

# VYUŽITÍ ADITIVNÍ ROBOTICKÉ FABRIKACE UHPC NA REALIZACI UNIKÁTNÍHO SOUSOŠÍ „NA HORU“

Jiří Kolísko, Federico Díaz, Dmitrij Nikitin, Petr Kněž, Karel Hurtig

V listopadu roku 2021 bylo na veřejném prostranství u nově postaveného komplexu Bořislavka v Praze slavnostně odhaleno sousoší s názvem Na Horu. Tento technologicky i umělecky ojedinělý artefakt byl vytvořen aditivní robotickou fabrikací ultra vysokohodnotného betonu. Cílem článku je seznámit čtenáře s procesem zrodu tohoto unikátního díla.

## APPLICATION OF THE ROBOTIC ADDITIVE MANUFACTURING PROCESSES OF UHPC ON THE IMPLEMENTATION OF THE UNIQUE SCULPTURE „AERIAL“

In November 2021, a new monumental sculpture entitled Aerial was unveiled in a public space near the newly built Bořislavka Centre in Prague. This technologically and artistically unique artefact was created by additive robotic fabrication of ultra-high-performance concrete (UHPC). The aim of this article is to introduce the reader to the process of the birth of this unique work.

Mezinárodně renomovaný umělec a architekt Federico Díaz přišel za pracovníky Kloknerova ústavu ČVUT v Praze (KÚ) v roce 2019 s myšlenkou využít robotickou aditivní fabrikaci ultra vysokohodnotného betonu (UHPC) k vytvoření unikátního sousoší pro soubor budov Bořislavka v Praze 6. Tento zcela nový směr v aplikaci UHPC odborníky z ústavu okamžitě nadchnul. V rámci realizace byl krok po kroku uvedený záměr naplňován, takže v listopadu roku 2021 mohlo být sousoší s názvem Na Horu slavnostně odhaleno. Sousoší je složeno ze tří menších soliterních soch a jedné velké sochy značných rozměrů. Je jasné, že vytvoření tohoto technologicky i umělecky ojedinělého artefaktu velikosti cca 11,3 × 7,4 × 5 m aditivní robotickou fabrikací UHPC byl komplikovaný proces, který doprovázela řada komplikací.

V rámci realizace sousoší metodou aditivní robotické fabrikace UHPC bylo nutno čelit široké škále problémů,

kteří až doposud nebyly nikdy řešeny. Z technologického a realizačního hlediska bylo nutné se zabývat:

- hardwarovým řešením, tj. sestavením a vývojem komponent strojního systému zahrnujícího míchací centrum, dopravu směsi, samotné robotické rameno, vývoj extrudéru a podpůrných nástrojů pro tisk šikmých povrchů,
- optimalizací a rozčleněním tvaru sochy na dílčí elementy tak, aby je bylo možné jednotlivě vytisknout (extrudovat) a na stavbě sestavit do konečné podoby,
- statickým řešením sochy jako celku i jednotlivých dílčích prvků a detailů spojů, příp. i vyztužením některých částí sochy,
- optimalizací směsi UHPC tak, aby byla využitelná pro strojní technologii robotické fabrikace,
- softwarovým řešením, tj. převedením tvaru sochy do digitální formy vhodné a použitelné pro programování robotického ramene a na-

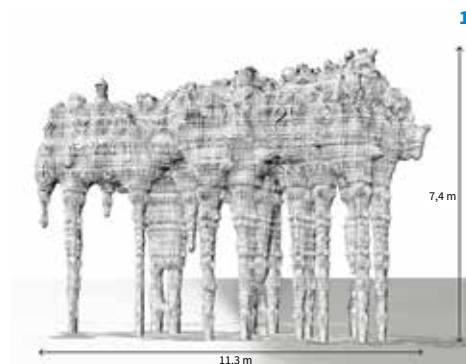
programováním ovládání robotického ramene,

- samotnou robotickou fabrikací jednotlivých dílů sochy,
- sestavením sochy z jednotlivých výtiskových částí přímo na prostranství u souboru budov Bořislavka.

