

# APLIKACE MODERNÍCH TECHNOLOGIÍ PŘI VÝSTAVBĚ LÁVKY PŘES LABE V HRADCI KRÁLOVÉ

Jiří Keclík, \*

Katedra betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební,  
České vysoké učení technické v Praze, Thákurova 7/2077, 166 29 Praha 6, Česká republika.  
jiri.keclik@fsv.cvut.cz

## ABSTRAKT

Článek se zabývá aplikací moderních a neobvyklých technologií při výstavbě unikátní lávky přes Labe v Hradci Králové ve spolupráci FSv ČVUT, zhotovitele SMP CZ a.s., projektanta Valbek a dalších společností. Článek prezentuje konstrukční uspořádání stavby a konkrétní aplikované způsoby řešení jejích částí. Hlavní pozornost je věnována shrnutí zkušeností s realizací UHPFRC segmentů mostovky a prezentace využití digitální fabrikace pro tvorbu tvarově složitých pilířů se zakřivením ploch o malých poloměrech ve dvou směrech. Článek shrnuje výsledky práce na projektu, který přesahuje běžné hranice mostního stavitelství.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Lávky • Segmenty • UHPC • Digitální fabrikace

## ABSTRACT

The article deals with the application of modern and unusual technologies in the construction of a unique footbridge over the Elbe in Hradec Králové in cooperation with the Faculty of Civil Engineering of the Czech Technical University, the contractor SMP CZ a.s., the designer Valbek and other companies. The article presents the structural arrangement of the construction and specific applied methods of its parts. The main attention is devoted to the summary of the experience with the realization of UHPFRC bridge deck segments and the presentation of the use of digital fabrication for the creation of a shape-complex pillar with curved surfaces of small radii in two directions. The paper summarizes the results of the work on a project that goes beyond the normal boundaries of bridge construction.

## KEYWORDS

Pedestrian bridges • Segments • UHPC • Digital fabrication

## 1. ÚVOD

Nová lávka v Hradci Králové byla navržena za účelem propojení centra města s rozvíjející se lokalitou okolo kongresového centra Aldis. Růst důležitosti oblasti odstartovala výstavba regionální centrály ČSOB. Futuristicky vyhlížející konstrukce lávky má nejen zlepšit dostupnost

nového objektu, ale vhodně jej vizuálně doplnit. Zároveň vytváří důstojnou spojnicí pro pěší mezi Šimkovými sady a druhým břehem Labe. Pro chodce tak nahradí nyní využívaný Labský most zatížený intenzivní silniční dopravou. Při její realizaci spolupracuje zhotovitel SMP CZ, a.s. kromě svých podzhotovitelů, kterými jsou například projekční kancelář Valbek s.r.o. nebo KŠ Prefa s.r.o., také s Fakultou stavební ČVUT. Taková spolupráce je potřebná pro zdárné a spolehlivé vyřešení neobvyklých detailů, které se mnohdy vymykají standardním řešením hojně užívaným u jiných mostních konstrukcí.

Konstrukce lávky se skládá ze dvou nesymetrických polí, hlavní pole překonávající řeku Labe má rozpětí téměř 69 m. Hlavním nosným prvkem je dvojice uzavřených lan o průměru 130 mm vedených v optimalizované geometrii, zajišťující požadovanou tuhost konstrukce. Mostovku tvoří vylehčené prefabrikované UHPFRC segmenty, kterými jsou vedeny čtyři nesoudržné předpínací kabely. V nadpodporových oblastech jsou tyto segmenty nahrazeny ocelovými příčníky. Osobité tvary spodní stavby podporují moderní vzhled celé stavby.

Tento příspěvek prezentuje část autorových zkušeností s využitím technologií, které jsou v dnešní době v České republice velice ojedinělé a na svůj masivní rozkvet ve stavebnictví stále ještě čekají. Shrnuje dále možné nesnáze spojené se zaváděním těchto technologií.

## 2. LÁVKA PŘES LABE

Lávka je založená na kombinaci mikropilot na pravém břehu (opěra O1) a ražených prefabrikovaných pilot na levém břehu (pilíř P2 a opěra O3).

