

ZKUŠENOSTI Z VÝROBY SPŘAŽENÉ DŘEVO-UHPC KONSTRUKCE

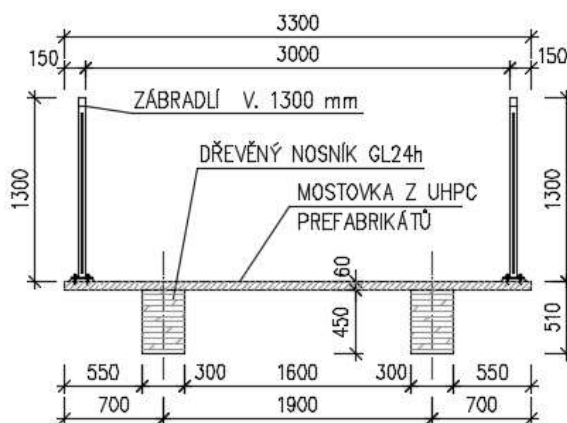
Milan Holý, David Čítek, Petr Tej, Lukáš Vráblík

1 Úvod

Článek prezentuje výsledky experimentálního vývoje inovativního mostního systému, který je tvořen trámy z lepeného lamelového dřeva spřaženými s mostovkou z prefabrikovaných panelů z UHPC. V článku je představen navržený mostní systém a realizovaný experimentální program, který zahrnoval mimo jiné ověření ohybové pevnosti tenkých desek z UHPC a také výrobu prototypu zkušební dřevobetonové konstrukce v měřítku 1:1 s následným provedením zatěžovací zkoušky celé konstrukce a následně i vlastních panelů mostovky z UHPC. Článek je zaměřen především na problematiku návrhu, výroby a zkoušení mostovky z UHPC.

2 Popis spřažené dřevo-UHPC konstrukce

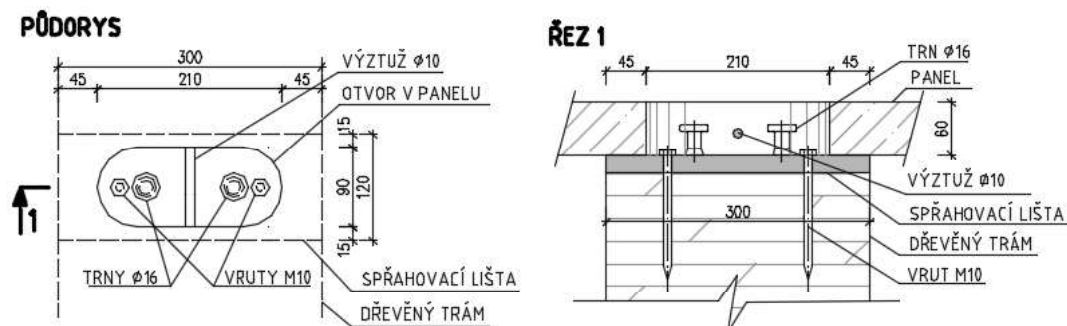
Návrh mostního systému vycházel z předpokladu, že most bude sloužit jako lávka pro chodce pro zatížení chodci a cyklisty a přejezd záchranného či údržbového vozidla do 3,5 t, s volnou šířkou mezi zábradlím 3,00 m. Nosná konstrukce byla navržena jako dva dřevěné trámové nosníky z lepeného lamelového dřeva spřažené s deskou mostovky z UHPC. Celý systém je dobře patrný ze schématu vzorového příčného řezu realizované experimentální konstrukce, které je znázorněno na **Obr. 1**.



Obr. 1 Vzorový příčný řez experimentální konstrukcí

Za účelem optimálního využití jednotlivých materiálů bylo zvoleno statické schéma prostý nosník. Mostovka je složena z příčných prefabrikovaných dílců konstantní tloušťky 60 mm typické skladebné délky 1,50 m a šířky 3,30 m. Segmenty mostovky lze univerzálně používat pro různá rozpětí mostu. Průřez dřevěných trámů je naopak uvažován variabilní v závislosti na rozpětí konstrukce. Dimenze jednotlivých trámů se stanoví na základě statického výpočtu pro konkrétní okrajové podmínky. Spřažení (**Obr. 2**) je

realizováno pomocí speciálních ocelových desek se smykovými trny, které jsou zabudovány do dřevěného trámu a upevněny dvojicí vrutů. Prefabrikované segmenty mostovky jsou opatřeny otvory pro spřahovací prvky.



