

# 3D TISK KRÁTKÉHO SCHODIŠŤOVÉHO RAMENE

Jan Tichý, Jiří Kolísko, Oto Melter, Milan Holý, Pavel Trávníček, Václav Nežerka, Jiří Němeček

V článku je představen vývoj a výroba prototypu drobného prefabrikovaného stavebního prvku, resp. schodišťového ramene, užívaného pro přístup do buňkoviště na stavbě, jenž byl zhotoven pomocí 3D tisku betonu. Pozornost je věnována návrhu, statickému výpočtu, směsi použité pro 3D tisk, vlastnímu tisku a vyhodnocení deformací stěny pomocí techniky korelace digitálního obrazu a algoritmu diskrétní Fourierovy transformace, převozu na stavbu a uložení prvku.

## 3D PRINTING OF A SHORT FLIGHT OF A PREFABRICATED STAIRCASE

The article presents the development and production of a prototype of a small prefabricated construction element. It was a staircase used for access to the construction site containers, which was made using 3D printing of concrete. Attention is paid to the design, structural analysis and to the mixture used for the 3D printing. The actual printing and evaluation of the wall deformations was carried out using a digital image correlation technique and the discrete Fourier transform algorithm. The transport to the site and the installation of the element were also considered.

3D tisk je nová progresivní technologie, která je zcela odlišná od klasické technologie výroby betonových prefabrikátů. Namísto odlévání čerstvého betonu do formy se při 3D tisku nepoužívá bednicí technika, ale čerstvá cementová směs se ukládá na podložku v podobě „housesnek“, resp. vrstev, podle předem připraveného algoritmu za pomoci speciálně upravené tiskové hlavy osazené na robotovi. Výrobek tedy vzniká po vrstvách, přičemž každá další vrstva je kladena na tu předchozí, kterou zatěžuje, a proto je nutný velmi rychlý nárůst pevnosti. Povrch výrobku pak tvoří charakteristické „vlny“, které odpovídají tloušťce jedné vrstvy [1].

V rámci grantového projektu technologické agentury České republiky byl v laboratorní tiskárně umístěné na Kloknerově ústavu (dále také KÚ) vytištěn reálný stavební prvek, který byl určen pro využití na stavbě řešitele projektu.

### Návrh prefabrikovaného prvku z 3D tisku

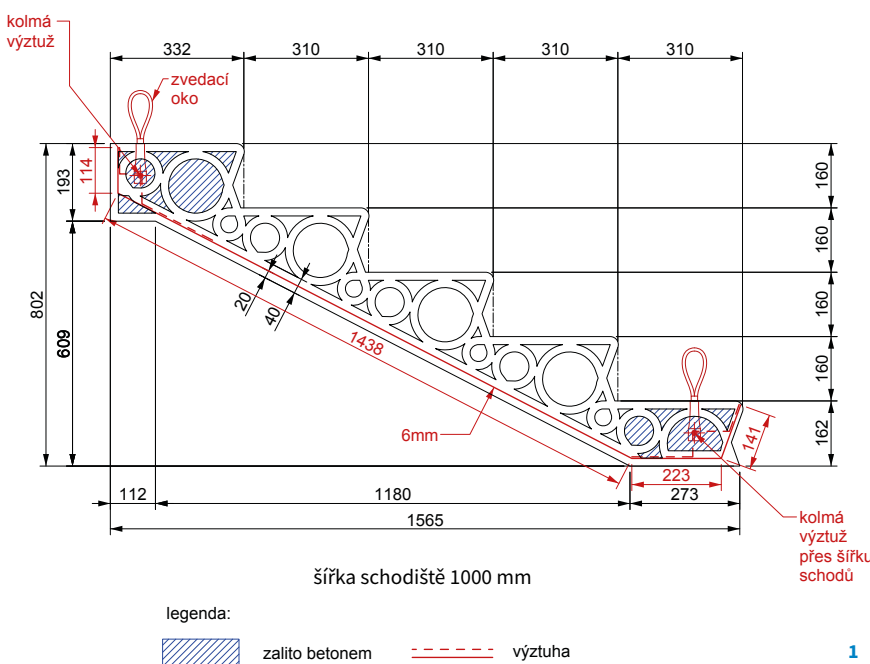
Navrženým prvkem je krátké schodišťové rameno, které má pět stupňů délky 310 mm a výšky 160 mm. Rameno je dlouhé 1,56 m, široké 1 m a jeho hmotnost je téměř 600 kg. Uložení je prosté s rozpětím přibližně 1,4 m na vodorovných úložných plochách pod prvním a posledním stupněm (obr. 1).