Prefabrikované ražené piloty jsou v České republice nezvyklým řešením, jejich použití ale přináší všechny výhody prefabrikace, jako je vysoká úroveň kontroly kvality výroby a časová úspora na stavbě. Zároveň projektant i zhotovitel okamžitě získává znalost únosnosti pilotového základu a je schopný velmi přesně určit následné sedání stavby díky provádění dynamických zatěžovacích zkoušek. Jejich nevýhodou je především malá nebo žádná zkušenost českých geotechniků s jejich navrhováním podpořená absencí výuky výpočtů ražených pilot na českých vysokých školách. Z toho důvodu byl podrobný výpočet proveden zástupci podzhotovitelské společnosti na základě zkušeností a výsledků

\* Školitel: doc. Ing. Lukáš Vráblík, Ph.D., FEEng.



bludných proudů. S ohledem na to, že fenomén bludných proudů je znám především v České republice a světově dodavatelé nosných uzavřených lan ho neznají a neřeší, bylo nutné vyvinout spolehlivý způsob jak nevodivě oddělit nosná lana od zbytku konstrukce. Právě lité nylon je například oproti teflonu, který by se mohl nabízet, velmi dobrým řešením, které odolává i výraznému namáhání způsobenému tlakem lan. Během předepnutí lana dojde k odskrucení lávky a proces předpínání bude ukončen při dosažení požadované geometrie konstrukce. Následně dojde k fixaci lan utažením dvojic ocelových svorek na každém žebře. Tyto svorky jsou ve styku s nosným uzavřeným lanem opatřeny vrstvou 1 mm metalizace (zinku), která zajistí jak ideální přenos napětí, tak spojení oxidujícího zinku svorek i lana. Toto spojení zaručuje kvalitní protikorozní ochranu lana v místě spojení.

Tlaková rezerva v mostovce (respektive stav dekomprese při mezním stavu použitelnosti) je zajištěna čtyřmi nesoudržnými předpínacími kabely, které procházejí UHPFRC segmenty. Tyto kabely zvyšují tlakové napětí především ve spárách mezi segmenty. Kabely jsou navrženy ze 13 lan a jsou kotveny do ocelových příčniců nad opěrami.

Nad podporami byly UHPFRC desky mostovky nahrazeny ocelovými příčnicemi vyplněnými samozhutitelným vysokohodnotným betonem. Tyto prvky vytvářejí pevný a masivní kotvicí blok pro předpínací systém lávky.

Součástí ocelové konstrukce jsou rovněž štíhlá svislá žebra, představující spojení spodních nosných lan a UHPFRC segmentů mostovky. V průběhu výstavby jsou žebra vzájemně propojena pomocí montážního ztužení, které bude demontováno po předepnutí konstrukce.

Žebra geometricky pokračují do sloupků zábradlí. Zábradlí kopíruje rastr celé konstrukce a je sestaveno z úseků stejné délky jako UHPFRC segmenty. V madle zábradlí je integrován LED pásek zajišťující osvětlení lávky.

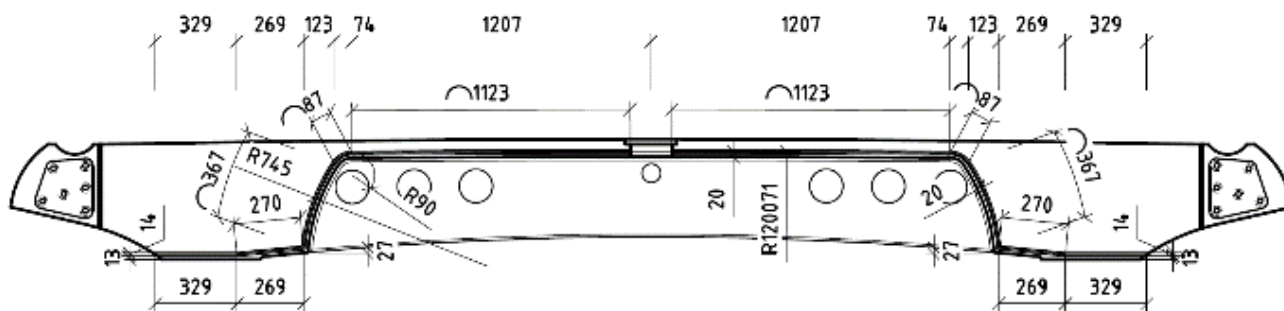
## 2.1. UHPFRC segmenty

Mostovka lávky je tvořena 39 prefabrikovanými UHPFRC segmenty délky 2,4 m a šířky 5,2 m. Z toho 37 prefabrikátů je typických a 2 náběhované umístěné z obou stran pilíře. Příčný řez segmentů je tvořen velmi tenkou deskou se dvěma

podélnými a dvěma příčnými trámy, které přispívají k celkové tuhosti prvku. Dílce jsou vyztuženy jak standardní betonářskou výztuží, tak rozptýlenou výztuží. Horní povrch je opatřen otiskem matrice RECKLI zajišťující protisklizové vlastnosti.