Obr. 2 Detail osazení panelu na spřahovací prvky - ocelové desky s navařenými smykovými trny

Skrz otvory pro smykové trny prochází výztuž, která slouží pro manipulaci s dílci. Panely jsou k sobě lepeny materiálem na bázi epoxidu a ve styčné spáře jsou spojeny pomocí čtyř šroubových spojů zajišťujících přitlačení čel pro řádné vytvrzení lepidla a přenos tahových sil ve spáře vznikajících od teplotního zatížení. Všechny otvory se na stavbě po osazení panelů na dřevěné trámy s předem zabudovanými spřahovacími prvky zalijí zálivkou z UHPC.

3 Ohybová pevnost tenkých desek z UHPC

Jako podklad pro návrh mostovky z materiálu UHPC byla experimentálně ověřována ohybová únosnost tenkých desek z UHPC. Pro stanovení ohybové pevnosti UHPC byly provedeny zkoušky ve tříbodovém ohybu na trácích 100 x 100 x 400 mm a 150 x 150 x 700 mm se zářezem podle ČSN EN 14651+A1 a ve čtyřbodovém ohybu na trácích 150 x 150 x 700 mm, 100 x 100 x 400 mm podle ČSN P732452 a na trácích 40 x 40 x 160 mm ve tříbodovém ohybu bez zářezu podle ČSN EN 12390-5, které jsou vzhledem k malému objemu těles s oblibou používány v praxi. V rámci experimentálního programu byla navržena také speciální zkušební tělesa půdorysných rozměrů 2 000 x 250 mm o tloušťkách 40, 50, 60, 70 a 80 mm, která byla testována ve čtyřbodovém ohybu s rozpětím podpor 1 900 mm (**Obr. 3 vlevo**). Neporušené krajní třetiny nosníku byly po zkoušce ve čtyřbodovém ohybu dále použity na zkoušku ve tříbodovém ohybu s rozpětím 600 mm (**Obr. 3 vpravo**). Polovina zkušebních těles byla zkoušena v poloze stejné jako při betonáži a druhá polovina horním povrchem dolů. Cílem zkoušek speciálních těles bylo vyhodnotit ohybové pevnosti pro konkrétní okrajové podmínky.



Obr. 3 Experimenty prováděné v Kloknerově ústavu - desková tělesa při zkoušce ve čtyřbodovém ohybu s rozpětím 1900 mm (vlevo) a ve třibodovém ohybu s rozpětím 600 mm (vpravo)

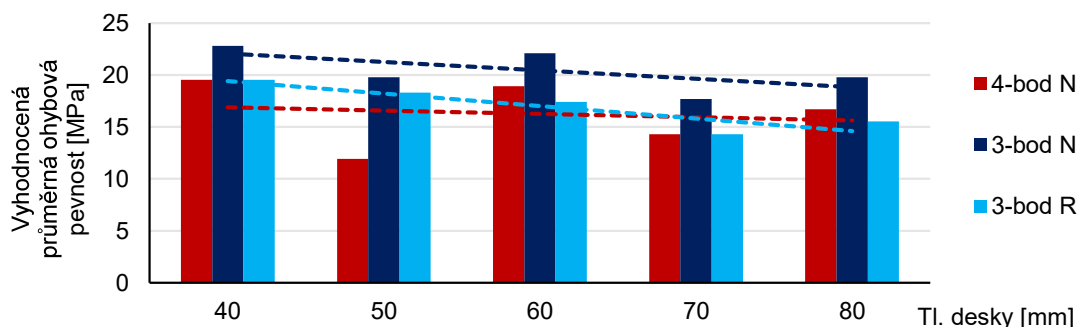
Výsledky vyhodnocení ohybových zkoušek podle různých platných norem (**Tab. 1**) potvrdily, že ohybová pevnost (pevnost v tahu za ohybu) UHPC se významně liší v závislosti na velikosti zkušebního tělesa a typu zkoušky. Trámce 40 x 40 x 160 mm vykazovaly cca 2,4x větší ohybovou pevnost než trámce 150 x 150 x 700 mm. Trámce 100 x 100 x 400 mm vykazovaly cca 1,4x větší ohybovou pevnost než trámce 150 x 150 x 700 mm. Tento výsledek potvrzuje skutečnost, že vliv size efektu a zejména stěnového efektu (usměrnění drátků o stěny formy) na mechanické vlastnosti je u malých těles naprosto zásadní. Rozdíly mezi tří- a čtyřbodovým ohybem u normových těles stejné velikosti byly zaznamenány okolo 8-9 % a jsou dány zejména skutečností, že v případě třibodového ohybu je místo porušení pevně definováno, zatímco u čtyřbodového ohybu dochází k porušení v nejslabším místě ve vnitřní třetině rozpětí nosníku.

