

Sekundárne ostenie tunelov z prostého betónu

Róbert Zwillig¹, Peter Bóna², Alexandra Jacková³

Abstrakt

Použitie nevystuženého sekundárneho ostenia tunelov prináša ekonomické a časové úspory počas realizácie tunelových stavieb.

Na Slovensku boli už v minulosti realizované niektoré časti sekundárneho ostenia z nevystuženého betónu. Trhliny, ktoré vznikali v sekundárnom ostení hlavne od zmršťovania betónu, boli riešené dodatočnými vyjadreniami zhotoviteľa, projektanta prípadne nezávislého odborníka. Stanovenie limitných šírok trhlín bolo uvádzané v Zvláštnych technicko-kvalitatívnych podmienkach alebo v projektovej dokumentácii. Receptúram a ošetrovaniu používaného betónu sa nevenovala zvláštna pozornosť a prevažne sa používali rovnaké receptúry ako pri vystuženom ostení.

Aktualizovaním Technicko-kvalitatívnych podmienok TKP 26 Tunely s platnosťou od 1.1.2017 boli nastavené určité zásady a usmernenia pre nevystužené ostenie.

Článok je venovaný výpočtu nevystuženého sekundárneho ostenia, trhlinám vzniknutým od reologických javov, príčine vzniku týchto trhlín, obmedzeniu vzniku trhlín nastavením vhodnej receptúry betónu, oddebnovacej pevnosti a adekvátneho ošetrovania ostenia tunela hlavne v rannom štádiu.

Kľúčové slová

Sekundárne ostenie tunela, trhliny, ošetrovanie betónu

Abstract

Using of unreinforced concrete tunnel lining brings time and cost savings to project. In the past, there were constructed some blocks of the tunnel lining using unreinforced concrete in Slovakia. At that time, cracks in final lining were treated subsequently, by statement of designer or independent expert, according to experience from other European countries.

Limiting crack width was usually specified in contract (special requirements of client) or in project. There were no special requirements for concrete mixture or concrete curing treatment. Used concrete mixture was the same as for reinforced and unreinforced concrete. Updating the technical guidelines TKP 26 Tunely valid since 1. 1. 2017 were specified certain principles for unreinforced concrete.

This paper is focused on structural analyses of unreinforced concrete, formed cracks, cause of cracking, reduction of cracking in concrete using adequate concrete mixture, stripping strength of concrete and appropriate curing treatment.

Key words

Final lining, cracks, concrete curing treatment

¹ Basler & Hofmann Slovakia s.r.o., Panenská 13, Bratislava, robert.zwillig@baslerhofmann.sk.

² Basler & Hofmann Slovakia s.r.o., Panenská 13, Bratislava, peter.bona@baslerhofmann.sk

³ Basler & Hofmann Slovakia s.r.o., Panenská 13, Bratislava, alexandra.jackova@baslerhofmann.sk

1 Úvod

Ostenie z nevystuženého betónu bolo prvýkrát na Slovensku použité pri výstavbe tunela Branisko, následne v tuneloch Bôrik, Turecký vrch, Šibeník, Považský Chlmec, Ovčiarsko a Višňové. V čase projektovania a realizácie tunelov Branisko, Bôrik, Turecký vrch a Šibeník neexistovali na Slovensku technické predpisy prípadne iné podporné dokumenty, ktoré by presne špecifikovali ako trhliny v nevystuženom betóne posudzovať, kategorizovať, pomenovať riziká vzniku a aké opatrenia vykonať, ktoré by eliminovali ich vznik a vývoj. Trhliny boli riešené až dodatočne po ich vzniku a pasportizácii a to vyjadrením projektanta resp. nezávislého odborníka, kde sa stanovili kritériá na zaobchádzanie so vzniknutými trhlínami na konkrétnom projekte. Tieto vyjadrenia, návrhy a zaobchádzanie s nimi obvykle vychádzali zo zahraničných predpisov resp. boli upravené v zmysle našich predpisov.

