

# KRITERIA A POUŽITÍ NEVYZTUŽENÉHO OSTĚNÍ PROJEKT A REALIZACE

Libor Mařík, Jan Hromádko

## 1 Úvod

Nejrozšířenější tunelovací metodou v České republice se záhy po pádu železné opony stala Nová rakouská tunelovací metoda (NRTM). Vystřídala prstencovou metodu spojenou především s ražbou tunelů a stanic metra, ale i např. s dokončením ražby Vinohradského tunelu č. 3. Prefabrikované ostění nahradilo dvouplášťové ostění tvořené primárním ostěním ze stříkaného betonu a monolitickým definitivním ostěním. Chápání funkce obou ostění i nosného horninového prstence v okolí výrubu není jen otázkou exaktních geotechnických výpočtů a v závislosti na zemi použití i firemní příslušnosti se může přístup k návrhu ostění diametrálně lišit. Článek ukazuje na příkladu českých tunelů, že i v tak malé zemi, jakou je v porovnání s alpskými zeměmi naše republika, může v obdobných geotechnických podmínkách docházet ke zcela odlišným technickým řešením.

## 2 Funkce a životnost primárního ostění

Pokud se chceme věnovat návrhu a dimenzování definitivního ostění, je nutno odpovědět na celou řadu otázek. K zásadním patří určení okrajových podmínek při „uložení“ konstrukce v horninovém masivu a stanovení zatížení ostění po celou dobu životnosti tunelu, která se standardně předpokládá 100 let. Na rozdíl od klasických tunelovacích metod, kdy se tloušťka ostění blížila 2 m, se v případě NRTM setkáváme s tloušťkami primárního ostění od 150 do 400 mm a definitivním ostěním v tloušťkách od 250 mm do 400 mm. Podstatné zestíhnutí ostění je umožněno využitím samonosnosti horninového masivu vyztuženého zpravidla systémovým kotvením a v porovnání s klasickými tunelovacími metodami zásadním zrychlením ražby a zvětšením plochy dílčích výrubů. Šetrnější přístup k horninovému masivu umožňuje mnohdy jeho využití jako stavebního materiálu. Systém primární ostění – horninový nosný prstenec dokáže efektivně obnovit ražbou narušenou rovnovážný stav a stabilizuje výrub minimálně do doby vestavění definitivního monolitického ostění. V mnoha případech se v tomto okamžiku přestane projektant primárním ostěním zabývat a veškerou pozornost soustředí na návrh dimenzí definitivního ostění. To bývá pojmenováváno jako ostění trvalé, zatímco primární ostění je někdy sugestivně označováno jako ostění dočasné. Právě otázka životnosti primárního ostění je zásadní z hlediska ekonomického návrhu tunelu.

V České republice je všeobecně rozšířen názor, že primární ostění v průběhu životnosti tunelu degraduje natolik, že zcela ztratí nosnou funkci a v určitém okamžiku zcela převezme jeho funkci ostění definitivní. Na rozdíl od našeho konzervativního přístupu existuje i opačný názor, který je velmi rozšířený v kolébce NRTM – Rakousku. V odborné literatuře se v této alpské zemi lze setkat i s názorem, že primární ostění zcela

přebírá nosnou funkci a definitivní ostění plní pouze funkci obkladní, resp. zvyšuje únosnost celkového systému dvouplášťového ostění. Při použití uzavřeného systému izolace bývá dimenzováno na zatížení hydrostatickým tlakem, zatímco primární ostění je zatíženo horninovým tlakem. S přístupem k funkci a životnosti primárního ostění souvisí otázka zatížení definitivního ostění, jeho tloušťky a v neposlední řadě otázka jeho vyztužení či nevyztužení. V případě akceptování nosné funkce primárního ostění se může celková tloušťka dvouplášťového ostění zvětšit až na dvojnásobek, což už je významný přínos pro celkovou únosnost systému. O pozitivním dopadu do výše investičních nákladů takto navrženého tunelu lze jen obtížně pochybovat.

S únosností systému ostění – hornina souvisí způsob vyztužení horninového prstence v okolí výrubu a životnost kotevního systému. V tomto případě pro naše podmínky vyznívá situace nepříznivě. Zatímco v mnoha zemích, Rakousko nevyjímaje, se pro kotvení používají plnoprofilové kotvy typu SN osazované v celé délce do cementové zálivky, v ČR dosahují u zhotovitelů velké obliby hydraulicky upínatelné svorníky. Důvodem je zřejmě snadná instalace a rychlá aktivace hydraulickým rozepnutím duté kotvy přímo ve vrtu. Jak množství oceli, tak korozní ochrana takto instalovaných kotev je řádově nižší, než v případě kotev typu SN (Soil Nails). Korozní úbytky pak zeslabují kotevní vyztužení horninového nosného prstence a větší část zatížení může přecházet do primárního ostění.

