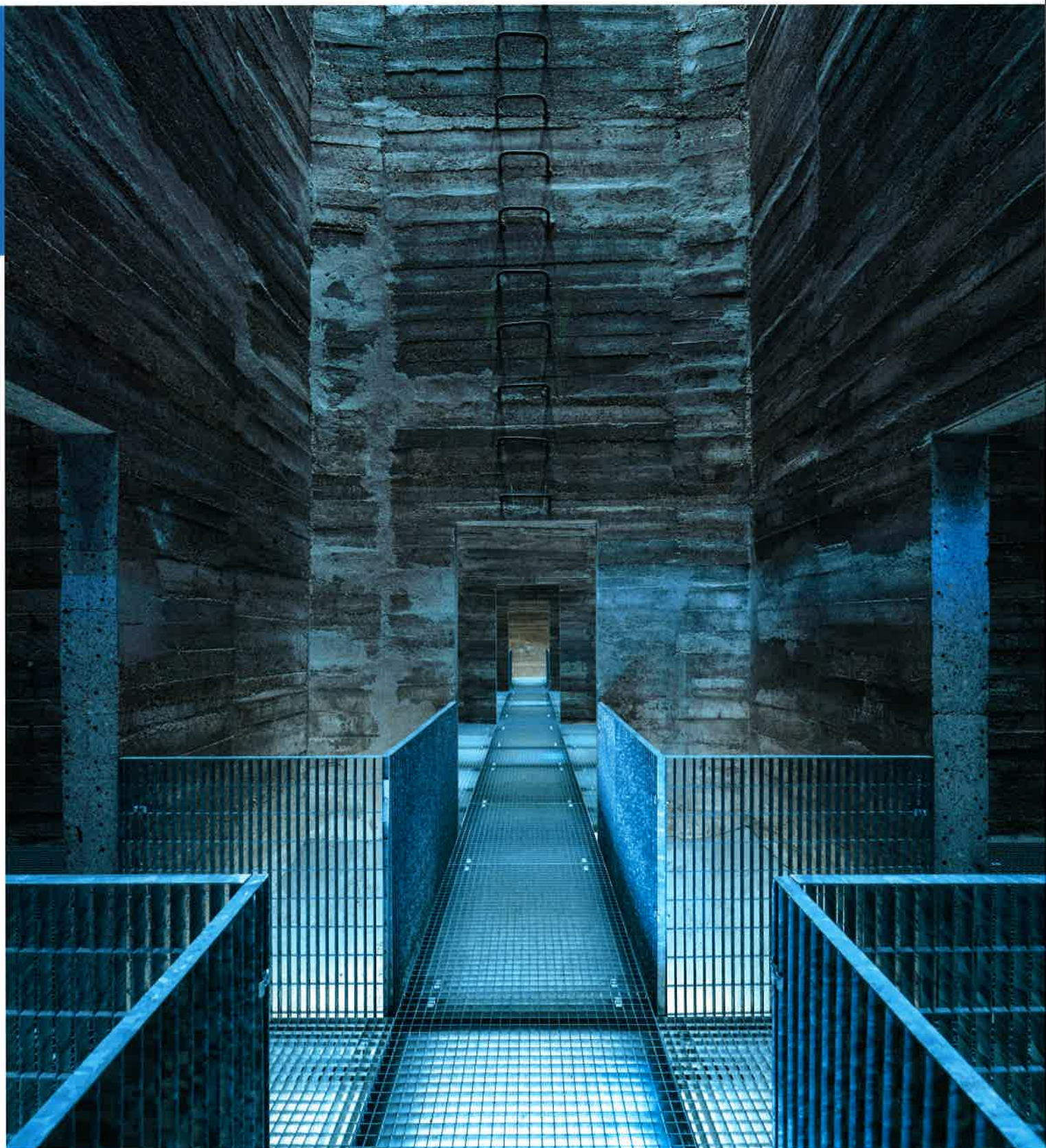


BETON 2024

#133, 24. ROČNÍK

www.ebeton.cz



JSME ČASOPIS O BETONU,

jediný v České republice
a na Slovensku.

Díky podpoře svazů si můžeme
dovolit být nezávislí.

