

UNIKÁTNÍ LÁVKA PRO PĚŠÍ Z UHPC V OBCI ČEPERKA ■ UNIQUE FOOTBRIDGE FROM UHPC IN THE ČEPERKA VILLAGE

Jan Tichý, Jan Komanec,
Bohuslav Slánský ml.,
Stanislav Ševčík, Jiří Kolísko

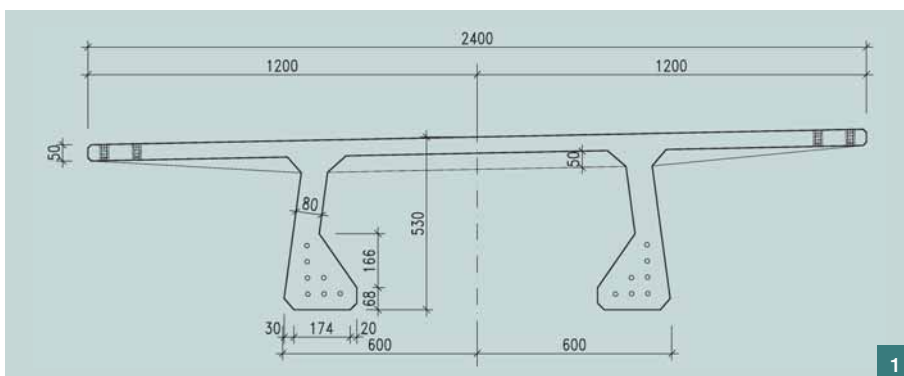
Lávka pro pěší přes Opatovický kanál, která byla realizována jako prefabrikovaný předem předpjatý nosník z ultra vysokohodnotného betonu, byla pilotním projektem použití UHPC pro SŽDC. UHPC jiné receptury byl použit i na zábradelní panely s vylehčovacími otvory. V příspěvku je popsán návrh a výroba předpjatého nosníku, výsledky laboratorních zkoušek UHPC a výroba a zkoušky zábradelních panelů. ■ A footbridge over the Opatovický channel, built as a precast prestressed beam from UHPC, was a pilot project of using UHPC for SŽDC (Railway Infrastructure Administration). UHPC of different recipe was used for railing panels with openings. The article describes design and manufacturing of the pretensioned beam, results of the laboratory tests of UHPC and manufacturing and testing of the railings panels.

Ultra vysokohodnotný beton (UHPC) je dalším moderním a kvalitativně novým materiálem na bázi cementového pojiva s výjimečnými parametry v oblasti mechanických vlastností a trvanlivosti. V současnosti je intenzivně dále rozvíjen po celém světě a byl již použit na řadě konstrukcí v Severní Americe, Japonsku, Austrálii i v západní Evropě. Také v České republice již našel tento typ materiálu své uplatnění při rekonstrukci mostu přes rychlostní komunikaci R10 u Benátek nad Jizerou a stavbě unikátní lávky pro pěší přes Labe v Čelákovících (*Beton TKS 4/2014, pozn. redakce*). Nejčastěji nachází UHPC uplatnění v mostních konstrukcích, hlavně u menších mostů a lávek pro cyklisty a pěší. Jsou však známy i aplikace v konstrukcích pozemních staveb, např. prefabrikované stěnové panely v Aubervilliers ve Francii nebo tenkostěnné fasádní panely v Malmö. [1 až 8]

NÁVRH NOSNÍKU Z UHPC

V polovině roku 2014 se na stavbě „Modernizace železniční trati Hradec Králové – Pardubice – Chrudim, 1. stavba – zdvoukolejnění úseku Stěblová – Opatovice nad Labem“ naskytla příležitost realizovat experimentální stavbu mostního nosníku z UHPC u lávky pro pěší přes Opatovický kanál (objekt SO 04-38-09).

V původním projektu byla navržena monolitická jednostránková konstrukce s konzolami o rozpětí 15,3 m z beto-



nu C35/45-*XC4*, *XF3*. Konstrukce lávky byla navržena jako dodatečně předpjatá dvěma 12lanovými kabely z lan $\varnothing 15,7$ mm. Předpokládaná spotřeba betonu byla 14 m^3 .