Vzhledem k veliké složitosti a nárokům na kvalitu segmentů bylo vyrobeno několik zkušebních dílců. Jedním z cílů jejich výroby bylo ověřit splnění vysokých nároků na kvalitu povrchu dílců neboť mostovka je navržena jako přímo pochozí. Zároveň bylo více než žádoucí postup betonáže optimalizovat a zkontrolovat, že bude dosaženo kvalitního probetonování všech míst segmentu. V neposlední řadě byl na zkušebních prvcích proveden test zálivky spáry. Ta nabývá tloušťky 15 mm na většině šířky segmentu, v místě odvodňovacích žlábků se však skokově rozšiřuje na tloušťku 250 mm, aby umožnila realizovat propojení s ocelovou konstrukcí uvažované jako vetknutí. Zálivka spáry je navržena jako vysokopevnostní s požadavky na pevnost v tlaku minimálně 95 MPa. Dále je od ní požadována maximální míra kompenzace smrštění. Z toho důvodu bylo nutné oslovit přední výrobce stavebních hmot a dostat se až k jejich samotné chemické podstatě. Pro dostatečnou kvalitu provedení spár je totiž nutné najít optimální poměr plnění zálivky, který zajistí dostatečnou tekutost, ale zároveň bude minimálně smršťovat, kamenivo v ní nebude segregovat ani při výšce zálivky 500 mm a dosáhne požadovaných mechanických vlastností. Vývoj finální zálivky v současné době stále probíhá a separátně se ho ujaly společnosti jako SPOLCHEMIE, MBCC Group nebo SIKA. Samotná zkouška zalití spáry mezi segmenty potvrdila, že provedení i takto tenké a zároveň vysoké spáry je technicky možné. Dále se ukázalo, že zálivka je v celé šíři a výšce homogenní.

Následně se zhotovitel pokusil o rozlomení dvojice spojených segmentů. Pokus ukázal, že i bez vzájemného prošroubování segmentů je nezlomí účinek dvojnásobku vlastní tíhy. Zatížení bylo aplikováno ve statickém schématu konzoly s vyložení délky jednoho segmentu. Dlužno podotknout, že pokus byl prováděn s oslabením spáry proříznutím diamantovým kotoučem průměru 250 mm.



Obrázek 3: Pohled na čelo typického segmentu

UHPFRC bylo navrženo ve spolupráci KŠ Prefa s.r.o. a Kloknerova ústavu ČVUT modifikací jejich dříve používané

směsi. Zpracované průkazní zkoušky následně potvrdily, že směs splní požadavky projektové dokumentace:

- Množství rozptýlené výztuže min. 1,5 %

- Min. průměrná pevnost v tlaku (28 d) 150 MPa
- Min. pevnost v tahu za ohybu (28 d) 20 MPa
- Min. modul pružnosti (28 d) 40 GPa
- SVP XC4 + XD3 + XF4

V průběhu optimalizace betonáže bylo nutné se vypořádat se složitým tvarem formy, který neumožňoval dostatečný odvod vzduchu. Zajištění odvodu vzduchu je při použití UHPFRC mimořádně důležité, ze směsi se totiž vzduch uvolňuje až 30 minut po jejím uložení. Ačkoliv by 1-2 mm hluboké kaverny způsobené neodvedením bublin vzduchu neměly vliv na životnost a spolehlivost konstrukce, nebyly esteticky přijatelné.