Tab. 1 Porovnání vyhodnocených hodnot ohybové pevnosti z různých typů ohybových zkoušek

Test č.	Typ zkoušky	Vyhodnocená průměrná ohybová pevnost [MPa]	Porovnání s testem č. 1
1	4-bod, 150 x 150 x 700 mm	12,5	100 %
2	3-bod, 150 x 150 x 700 mm se zářezem	13,5	108 %
3	4-bod, 100 x 100 x 400 mm	17,5	140 %
4	3-bod, 100 x 100 x 400 mm se zářezem	19,1	153 %
5	3-bod, 40 x 40 x 160 mm bez zářezu	29,9	239 %
6	4-bod, tl. 40-80 mm, rozpětí 1900 mm, normálně	16,3	130 %
7	3-bod, tl. 40-80 mm, rozpětí 600 mm, normálně	20,4	164 %
8	3-bod, tl. 40-80 mm, rozpětí 600 mm, obráceně	17,0	136 %

Při porovnání výsledků deskových těles (**Obr. 4**) bylo možno pozorovat určitý trend rostoucí ductility a ohybové pevnosti se snižující se tloušťkou desky. Desky tl. 40 mm vykazovaly cca o 15 % vyšší ohybovou pevnost oproti deskám tl. 80 mm. Vyhodnocená ohybová pevnost ze zkoušek v třibodovém ohybu u deskových těles byla o cca 25 % vyšší oproti čtyřbodovému ohybu. Rozdíly mezi oběma testy u deskových těles byly cca 2,5násobně vyšší oproti rozdílům zjištěným u normových těles (rozdíly 8-9 %), což je dáno výrazně vyšším rozpětím u deskových těles. Porušení v případě čtyřbodového ohybu může nastat v kterémkoliv místě na úseku cca 650 mm u deskových těles a na úseku cca 200 mm u trámů 700 x 150 x 150 mm. Ohybová pevnost u deskových těles betonovaných ve

vodorovné poloze byla cca o 20 % nižší při zatěžování v obrácené pozici. Tento rozdíl byl dán zejména nerovnoměrným rozdělením drátků po výšce průřezu vlivem gravitace.



Obr. 4 Porovnání ohybové pevnosti vyhodnocené z testů na deskových pruzích

4 Výroba zkušební konstrukce

Pro verifikaci výrobních detailů a postupů navrženého systému spřažených dřevo-UHPC mostních konstrukcí se podařilo realizovat experimentální konstrukci v měřítku 1:1. Výroba zkušební konstrukce probíhala ve firmě KŠ-Prefa s.r.o. ve Štětí. Experimentální konstrukce byla realizována šířky 3,30 m a délky 10,24 m. Staticky se jednalo o prostě uloženou spřaženou dřevo-betonovou mostní konstrukci o jednom poli s teoretickým rozpětím 9,50 m.

Nosnou konstrukci tvořily 2 dřevěné nosníky obdélníkového průřezu výšky 450 mm a šířky 300 mm z lepeného lamelového dřeva třídy GL24h umístěné v osové vzdálenosti 1900 mm a spřažené s deskou mostovky tloušťky 60 mm z ultra-vysokohodnotného betonu UHPC 110/130 vyztuženého drátků v objemu 1,5 % a KARI sítí.