Počas prípravy tunelov Považský Chlmec a Ovčiarsko sa už v rámci projektovania uvažovalo so vznikom trhlín a súbežne sa pripravovala aj aktualizácia TKP 26 Tunely. V rámci aktualizácie TKP okrem kategorizácie trhlín zapracovalo aj samotné zaobchádzanie so vzniknutými trhlínami a iné požiadavky na obmedzenie vzniku trhlín.

2 Navrhovanie sekundárneho ostenia

2.1 Všeobecne

Vzhľadom na požiadavku definovanú v [1], musí byť konštrukcia sekundárneho ostenia navrhnutá a zhotovená tak, aby počas stanovenej životnosti mala zodpovedajúcu odolnosť, používateľnosť a trvanlivosť.

V súlade s Tab. 2.1 podľa [1] je stanovená kategória návrhovej životnosti 5 t.j. 100 rokov. Tomu zodpovedajú aj zvýšené nároky resp. požiadavky na projektovanie a zhotovovanie sekundárneho ostenia.

Dôraz je kladený na výber vhodného typu ostenia (na základe inžinierskogeologických podmienok), vhodných materiálov, kvalitu zhotovenia a povrch ostenia v čase preberania diela, ale aj počas celej doby životnosti.

a. Modelovanie ostenia

Pre návrh sekundárneho ostenia sa všeobecne používa nelineárna analýza na prúťovom modeli. Nelineárna z dôvodu okrajových podmienok (nelineárne vlastnosti pružinových konštánt, kyvných prúťov). Materiálové vlastnosti pre vystužené ostenie sú však lineárne elastické tzn. nie je uvažované so vznikom trhlín a ich vplyvom na tuhosť konštrukcie.

Pre návrh sekundárneho ostenia z nevystuženého betónu sú obvykle používané nasledovné výpočtové modely:

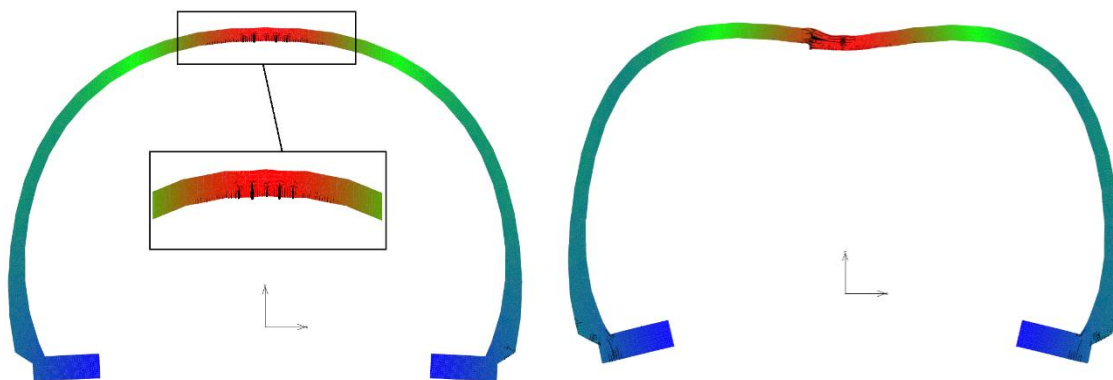
- Trojkľbový prúťový model (používaný hlavne v minulosti).
- Prúťový model s nelineárnymi materiálovými vlastnosťami.
- FE-model s plošných prvkov s nelineárnymi materiálovými vlastnosťami.

V prípade trojkľbového prúťového modelu sa v mieste trhliny (najbežnejšie v strope) vkladá kĺb, ktorým sa simuluje vzniknutá trhlina čím dochádza k redistribúcii ohybových momentov.

Prúťový model s nelineárnymi materiálovými vlastnosťami sa vykonáva podľa [5]. Posúdenie potom musí spĺňať požiadavky na maximálne pretvorenie v betóne, minimálnu hrúbku tlačenej zóny prierezu (min. dvojnásobok veľkosti zrna kameniva). V prípade posúdenia na medzný stav používateľnosti aj maximálne pootočenie 4 mrad. Toto obmedzenie vyplýva z možného vzniku sekundárnych trhlín a následného odpadávania betónu, podrobnejšie popísané v [6].