<b>Řešitel projektu</b>	Skanska a.s.
<b>Spolupráce</b>	Kloknerův ústav ČVUT v Praze Fakulta stavební ČVUT v Praze

Schodišťové rameno je vylehčeno kruhovými otvory, které vznikly při 3D tisku. Schodiště obsahuje potřebnou výztuž i montážní úchyty a při pohledu z boku zaujme jeho neotřelý architektonický vzhled. Kloknerův ústav vypracoval architektonicko-konstrukční návrh a statické posouzení samotného experimentálního prvku a zrealizoval vlastní 3D tisk. Průběh tisku schodiště byl snímán na digitální kameru a odborníci z Fakulty stavební ČVUT vyhodnotili deformace stěny pomocí techniky korelace obrazu. Nyní schodiště již několik měsíců slouží pro přístup do buňkoviště na stavbě ČEK A ve čtvrti Emila Kolbena v Praze 9.

### Konstrukční návrh

Tvar schodiště byl definován dráhou tisku o šířce 25 mm. Většina průřezu schodiště byla tvořena deskovými částmi tloušťky cca 25 mm (jedna tisková stopa). Spodní deska byla silnější, resp. má 50 mm (dvě tiskové stopy), jelikož zde bylo během tisku vkládáno podélné vyztužení průměru 6/100 mm. Příčná vyztuž průměru 6 mm byla následně dodatečně vkládána do některých otvorů vzniklých při tisku a zalévána zálivkou podobných vlastností jako tisková směs (obr. 2).



1



2a



2b

1 Návrh příčného řezu schodištěm 2 a) Vkládání výztuže při 3D tisku, b) dráha tisku měla šířku 25 mm 3 a) 3D výpočetní model schodiště v programu Ansys, b) tvar deformované konstrukce 1 Design of the cross-section of the staircase 2 a) Placement of the reinforcement in the process of the 3D printing, b) the print path was 25 mm wide 3 a) 3D calculation model of the staircase using the Ansys Software, b) the shape of the deformed structure

### Statický výpočet

Statickou analýzu pro výrobu tištěného schodiště provedli pracovníci KÚ z Oddělení mechaniky. Výpočetní model schodiště pro nelineární numerickou analýzu byl vytvořen v programu Ansys 22R2 a je uveden na obr. 3 [2]. Kompletní tištěné schodiště bylo modelováno ve 3D pomocí objemových prvků včetně vkládané betonářské výztuže. Pro simulaci tištěného betonu byl využit nelineární materiálový model Menetrey-William. Pro výztuž byl využit nelineární materiálový model odpovídající oceli třídy B500B. Zatížení schodiště bylo uvažováno vlastní tíhou dle nominálních rozměrů konstrukce a dále rovnoměrným plošným zatížením  $5 \text{ kN/m}^2$ . Schodišťové rameno bylo prostě uloženo. Byly uvažovány dva základní případy podepření – ideální případ s konstantní tuhostí podpor a případ s rozdílnou tuhostí podpor tak, že tužší podpory byly rozmístěny křížem (po diagonále), čímž bylo schodiště namáháno na kroucení.