Za každým bodem je skryto velké množství dílčích teoretických i praktických úkonů a operací. Realizačním týmem ze Studia Federico Díaz (SFD) využil zkušeností pracovníků KÚ s technologií a navrhováním prvků z UHPC. Jako dodavatel suché směsi UHPC Valucem se projektu účastnila i společnost PREMIX servis. Směs UHPC Valucem byla v rámci prací modifikována týmem SFD a odborníky z Kloknerova ústavu právě do podoby použitelné pro robotickou fabrikaci. Je jasné, že se jednotlivé řešené oblasti prolínaly a bylo nezbytné se jimi zabývat paralelně. Mnohdy se realizační tým potýkal i s nevyhovujícími výsledky, které jej však posouvaly novým a žádoucím směrem.

<b>Autor sousoší</b>	Federico Díaz
<b>Realizace</b>	Studio Federico Díaz s.r.o.
<b>Technologie</b>	So Concrete a.s.
<b>Vedoucí robotiky a programování</b>	Dmitrij Nikitin
<b>Vývoj technologie</b>	Studio Federico Díaz s.r.o. / Daniel Marko, Petr Pufler, Jakub Petr, Filip Dubský Kloknerův ústav ČVUT v Praze / Karel Hurtig, David Čítek, Jiří Kolísko
<b>Statické řešení</b>	Kloknerův ústav ČVUT v Praze a samostatný statik Ing. Jan Dučeček
<b>Dodavatel UHPC</b>	PREMIX servis, spol. s r.o.
<b>Dodavatel průmyslových robotů</b>	ABB Robotika
<b>Augmentovaná realita</b>	Jaroslav Stehlík
<b>Investor</b>	KKCG a.s.

1 Vizualizace hlavní sochy B  
1 Visualisation of the central sculpture B





2a

2 Sousoší Na Horu stojí ve venkovním prostoru mezi budovami komplexu Bořislavka v Praze 6  
2 The sculpture Aerial stands in the outdoor area between the buildings of the Bořislavka Centre in Prague 6

### Umělecký koncept

Socha Na Horu byla navržena pro novou centrálu společnosti KKCG, která vznikla na pražské Bořislavce podle návrhu architektonické kanceláře Aulík Fišer architekti. Dílo bylo vybráno v rámci uzavřené umělecké soutěže, kterou organizovala nadace Karel Komarek Family Foundation, jež se dlouhodobě zabývá zkvalitňováním veřejného prostoru v ČR.

Samotné dílo odkazuje na starou obchodní stezku, která lokalitou kdysi vedla. V minulosti byly silnice a cesty budovány v soutěskách či horských průsmycích vytvořených ledovci nebo působením deště. Není náhodou, že slovo „stezka“ má stejný etymologický základ jako „stékat“. Tvary sousoší Na Horu tak odkazují na břidlici a horniny, které pod Bořislavkou miliony let sedimentovaly a které formují podobu města i dnes. Po bližším prozkoumání je ale na soše zároveň patrná pravidelná a zvrásněná struktura vytvořená strojem. Dílo tak evokuje pnutí mezi přírodou a lidstvím. Připomíná trvalost, která nás přesahuje, stejně tak jako schopnost člověka adaptovat sebe a své okolí.

### Software

Technika robotické aditivní fabrikace vyvinutá SFD pro realizaci sochy vyžadovala kromě návrhu a odladění výrobního procesu také výraznou integraci nových softwarových řešení. Vzhledem k faktu, že pro fabrikaci takto složité struktury na trhu neexistovaly dostupné programy, byl pro realizaci navržen nový software. Tohoto úkolu se v rámci SFD chopil Ing. arch. Dmitrij Nikitin.

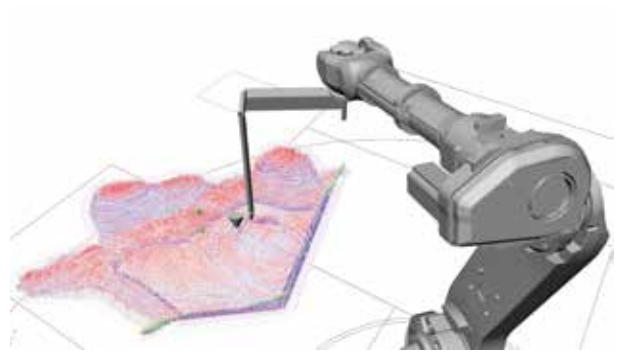
Základním principem softwarových nástrojů pro 3D tisk je „nařezání“ geometrie po výšce na (nejčastěji) vodorovné křivky, které poté sleduje robot či 3D tiskárna při extruzi materiálu. Z tohoto principu „nařezání“ geometrie vychází i označení takovýchto programů pojmem slicer (z anglického slice – plátek). Tento slicer byl však jen jednou ze součástí výsledného softwaru.