I přes u nás vžitý konzervativní přístup k funkci a životnosti primárního ostění lze uvést příklad silničního městského tunelu, kde primární ostění zcela přejímá trvalou nosnou funkci a definitivní ostění plní pouze funkci prvku zvyšujícího celkovou únosnost systému. Jedná se o Pisárecký tunel na Pražské radiále v Brně. Projektovaná tloušťka primárního ostění dosahuje 200 mm, nevyztužené definitivní ostění o tloušťce 300 mm se směrem k bokům rozšiřuje na max. 700 mm. Životnost vyztužení horninového nosného prstence řeší použití laminátových kotev osazovaných do cementové zálivky. Projektční kancelář Amberg Brno využila zahraničních zkušeností své švýcarské matky a navrhla kromě první aplikace nevyztuženého ostění v ČR i první a zřejmě na dlouhou dobu poslední primární ostění s trvalou nosnou funkcí. Po 12 letech od uvedení do provozu nevykazuje nevyztužené tunelové ostění známky porušení.

### **3 Definitivní ostění tunelu Libouchec**

#### **3.1 Základní informace**

Dálniční tunel Libouchec leží na úseku dálnice D8, stavby 0807/II Knínice – státní hranice SRN. Z důvodů kapacitních i bezpečnostních je tunel směrově rozdělen do dvou tunelových trub, vzájemně propojených dvěma průchozími tunelovými propojkami. Při směru dálnice od jihu na sever a úpatní poloze tunelu byly tunelové trouby z důvodu snadné identifikace při výstavbě označeny jako východní (situovaná směrem do údolí) a západní (situovaná směrem do hory). Až po dokončení stavby byla použita konvence používaná u ŘSD ČR a tunelové trouby byly označeny jako pravá a levá ve směru stoupajícího staničení trasy. Celková délka západní tunelové trouby (ZTT) dosahovala 504 m, délka východní tunelu (VTT) činila 520 m. Na severním portále na západní raženou tunelovou troubu přímo navazovala galerie délky 120 m. Příportálové úseky obou tunelových trub byly prováděny v otevřené stavební jámě a zpětně zasypány. Zbývající úseky byly raženy Novou rakouskou tunelovací metodou (NRTM) s dvouplášťovým

ostěním. Tloušťka primárního ostění dosahovala podle technologické třídy výrubu od 100 mm do 300 mm, sekundární definitivní ostění zadávací dokumentace požadovala provést v tloušťce 400 mm.

K příznivému namáhání ostění přispíval ekonomický profil tunelu kategorie T7,5 dle ČSN 737507. Jedná se o standardní profil používaný v Evropě u směrově rozdělených dálničních tunelů, který optimalizací tvaru tunelu minimalizuje výši investičních nákladů. Kategorie T7,5 představuje šířku vozovky mezi obrubníky, která se skládá ze dvou jízdních pásů šířky 3,5 m a vodicích proužků šířky 250 mm. Po obou stranách profilu tunelu je navržen služební chodník šířky 1 m. Šířkové uspořádání tunelu spolu se standardní výškou průjezdného průřezu 4,5 m umožňuje návrh profilu tunelu tvarem blízkého kruhu. Tím dochází k minimalizaci plochy výrubu (max. 89 m<sup>2</sup>) i velmi dobré statické funkci.

Z hlediska zatížení definitivního ostění hraje důležitou roli i hydroizolační systém tunelu. V případě tunelu Libouchec byl použit tzv. deštníkový systém s odváděním podzemní vody po obvodu ostění mezilehlou pláštovou hydroizolační fólií k bočním tunelovým drenážím, kterými voda odtéká směrem k níže položenému jižnímu portálu tunelu. Navržený systém zaručuje při dobré údržbě drenážního systému, že ostění tunelu nebude zatíženo hydrostatickým tlakem. Sklon tunelu a tím i sklon drenáží 4,5% dává dobrý předpoklad k minimalizaci vzniku sedimentu v potrubí, který se tvoří jednak vymýváním jemných částic z horninového masivu, jednak výluhy ze stříkaného betonu primárního ostění.

### 3.2 Geologická stavba území a geotechnické podmínky

Použití nevyztuženého definitivního ostění úzce souvisí s geologickými, resp. geotechnickými podmínkami v trase tunelu. Na nich z velké míry závisí zatížení konstrukce horninovým tlakem. Nejde při tom jen o absolutní hodnotu zatížení, ale především o poměr svislého a bočního tlaku, který s ohledem na tvar tunelu významně ovlivňuje průběhy vnitřních sil a tím i dimenzování ostění. Z hlediska geologického procházely obě tunelové trouby prostředím ortorul různého stupně zvětrání i tektonického porušení. V příportálových úsecích se výška nadloží pohybovala od 5 m do 10 m a zóna zvětrání zasahovala až do profilu kaloty tunelu. Negativně se projevovalo i úpatní umístění tunelů, při kterém se geologické poměry východního tunelu situovaného blíže k údolí výrazně lišily od západního tunelu umístěného více do hory. I z těchto důvodů byl ražený úsek východní tunelové trouby kratší. Horninový pilíř o mocnosti 8 m mezi západní tunelovou troubou a stavební jámou hloubeného úseku východního tunelu byl jedním z důvodů, proč bylo nutné vyztuzit i část západního tunelu s poměrně dobrými geologickými podmínkami. Vlivem horninového pilíře docházelo k nesymetrickému zatížení, které nedovolovalo použití nevyztuženého ostění. Délka vyztuzených úseků u jižního portálu dosahovala v obou tunelových troubách 36 m (3 bloky betonáže o délce 12 m).