Projektant prováděcího projektu navrhl výrazně štíhlejší a efektivnější nosník tvaru dvojitého T, předem předpjatý a zhotovený z UHPC třídy C110/130-*XF4* (obr. 1). Objem UHPC je cca o 2/3 menší než při použití běžného betonu, tedy cca 4 m^3 . Při návrhu bylo plně využito vlastností UHPC, což umožnilo realizovat tenkostěnnou konstrukci předepnutou 14 lany $\varnothing 15,7$ mm. Tloušťka konzol je 50 mm a žeber 80 mm. Z důvodu zachování tuhosti konstrukce je horní deska zesílena žebry v osové vzdálenosti 1 m, výšky 50 mm mezi trámy, zmenšující se směrem k okraji konzoly. Zábradlí je uchyceno pomocí zabetonovaných pouzder v okraji desky. Prefabrikovaná lávka je z výrobních důvodů navržena s jednostranným sklonem. Ve výrobě byl prefabrikát vybetonován v pootočené formě s vodorovným povrchem, což usnadnilo jeho výrobu. Prefabrikát je doplněn monolitickým příčnickem se zavěšenými křídly z betonu C35/45-*XF4* o celkovém objemu 1 m^3 .

Výsledná konstrukce svými parametry výrazně převyšuje parametry původního návrhu, beton lávky je navíc mrazuvzdorný a zcela nenasákavý. Prvek je navržen k montáži včetně příčníků a křidel a celková hmotnost je menší než 13 t, což je pro betonovou lávku velmi příznivá hodnota. Z hlediska návrhu se tak otevírá cesta pro aplikaci jednoduchých, snadno vyrobitelných lávek s vysokou životností, bez nároků na údržbu, které lze v krátké době osadit na místo použití běžně dostupnou technikou v již dokončeném stavu např. i včetně zábradlí.

Obr. 1 Tvar předem předpjatého nosníku lávky pro pěší z UHPC ■

Fig. 1 Cross section of the pretensioned UHPC footbridge beam

VÝROBA PŘEDEM PŘEDPJTÉHO NOSNÍKU Z UHPC

Pro výrobu předem předpjatého nosníku byla navržena třída betonu C110/130-*XF4* s rozptýlenou ocelovou výztuží dle Model Code 2010, *fib*, Final Draft 09/2011.

Čerstvý UHPC s rozptýlenou ocelovou výztuží byl vyráběn na betonárně provozovny Štětí v míchačce s automatickým ovládacím systémem o maximálním objemu $1,5 \text{ m}^3$ s nuceným mícháním.

Po předchozím předepnutí předpínacích lan byl čerstvý UHPC dopravován od betonárny do výrobní haly speciálním vozíkem a pak bádli do ocelové formy kombinované s překližkou. Postup dávkování, míchání a celé výroby nosníku byl přesně zadán v technologickém předpisu.

Ukládání čerstvého UHPC do forem důkladně očištěných od nečistot a opatřených separačním prostředkem probíhalo plynule bez jakéhokoliv ztuhnutí. UHPC se pomalu rozléval sám, povrch byl zarovnávan latí. Poté byl postříkán prostředkem proti odpařování vody a hlazen ocelovým hladítkem, dokud se na povrchu nepřestaly vytvářet vzduchové bubliny (obr. 2a až c).

VÝSLEDKY LABORATORNÍCH ZKOUŠEK UHPC

Souběžně s výrobou předem předpjatého nosníku byla v Kloknerově ústavu ČVUT v Praze provedena celá řa-



da doprovodných zkoušek na různých zkušebních tělesech – trámečcích $40 \times 40 \times 160$ mm, trámčích $100 \times 100 \times 400$ mm a krychlích o hraně 100 a 150 mm. Výsledky zkoušek jsou určeny vždy z průměru tří těles a jsou uvedeny v tab. 1 až 3.

Před betonáží nosníku byly do konstrukce nainstalovány odporové tenzo-

metry pro měření deformací v krátkých časových intervalech během předpínání nosníku a následně v delších intervalech pro stanovení vývoje deformací vlivem objemových změn a účinku předpětí. V současné době stále probíhá kontinuální měření, jehož výsledky budou prezentovány na 23. Betonářských dnech 2016 v Litomyšli.