### Směs pro 3D tisk

Pro úspěšný tisk je jednou z nejdůle-

žitějších součástí procesu optimalizovaná 3D tisková směs. KÚ se dlouhodobě zabývá vývojem vlastní tiskové cementové směsi v rámci projektu 3D STAR realizovaného ve spolupráci s Technickou univerzitou v Liberci (dále také TUL), jež byla použita i při tomto tisku [5]. Směs vyniká především optimálním poměrem dlouhé zpracovatelnosti, dobré čerpatelnosti a dobrých tixotropních vlastností v klidném stavu, které už v základu umožňují stavitelnost směsi v několika vrstvách i bez přidaného akcelérátoru. Při samotném tisku je možné dle komplexnosti tvaru přidávat variabilní množství urychlovače přímo do tiskové hlavy, kde dojde k promíchání a aktivaci tiskové směsi. Dobré tixotropii napomáhají také přidaná PP vlákna a pro tisk tohoto schodiště byla navíc přidána i PVA vlákna pozitivně ovlivňující minimalizaci vzniku trhlin při tuhnutí směsi.

Směs aktuálně obsahuje kamenivo s maximální velikostí zrn  $1,25 \text{ mm}$ , přičemž probíhají pokusy směřující k využití větších frakcí, které by měly mít pozitivní vliv na smrštění a při

tisku větších objemů výrazně zlepšit ekonomičnost směsi.

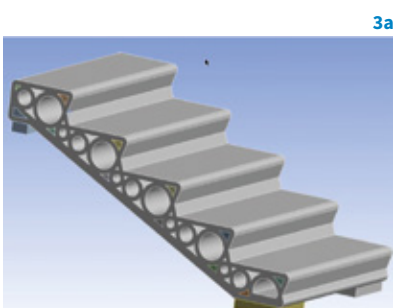
Pro tištěný prvek schodiště bylo v tomto případě nutné v oblasti tahového namáhání použít ocelovou výztuž, pro oblasti namáhané tlakem je i přes subtilnost prvku pevnost směsi na úrovni  $60 \text{ MPa}$ , což je více než dostatečné. Jednotlivé záměsi tiskové hmoty jsou periodicky testovány pro ověření konzistentních vlastností, příp. pro vyhodnocení vlivu zkoumaných úprav v receptuře, a dále procházejí intenzivním vývojem.

Pro tisk bylo použito tříosé tiskové zařízení portálového typu, které bylo vyvinuto a sestaveno pracovníky TUL také v rámci projektu 3D STAR a je součástí testbedu 3D STAR provozovaného nyní v KÚ [5].