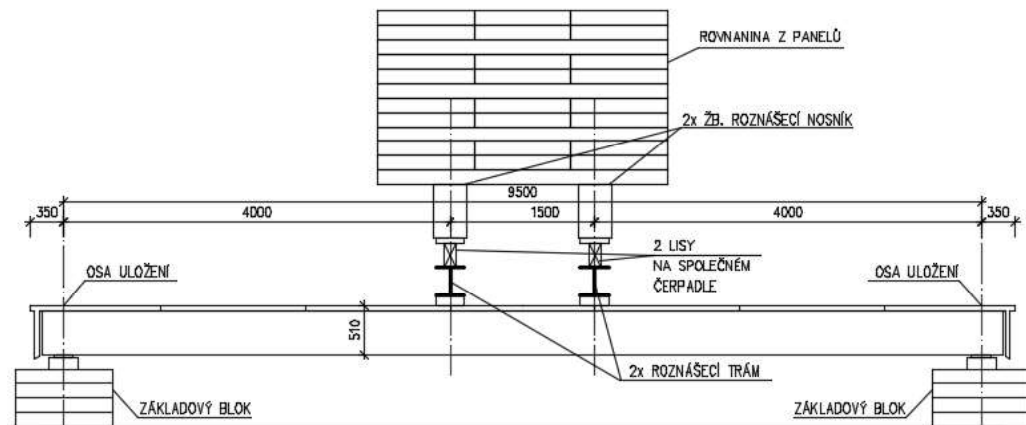


Obr. 5 Vlevo zkušební uložení panelů na trámy před instalací spřahovacích prvků, vpravo osazené spřahovací prvky do kapes na trámech v areálu firmy KŠ-Prefa s.r.o. ve Štětí

4.1 Zatěžovací zkouška zkušební konstrukce

Pro ověření únosnosti a chování konstrukce při zatížení byla realizována zatěžovací zkouška experimentální konstrukce. Zatěžovací zkouška byla provedena čtyřbodovým ohybem s teoretickým rozpětím 9,5 m do porušení, síly byly vnášeny ve vzdálenosti 4 m od podpor. Zatěžovací zkouška prokázala, že navržená konstrukce je bezpečná a její

chování odpovídá předpokladům uvažovaným při návrhu. Konstrukce se i při návrhové kombinaci zatížení v MSÚ chovala stále elasticky. Skutečná únosnost konstrukce byla cca 5x vyšší než návrhové zatížení. Porušení nastalo tahovým porušením dřevěného trámu.



Obr. 6 Schéma zatěžovací zkoušky do porušení

4.2 Zatěžovací zkouška panelů mostovky

Po celkové zatěžovací zkoušce byly z konstrukce vyřezány tři segmenty šířky 1 m a byla na nich provedena zatěžovací zkouška mostovky v příčném směru. Segmenty byly postupně zatěžovány pomocí pytlů s pískem. Byly testovány různé zatěžovací stavy – charakteristické zatížení chodci, zatížení na konzole a v poli pro dosažení únosnosti. Během zkoušky byl zaznamenáván vývoj průhybů a zatížení pole a obou konzol v závislosti na čase. Výstupy měření byly porovnávány s teoretickým odhadem průhybů na základě lineárního výpočtu. Zatěžovací zkouška prokázala, že mostovka se chová v mezním stavu použitelnosti pružně, vývoj průhybů v lineární oblasti v zásadě odpovídal předpokládaným průhybům stanoveným na prutovém výpočetním modelu. Únosnost panelů mostovky výrazně překračovala návrhové zatížení, ani při aplikaci 3 silničních panelů a cca 2,5 t pytlů s pískem se ji nepodařilo dosáhnout.



Obr. 7 Vlevo simulace charakteristické hodnoty zatížení chodci - 5 kN/m² pomocí pytlů s pískem, vpravo snaha o dosažení únosnosti mostovky – zatížení odpovídá cca 23 kN/m²

5 Závěr

V rámci vývoje mostního systému využívajícího spřažení dřeva a prefabrikátů z UHPC se za podpory grantu TAČR podařilo provést množství experimentů, které byly přínosné nejen z hlediska navrhování dřevo-UHPC spřažených konstrukcí, ale také z hlediska konstrukcí z UHPC obecně. Porovnání různých typů ohybových zkoušek zaměřených na stanovení ohybové pevnosti UHPC vyztuženého drátky pomohlo kvantifikovat rozdíly vyhodnocené ohybové pevnosti mezi různými typy zkoušek. V praxi běžně využívaná tělesa o rozměrech 40x40x160 mm cca dvojnásobně nadhodnocují pevnost v tahu za ohybu oproti doporučeným referenčním zkouškám ve třibodovém ohybu na trámcích podle směrnice Technických pravidel ČBS [5]!