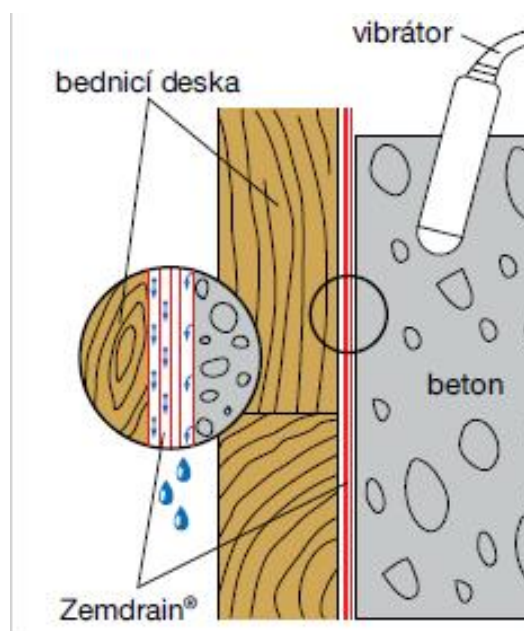


Obrázek 4: Forma s namontovaným záklopem

Během tvorby zkušebních prefabrikátů bylo proto nutné optimalizovat jak postup betonáže, tak i podmínky výroby betonu. Vzhledem k tomu, že na provzdušnění i dobu uvolňování betonu má významný vliv teplota prostředí i směsi, bylo betonování segmentů odloženo do podzimních měsíců, kdy již teploty nepřesahovaly 20 °C. Během míchání směsi byla zároveň do míchačky přidávána ledová tříšť, aby se dostatečně ochladila. Beton byl následně plněn do autodomíhače v němž se nechal míchat dalších zhruba 10 minut. Poté se z domíhače směs přemístila do bádie v níž bylo betonu umožněno uvolnit vzduch. Přemístění betonu do bádie zároveň umožnilo odebrat z povrchu betonu odloučené stopové množství mikrosiliky, která na povrchu segmentů tvořila nepřijatelné skvrny. Po provedení těchto úkonů byl beton ukládán z bádie do formy segmentu. Během betonáže byla forma naklápěna a byly uzavřeny odvzdušňovací otvory. Zajištění kvalitního finálního povrchu segmentů bylo rovněž dosaženo použitím fólie ZEMDRAIN, která umožnila pohlcení části vzduchu unikající do záklopu formy.



Obrázek 5: Segment při manipulaci na skládce

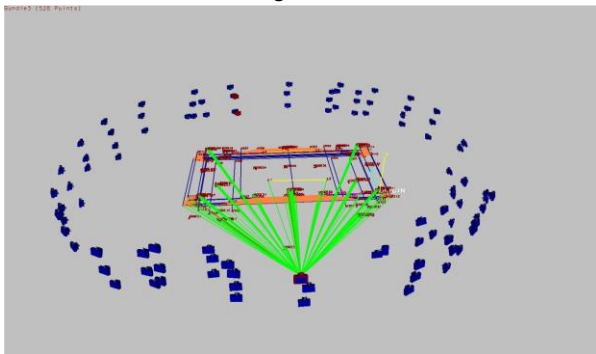


Obrázek 6: Schéma principu odvodu tekutiny z povrchu bednění fólie Zemdrain

Vzhledem k tomu, že na celou konstrukci jsou kladeny přísné nároky na geometrickou přesnost všech prvků, bylo prováděno měření jednotlivých segmentů. Každý ze segmentů byl ve stáří 3 dní ručně měřen pracovníky přefy měřidlem a každý třetí segment byl zaměřen fotogrametricky po 7 dnech od vybetonování. Fotogrametrií byla měřena především geometrie čel s důrazem na přesnost oblých úložných ploch, kde dochází ke styku ocelové konstrukce s betonovými segmenty. Segment byl umístěn na dvojici betonových svodidel, a to vně kryté haly. To při prvním měření způsobilo potíže při snímkování, za slunečního svitu, kdy odraz adhesivních terčů o průměru 6 mm na kontrolních bodech a nuggetech není ve světlém betonovém okolí dostatečný (kamera má vlastní bleskové osvětlení a může pracovat i za šera nebo i potmě). Díky použití speciálního filtru a vysokého clonového čísla bylo možno snímkovat, jakmile bylo slunce zakryto mraky. V příštích měřeních byla volena doba snímkování v pozdních odpoledních hodinách. Kolem segmentu bylo třeba zajistit zcela volný prostor o poloměru 5 m pro pohyb snímkujícího. Na přední podélné straně segmentu směrem k hale bylo vždy nalepeno 38 adhesivních terčů o

průměru 6,5 mm. Dále bylo účelně rozmístěno celkem 59 magnetických nuggetů na ocelových úhelnících nebo přilepených na spodní část segmentu, které umožnily sestavení prostorového modelu objektu ze všech pořízených snímků, jejichž osy jsou vzájemně konvergentní.