Stabilní geologické prostředí i příznivý tvar tunelu potvrdil během výstavby geotechnický monitoring, který mimo jiné sledoval deformace primárního ostění v čase. V příportálových úsecích nepřekročila deformace primárního ostění 30 mm, v ražených úsecích s vyšším nadložím se pak standardní měřená deformace primárního ostění pohybovala do 7 mm. I za předpokladu, že před čelbou tunelu, resp. před osazením měřického profilu může odeznít 30% až 40% deformace se jednalo o velmi příznivé výsledky, které projektanta vedly k prvním úvahám o použití nevyztuženého ostění.

### 3.3 Kriteria použití nevyztuženého definitivního ostění

Podrobnostmi návrhu a statického řešení nevyztuženého definitivního ostění se zabýval příspěvek [3]. Proto se v tomto příspěvku zaměříme na kriteria použití nevyztuženého ostění a zkušenosti z provádění. Úvodem je třeba říci, že použití nevyztuženého ostění předcházelo poměrně složitý proces diskusí a přesvědčování nejprve zhotovitele a následně i zástupce investora a jeho supervize, že se nejedná o nic výjimečného, nebo dokonce rizikového. Zpočátku zásadně odmítavý postoj se postupem doby pomalu měnil, možná i díky příkladům ze zahraničí, kde jsou tunely s ostěním z prostého betonu v provozu již desítky let. Největší diskuse probíhaly nad tematikou vzniku trhlin a případných povrchových vad ostění. Vznik trhlin je u betonového ostění zcela přirozeným jevem, bez kterého by dokonce železobetonový průřez nebyl schopen efektivně přenášet vnitřní síly. V případě nevyztuženého ostění se však dá předpokládat vznik trhlin větší šířky, než v případě železobetonového průřezu. Žádná z českých norem, směrnic či předpisů však neudává přípustné hodnoty šířky, hloubky, nebo dokonce směru a umístění trhliny na ploše ostění. Statický výpočet posuzoval i hloubku a rozevření trhlin. Protože maximální hloubka trhlin v konstrukcích z prostého betonu není explicitně stanovena, bylo za kritérium v tomto případě uvažováno omezení napětí v betonu na přijatelnou mez dle ČSN 73 1201, tj.  $e_d \leq 0,9 a_{gc}$ . Při splnění této podmínky nesměla při tloušťce průřezu 400 mm hloubka trhliny od statického zatížení překročit 360 mm. Maximální šířka trhliny od statického zatížení byla podle doporučení [2] omezena na max. 1 mm při maximálním pootočení průřezu  $\theta \leq 4 \cdot 10^{-3}$  rad. Omezení pootočení průřezu minimalizuje nebezpečí vzniku druhotných trhlin, které způsobují odprýskávání betonu a ovlivňují tak schopnost konstrukce sloužit svému účelu. Druhotné trhliny vycházejí z kořene primárních trhlin a jsou na ně přibližně kolmé. Vznik trhlin a vad ostění, resp. případné reklamace a nutnost sanace byly zásadním problémem jak pro investora, tak zhotovitele. Návrh ostění bez výztuže vedl k výrazné úspoře investičních nákladů. V případě reklamací ze strany investora by však mohl znamenat pro zhotovitele, neúměrné riziko v podobě sanací případných trhlin a povrchových vad, které by byl nucen provádět na vlastní náklady. Proto byl projektant realizační dokumentace společně se zástupci investora pověřen vytvořením pravidel, která by přípustné trhliny a povrchové vady definovala. V první fázi se snažil projektant využít zahraniční směrnici [4], které se v kolébce NRTM používá již celou řadu let, je průběžně novelizována a vychází z dlouholetých zkušeností s výstavbou a především provozováním tunelů v Rakousku. Pro povrchové vady ostění směrnice uvádí jednoduché a snadno kontrolovatelné zásady:

- V oblasti opěří tunelu pod ukloněnými plochami bednění je vznik pórů o průměru cca 2 cm prakticky nevyhnutelný a neškodný. U vyztužených ostění nesmí hloubka pórů překročit 1 cm, u nevyztužených ostění 1,5 cm.
- V případě zvláštních požadavků na povrch betonu, např. z architektonických důvodů nebo z důvodu zvýšení odolnosti proti posypovým solím, jsou nutná další opatření (např. obklady, nátěry).
- Nepatrné poruchy, které neovlivňují použitelnost, nemusí být sanovány.
- Pro nařízení opatření k opravám líce ostění by mělo platit, že povrchový odprysk betonu je stále lepší a trvanlivější, než oprava maltou nanášenou v tenké vrstvě. To platí především pro mělké ploché poruchy.
- Pro nápravu poškozených míst (pórů hlubších 1 cm nebo 1,5 cm u nevyztužených ostění) jsou prováděny přípravy podkladu jakož i opatření pro opravu vhodnými

materiály (např. reprofilační maltou). Velkoplošná poškození o hloubce větší než 2 cm jsou sanována pro dosažení požadovaného krytí výztuže nástřikem reprofilační malty.