VÝROBA ZÁBRADELNÍCH PANELŮ Z PROBARVENÉHO UHPC

Namísto původně navrženého ocelového zábradlí navrhl zpracovatel PDPS ocelové sloupky, do kterých budou vsazeny výplně – zábradelní panely z UHPC. V zadávací projektové dokumentaci byl předepsán barevný odstín DB 602, který měl být dodržen nejen u ocelových

Tab. 1 Technické parametry UHPC na trámečcích ■

Tab. 1 Technical parameters of the UHPC in test beams

Stáří vzorku [d]	Trámečky $40 \times 40 \times 160$ mm		
	Objemová hmotnost [kg/m^3]	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	Pevnost v tlaku [MPa]
23	2 380	25,1	128,5
29	2 390	27,9	133,5
58	2 390	28,2	143

Tab. 2 Technické parametry UHPC na krychlích ve stáří 29 dní

■ Tab. 2 Technical parameters of the UHPC in cubes, time 29 days

Zkušební těleso	Krychle o hraně 150 mm		Krychle o hraně 100 mm	
	Objemová hmotnost [kg/m^3]	Pevnost v tlaku [MPa]	Objemová hmotnost [kg/m^3]	Pevnost v tlaku [MPa]
vzorek č. 1	2 433	130,7	2 387	123,5
vzorek č. 2	2 417	121,4	2 389	128
vzorek č. 3	2 411	116,4	2 388	124,6

Tab. 3 Technické parametry UHPC na trámčích ■

Tab. 3 Technical parameters of the UHPC in test beams

Stáří vzorku [d]	Trámce $100 \times 100 \times 400$ mm		
	Objemová hmotnost [kg/m^3]	Trámcová pevnost [MPa]	Statický modul pružnosti [GPa]
30	2 380	104	43
58	2 400	115,5	43,7



Obr. 2 a) Postup ukládání čerstvého UHPC do formy, b) aplikace prostředku proti odpařování vody, c) hlazení povrchu nosníku po aplikaci prostředku proti odpařování vody, d) čelo nosníku s výztuží pro příčník a křídla ■ Fig. 2 a) Casting the fresh UHPC into a mould, b) application of an agent against water evaporation, c) smoothing the beam surface after application of the agent against water evaporation, d) face of the beam with reinforcement for a cross beam and wing walls

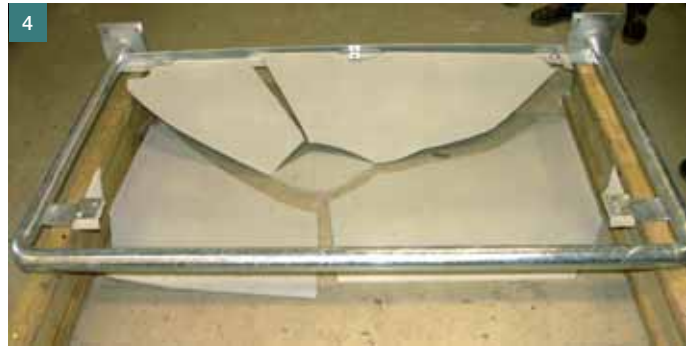
Obr. 3 Prototypy mostního zábradlí s probarvenou výplně z UHPC (žlutá, šedá bez probarvení, bílá) ■ Fig. 3 Prototype of the bridge railing with coloured filling from UHPC (yellow, grey without colouring, white)

Obr. 4 Deska z UHPC tloušťky 13 mm po statické zatěžovací zkoušce
 ■ Fig. 4 UHPC board of 13 mm thickness after a static load bearing test

Obr. 5 Různé odstíny probarvených dlaždic z UHPC podobné odstínu DB 602
 ■ Fig. 5 Different shades of coloured tiles from UHPC, similar to the DB 602 shade

Obr. 6 Zábradelní panel z probarveného UHPC s výztužnou sítí určený pro lávku v Čeperce
 ■ Fig. 6 Railing panel from coloured UHPC with a reinforcing net intended for the Čeperka footbridge

Obr. 7 a) Statická zkouška zábradelního panelu tloušťky 33 mm
 b) průběh deformace ■ Fig. 7 a) Static test of the railing panel of 33 mm thickness, b) deformation process



sloupků, ale i u zábradelních panelů.

Protože jednotlivé složky UHPC musely být navažovány laboratorními váhami s přesností na gramy, musela být k výrobě těchto zábradelních panelů použita míchačka s nuceným oběhem M 250. Postup dávkování, míchání a celé výroby fasádních panelů byl přesně zadán v technologickém předpisu.