Protihluková stěna s otiskem matrice realisticky reprodukcující gabionovou stěnu
(foto: archiv NOE-Schaltechnik Georg Meyer-Keller)

vydávání časopisu podporují

SVB

Svaz výrobců betonu ČR
K Cementárně 1261, 153 00 Praha 5
mob.: 602 839 429
e-mail: svb@svb.cz
www.svb.cz

CBS

Česká betonářská společnost ČSSI
Na Zámecké 9, 140 00 Praha 4
mob.: 775 124 100
e-mail: cbsbeton@cbsbeton.eu
www.cbsbeton.eu

SSBK

Sdružení pro sanace betonových konstrukcí
Veveří 331/95, 602 00 Brno
mob.: 604 158 023
e-mail: ssbk@email.cz
www.ssbk.eu

ŠÉFREDAKTORKA A JEDNATELKA Ing. Lucie Šimečková **REDAKČNÍ RADA** prof. György L. Balázs, Vesselin Barliev, prof. Peter J. M. Bartoš, prof. Ing. Zdeněk P. Bažant, Ph.D., dr. h. c., prof. Ing. Vladimír Benko, PhD., prof. Francesco Biasioli, prof. Ing. Juraj Bilčík, PhD., doc. Ing. Jiří Dohnálek, CSc., prof. Ing. Ludovít Fillo, PhD., Ing. Jan Gemrich, prof. Ing. Petr Hájek, CSc. (předseda), prof. Ing. Leonard Hobst, CSc. (místopředseda), Ing. Adam Hubáček, Ph.D., Ing. arch. Jitka Jadrníčková, Ing. Milan Kalný, prof. Ing. Alena Kohoutková, CSc., FEng., prof. Ing. Jiří Kolísko, Ph.D., doc. Ing. arch. Patrik Kotas, Ing. Milada Mazurová, prof. Ing. Martin Moravčík, PhD., doc. Ing. Pavel Reiterman, Ph.D., Ing. arch. Jiří Šrámek, Ing. Michal Števíla, Ph.D., prof. Ing. RNDr. Petr Štěpánek, CSc., Ing. Vladimír Veselý, prof. Ing. Jan L. Vitek, CSc., FEng.

ROČNÍK dvacátý čtvrtý **ČÍSLO** 2024 (vyšlo dne 10. 12. 2024) **vydává** BETON TKS, s. r. o., pro Svaz výrobců betonu ČR, Českou betonářskou společnost ČSSI a Sdružení pro sanace betonových konstrukcí **GRAFICKÉ ZPRACOVÁNÍ** Petra Lorse Tynklová **TISK** Astron print, s.r.o., Mladoboleslavská 1128, 197 00 Praha 9 **REDAKCE** Beton TKS, s. r. o., K Cementárně 1261/25, 153 00 Praha-Radotín, www.ebeton.cz **INZERCE** 602 839 429, e-mail: inzerce@betontks.cz **PŘEDPLATNÉ** 775 632 852, e-mail: predplatne@betontks.cz **CENA VÝTISKU BETON 2024** 280 Kč vč. DPH (v ceně je zahrnuto balné a distribuce)

Časopis je zařazen na Seznam recenzovaných neimpaktovaných periodik vydávaných v České republice schválený Radou pro výzkum a vývoj. Vydávání povoleno Ministerstvem kultury ČR pod číslem MK ČR E-11157 ISSN 1213-3116. Autoři odpovídají za původnost příspěvků a jsou povinni respektovat autorská práva třetích stran.

FOTOGRAFIE NA TITULNÍ STRANĚ Obilné silo Automatických mlýnů v Pardubicích – průchod skrz obilné zásobníky (foto: Petr Polák | petrpolakstudio.cz)



REALIZACE EXPERIMENTÁLNÍCH TIŠTĚNÝCH KONSTRUKCÍ

Oto Melter, Zuzana Auská, David Čítek, Aleš Hvizdal, Karel Hurtig, Jiří Kolísko

Na půdě Kloknerova ústavu dlouhodobě probíhá vývoj technologie 3D tisku cementových směsí, jehož součástí je i ověřování dosažených poznatků pomocí tisku experimentálních konstrukcí. Obecně jsou tyto konstrukce navrhovány tak, aby v co největší míře splňovaly standardní parametry, které jsou v praxi požadovány od analogických produktů zhotovených konvenčním způsobem. Na představených realizacích, jimiž jsou tištěná lávka v Solopiscích a lavička v Kutné Hoře, jsou prezentovány základní směry výzkumu. Řešeny jsou jak mechanické vlastnosti konstrukcí, a to i v dlouhodobém horizontu, tak neméně zásadní otázky designu.