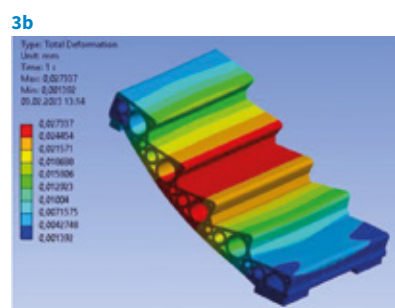
### Průběh 3D tisku

#### Příprava tisku, tvorba geometrie

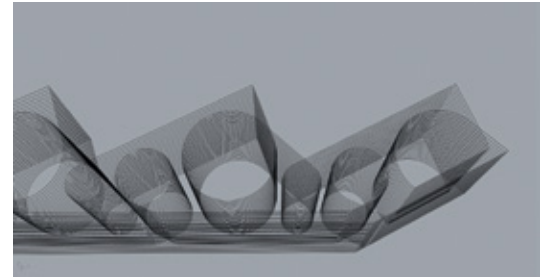
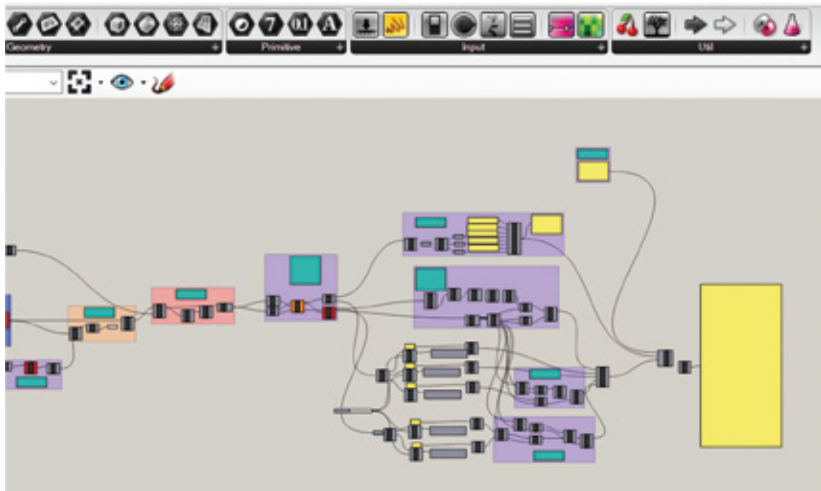
V návaznosti na zadání základních parametrů schodiště bylo nutné nejdříve vytvořit návrh tiskové dráhy, resp. tvaru splňujícího především požadavky mechanické, tak aby bylo možné schodiště bezpečně užívat, a zároveň výsledný tvar optimalizovat pro výrobu pomocí technologie 3D tisku. Dalším hlediskem pak byla samozřejmě i estetická kvalita vytištěného prvku, který nezakrývá svou podstatu, ba naopak využívá tvaru tiskové dráhy jako přidané hodnoty. Tyto předpoklady ústí ve většině případů k tisku tenkostěnných betonových prvků, což zároveň nabízí výraznou úsporu materiálu.



3a



3b



5

vzdálenosti přibližně 1,5 m od tisknutého objektu. Fokální délka byla nastavena na 55 mm, což dávalo metrické měřítko 0,302 mm/px, ideální pro sledování jemných detailů procesu tisku. Výhodou tohoto nastavení byla možnost zachytit jak velké, tak i mikroskopické změny v tělese během tisku.

Pro zajištění konzistentního osvětlení a minimalizaci šumů byla použita kombinace nízkého ISO a dlouhé doby expozice. Toto osvětlení zajišťovalo konstantní intenzitu světla na sledovaném povrchu (obr. 6). Důležitým aspektem měření byla také textura betonu, která byla v tomto případě využita jako náhodný vzor pro analýzu (obr. 7). Přirozená textura betonu poskytla dostatečný kontrast a detail, což bylo nezbytné pro přesné vyhodnocení posunů a deformací metodou korelace digitálního obrazu (DIC).

**Vyhodnocení deformace stěny pomocí techniky korelace digitálního obrazu a algoritmu DFT**

V rámci vyhodnocení deformací betonového schodiště v průběhu 3D tisku

Výsledný tvar schodiště prošel postupným vývojem, při němž jsme vycházeli z našich zkušeností s tiskem a zároveň jsme zapracovávali funkční požadavky nutné pro osazení v reálném provozu, jako jsou např. detaily uložení ramene či vedení výztuže a její provázání se standardními manipulačními pouzdry pro jednoduchou manipulaci na stavbě.

Finální tisková data byla z důvodu komplexnosti dráhy připravena v grafickém programovacím prostředí Grasshopper, ze kterého byl exportován G-code pro samotnou tiskárnu.

S ohledem na vkládání ocelové výztuže do šířky tiskové stopy a současně kvůli potřebě dostatečně malého průměru pro tisk detailní geometrie schodiště byla zvolena tryska s průměrem 25 mm. Výška tiskové vrstvy

byla 10 mm, byla tak dostatečně detailní pro použití jako nášlapný povrch schodiště a zároveň umožnila rychlý tisk prvku. Tisková dráha jedné vrstvy měla celkovou délku 1 030 mm, samotné vytištění celého schodiště trvalo zhruba 2,5 h.