2b





3



4

Celý návrh byl od počátku řešen metodou parametrického navrhování v programu Grasshopper. Ten využívá metodu tzv. vizuálního programovacího jazyka k sestavování skriptů (tedy vlastních softwarů) vytvářejících a upravujících geometrii (obr. 3). Výhodou této metody je velmi flexibilní proces navrhování, kdy každá změna vstupních parametrů během okamžiku automaticky promění nejen celou výslednou geometrii, ale i veškeré další výstupy včetně pohybových instrukcí pro robota. Tím se výrazně zkracuje čas věnovaný iteracím verzí návrhu.

Princip fungování zmiňovaného softwaru lze na příkladu sousoší Na Horu popsat zhruba takto: na počátku je umělecká představa Federica Díaze o prostorové kompozici, povrchu a estetickém dojmu. Prvním vstupem (parametrem) je tedy komponované prostorové mračno bodů, které slouží k vygenerování základní geometrie tvořené jedním hlavním velkým tvarem (dlouhým 11,3 m a vysokým

7,4 m) a třemi menšími solitéry. Tyto hmoty jsou obaleny povrchem připomínajícím svou strukturou erozi hornin. Tato struktura je též generována parametricky a má proměnlivé měřítko i výšku reliéfu. Socha je poté rozdělena na moduly, jejichž tvar a velikost vychází z dosahu robotického ramene a celkového konstrukčního schématu objektu. Na tento proces v programu navazuje automatizované generování tvarů výztužných žebírek, která jsou lokálně zahušťována v tvarově složitých částech geometrie. Dále jsou automaticky generovány tvary spojovacích lemů, vnitřních komůrkových výztuží, průchodů pro spojovací šrouby, otvorů pro potrubí apod. Tyto procesy reagují v reálném čase na jakékoli změny vstupní geometrie a automaticky se jí uzpůsobují.

Speciální funkcí softwaru je též možnost použít princip topologické optimalizace. Výstup ze statické analýzy je zde použit pro zahuštění, či naopak rozvolnění komůrkových výztuh

v jedné z výškových úrovní sochy. Nosná konstrukce se tedy automaticky adaptuje dle průběhů vnitřních napětí objektu. Zároveň je provedena analýza sklonů povrchu tvaru (tedy zjednodušeně přítomnosti konzol). Ty vyžadují vytvoření sypaných podpor během výroby, jež jsou opět generovány automaticky.

Dalším výrobním procesem, který musí software ošetřit, je robotické frézování styčných povrchů betonových dílů sochy, aby se zjednodušila montáž a aby se docílilo přesných návazností (s teoretickou přesností zlomků milimetrů). Tento proces probíhá v průběhu výroby mezi extruzí jednotlivých vrstev betonu. I tuto činnost zvládá software vygenerovat automaticky.

Na proces definování pohybových drah pro nejrůznější nástroje navazuje část parametrického skriptu zodpovídající za vytvoření správné sekvence procesů robotické výroby (sequencer). Zjednodušeně jde o provázání a přesné seřazení příkazů pro extruzi materiálu, budování sypaných podpor, průběžné frézování hran, komunikační interface s operátorem robota apod.

Výsledná sekvence pohybových instrukcí a dalších příkazů je poté zpracována částí skriptu zodpovědnou za simulaci pohybu robotického ramene ve virtuálním prostoru. Zde se ověřuje, zda jsou všechny pohyby robotem fyzicky proveditelné, zda v předchozích fázích nedošlo k chybám apod. Celkově tato fáze slouží k ověření správnosti a zajištění bezpečnosti programu.