Lávka v Solopiscích

Lávka byla navržena, vyrobena a otestována v rámci výzkumu 3D tisku na Kloknerově ústavu. Jde o jednu z nejstarších realizací, na které je dlouhodobě sledována odolnost v exteriéru.

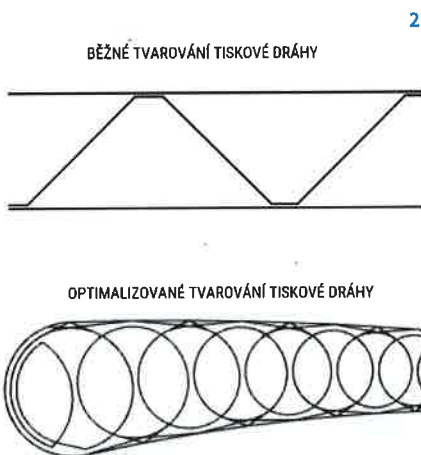
Konstrukce využívá statické tříkloubové schéma. Výhodou je možnost rozdělení konstrukce na menší části vhodné pro tisk a zároveň pro přepravu. Staticky se konstrukce chová jako určitá, což znamená, že napětí v konstrukci není ovlivněno teplotními vlivy. Reakcí

na změny teploty na konstrukci je prodloužení nebo zkrácení jednotlivých částí, což má za následek vertikální posun středového kloubu při současném otáčení patních kloubů.

Architektonický tvar konstrukce je inspirován historickými litinovými konstrukcemi a odpovídá průběhu napětí v jednotlivých částech. Dalším z určujících pravidel bylo co nejplynulejší tvarování tiskové dráhy. Standardní výrobní metody převážně ústí v polygonální ostré tvary výrobku, který je mož-

né jednoduše popsat a realizovat například pomocí bednění. Pro 3D tisk jsou tyto tvary nevhodné, a naopak měkké přechody a radiusy jsou cestou k plynulemu pohybu tiskové hlavy a tím pádem rychlejšímu i přesnějšímu tisku. Na lávce byla tato myšlenka s úspěchem otestována jedním z možných konkrétních řešení, a to dráhou složenou převážně z kružnic (obr. 2).

Samotný tisk probíhal o rychlosti 120 mm/s, při tiskové stopě šířky 20 mm, výšce vrstvy 10 mm a trval p





4



5

1 Podélný pohled na lávku osazenou na výpusti rybníka v Solopiscích 2 Tvarování tiskové dráhy 3 Tisk lávky v Kloknerově ústavu trval cca 6 h 4 Zatěžovací zkouška lávky 5 Vizualizace osazení lávky – příčný práh výpusti rybníka nahradil spodní táhlo trojúhelníkové konstrukce 6 Finální návrh 3D tištěné lávky 7 Osazování lávky na hrázi rybníka

bližně 6 h pro obě poloviny lávky dohromady (obr. 3). Hmotnost tištěného oblouku je přibližně 1 400 kg.

Kompletaci lávky pro ověření únosnosti předcházela výroba opěr s táhlem, na které byla lávka provizorně usazena na dvoře Kloknerova ústavu (obr. 4). Zatěžování až do úrovně 5,7 kN/m² probíhalo v cyklech po 350 kg s kontrolním měřením mezi cykly. Pomocí potenciometrů byly měřeny hodnoty na koncích tištěných prvků, ve čtvrtinách rozpětí a ve vrcholu.