Do forem důkladně očištěných od nečistot a opatřených separačním prostředkem byla vložena výztužná síť a přesně zakotvena na podélné úhelníky. Pak byl z míchačky plynule naléván čerstvý UHPC, který se bez jakéhokoliv zhutnění pomalu rozléval sám, povrch byl zarovnáván ocelovým hladítkem.

Metodika a postup zkoušení

V první fázi projektu byly navrženy a vyrobeny plné deskové výplňové panely z UHPC s tloušťkami 13 a 20 mm různě

barevného provedení, které byly osazeny do rámu mostního zábradlí. Pro jejich uchycení bylo navrženo několik variant, z kterých byl pro zatěžovací zkoušky vybrán systém, kdy je na dolním okraji deska liniově podepřena a bodově stabilizována třemi šrouby a u horního okraje je upevněna bodově ve dvou místech. Prototypy mostního zábradlí s probarvenou výplní z UHPC jsou na obr. 3.

Statická zatěžovací zkouška pilotních desek

Statická zatěžovací zkouška pilotních desek vycházela z požadavků daných normou pro mostní zábradlí. Byla však mírně modifikována tak, aby bylo možné její snadné provedení. Desky o tloušťkách 13 a 20 mm byly na vodorovné lavici zatěžovány postupně závažími o hmotnosti v násobcích 25 kg, která byla umístěna na střed desky. By-

ly zaznamenávány deformace pomocí odporového úchylkoměru umístěného ve středu horní hrany desky, kde byly vzhledem k uložení očekávány maximální průhyby (tab. 4).

Vyhodnocení zkoušek a návrh dalšího řešení

Jak je patrné z tab. 4, výplňové desky o tloušťkách 13 a 20 mm nevyhověly zadaným požadavkům statické zatěžovací zkoušky (1,75 kN). Na obr. 4 je vidět výplňovou desku tloušťky 13 mm po statické zatěžovací zkoušce.

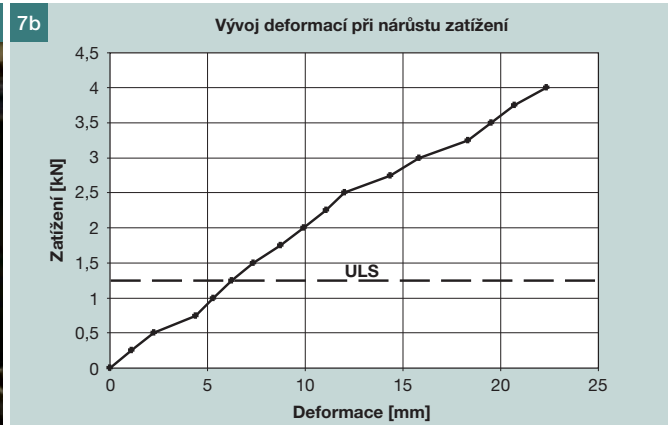
Přesto tyto výsledky přispěly k lepší predikci chování prvků z UHPC a posloužily k návrhu dalšího řešení. Byly zaznamenávány také střednědobé deformace v řádu několika hodin. Podrobnější data ze statických zkoušek lze najít v [9].

Hmotnost plné desky o tloušťce 20 mm byla 71 kg, což bylo z hlediska



Tab. 4 Naměřené deformace během statické zkoušky ■ Tab. 4 Deformations measured during the static test

Krok č.	Vnesené zatížení		Naměřená deformace [mm]	
	[kg]	[kN]	tl. 13 mm	tl. 20 mm
0	0	0	0	0
1	25	0,25	2,96	0,6
2	2,5	0,5	6,19	2,03
3	75	0,75	10,15	3,36
4	100	1	destrukce	5,87
5	125	1,25		14
6	150	1,5		nadměrná deformace ukončení zkoušky





Obr. 8 Příprava dynamické zkoušky – náraz měkkého tělesa ■ Fig. 8 Preparation of a dynamic test – impact of a soft object

Obr. 9 a) Lávka pro pěší z UHPC přes Opatovický kanál připravená v Přefě, b) transport lávky na stavbu, c) zabetonovaná ložiska pro uložení nosníku, d) osazování lávky na místo, e) první zátěžový test lávky ■ Fig. 9 a) Footbridge from UHPC over the Opatovický channel ready in Prefa factory, b) transporting the footbridge to the construction site, c) bearing pads for fitting of the beam, d) installation of the footbridge in place, e) first load bearing test

Obr. 10a,b,c Lávka pro pěší po dokončení ■ Fig. 10a,b,c Completed footbridge

snadné montáže hraniční. Další zvýšení hmotnosti nebylo žádoucí, a proto byly nově navrženy zábradelní panely sice s větší tloušťkou, avšak s vylehčovacími otvory. Žebra byla zesílena výztužnými sítěmi.