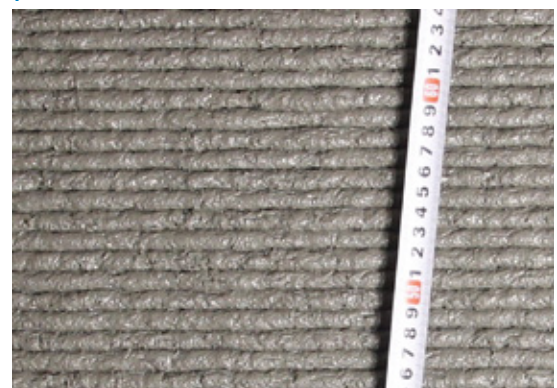
**Snímání polí posunů a deformací digitální kamerou**

Klíčová při sledování procesu 3D tisku betonového schodiště byla volba vhodného vybavení pro zaznamenání polí posunů a deformací. K zachycení tohoto dynamického procesu byla využita kamera Canon EOS 70D s rozlišením 4 684 × 2 185 px. Díky vysokému rozlišení tohoto modelu DSLR kamery bylo možné získat detailní záznam o drobných posunech a deformacích během tisku. Kamera byla umístěna ve

4 Vyobrazení prostředí Grasshopper 5 Tiskové dráhy pro realizaci tisku schodiště 6 Pohled na nasvícenou plochu snímanou digitální kamerou 7 Detail textury tištěného betonu (jednotky na měře jsou v cm) 8 Sledování posunu diskretních bodů (virtuálních extenzometrů) na povrchu konstrukce a vývoje relativních vertikálních posunů v průběhu tisku: a) deformace levé části konstrukce, b) deformace pravé části konstrukce



6

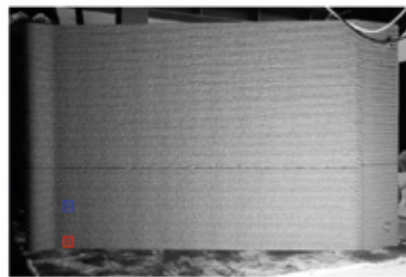


7

byla zvolena technika korelace digitálního obrazu (DIC) s využitím algoritmu DFT (diskrétní Fourierovy transformace). Tento algoritmus je velmi efektivní při registraci posunů množin pixelů, které se v průběhu zkoušky mění ať už kvůli změnám v osvětlení, či změnám samotného snímaného povrchu v důsledku vývoje mikrostruktury. Výhodou algoritmu DFT v kontextu DIC je jeho schopnost rychle a přesně zaregistrovat posuny na základě frekvenčních charakteristik obrazu, což eliminuje potřebu náročných optimalizačních algoritmů [3], [4].

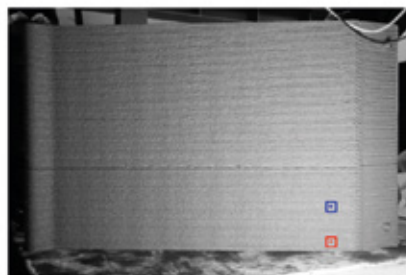
Pro analýzu bylo využito vlastního nástroje vyvinutého v programovacím jazyce Python – PyVEX (Python Virtual Extensometers). Tento open-source software byl optimalizován tak, aby poskytoval všechny potřebné funkce pro pohodlné vyhodnocení posunů na základě sekvence snímků, aniž by bylo potřeba předzpracování nebo jiné složité uživatelské interakce, které by mohly měření ovlivnit.

Výsledky této analýzy mají podobu relativních posunů diskrétních bodů umístěných libovolně na povrchu sledované konstrukce (obr. 8). Z prezentovaných výsledků je patrné, že zpočátku dochází k mírnému rozlivu tisknutých vrstev konstrukce, avšak později se deformace v důsledku zatížení novými vrstvami ustálí a jejich průběh se změní na přibližně lineární. Tyto výsledky budou hodnotné pro kalibraci materiálových modelů tisknutých směsí.