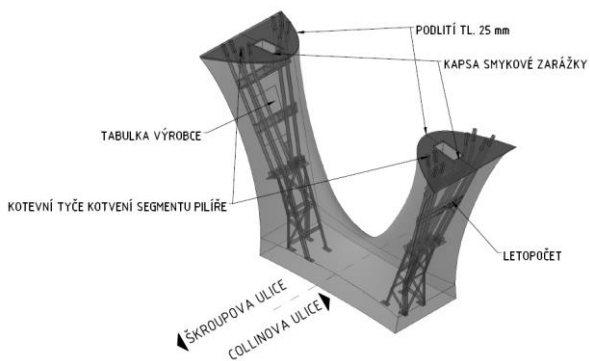
Prováděná měření umožnila prokázat, že jsou prefabrikáty vyrobeny nadstandardně přesně a jednotlivá čela nejsou vůči sobě zkroucená. Porovnání fotogrametrického měření s předpoklady projektu bylo prováděno nahráním dat z měření do 3D modelu segmentu a kontrolou vůči zadání.



Obrázek 7: Vizualizace postupu snímání segmentu

## 2.2. Pilíř P2

Pilíř P2 je autory i zhotovitelem více nazýván sochou než pilířem. Vybízí k tomu především velice složitý tvar, který je tvořený obecnými křivkami. Křivost pilíře na většině ploch není realizována pouze v jednom směru, nýbrž ve dvou, a to zároveň v malých poloměrech. Složitost tvaru je dále zvětšena tím, že přibližně 1 metr nad základem se dříví rozděluje a mezi sebou je propojený hmotou železobetonu ve tvaru sedla.



Obrázek 8: Vizualizace pilíře P2

Tento tvar byl výzvou pro všechny renomované dodavatele a projektanty bednění v České republice a znamenal několik nezdárných pokusů vybednit tvar tradičně tesařsky. Z toho důvodu navrhl autor a zhotovitelská firma SMP CZ a.s. využít digitální fabrikace. Ideou bylo bednění skládat jako horizontální sendvičovou konstrukci z deskového materiálu obrobenu CNC 5-osou frézou do přesného tvaru pilíře. Samotnou bednicí formu tak měly tvořit obrobene hrany deskového materiálu, nikoliv plochy.

Samotný pilíř je poměrně výrazně namáhán ohybovým momentem a smykovou silou, zároveň však není možné jeho průřez příliš zvětšovat z estetických důvodů. Proto je silně

vyztužen a navržen ze samozhutitelného betonu SCC 50/60 XF4,  $D_{max}=16$  mm. Zároveň je uvnitř pilíře navrženo osazení kotevního přípravku nadpodporového ocelového segmentu P2. Tento kotevní prvek je v každém z dvou dříví tvořen 8 šikmými nerezovými tyčemi o průměru 60 mm s vyfrézovaným závitem M56 na koncích.

Tyto skutečnosti výrazně ovlivnily finální výběr materiálu, který bednění bude tvořit neboť nebylo přípustné, aby se do bednění vtlačily distanční tělesa. Dalším posuzovaným parametrem byla schopnost odolávat atmosférické vlhkosti jak z hlediska objemových změn materiálu, tak i odolnosti obrobenech hran při změnách vlhkosti. V neposlední řadě se při výběru dbalo na kvalitu obrobene hrany, která bude následně definovat vzhled finálního povrchu betonu pilíře. Jako materiál vhodný pro obrábění byly posuzovány desky z extrudovaného polystyrenu, recyklované desky z tetrapaků PackWall, vodovzdorné překližky a masivní bidesky. Nejlépe z testovaných materiálu vyšly bidesky a desky z extrudovaného polystyrenu. S ohledem na riziko vtlačení distancí byly nakonec vybrány právě bidesky. Vzhledem k tomu, že masivní dřevo je rizikové s ohledem na objemové změny vlivem změn vlhkosti ve venkovním prostředí umocněné umístěním pilíře přímo vedle řeky, bylo nutné zvolit opatření, které bude změny redukovat. Z toho důvodu bylo rozhodnuto, že všechny hrany bednicích desek se po obrobení a složení formy ve výrobní opatří vrstvou laku. Zároveň se jako odbedňovací prostředek zvolila odbedňovací pasta SIKA Separol S-5, která taktéž zvyšuje odolnost povrchu bednění vůči vlhkosti a zároveň je velmi trvanlivá na rozdíl od standardního odbedňovacího oleje.