Zábradelní panely pro lávku pro pěší v obci Čeperka měly být vyrobeny v odstínu DB 602, proto byla nejdříve vyrobena série dlaždic s různými dávkami anorganických pigmentů a dlaždice byly odeslány starostce obce Čeperka, aby vybrala požadovaný odstín.

Na obr. 5 je znázorněna série dlaždic s různými odstíny, na obr. 6 je vidět již hotový zábradelní panel z probarveného UHPC.

Výsledky statických a dynamických zkoušek nově navržených zábradelních panelů

Vzhledem ke změně tvaru ocelového rámu na projektu lávky bylo nutné zvětšit rozměry výplňového panelu. Tím došlo k jeho zvýšenému namáhání, a bylo tedy nutné jej zesílit klasickou betonářskou výztuží (\varnothing 6 mm) a použít lineární upevnění po všech čtyřech hranách.

Při statické zkoušce dosáhl testovaný panel únosnosti cca 260 % požadovaného zatížení (4,5 kN). Přírůstky deformací byly až do porušení víceméně lineární (obr. 7a,b).

Dynamická zkouška tohoto panelu dopadla také pozitivně. Byla provede-

na dle [13], avšak opět bylo nutné přistoupit k její drobné modifikaci, aby bylo možné její snadné provedení. Předmětem této dynamické zkoušky jsou dvě kyvadlové rázové zkoušky – náraz měkkým tělesem o hmotnosti 50 kg (pytel naplněný skleněnými kuličkami o průměru 3 mm) (obr. 8) a tvrdým tělesem (ocelová koule o hmotnosti 3 kg). Požadavky normy byly splněny – žádná část výplňového panelu se nezlomila ani neoddělila, ačkoliv zde byly patrné trhliny přes celou tloušťku průřezu po nárazu měkkého tělesa.

Vývoj zábradelních panelů z UHPC nadále probíhá. V současné době je snahou vytvořit panely, které bude možné upevnit do ocelových rámu pouze podél kratších stran, a tím výrazně snížit cenu použitého ocelového rámu. Dalším cílem je ekonomická a tvarová optimalizace panelu.

MONTÁŽ LÁVKY

Naložení nosníku lávky pro pěší přes Opatovický kanál v obci Čeperka, jeho přeprava na stavbu a uložení na předem připravená ložiska proběhlo 14. října 2015 (obr. 9a až e). Ocelové sloupky a zábradelní panely byly osazeny po uložení nosníku v první polovině listopadu 2015.





ZÁVĚR

Použití UHPC při stavbě lávky pro pěší přes Opatovický kanál ukazuje, že vysoké požadavky na UHPC lze splnit i za použití složek betonu běžně dostupných v ČR. Dalším přínosem bylo ověření, že je reálné vyrobit i velmi tenkostěnný výrobek, který je bez kaveren a vzduchových pórů, a lze vyhovět náročným požadavkům architektů na tvar i odstín pohledové plochy zábradelních panelů.

Výsledky doprovodných zkoušek potvrdily poznatky z literatury a ukázaly, že mostní desky z UHPC měly zhruba dvojnásobnou pevnost v tlaku než desky z běžného betonu. V budoucnu bude mít UHPC velké uplatnění zejména při stavbách pozemních komunikací a stojí za to se touto problematikou dále zajímat.

I když se zdá, že předem předpjaté nosníky z UHPC oproti nosníkům z běžného železobetonu jsou ekonomicky náročnější, přesto jsou jednoznačně výhodnější. Celková hmotnost je zhruba o polovinu nižší, a tím se ušetří na manipulaci s nosníky a základové konstrukce nemusí být tak robustní. To má velký přínos pro omezování skleníkových emisí, a tím snižování zátěže prostředí. Velkým přínosem UHPC bude tak kromě

zvýšení užitečných vlastností a trvanlivosti, zvláště pak v podmínkách vysoce agresivního prostředí, také zlepšení životního a pracovního prostředí.