- Průběžné trhliny o šířce > 0,3 mm musí být v případě vyztužených ostění injektovány. V případě nevyztužených ostění může být od jejich injektování upuštěno v případě, kdy je prokázána jejich nezávadnost.
- Nevyhnutelné zazubení mezi jednotlivými bloky betonáže dopravních tunelů jsou zpravidla skryty pomocí úpravy spáry mezi bloky. Poruchy ve spárách mezi bloky jsou průběžně obroušeny.

Uvedená opatření jsou založena na funkčnosti a jednoduchosti provádění s tím, že případný odprysk sanačního materiálu zejména ve vrcholu klenby může při provozování tunelu způsobit havárii zasaženého vozidla s následky podstatně závažnějšími, než je lokální povrchová vada bez vlivu na nosnou funkci ostění. Zásady uvedené ve směrnici byly potvrzeny při konzultacích ze zástupcem rakouského investora z firmy ASFINAG.

Pro použití nevyztuženého ostění nebylo možné výše uvedené zásady použít a na základě dlouhodobých jednání se zástupci ŘSD ČR byla stanovena speciální kritéria, která uvádí následující tabulka:

**Tab. 1** Některé druhy lehkých kameniv s různou materiálovou podstatou a jejich zákl. vlastnosti

Maximální přípustné hodnoty sledovaných poruch ostění z nevyztuženého betonu	Jed.	Stav při převzetí	Konec záruční doby	Konec životnosti	
Trhliny od mechanického zatížení	Šířka trhlin (horizontálních)	[mm]	0,5	1,0	1,5
	Hloubka trhlin	[mm]	360*)	360*)	360*)
	Svislý posun (kolmo k ose tunelu)	[mm]	1	2	3
	Vodorovný posun (kolmo k ose tunelu)	[mm]	1	2	3
	Počet trhlin v sekci délky 12 m (horizontálních)	[ks]	3	4	5
Trhliny od smršťování betonu	Šířka trhlin (vertikálních)	[mm]	2	3	3
	Hloubka trhlin	[mm]	400	400	400
	Počet trhlin na délku sekce délky 12 m (vertikálních, které probíhají přes celou klenbu)	[ks]	2	2	2
	Počet trhlin na délku sekce délky 12 m (štěpných, vertikálních, do max. výšky 2m nad základ, )	[ks]	4	4	4
Posuny v pracov ních/díla tačních spárách	Šířka (posun ve směru osy tunelu)	[mm]	10	15	20
	Svislý posun	[mm]	5	8	10
	Vodorovný posun (kolmo k ose tunelu)	[mm]	5	8	10
Radiální deformace měřená na definitivním ostění od počátečního data	Max. hodnota vektoru deformace bod 1	[mm]	15	20	25
	Max. hodnota vektoru deformace bod 2	[mm]	15	20	25
	Max. hodnota vektoru deformace bod 3	[mm]	15	20	25
	Max. hodnota vektoru deformace bod 4	[mm]	15	20	25
	Max. hodnota vektoru deformace bod 5	[mm]	15	20	25

Poměrně složitá pravidla definují polohu, šířku, hloubku a počet trhlin v jednom bloku betonáže s tím, že rozlišují trhliny vzniklé smršťováním betonu a trhliny vzniklé od statického (mechanického) zatížení ostění. Kritéria platí pro časový horizont od převzetí díla objednatelem přes ukončení záruční doby (5 let) až po ukončení životnosti tunelu, tj. 100 let. Aplikace kritérií vyžaduje podrobnou pasportizaci trhlin v ostění s osazením

měřických profilů a podrobným vyhodnocováním naměřených veličin. Kromě údajů uvedených v tabulce byla stanovena další kritéria, která definují postupy při sledování trhlin v oblasti spár mezi bloky betonáže definitivního ostění, velikosti přípustných lokálních povrchových poruch ostění, četnost sledování atd. Jedná se o následující zásady:

- Jde-li trhlina ve vzdálenosti 200 mm nebo menší od pracovní/dilatační spáry nebo jiné trhliny, je nutné sledovat možnost odprýsknutí části betonu.
- Tvoří-li trhlina a pracovní /dilatační spára a/nebo více trhlin spojitý uzavřený tvar, vymezující možnost uvolnění části betonu, bude se šířka trhliny i od smršťování (nebo kombinace trhlin od zatížení a smrštění) sledovat nejméně 1x ročně, pokud její šířka nepřesáhne 0,2 mm. Při šířce trhliny od 0,2 do 0,8 mm se bude sledovat 1x za 3 měsíce a při šíři nad 0,8 mm je nutno navrhnout a provést opatření (např. sanaci dotčeného úseku ostění).
- Póry na povrchu pohledového betonu ostění (limitní hodnoty při převzetí díla) - průměr i hloubka póru max. 10 mm.
- Trhliny od mechanického zatížení lze pozorovat zejména v horní části klenby a jsou rovnoběžné s osou tunelu (horizontální), nebo šikmé (max. úhel od vodorovné je 9 stupňů).
- Trhliny od smršťování se vyskytují ve stěnách a jsou ve směru kolmo na osu tunelu (vertikální). Vznikají a zvětšují se obvykle v průběhu prvního roku po betonáži.
- Maximální hloubka trhlin od mechanického zatížení je dána požadavkem na minimální tloušťku tlačené zóny betonu při tloušťce ostění 400 mm
- Hloubka trhlin od smršťování není omezena a může procházet přes celou tloušťku ostění, tj. do hloubky 400 mm.
- Kaverny na povrchu ostění je nutno sanovat, pokud jeden z jejich rozměrů (průměr, hloubka) přesáhne daný limit.
- Hodnoty kritérií pro přípustnou šířku a hloubku trhliny uvedené v tabulce v sobě již obsahují chyby měření, a to za předpokladu požadované chyby měření  $\Delta \leq 0,1$  mm.
- Trhliny žádného typu nesmí procházet dodatečně vkládanými rozpěrnými kotvami (upevnění technologického vybavení tunelu, dopravního značení apod.).
- Kritéria vycházejí z předpokladu, že tunel bude spolehlivě sloužit svému účelu. Pokud šířky trhlin nebo jiná výše uvedená kritéria budou v navržených limitech, není nebezpečí, že bude docházet k deformacím směrem kolmo na střednicovou plochu ostění a tedy stačí sledovat šířku trhlin a není nutné měřit další parametry. Pokud by šířka trhlin nebo jiná výše uvedená kritéria přestoupila dané limity, pak je třeba hledat příčinu a pozvat specialistu na posouzení vzniklé situace. Ten navrhne další postup. Překročení výše uvedených kritérií pro záruční dobu se považuje za záruční vadu/poruchu.

I přes velmi složitá a přísná kritéria přistoupil zhotovitel k realizaci nevyztuženého ostění. Obavy byly zejména z požadavku na průměr a hloubku povrchových kaveren 10 mm, neboť pro ostění tunelu byl používán provzdušněný beton C30/37 XF4 a tvar bednění v dolní části tunelu prakticky vylučuje únik vzduchových bublin. Pro omezení vzniku a šíření divokých smršťovacích trhlin požadoval zpočátku investor vkládání plastových profilů, které by předurčily vznik trhliny. Vzhledem k obtížnému osazování profilů do ocelového bedníčeho vozu délky 12 m bylo nakonec od tohoto požadavku upuštěno. Realizace ostění však počáteční obavy nepotvrdila a výhody provádění nevyztuženého ostění převážily případné požadavky na sanace.

### 3.4 Výhody použití nevyztuženého definitivního ostění

Pomineme-li nezanedbatelný finanční efekt a připustíme-li možnost vzniku trhlin a povrchových vad, které nemají na funkčnost a životnost nevyztuženého ostění žádný vliv, má použití nevyztuženého ostění celou řadu výhod.

V případě tunelu Libouhec byla použita pro zajištění vodonepropustnosti ostění mezilehlá PE fólie tl. 2,5 mm se signální vrstvou. I když konstrukční prvky při návrhu výztuže v příportálových úsecích minimalizovaly možnost poškození výztuže, určité riziko vždy hrozí. Nalezení míst s poškozením hydroizolační fólie při montáži výztuže usnadňuje signální vrstva, která dovoluje vizuální kontrolu fólie před betonáží. Riziko poškození fólie při ustavování polohy bednicího vozu sice částečně eliminoval systém stykování nosných rámů samonosné výztuže pomocí lanových spojek, zcela vyloučit kontakt výztuže s fólií však nelze. V případě nevyztuženého ostění toto riziko zcela odpadá a jediné nebezpečí poškození hydroizolační fólie hrozí v místě bednění čela bloku betonáže, kde však byly použity ochranné pásy natavené po celém obvodu na hydroizolační fólii.

Další nebezpečí číhá na hydroizolační fólii v případě vyztuženého ostění ve vrcholu klenby tunelu, kde při betonáži vzniká nevyplněný prostor tvaru menisku. Při betonáži definitivního ostění dochází z důvodu vibrování směsi, značného podélného sklonu tunelu (4,5%) a s ohledem na možnost plnění bednění betonem ve vrcholu prostor, který je po dosažení požadované pevnosti betonu dodatečně zainjektován pomocí speciálně vytvořených injektážních otvorů v ostění. Provádění a rozsah injektování je jen obtížně kontrolovatelný a v případě, že se vzniklý meniskus nepodaří úplně zainjektovat, může obnažená výztuž poškodit hydroizolační fólii.