Obrázek 9: Kontrolní montáž bednicí formy v areálu prefabrikace bednění SMP CZ a.s. - PIM Beroun

Podrobný projekt bednění byl zpracován v 3D CAD software SolidWorks. Původní myšlenka byla dále zpracována a bednění tak dostalo podobu „krabice“ sestavené z dílčích bloků tvořených v půdoryse 6 dílcí. Tyto bloky byly dále rozděleny i vertikálně, z důvodu snazší manipulace a transportu, do 6 výškových úrovní. V projektu došlo také k optimalizaci množství použitého materiálu tak, aby co nejušporněji opisoval tvar pilíře. „Prázdný“ prostor proto vyplnily ramenáty, které byly velmi přesně vyrobeny na stejném CNC stroji jako bednicí bloky. Pro zajištění celkové tuhosti a stability bednění se tyto bednicí bloky a ramenáty obalily rámovým bedněním a sepnuly spínacími tyčemi vedenými mimo objem betonu pilíře.

Pro velmi netradiční pilíř si jeho autoři vymysleli i atypicky vypadající letopočet. Ten nebylo možné provést standardním řešením pomocí silikonové matrice, která se běžně při výstavbě mostů používá. Z toho důvodu bylo využito znovu digitální fabrikace. 3D modely jednotlivých číslic byly vyrobeny technologií 3D tisku na tiskárně PRUSA i3 MK3S+. Aby bylo možné číslice přilepit v zakřivené ploše a bylo zajištěno snadné odbednění, byl pro výrobu číslic zvolen flexibilní filament TPE, který je dostatečně pružný, aby požadavkům vyhověl.



Obrázek 10: Pohled na výsledný pilíř P2 a atypický letopočet

### 3. ZÁVĚR

Projekt lávky přes Labe v Hradci Králové je unikátní a jeho navržené detaily se vymykají ověřeným řešením. To nutí autora příspěvku ve spolupráci se zhotovitelem a projektantem realizační dokumentace navržené řešení optimalizovat na

základě současných možností stavebnictví a souvisejících oborů. Článek shrnuje zkušenosti získané s realizací UHPFRC segmentů a upozorňuje na problémy, které při jejich tvorbě mohou vznikat, pokud je tvar konstrukce složitý. Z uvedených informací vyplývá, že je vhodné už při základním návrhu tvaru konstrukce přemýšlet nad tím, jak bude betonována, aby bylo možné efektivně z bednicí formy odvést vzduch a nebyly nutné následné sanace, které mohou mít nižší životnost než vybetonovaný prvek.

Článek dále shrnuje úspěšnou realizaci pilíře – sochy s využitím digitální fabrikace. Obsahem je prezentace unikátního způsobu bednění a shrnutí návaznosti na výběr materiálu. Metoda tohoto způsobu se osvědčila a pomocí ní bylo dosaženo výborných výsledků. Problémem takového způsobu bednění je ale jeho extrémně vysoká cena a to obzvláště v případě, že se forma použije pouze jednou.

Jedním ze závěrů spolupráce na tomto projektu je, že v případě návrhu takto složitých a atypických staveb je vhodné klíčové detaily, pokud nejsou zaběhnuté a prověřené léty zkušeností, pečlivě verifikovat již při tvorbě zadávací dokumentace. Zároveň se potvrzuje, že je nutné pečlivě vybalancovat estetickou a technickou stránku konstrukce tak, aby se ani jeden z uvedených aspektů neocital na hraně proveditelnosti. Díky tomu je možné docílit výrazného snížení rizik jak na straně investora, tak i zhotovitele.

Zůstává ovšem otázkou, zda podobné projekty jsou ekonomicky a environmentálně udržitelné po celou dobu cyklu životnosti stavby. Jako další námět k pokračování práce na projektu autor navrhuje vyhodnotit po dokončení stavby dopad na životní prostředí a porovnat ho s méně odvážnou a neobvyklou konstrukcí.

## Reference

- Keclík, J., Navarová, L., Stržínek, V., Vráblík, L., Harazim, P., Lombardini, D. (2022), Pedestrian bridge over the River Elbe in Hradec Králové, *IABSE Symposium Prague 2022, Praha*.
- Valbek, spol. s r.o. (2022). *Realizační dokumentace stavby – SO 201 Lávka přes Labe*, Praha.
- Kloknerův ústav Českého vysokého učení technického v Praze (2021). *Expertní zpráva č. 2100J206-2: Průkazní zkouška cementového materiálu ultra high performance concrete (UPHC) XC4, XD3, XF4 s rozptýlenou výztuží*, Praha.
- SMP CZ a.s. (2021). *VTD bednění pilíře P2, lávka přes Labe*, Praha.