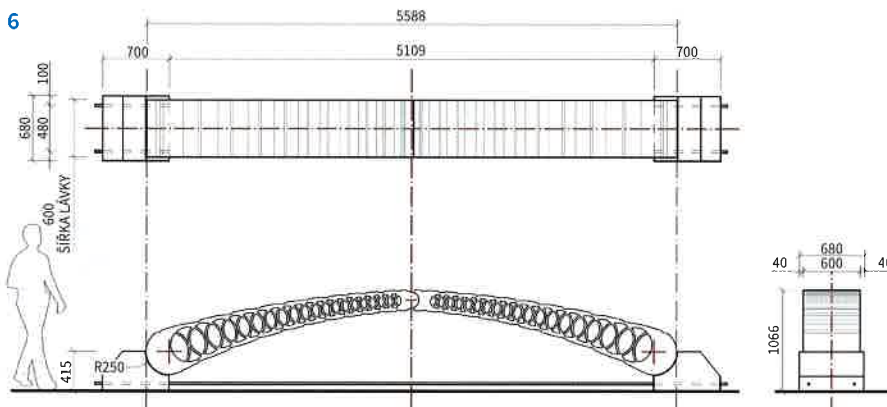
Z měření je patrný postupný pokles vrcholu lávky o 2,5 mm. Pravděpodobně se jedná z větší části o příspěvek od dotlačení olověných desek v kloubech a od stoupající teploty v průběhu měření. Po započtení těchto vlivů se zbytek průhybu konstrukce při maximálním zatížení pohyboval na úrovni 0,8 mm.

Lávka byla osazena na výpusti malého soukromého rybníku, kde byla nespornou výhodou možnost umístit ji nad příčný práh výpusti, který tak nahradil spodní táhlo trojúhelníkové konstrukce (obr. 5). Práh i okolní terén byly fotogrammetricky zaměřeny. Výsledný 3D model byl poté použit k vytvoření podélného řezu lávkou a k návrhu jejího založení (obr. 6). Příčný práh výpusti byl prodloužen o betonový základ provázaný s původním prahem. Každá z opěr je dodatečně propojena s betonovým podkladním blokem třemi závitovými tyčemi. Tyče byly poté dotaženy pro zajištění zásoby tlaku ve spáře mezi opěrou a podkladním blokem betonu.

Na základě laboratorních testů tiskového materiálu lze uvažovat velmi dobrou odolnost působení povětrnostních vlivů. U této lávky, kde je největším extrémům vystavena boční tisková stěna,

bude zajímavé z dlouhodobého hlediska sledovat působení mrazu v rýhách mezi jednotlivými tiskovými vrstvami. Tato místa jsou obecně u tištěných objektů považovaná za riziková a může na nich docházet k poškozování v důsledku omývání vodou nebo kořenovou aktivitou usazené náletové vegetace. Lávka je dlouhodobě monitorována od svého vy-

tištění a osazení do exteriéru v prosinci 2021 i následného přemístění na stálé místo u rybníka v Solopiscích, které proběhlo v říjnu 2023 (obr. 7). Při vizuálních kontrolách nebyly doposud objeveny žádné výrazné trhliny, které nebyly způsobeny původním smrštěním směsi při tuhnutí po tisku, a povrch lávky se jeví v dobrém stavu bez znatelné degradace.



7



Lavička X

Nejnovější experimentální realizací je tištěná lavička pro Kutnou Horu, která byla zhotovena na půdě Kloknerova ústavu podle vítězného architektonického návrhu doktorandky Kateřiny Goryczky. Koncept architektonického návrhu zkoumá tvarosloví gotiky adaptované pro technologii 3D tisku, která poskytuje možnost provedení požadovaných tvarů bez extrémní finanční zátěže výroby složitého bednění pro výrobu jednoho kusu. V základu objemný prvek je díky skulptivnímu tvarování opticky odlehčen. Pracováno je i se strukturou povrchu. Odlišně pojednané plochy v hloubce nejmasivnější části rozbíjejí monolitický pocit masy a podporují tak celkový dynamický výraz.

Před realizací došlo k detailnímu dořešení všech tvarových přechodů a optimalizaci polygonové sítě pro plynulý průjezd dráhy tiskárnou, tak aby vstupními daty pro tiskárnu byla co nejrovnoměrnější síť bodů (obr. 10).

Tento projekt nám umožnil vyzkoušet si realizaci poměrně velkého prvku metodou ztraceného bednění. Tloušťka stěny byla v tomto případě opět 20 mm, avšak zvolená výška vrstvy byla pro dosažení většího detailu zvolena 5 mm, namísto standardních 10 mm. Objem samotného tištěného bednění je pouze 124 litrů, což se pozitivně projevilo na ušetření váhy a usnadnění manipulace s tištěnou částí při následných krocích výroby lavičky.