Odstranění montáže výztuže sice postup výstavby nijak neurychlí, neboť výztuž je v ražených úsecích tunelu prováděna jako samonosná a její montáž probíhá v předstihu před betonáží. Montáž výztuže však zpravidla provádí jiná firma, než která zajišťuje betonáž, nebo provádění hydroizolační fólie. Vyjmutí jednoho technologického kroku z cyklogramu prací zjednodušuje systém kontroly a odpovědnosti v rámci sdružení zhotovitelů, resp. v rámci vztahů mezi odpovědným zhotovitelem a jeho subdodavatelem. Zkušenosti z výstavby ukazují, že čím více subjektů se na stavbě pohybuje, tím obtížnější je zjištění konkrétního viníka případné technologické nekázně a tím vyšší je riziko vzniku chyb při realizaci. I když z pohledu investora je odpovědnost na smluvním partnerovi - generálním zhotoviteli, minimalizace rizik při provádění by měla být společným zájmem všech účastníků výstavby.

## 4 Použití nevyztuženého ostění v extrémních podmínkách

Do dne uvedení příspěvku bylo v České republice použito nevyztužené ostění pouze u tří realizovaných tunelů. Jednalo se o tunely silniční tunely Pisárecký v Brně, Libouhec na dálnici D8 a železniční tunely Nového spojení v Praze. V současné době se připravuje použití nevyztuženého ostění u železničních tunelů Olbramovický a Zahradnický na traťovém úseku Votice – Benešov u Prahy, které jsou ve výstavbě a kde geotechnické poměry dovoluují nevyztužené ostění použít. Olbramovický tunel je v celé délce proražen a byla zahájena betonáž ostění hloubených úseků tunelů, ražba Zahradnického tunelu dosud probíhá. V případě všech uvedených tunelů ražba probíhá v mimořádně příznivých geotechnických podmínkách a deformace primárního ostění se při ploše výrubu cca 100 m<sup>2</sup> pohybují v řádu centimetrů. Definitivní ostění je betonováno zpravidla v okamžiku, kdy

dojde k odeznění deformací primárního ostění a lze konstatovat, že veškeré zatížení horninovým tlakem přejímá primární ostění. Tloušťka definitivního ostění se pohybuje od 350 mm do 400 mm. V mnoha dalších případech nově prováděných dopravních tunelů bylo definitivní ostění vyztuženo. V zahraničí jsou však známy případy nasazení nevyztuženého ostění v pro nás nepředstavitelných podmínkách. Pro informaci uvádíme příklad dvou silničních tunelů. Jedná se o směrově rozdělené dvoupruhové tunely Strengen a Tauern v Rakousku. Na příkladech je možné dokumentovat dlouhodobé používání nevyztuženého ostění, neboť první tunelová trouba tunelu Tauern byla uvedena do provozu v roce 1975, druhá v roce 2010. Tunel Strengen byl uveden do provozu po těžkostech při ražbě v roce 2005.

#### 4.1 Nevyztužené ostění tunelu Strengen

Dvoutroubový tunel Strengen délky necelých 6 km leží na rychlostní komunikaci S16 mezi obcemi Piarsch a Flirsch. Již při variantním řešení trasy tunely byly očekávány složité geotechnické poměry a zvolená varianta měla být podle předpokladů situována do oblasti s lepší geologickou prognózou. To se během výstavby tunelu nepotvrdilo a při ražbě v silně tektonicky porušených metamorfovaných horninách tvořených křemitými fility a slídnatými krystalickými břidlicemi dosahovaly radiální deformace výrubu až 800 mm, přičemž docházelo ke zdvihání počvy kaloty až o 1000 mm. Rychlost deformace dosahovala v prvních dnech po výrubu až 80 mm/den. Jedná se o hodnoty deformací v českých podmínkách nepředstavitelné a otázkou zůstává, jak bychom se v takovém prostředí vypořádali se železobetonovým ostěním. Extrémní deformace výrubu, resp. primárního ostění byly komplikací nejen statickou, ale i logistickou, neboť při přeprofilování výrubu na požadovaný tvar docházelo k těžení většího objemu materiálu, než bylo původně předpokládáno. Aby nedošlo vlivem deformací k rozdrčení primárního ostění a ztrátě stability líce výrubu, byly používány speciální kompenzační elementy, které se vkládaly podélně do primárního ostění a zajistily intergritu ostění před vestavením definitivního ostění. Vzhledem k nadměrným deformacím primárního ostění bylo nutné kromě použití kompenzačních elementů některé úseky překotvit dlouhými kotvami typu SN. Na obrázku č. 1 je zobrazen výsek primárního ostění s kompenzačním elementem a hustým kotvením. Deformace způsobovaly odstřelování hlav kotev. Proto musely být z bezpečnostních důvodů kotevní desky překryty ocelovou sítí přichycenou k primárnímu ostění kotvami osazovanými s časovým odstupem (na obrázku označeny barvou). Přes extrémní geotechnické podmínky není definitivní ostění ražené části tunelu vyztuženo prutovou výztuží, nebo sítěmi a má tloušťku pouhých 250 mm.