Tretí typ modelu umožňuje modelovať skutočné správanie ostenia z nevystuženého alebo vystuženého betónu. Pre tento typ modelu je možné použiť napr. software ATENA 2D. Konštitučný model CC3DNonLinCementitious kombinuje modely pre ťahové (lomová energia a ťahová pevnosť) a tlakové (plastické) správanie materiálu. Model je vhodný pre simulovanie vzniku trhlín resp. porušenia v tlaku, umožňuje zaťažovať konštrukciu do porušenia a určiť charakter porušenia (krehké, duktilné porušenie). Na obrázku 1 (vľavo) je možné vidieť vykreslené vzniknuté trhliny resp. porušenie konštrukcie (vpravo).

V počiatočných fázach pôsobia na konštrukciu zaťaženia ako vlastná tiaž, účinky zmršťovania betónu, účinky teploty (leto, zima). Okrem týchto zaťažení začne po degradácii primárneho ostenia pôsobiť horninový tlak, ktorý môže mať priaznivý vplyv na uzatvorenie trhlín. Pre výpočtový model sú vyselektované tri rozhodujúce kombinácie zaťažení. Kombinácia C1 Vlastná tiaž + Teplota leto, Kombinácia C2 Vlastná tiaž + Teplota zima + Zmršťovanie, Kombinácia C3 Vlastná tiaž + Teplota zima + Zmršťovanie + Horninový tlak. Pre vznik trhlín typu 2 je pritom rozhodujúca kombinácia C2 resp. striedanie kombinácií C1 a C2. Pre výpočtové modely uvažujeme charakteristickú a návrhovú kombináciu s príslušnými parciálnymi súčinitel'mi spoľahlivosti a zaťaženia podľa platných noriem. Pre modelovanie čo najreálnejšieho pôsobenia zaťažení v čase na ostenie uvažujeme model so strednými hodnotami materiálových parametrov s postupnou aplikáciou zaťažení. V prvej fáze sa aplikuje vlastná tiaž spolu so zmršťovaním, postupne sa simulujú teplotné cykly (leto, zima) a nakoniec sa aplikuje základné zaťaženie od horninového tlaku. Zaťaženie od horniny je potom možné v postupných krokoch zvyšovať až do porušenia konštrukcie (obvykle sa jedná o násobky základného tlaku od horniny). Týmto spôsobom je teda možné určiť maximálne možné zaťaženie ostenia a charakter porušenia. Pre ostenie z nevystuženého betónu vyplýva krehké porušenie, vzhľadom na absenciu výstuže, ktorá by zabezpečovala duktilitu.



Obr. 1 Vzniknuté trhliny a porušenie konštrukcie

Zdroj: Basler & Hofmann Slovakia s.r.o.

3 Trhliny

3.1 Vznik trhlín v nevystuženom ostení

Rizikové faktory vzniku trhlín v nevystuženom ostení ako sú popísané v [4] sú nasledovné:

- Teplota betónovej zmesi pri betonáži $> 22\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Čas oddebzenia kratší ako 12 hodín
- Oddebňovacia pevnosť vyššia ako 3 MPa
- Rýchlosť prúdenia vzduchu v tuneli pri betonáži vyššia ako 1 m/s

- Vlhkosť vzduchu v tuneli pri betonáži nižšia ako 90 %
- Veľký teplotný rozdiel medzi betónom ostenia a prostredím v tuneli (vysoké hydratačné teplo)
- Použitie plášťa debniaceho voza so zlou tepelnou vodivosťou
- Obmedzenie možnosti pohybu medzi primárnym a sekundárnym ostením (napr. Zazubenie primárneho ostenia, absencia separačnej fólie / hydroizolácie).

3.2 Vznik a vývoj trhlín

Kontrola vzniku a vývoja trhlín je dôležitá nielen z hľadiska odolnosti a použiteľnosti ale najmä z hľadiska trvanlivosti a požiadaviek na povrch sekundárneho ostenia. Trvanlivosť konštrukcie ovplyvňuje agresivita prostredia a typ použitej výstuže (betonárska, súdržná, nesúdržná výstuž).