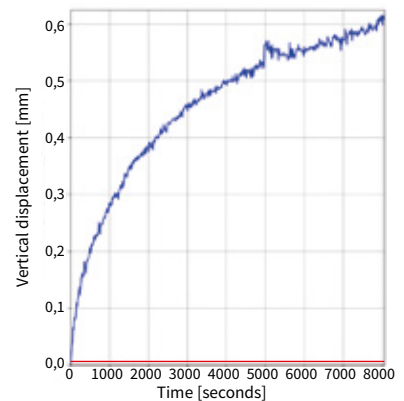
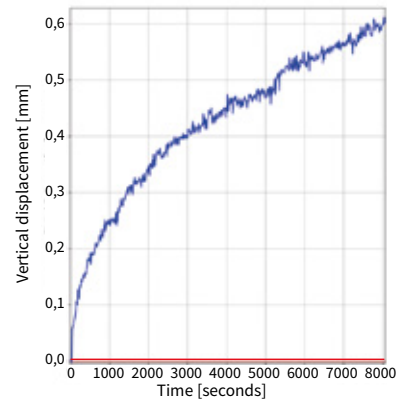
— Ref.-L  
— Meas.-L

8a



— Ref.-R  
— Meas.-R

8b



## Nakládání, převoz na stavbu a uložení prvku

Převoz schodišťového ramene byl zajištěn nákladním automobilem Avia s automatickou hydraulickou rukou. Samotný 3D tisk proběhl v jedné z laboratoří KÚ. Po zatvrdnutí bylo schodišťové rameno naloženo na paletovací vozík a převezeno na dvůr. Zde bylo automatickou rukou naloženo na nákladní automobil a převezeno na stavbu.

Na stavbě ČEK A byl k dispozici věžový jeřáb, proto byla manipulace se schodišťovým ramenem daleko jednodušší. Schodišťové rameno je určeno pro přístup pracovníků ze vstupní buňky na stavbu a kvůli bezpečnému užívání je opatřeno dřevěným zábradlím. Postup vykládky z nákladního automobilu na stavbě je znázorněn na obr. 9. Převoz schodišťového ramene se uskutečnil 9. března 2023.

### Literatura:

- [1] Měsíčník zaměstnanců – Skanska Central Europe (SCE). SCE Communication Team. 3/2023.
- [2] HOLÝ, M., KNĚŽ, P. Výpočetní analýza prototypu schodiště vyráběného 3D tiskem. 10. 2. 2023. Praha: Kloknerův ústav ČVUT v Praze, 2023.
- [3] NEŽERKA, V., HAVLÁSEK, P. A Lightweight DFT-Based Approach to the Optical Measurement of Displacements Using an Open-Source Python Code. *Experimental Techniques*. 2022, Vol. 46, pp. 485–496. DOI: 10.1007/s40799-021-00488-8
- [4] ANTOŠ, J., NEŽERKA, V., SOMR, M. Real-Time Optical Measurement of Displacements Using Subpixel Image Registration. *Experimental Techniques*. 2019, Vol. 43, pp. 315–323. DOI: 10.1007/s40799-019-00315-1
- [5] RÁFTL, J., BALDA, V., BELDA, K., BERAN, L., BUREŠ, V., BURGETOVÁ, E., BRŮŠEK, J., ČÍTEK, D. et al. 3D STAR: 3D tisk ve stavebnictví a architektuře. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2022. ISBN 978-80-7494-632-5.
- [6] ČÍTEK, D., BUREŠ, V., MELTER, O., HVÍZDAL, A., HURTIK, K., KOLÍSKO, J., SUCHOMEL, J. Experimentální vývoj 3D tisku cementových kompozitů. *Beton*. 2022, roč. 22, č. 1, s. 7–11. ISSN 1213-3116.