V rámci experimentálního programu byla dále realizována také experimentální konstrukce v měřítku 1:1, na které byly verifikovány výrobní detaily a postupy. Provedené experimenty prokázaly, že navržená konstrukce je realizovatelná a z hlediska výrobních nákladů konkurenceschopná k běžně používaným typům konstrukcí lávek pro pěší. Zatěžovací zkoušky ukázaly, že navržená konstrukce je bezpečná a její chování odpovídá výpočtovým předpokladům.

Článek byl napsán s podporou programu NAKI II ministerstva kultury České Republiky, č. projektu DG20P02OVV005.

Literatura

- [1] Holý, M., Čítek, D., Tej, P., Vráblík, L.; *Ohybová pevnost tenkých desek z UHPFRC*, 25. Betonářské dny (2018), 2018, ISBN 978-80-906759-6-4
- [2] Holý, M., Čítek, D., Tej, P., Vráblík, L.; *Material Properties of Thin UHPC Slabs Used for Timber-Concrete Composite Bridge*, The 10th International Conference on Short and Medium Span Bridges (SMSB 2018), Quebec Canada, 2018
- [3] Holý, M., Čítek, D., Tej, P., Vráblík, L.; *Experimentální stanovení ohybové pevnosti desek z UHPFRC*, BETON TKS. 2019.
- [4] Holý, M.; *Optimization of Timber-UHPC Composite Bridges*. Disertační práce, ČVUT v Praze, 2020
- [5] Coufal, R.; M. Kalný; J. Kolísko; Vítek J. L.; *Technická pravidla ČBS 07 – Ultravysokohodnotný beton – UHPC*. ČBS, 2022
- [6] Holý, M., Čítek, D., Tej, P., Vráblík, L.; *The Experimental Timber-UHPC Composite Bridge*, SUSTAINABILITY. 2021, 13(9), ISSN 2071-1050.
- [7] Holý, M.; Vráblík, L.; Kolísko, J.; *Lávka spřažená z dřevěných nosníků s prefabrikovanou mostovkou z desek z UHPC*, MOSTY 2022 27. MEZINÁRODNÍ SYMPOZIUM sborník příspěvků. Ostrava: SEKURKON s.r.o., 2022.
- [8] Holý, M.; Čítek, D.; Tej, P.; Kolísko, J.; Marek, J.; Vráblík, L.; *Výroba zkušební kompozitní mostní konstrukce ze dřeva a UHPC*; Sborník ke konferenci 27. BETONÁŘSKÉ DNY. Praha 1: Česká betonářská společnost ČSSI, 2020.

Ing. Milan Holý, Ph.D.

✉ Kloknerův ústav ČVUT
Šolínova 7, 166 08 Praha 6
Czech Republic
☎ +420 224 353 519
😊 milan.holy@cvut.cz
URL www.klok.cvut.cz

Ing. David Čítek

✉ Kloknerův ústav ČVUT
Šolínova 7, 166 08 Praha 6
Czech Republic
☎ +420 224 353 521
😊 david.citek@cvut.cz
URL www.klok.cvut.cz

doc. Ing. Lukáš Vráblík, Ph.D., FEng.

✉ Fakulta stavební ČVUT
Thákurova 7, 166 29 Praha 6
Czech Republic
☎ +420 244 354 661
😊 lukas.vrablik@fsv.cvut.cz
URL concrete.fsv.cvut.cz

Ing. Petr Tej, Ph.D.

✉ Kloknerův ústav ČVUT
Šolínova 7, 166 08 Praha 6
Czech Republic
☎ +420 224 353 512
😊 petr.tej@cvut.cz
URL www.klok.cvut.cz