Projektant PDPS	Pontex, s. r. o.
Zkoušky UHPC	Kloknerův ústav ČVUT v Praze
Generální dodavatel	SMP, a. s.
Dodavatel lávky	Skanska, a. s.

Ing. Jan Tichý, CSc.
Skanska, a. s.
e-mail: jan.tichy@skanska.cz



Ing. Jan Komanec
Pontex, s. r. o.
e-mail: jkm@pontex.cz



Ing. Bohuslav Slánský ml.
Skanska, a. s.
e-mail: bohuslav.slansky2@skanska.cz



Ing. Stanislav Ševčík
Skanska, a. s.
e-mail: stanislav.sevcik@skanska.cz



doc. Ing. Jiří Kolísko, Ph.D.
Kloknerův ústav ČVUT v Praze
e-mail: jiri.kolisko@cvut.cz



Literatura:

- [1] TICHÝ, J., KOLÍSKO, J. Provozní zkoušky ultra vysokohodnotného betonu v prefabrikaci. In: 10. konference *Technologie betonu*. Pardubice: ČBS ČSSI, 2012.
- [2] TICHÝ, J., KOLÍSKO, J., KALNÝ, M., HUŇKA, P. First Practical Implementation of UHPC in Czech Republic. In: 8th CCC *durability of Concrete Structures*. Plitvice Lakes, 2012.
- [3] BLAIS, P. Y., COUNTERE, M. Precast, Prestressed Pedestrian Bridge – World's First Reactive Powder Concrete Structure. *PCI journal*. Torino, 1999, Vol. 44, No. 5. ISSN 0887-9672.
- [4] KALNÝ, M., ŠRŮMA, V. Nové realizace konstrukcí z vysokohodnotného betonu – poznatky z HSC/HPC symposia v Tokiu 2008. In: 8. konference *Technologie betonu*. Praha: ČBS ČSSI, 2009.
- [5] TICHÝ, J., KOLÍSKO, J., KALNÝ, M., KOMANEC, J. Destructive Tests of Prestressed UHPC Beams. In: 10th CCC *Concrete Offers for the Period of Economic Recovery*. Liberec, 2014.
- [6] TICHÝ, J., KOLÍSKO, J., TREFIL, V., HUŇKA, P. Výroba tenkostěnných fasádních panelů z bílého UHPC s výztužnou sítí. In: 12. konference *Technologie betonu*. Jihlava: ČBS ČSSI, 2014.
- [7] VÍTEK, J., KALNÝ, M., BROŽ, R., COUFAL, R., KOMANEC, J. et al. Lávka přes Labe v Čelákovících – První nosná konstrukce z UHPC v ČR. *Beton TKS*. 2014, roč. 14, č. 4, s. 10-19. ISSN 1213-3116.
- [8] VÍTEK, J. L., KOUKOLÍK, P., BROŽ, R., COUFAL, R., KALNÝ, M. et al. Výstavba první lávky z UHPC v ČR. In: 21. *Betonářské dny 2014*. Praha: ČBS ČSSI, 2014. ISBN 978-80-903806-7-7.
- [9] SLÁNSKÝ, B., ŠEVČÍK, S., PEŠKA, J. Výplň mostního zábradlí z UHPC betonu. In: *Mezinárodní symposium Mosty 2015*. Brno, 2015. s. 332–336.
- [10] TICHÝ, J., SLÁNSKÝ, B., SLÁNSKÝ, B. ML., ŠEVČÍK, S. Výroba a zkoušky zábradelních panelů z UHPC. In: 12. konference *Speciální betony*. Skalský Dvůr, 2015.
- [11] TICHÝ, J., KOMANEC, J., SLÁNSKÝ, B., ČÍTEK, J., HUBKA, M., KOLÍSKO, J. Lávka pro pěší z UHPC přes Opatovický kanál. In: 22. *Betonářské dny 2015*. Litomyšl, 2015.
- [12] TICHÝ, J., SLÁNSKÝ, B. ML., KOMANEC, J., KOLÍSKO, J. První lávka pro pěší z UHPC určená pro SŽDC. In: 22. *mezinárodní symposium Mosty 2016*. Brno, 2016.
- [13] CEN/TR 1316-6. *Silniční záchytné systémy – Záchytné systémy pro chodce – Část 6: Mostní zábradlí*. Praha: ÚNMZ, 2012. 44 s.