY

Spojování segmentů pomocí trnů je jednoduchý a zároveň dostatečně únosný systém pro zajištění ostění v místě plánovaného výlomu.

V místě výlomu v ostění pak není třeba realizovat konstrukce, které omezují stavební provoz v tunelu nebo další navazující práce.

Spojení lze realizovat pomocí běžně dostupných materiálů.

Pro ověření únosnosti byly realizovány experimenty, při kterých byla ověřena únosnost pro základní druhy namáhání trnů.

Spojení pomocí trnů je patentem firmy Metrostav, a. s.

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

Ing. Karel Rössler, PhD.

oba: Metrostav, a. s.  
Koželužská 1288/8, 180 00 Praha 8  
www.metrostav.cz