8

Pro zajištění spolehlivosti je vnitřní zálivka lavičky opatřena ocelovou betonářskou výztuží. V podélném směru jsou osazeny tři smyčky prutů o \varnothing 10 mm, které jsou v příčném směru provázány s pruty o \varnothing 6 mm ve tvaru C (obr. 9).

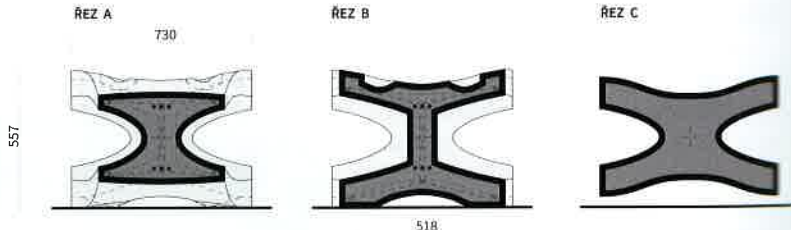
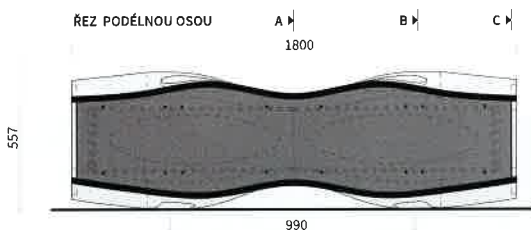
Zalítí vnitřku bylo provedeno s odstupem dvou týdnů – cementový tiskový kompozit prochází při tuhnutí větším smrštěním než vnitřní betonová zálivka, a tak bylo vhodné vyplnit bednění až po jeho největším smrštění, aby nedošlo k jeho popraskání vlivem stažení kolem plného jádra. Díly bednění byly osazeny

ocelovou výztuží (obr. 11) a betonáž poté probíhala ve třech úrovních s technologickými přestávkami pro omezení hydrostatického tlaku na výtisk bednění.

Následná manipulace a začištění detailů včetně pemrlování odhalených ploch zálivky bylo provedeno už po třech dnech od betonáže vnitřní výplně. Čela i sedací plochy lavičky byly opatřeny hydrofobním nátěrem, strukturovaná stojina byla natřena ochrannou barvou a zbytek povrchu lavičky je bez dalších úprav. Bude tak zajímavé sledovat trvanlivost a změny různé

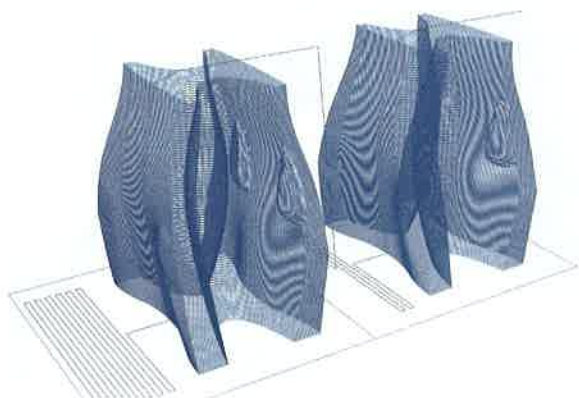
9a

9b



10

11



ošetřených částí. Celková hmotnost lavičky přesáhla 600 kg, její tvarování ale dovoluje snadnou manipulaci pomocí popruhů obepnutých kolem zúženého středu a jeřábu.