**Obr. 1** Kotvení pro zajištění stability výrubu

Pouze v místě rozšířeného profilu nouzových zálivů bylo použito definitivní ostění z drátkobetonu tloušťky 350 mm, což je o 50 mm méně, než u standardního profilu tunelu Libouchec. Definitivní ostění bylo v některých úsecích tunelu betonováno i v případě, že nedošlo k ustálení deformací primárního ostění. Bez zajímavosti není ani tabulka s kritérii pro použití ostění v různých částech tunelu (viz tab. 2). Tloušťka ostění závisí podle uvedených kritérií na rychlosti deformace primárního ostění po uzavření

spodní klenby a celkové velikosti radiální deformace primárního ostění v daném úseku.

**Tab. 2** Kriteria použití definitivního ostění tunelu Strengen

Geotechnické poměry		Strukturně podmíněné dlouhodobě odeznívající posuny		Tlačivé horniny s celkovou radiální deformací < 250 [mm]		Tlačivé horniny s celkovou radiální deformací > 250 [mm]		
		Zbytková rychlost deformace po uzavření spodní klenby [mm/měsíc]						
		3 - 6	3 - 6	6 - 12	3 - 6	6 - 12	> 12	
Tloušťka ostění	250 [mm]							
	300 [mm]							
	350 [mm]							
	400 [mm]							
Beton	B225							
	B300							
Drátkobeton 50 kg/m <sup>3</sup>								

#### 4.2 Nevztužené ostění tunelu Tauern

Tunel leží v Rakousku na dálnici A10, která je důležitou evropskou komunikací spojující sever s jihem. Mezi ražbou první a druhé tunelové trouby tunelu délky 6 800 m uplynulo téměř 40 let. Za tu dobu se v technologii tunelování mnoho změnilo. V případě tunelu Tauern se však nezměnila ani metoda tunelování NRTM, ani použití nevztuženého ostění. Stejně jako v případě tunelu Strengen docházelo i při ražbě první tunelové trouby v roce 1970 k extrémním deformacím výrubu. Ve staničení 1100 se deformace vrcholu kaloty pohybovaly kolem hodnoty 1 200 mm. Při ražbě druhé tunelové trouby byly proto očekávány obdobné hodnoty deformací. Prognóza se nešťěstí nevyplnila a deformace v odpovídajícím úseku druhé tunelové trouby dosahovaly „pouze“ 410 mm. I v dalších úsecích, kde se konvergence první tunelové trouby pohybovaly kolem 300 mm byly při ražbě druhé trouby naměřeny hodnoty 40 mm až 70 mm. Mezi hlavní důvody omezení deformací při ražbě druhé tunelové trouby patří podstatní zrychlení provádění kotev i stříkaného betonu, kratší délka záběru při ražbě a především použití sofistikovaných kompenzačních elementů, které umožnily regulovat tuhost a tím i deformaci elementu. Na obrázku č. 2 jsou v ostění osazeny jak radiální, tak tangenciální deformační prvky.



**Obr. 2** Deformační prvky v primárním ostění

Kritériem pro jejich použití byla rychlost nárůstu radiálních deformací za 24 hodin. Při nárůstu deformace do 3 mm/24 hod. se deformační elementy neosazovaly. Při deformaci 3 mm až 6 mm/24 hod. se v ostění vytvářely dvě řady elementů, při rychlosti od 6 mm do 12 mm/24 hod. – čtyři a při rychlosti deformace přes 12 mm/24 hod. šest nik s deformačními elementy. Díky tomu nedošlo k destrukci primárního ostění a zvýšenému rozvolňování horninového masivu v okolí výrubu, jako tomu bylo

při ražbě první tunelové trouby. Tloušťka definitivního ostění je v ražených částech tunelu navržena 30 cm a v převážné většině je provedeno jako nevyztužené.

## 5 Závěr

Nevyztužené definitivní ostění tunelů v České republice pomalu začíná nalézat své příznivce, i když četnost jeho použití je zatím velmi nízká. Častým argumentem pro vyztužení ostění je menší výška nadloží tunelů, než v případě alpských zemí. Pokud předpokládáme, že nosný horninový prstenec se v okolí výrubu tvoří v závislosti na geotechnických podmínkách již při výšce skalního nadloží cca 1,5 průměru tunelu, lze se samonosností horninového masivu počítat i při menších výškách nadloží a o použití nevyztuženého ostění uvažovat i v našich podmínkách. Pokud bychom se dokázali vypořádat s problematikou životnosti primárního zajištění stability výrubu, dalo by se počítat s částečným, nebo úplným spolupůsobením prokotveného horninového masivu, primárního i definitivního ostění, což by návrh dimenzí ještě více zefektivnilo. K prvkům zajištění stability výrubu nepatří pouze vlastní primární ostění, ale i systémové radiální kotvení. V případě zahraničních tunelů se tloušťka nevyztuženého ostění pohybuje od 250 mm do 300 mm, zatímco v případě dosud použitých případů v ČR neklesla tloušťka ostění pod 300 mm a v případě tunelu Libouchec dosahuje až 400 mm.