Stupeň vplyvu prostredia definuje podmienky v ktorom konštrukciu navrhujeme. Podľa normy [2] sú v Tab. 1 uvedené limitné hodnoty šírky trhlín vzhľadom na stupeň prostredia pre železobetónové prierezy vystužené betonárskou výstužou. Pre vystužené sekundárne ostenie je na základe stupňa prostredia XC2-4 Korózia vplyvom karbonatácie stanovená limitná šírka trhlín na 0,3 mm.

Tab. 1 Odporúčané hodnoty w_{max} pre železobetónové prvky podľa[2]

Stupne prostredia	Limitná šírka trhliny [mm]
X0, XC1	0.4
XC2, XC3, XC4	0.3
XD1, XD2, XD3	

Pre nevystužené sekundárne ostenie nie sú v Eurokódoch definované presné kritéria na limitné hodnoty šírky trhlín vzhľadom na absenciu betonárskej výstuže a rizika korózie výstuže. Vzhľadom na bohaté skúsenosti Európskych krajín s výstavbou tunelov a použitím nevystuženého sekundárneho ostenia, si každý štát vytvoril predpisy, na základe ktorých definuje požiadavky na trvanlivosť a povrch sekundárneho ostenia. Sú zadefinované hodnoty šírky trhlín po dosiahnutí, ktorých je potrebné vykonať sanáciu ostenia vrátane pravidelného sledovania a prehliadok. Od 01. 01. 2017 je v platnosti predpis [4] pre tunely, kde sú okrem iného definované kritéria vzniku a vývoja trhlín v nevystuženom sekundárnom ostení Tab. 2.

Tab. 2 Kritéria vzniku a vývoja trhlín v nevystuženom sekundárnom ostení podľa TKP 26

Trhliny od mechanického zaťaženia				
Maximálne prípustné hodnoty sledovaných parametrov porúch ostenia z nevystuženého betónu	Jednotka	Pri preberaní diela	Ku koncu záručnej doby	Počas životnosti konštrukcie
Maximálna šírka horizontálnych trhlín	[mm]	1.0	1.0	1.5
Hĺbka trhlín	[mm]	určí statický výpočet		
Počet horizontálnych trhlín v bloku ostenia dĺžky 10 – 12.5 m	[ks]	2	3	4
Trhliny od zmršťovania betónu				
Maximálne prípustné hodnoty sledovaných parametrov porúch ostenia z nevystuženého betónu	Jednotka	Pri preberaní diela	Ku koncu záručnej doby	Počas životnosti konštrukcie
Maximálna šírka vertikálnych trhlín	[mm]	1.0	1.5	2.5
Hĺbka trhlín	[mm]	celá hrúbka ostenia		
Maximálny celkový počet trhlín širších ako 0.3 mm v jednom bloku ostenia dĺžky 10 – 12.5 m	[ks]	3	3	4
Maximálny počet priebežných trhlín, prebiehajúcich cez celú klenbu ostenia (z celkového počtu na blok ostenia)	[ks]	1	1	2
Maximálny počet trhlín, prebiehajúcich do výšky max. 3 m nad horné líce päty ostenia (z celkového počtu na blok ostenia)	[ks]	2	2	2

Zdroj: Technicko-kvalitatívne podmienky TKP 26 Tunely, MDVSR 01.01.2017

3.3 Typy trhlín v nevystuženom ostení

Na obrázku 2 sú znázornené typy trhlín, ktoré najčastejšie vznikajú na nevystuženom ostení. Typ 1 Lineárne (nerozvetvené) radiálne trhliny vznikajúce v dôsledku zmršťovania betónu. Typ 2, Typ 4 Lineárne (nerozvetvené) pozdĺžne trhliny v strope vznikajúce v dôsledku pôsobenia vlastnej tiaže, zmršťovania a teploty. Modelové štúdie ukázali, že trhliny do 1,2 mm nie sú kritické [7].