### 9 Vykládka z nákladního automobilu na stavbě

9 Unloading from a lorry on the construction site

9



## Závěr

Technologie robotické fabrikace cementových materiálů známá spíše pod označením jako 3D tisk (betonu) je oblast, která je stále intenzivněji předmětem zájmu nejen výzkumných týmů v ČR a zahraničí, ale také soukromých společností ze stavebního průmyslu. Tento článek prezentující vývoj a výrobu prototypu relativně drobného prvku, resp. schodišťového ramene, je ukázkou možnosti propojit výzkum a praxi. Zásadním pro realizaci byl impulz od pracovníků řešitele projektu. Pracovníci KÚ za pomoci kolegů z Fakulty stavební, tj. dvou pracovišť ČVUT v Praze, tento impulz přeměnili v reálný, byť drobný konstrukční prvek. Návrh tvaru, statická analýza, převedení do tiskových dat, úprava tiskové směsi, samotný tisk (fabrikace), kontrolní sledování výsledného tvaru schodiště, ošetřování, převoz, instalace a další sledování jsou zdánlivě jednoduché a obvyklé činnosti. Jejich realizace však není ve stále nové a technologicky a normativně neusazené oblasti 3D tisku vůbec triviální. Prozatím je to tedy celkem náročný proces založený primárně na experimentálním ověřování, tak jak je umožněn v ČSN EN 1990.

Schodišťové rameno nebylo zvoleno jako jeden z pilotních projektů 3D tisku náhodně, jedná se totiž o prvek, který se vyskytuje opakovaně v každé vícepatrové budově a zpravidla se vyrábí jako prefabrikovaný „typový“ prvek. Potenciál 3D tisku je v tomto případě proto vysoký, výhodou by byla automatizace výroby těchto typových prvků a nezanedbatelná úspora ma-



10a



10b

10 Pohled na schodiště z 3D tisku po půl roce provozu na stavbě

10 View of the 3D printed staircase after one half of a year of use on the site

teriálu společně se snížením dopravních nákladů a všeobecně ekologické náročnosti výroby.

Prvek schodišťového ramene je nyní vystaven běžnému provozu a exteriérovým klimatickým podmínkám. Schodiště je používáno již více než půl roku a po důkladném prozkoumání na něm není žádná stopa vady nebo porušení. Pohled na schodiště je zachycen na obr. 10. Doufáme, že výsledky sledování potvrdí předpoklad, že je prvek schopen v náročných podmínkách obstát.

3D tisk si prozatím hledá svoji vlastní cestu uplatnění stejně tak, jako si ji kdysi hledal i železobeton „od Monierových květináčů přes lodičky až po nyní běžné konstrukce, předpjatý beton a vysokopevnostní štíhlé vláknobeton“ [1].

*Výsledky byly dosaženy jednak díky grantovému projektu č. FW01010521 s názvem Mikrostrukturální modifikace samozhutitelných betonů pro snížení tlaků na bednění s podporou TA ČR a jednak díky grantům Studentské grantové soutěže ČVUT v Praze SGS23/145/OHK1/2T/31 a SGS23/144/OHK1/2T/31.*

Fotografie: archiv autorů



Ing. Jan Tichý, CSc.  
Skanska a.s.  
jan.tichy@skanska.cz



prof. Ing. Jiří Kolísko, Ph.D.  
Kloknerův ústav ČVUT v Praze  
jiri.kolisko@cvut.cz



Ing. arch. Oto Melter  
Kloknerův ústav ČVUT v Praze  
oto.melter@cvut.cz



Ing. Milan Holý, Ph.D.  
Kloknerův ústav ČVUT v Praze  
milan.holy@cvut.cz



Ing. Pavel Trávníček, Ph.D.  
Fakulta stavební ČVUT v Praze  
pavel.travnicek@fsv.cvut.cz



doc. Ing. Václav Nežerka, Ph.D.  
Fakulta stavební ČVUT v Praze  
vaclav.nezeka@cvut.cz



prof. Ing. Jiří Němeček, Ph.D., DSc.  
Fakulta stavební ČVUT v Praze  
jiri.nemecek@fsv.cvut.cz

inzerce

CCC 2024  
First Announcement  
První oznámení



14<sup>th</sup> Central European Congress  
on Concrete Engineering  
14. Středoevropský  
betonářský kongres

Host CCC Association  
Czech Concrete Society  
Česká betonářská společnost ČSSI  
fib Czech national member group  
[www.csbetoneu](http://www.csbetoneu)

MIKULOV 2024



CCC MEMBER COUNTRIES



September 22–24, 2024 | Hotel Galant, Mikulov | Czech Republic

[www.csbetoneu](http://www.csbetoneu)