Technologie 3D tisku – benefity a úskalí

Jako nově se rozvíjející technologie představuje 3D tisk řadu výzkumných výzev a prezentované objekty nabízejí možná řešení některých z nich. Jako každá nová technologie potřebuje nalézt své optimální tvarosloví, které bude vycházet z funkčních principů. Při navrhování 3D tištěné konstrukce je zásadní otázkou topologie. Od počátku je potřeba zohlednit limity zvolené technologie – velikost tiskové plochy, rychlost tuhnutí směsi a její správné složení. Rychlost tuhnutí použité betonové směsi musí být správně nastavena vzhledem k velikosti objektu a tiskové dráze. Správné naplánování tiskové dráhy je klíčové, protože plynulý pohyb tiskové hlavy usnadní celý proces tisku, což vede k menšímu počtu tiskových vad, a v důsledku k lepšímu výsledku. Tento princip byl demonstrován v případě obou objektů. V případě lávky vý-

sledek nakonec zcela definoval vzniklý ornamentální design bez nutnosti konstrukci dále vyztužovat. V případě lavičky pak bylo pracováno s kombinací 3D tisku a běžných postupů vyztužení pomocí ocelových prutů.

Z výše uvedeného vyplývá, že estetika 3D tištěných konstrukcí je v podstatě neintuitivní; podoba je do značné míry určena použitou technologií a důslednou optimalizací celého procesu. Tradičně uváděné benefity, které použití 3D tisku ve stavebnictví přináší, jsou jednoduchá realizace lehkých, dutých, tenkostěnných a rozměrově složitých konstrukcí. Kromě toho není potřeba prakticky žádné bednění, snižují se nároky na ruční práci a při vhodné organizaci procesu tisku je možné i zkrácení doby výstavby. Realizací výše zmíněných objektů však vychází najevo, že jedním ze stěžejních problémů, které je potřeba vyřešit, je účinné a efektivní vyztužení konstrukcí. Odvrácenou stranou vyzdvihované tenkostěnnosti je nedostatečné krytí standardní ocelí. Vzniká tak potřeba nalezení alternativních metod vyztužení jako např. kompozitní vyztuž, která může být v budoucnu jedním z řešení těchto úskalí.



13

Tento článek byl zpracován za podpory projektů TAČR ID:FW06010422 – digiBeton a SGS 23/126/OHK1/2T/15.

Fotografie: kolektiv autorů KÚ ČVUT, Vanda Hvizdalová, Tomáš Rubín

12



8 Podélný pohled 9 a) Podélný řez, b) příčné řezy 10 Tisková dráha pro výrobu lavičky X 11 Výztuž vložená do bednění vytvořeného 3D tiskem 12 Sesazování dvou polovin tištěného bednění 13 Lavička v kontextu

Reference:

- [1] BALDA, V., BELDA, K., BERAN, L., BUREŠ, V., BURGETOVÁ, E. ET AL. 3D STAR: 3D tisk ve stavebnictví a architektuře = 3D print in civil engineering and architecture. [Liberec]: Technická univerzita v Liberci, 2022. ISBN 978-80-7494-632-5, s. 10.
- [2] ČÍTEK, D., BUREŠ, V., MELTER, O., HVÍZDAL, A., HURTIK, K., SUCHOMEL, J., KOLÍSKO, J. (2022). Experimentální vývoj 3D tisku cementových kompozitů. *BETON TKS*. 2022, roč. 22, č. 1, s. 7-11. ISSN 1213-3116.
- [3] DILAWAR RIAZ, R., USMAN, M., ALI, A., MAJID, U., FAIZAN, M. ET AL. Inclusive characterization of 3D printed concrete (3DPC) in additive manufacturing: A detailed review. Online. *Construction and Building Materials*. 2023, roč. 394. ISSN 09500618.
- [4] MELTER, O., ČÍTEK, D., HVÍZDAL, A., AUSKÁ, Z., GABRIEL, M. Additive Fabrication for Bridge Structures – Experimental Concrete Footbridge in Solopisky, *Digital Concrete*, Munich, 2024.
- [5] SUCHOMEL, J., BUREŠ, V., VÁLEK, J., ČÍTEK, D., KOLÍSKO, J. Experimental development of 3D printing using cement composites. In Abstract book WMCAUS. 2022.



Ing. arch. Oto Melter
oto.melter@cvut.cz



MgA. Zuzana Auská
zuzana.auska@cvut.cz



Ing. David Čítek, Ph.D.
david.citek@cvut.cz



MgA. Aleš Hvizdal
ales.hvizdal@cvut.cz



Ing. Karel Hurtig
karel.hurtig@cvut.cz



prof. Ing. Jiří Kolísko, Ph.D.
jiri.kolisko@cvut.cz

všichni: Kloknerův ústav ČVUT v Praze