Trhliny typu 1, 2 a 4 sa na ostení objavujú najčastejšie. Trhliny, ktoré sa objavia na ostení je potrebné zaznamenať, posúdiť a sledovať ich vývoj v čase. V prípade, že dosiahne trhlinka hodnoty stanovené v Tab. 2 je potrebné takúto trhlinku sanovať.



Obr. 2 Typy trhlín na nevystuženom sekundárnom ostení

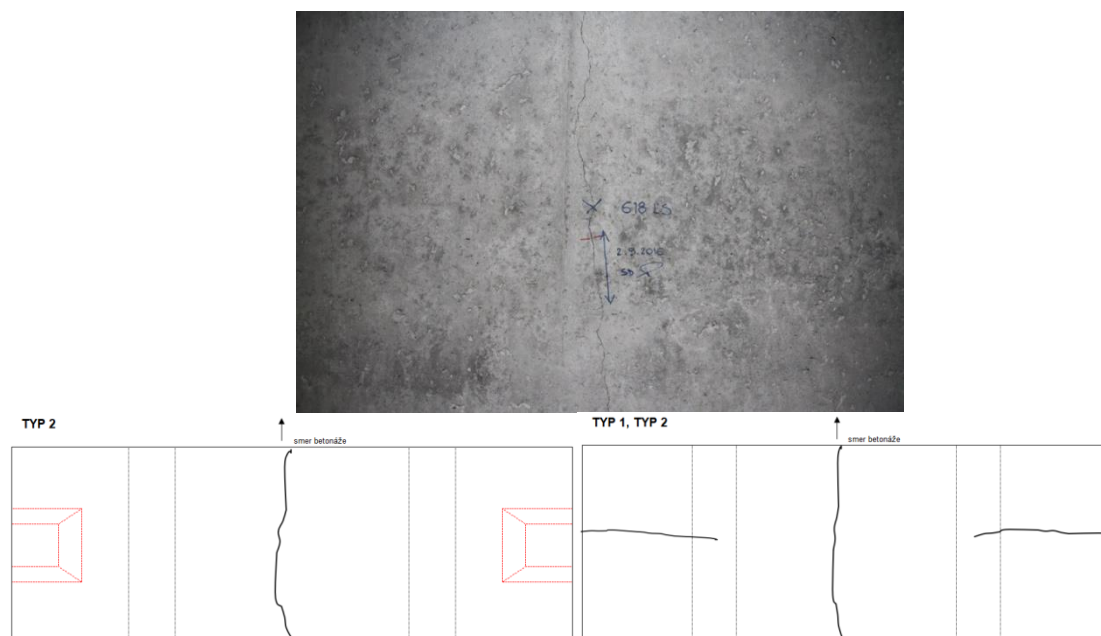
Zdroj: Basler & Hofmann Slovakia s.r.o.

3.4 Zaobchádzanie s trhlinami

Z hľadiska trvanlivosti konštrukcie sú definované požiadavky na povrch ostenia, ktoré musí byť hladké, bez veľkých pórov, štrkových hniezd, hrubých zŕn a výčnelkov. Z hľadiska

typu ostenia sú predpísané aj opatrenia na sanáciu ostenia. Pre vystužené ostenie je potrebné každú trhlinu širšiu ako 0,3 mm vyplniť pevnostnou injektážnou zmesou.

Pre jednotlivé typy trhlín v nevystuženom ostení je v platnosti predpis [4], ktorý definuje že trhliny typu 2, 3, 4 je potrebné po prekročení limitnej šírky trhliny vyplniť pevnostnou injektážnou zmesou, typu 1 výplňovou injektážnou zmesou. Na obrázku 3 sú uvedené príklady pasportizácie trhlín na tuneli Ovčiarsko.