Na konci řetězce činností softwaru je tzv. postprocesor, tedy nástroj sloužící k naformátování správně seřazených pohybových příkazů a proce-

3 Ilustrace využití vizuálního programovacího jazyka programu Grasshopper pro tvorbu skriptů

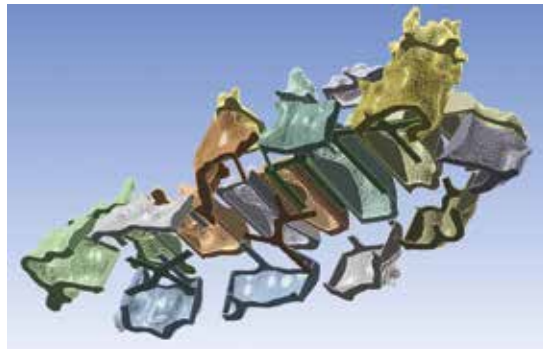
4 Simulace tiskových drah a dosahů robota 5 Příčný řez sochou B s vyznačením ztužujících prvků

6 Vodorovný řez středem těla sochy B, horní polovina se znázorněným rozkladem na jednotlivé díly

3 Illustration of the use of the Grasshopper visual programming language for scripting 4 Simulation of print paths and robot reaches 5 Vertical cross-section of the statue B presenting bracing members

6 Horizontal section through the upper half of the statue's body. Presentation of the decomposition into individual parts

5 6





sů do podoby, které porozumí robot. I tento proces je zcela automatizován a v reálném čase odráží změny vstupních parametrů (tedy geometrie a dalších proměnných).

## Geometrie

To, co objekt Na Horu odlišuje od většiny realizací aditivní fabrikace z betonu, je velká tvarová komplexita. Najdeme zde jak sloupové prvky, tak stěny, klenby, konzoly či zavěšené části. Všechny tyto prvky jsou navíc tvarovány velmi volně, což obtížnost návrhu a realizace ještě znásobuje.

Největším technologickým oříškem aditivní fabrikace je úhel sklonu povrchu. Standardním omezením konvenčních betonových tiskáren jsou již úhly nad 35°. Technologie vyvinutá SFD a použitá k realizaci sochy Na Horu musela splnit nejen požadavek na realizovatelnost neomezeného rozsahu úhlů povrchu, ale navíc řešit i části geometrie začínající „ve vzduchu“.

K realizaci takto složitých tvarů byla použita kombinace postupů zahrnující optimalizaci materiálů, analýzu povrchu, sypané podpory, lokální adaptivní tištěné podpory a výztuže atd. Díky tvarové komplexitě a kombinaci uvedených řešení je tato realizace výjimečná nejen v lokálním měřítku, ale vynikne i v mezinárodním srovnání (mezi příklady obdobné komplexity můžeme uvést např. některé realizace pracoviště Digital Building Technologies při ETH v Curychu – více na [dbt.arch.ethz.ch](http://dbt.arch.ethz.ch)).

Dalším zajímavým prvkem sousošší je členitý povrchový reliéf evokující povrch erodovaných hornin. Ten byl komplikovaný nejen z pohledu datové přípravy, ale i z pohledu výroby. Během té totiž hraje důležitou roli optické rozlišení vytvářeného povrchu, které je dané průměrem trysky extrudéru a výškou vrstev fabrikace (jde o pro 3D tisk charakteristický „pruhovaný“ povrch). Pro zajištění co nejvěrnějšího dojmu z tohoto relié-

fu a zároveň pro zefektivnění výroby je jemnost tiskových vrstev po výšce sochy variována. Nejnižší části, jež jsou v kontaktu s divákem, mají reliéf nejjemnější (3 mm), zatímco nejvyšší části byly vytvářeny v hrubším rozlišení (10 mm), což umožnilo rychlejší výrobu.

## Materiál

O parametrech a vlastnostech UHPC byla již vydána řada článků a publikací ([1] až [4] ad.). V květnu 2022 vydala Česká betonářská společnost ČSSI k navrhování a realizaci UHPC i prvků z něj vyrobených aktualizovaná technická pravidla. Zde tedy nebudou vlastnosti UHPC blíže rozebírány ani popisovány.

Jednou z charakteristik čerstvé směsi UHPC je její tekutost neboli tzv. samonivelační chování. Tato vlastnost čerstvého UHPC je samozřejmě pro aplikaci směsi aditivní fabrikací zcela nevhodná a nelze ji odstranit pouze snížením dávkování vo-

inzerce

# valucem

## ÚPLNĚ JINÝ BETON

Valucem je obchodní název unikátního vysokohodnotného betonu označovaného jako UHPC tj. Ultra High Performance Concrete. Společnost PREMIX servis s.r.o., jako výrobce a dodavatel tohoto vysokopevnostního vláknocementového kompozitu, má bohaté zkušenosti s realizacemi.