Vytvořená kritéria slouží jako smluvní pravidlo pro případnou reklamaci díla investorem a sanaci vad povrchu ostění i případných nadměrných trhlin na náklady zhotovitele. Složitost vytvořených pravidel odpovídá minimální zkušenosti s použitím nevyztuženého ostění v ČR a s tím spojené opatrnosti. Až budoucnost ukáže, zda je nutné se nevyztuženého ostění obávat, nebo jej lze považovat za standardní řešení v případě vhodných geotechnických poměrů. Pasportizace trhlin na tunelu Libouchec zatím ukazuje, že nedochází k enormnímu vzniku smršťovacích trhlin. Trhliny od statického zatížení lze očekávat až v případě, pokud by došlo k degradaci primárního ostění, resp. ztrátě únosnosti kotev, kterými je vyztužen nosný prstenec v okolí výrubu. Jediným problémem je vznik průběžné podélné trhliny ve vrcholu klenby v bloku betonáže za druhou tunelovou propojkou. Ani v tomto případě však zřejmě nedošlo ke vzniku trhliny působením horninového tlaku, ale pravděpodobně při odbednění bloku betonáže, kdy pevnost betonu nebyla schopna přenést zatížení od vlastní tíhy ostění. Tato trhlina byla v průběhu času sledována a nejeví známky dalšího rozšiřování, nebo dokonce vzájemného posunu jednotlivých částí ostění.

Vzhledem k použití nevyztuženého ostění u tunelů v extrémně deformabilním prostředí se nabízí otázka vhodné metodiky výpočtu horninového tlaku, resp. jeho přenosu z primárního na definitivní ostění. Sledování vývoje zatížení tunelového ostění v čase je podporováno GAČR v rámci grantového projektu č. 103/2008/1691 a jeho cílem je měření napjatosti definitivního ostění u mnoha tunelů v ČR pomocí tenzometrů osazovaných do profilu ostění při betonáži. S měřením poměrných deformací probíhá i měření teploty v měřicím profilu [5]. Dosud naměřené výsledky ukazují, že kromě vlastní tíhy ostění je zásadním zatěžovacím stavem oteplení, resp. ochlazení ostění v závislosti na klimatických podmínkách. I když v naměřených hodnotách nelze rozlišit vliv jednotlivých zatěžovacích stavů, charakter výsledků nasvědčuje tomu, že u sledovaných tunelů dosud přenáší horninový tlak pouze primární ostění. Na druhou stranu je nutno uvést, že měření jsou vzhledem k životnosti tunelu pouze krátkodobá a extrapolace naměřených hodnot problematičká. Při řešení životnosti primárního ostění bude proto nezbytné vyjít ze zahraničních zkušeností, kde se tunely ražené pomocí NRTM úspěšně staví již desítky let.

Použití nevyztuženého ostění je cestou ke snížení investičních nákladů při dosažení požadované kvality díla. V případě tunelů ražených pomocí NRTM nelze oddělit statickou funkci primárního a definitivního ostění. Zohlednění dlouhodobé nosné funkce primárního ostění i prokotveného horninového prstence v okolí výrubu je dalším krokem ke zefektivnění návrhu tunelových ostění.

## Literatura

- [1] Mattle, B.; John, M.: Statický výpočet a návrh definitivních ostění z prostého betonu – časopis Tunel, 1/2009, str. 73 – 78
- [2] Pöttler, R.: Die unbewehrte Innenshale im Felstunnelbau – Standsicherheit und Verformung im Rissbereich – Beton- und Stahlbetonbau, 6/1993, str. 155 - 160
- [3] Mařík, L.: Definitivní ostění tunelu Libouchec, sborník 2 konference Beton v podzemních a základových konstrukcích 2006
- [4] Richtlinie Innenschalenbeton, Ausgabe Oktober 2003, Österreichische Betonvereinigung für Beton- und Bautechnik, A-1040 Wien, Austria
- [5] Šourek P., Víték J., Aldorf J.: Měření deformací a teplot na definitivních tunelových ostěních – časopis Tunel, 4/2008, str. 70 – 76

---

### Ing. Libor Mařík

✉ IKP Consulting Engineers, s. r. o.  
Jirsíkova 5  
186 00 Praha 8  
☎ +420 605 707 767  
📠 +420 255 733 6%5  
😊 libor.marik@ikpce.com  
URL [www.ikpce.com](http://www.ikpce.com)

### Ing. Jan Hromádko

✉ Ředitelství silnic a dálnic ČR  
Na Pankráci 546/56  
145 05 Praha 4  
☎ +420 606 711 837  
📠 +420 241 776 787  
😊 jan.hromadko@rsd.cz  
URL [www.rsd.cz](http://www.rsd.cz)