Obr. 3 Pasportizácia trhlín na zrealizovanom sekundárnom ostení

Zdroj: Združenie Ovčiarsko

3.5 Riešenie obmedzenia vzniku trhlín

Základné opatrenie na obmedzenie vzniku trhlín je úprava receptúry betónovej zmesi – zníženie nárastu počiatkovej pevnosti betónu v tlaku. Vzhľadom na takúto úpravu je v rakúskej smernici [8] povolené konečnú pevnosť betónu posudzovať ako 56 resp. 90-dňovú.

Ďalším opatrením je oddebnovanie ostenia pri pevnosti betónu v tlaku pod 3 MPa za podmienky, že čerstvo oddebnované ostenie dokáže preniesť zaťaženie od vlastnej váhy. V Rakúsku je odporúčaná hodnota oddebnovania 2 – 3 MPa (pevnosť v tlaku meraná vo vrchole klenby). Oddebnovať by sa malo po 10 až 14 hodinách, optimálne po 12-tich hodinách. Pre kruhový profil polomeru 6 m a hrúbke ostenia minimálne 25 cm nie je potrebné oddebnovacia pevnosť preukazovať statickým výpočtom.

Posledným opatrením je ošetrovanie a ochrana betónu tak, aby bolo zabránené vzniku povrchových trhliniek na betónových konštrukciách. Tuhúci betón je potrebné chrániť proti vplyvu vnútorného alebo vonkajšieho namáhania. Toto sa najlepšie dosahuje pomocou ošetrovacieho voza. Plášť voza tvorí tepelnoizolačný a parotesný materiál vo vzdialenosti 100 – 150 mm od povrchu ostenia. Dĺžka ošetrovacieho voza je v dĺžke troch blokov betonáže sekundárneho ostenia (min. 30 m). Ošetrovací vozík ide v bezprostrednom závесе za debniacim vozom. Doba ošetrovania trvá spravidla 72 hodín resp. pokiaľ sa nedosiahne pevnosť 35 % koncovej pevnosti betónu v tlaku.

3.6 Záver

Realizovanie ostenia z nevystuženého betónu má priaznivý ekonomický a časový vplyv na výstavbu. Okrem skrátenia doby výstavby má vplyv na cenu diela vzhľadom na ušetrenie

materiálu (oceľovej výstuže) a prácnosti počas vystužovania. Pri použití minimálneho vystuženia sa jedná o ušetrenie približne 8 t/blok, pri hrúbke ostenia 30 cm 95 kg/m³.

Podmienkou použitia sú však vhodné geologické podmienky a preukázanie možnosti použitia statickým výpočtom.

Ďalšou podmienkou je prijať opatrenia na obmedzenie vzniku trhlín ako receptúra betónovej zmesi, oddebňovanie a ošetrovanie betónu.

Aktualizáciou predpisu [4] boli niektoré z týchto podmienok už stanovené. Dodržanie týchto podmienok je prvým krokom k vhodnému použitiu ostenia z nevystuženého betónu. Taktiež nie je v bežných prípadoch vzniknutých trhlín potrebné vyjadrenie projektanta, stačí sledovať podmienky uvedené v predpise.

Najdôležitejším faktorom úspešnej realizácie nevystuženého ostenia však ostáva dodržiavať podmienky stanovené projektom a predpisom, ako aj dôsledná kontrola prác.

Literatúra

- [1] STN EN 1990 Eurokód 0 Zásady navrhovania konštrukcii
- [2] STN EN 1992 Eurokód 2 Navrhovanie betónových konštrukcií
- [3] STN EN 13670 Zhotovovanie betónových konštrukcií
- [4] TKP 26 Tunely
- [5] Saurer, E.; Höser, S.; Mattle, B.: Ein Bemessungskonzept für unbewehrte und faserbewehrte Tunnelinnenschalen, Beton- und Stahlbetonbau, 2011, 106, 371-376
- [6] Küpfer, H.B.; Küpfer, H.; Stegbauer, A.: Tragfähigkeit von schlanken Druckgliedern aus unbewehrtem Beton, Bauingenieur 59, 1984, 173-180
- [7] Kriterien für die Anwendung von unbewehrten Innenschalen für Straßentunnel, Heft B92, Bast, April 2013
- [8] Innenschalenbeton, OBV, Dezember 2012