### VÝHODY VALUCEMU®



vysoké materiálové parametry dle směrnice TP 07 ČBS (třída min. C110 a více)



při návrhu konstrukcí lze uvažovat i pevnost materiálu v tahu



Lávka v Příboře přes Lubinu



Lávka ve Vrapicích u Kladna



vysoká hutnost a nízká permeabilita zajišťují téměř neomezenou trvanlivost



možnost navrhovat tenkostěnné, subtilní lehké konstrukce s vysokou úsporou materiálů



vysoká tekutost čerstvé směsi zajistí vyplnění i složitých a tenkostěnných forem

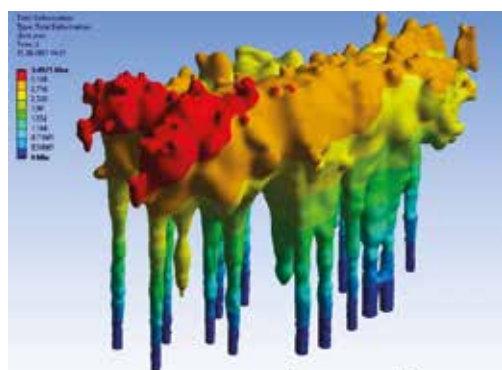


úpravou přísad lze Valucem využít pro aplikace 3D tiskem

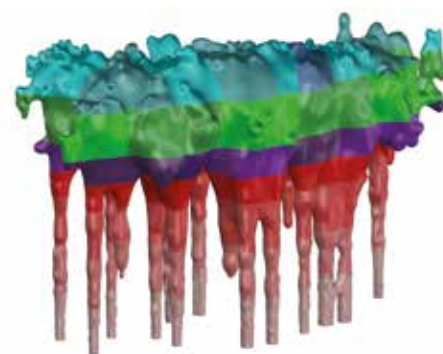
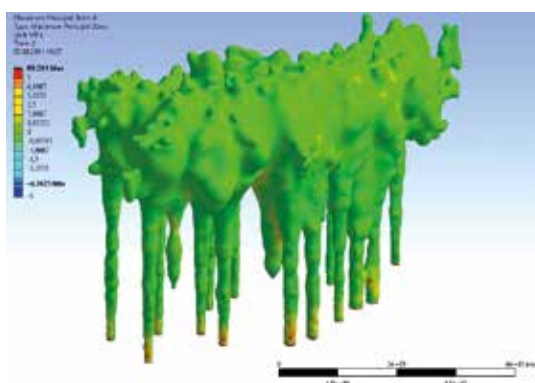
[valucem.cz](http://valucem.cz)

[premixservis.cz](http://premixservis.cz)

**Premix  
SERVIS**



7 8



9

7 Celková deformace modelu při ochlazení: maximální hodnota 3,5 mm 8 Hlavní tahové napětí na celkovém modelu: maximální napětí jsou v místě vetknutí nohou, na tato napětí je navržena vnitřní betonářská výztuž 9 Rozčlenění sochy B na vodorovné konstrukční pásy po výšce: každá barva značí samostatně vytvořenou úroveň tisku, každý pás byl dále členěn na jednotlivé segmenty 10 Ve speciálně navržené modelovací hmotě vyřyl robot požadovaný reliéf vodních rezervoárů 11 V rámci realizace proběhly i ověřovací testy některých prvků: a) zatěžovací zkouška deskového prvku rezervoáru C3, čtyřbodově podepřená a bodově zatěžovaná tvarovaná deska tloušťky 35 mm (maximální síla při protlačení  $F_{max} = 7$  kN), b) model deskového prvku

7 Deformation of the statue's model loaded by cooling. The maximum deformation 3,5 mm 8 Principal tensile stresses on the overall model. The maximum stresses are at the column embedding. The internal concrete reinforcement is designed to bear these stresses 9 Division of statue B into horizontal construction sections by height: each color indicates a separate horizontal level. Each level was further divided into individual segments 10 The relief of the water reservoirs was carved by the robot into a specially designed modelling material 11 Verification tests of some elements were also carried out as part of the sculpture realization phase: a) load test of the plate element C3 of the reservoir, four-point supported and point-loaded shaped plate 35 mm thick (maximum load  $F_{max} = 7$  kN), b) model of plate element

dy. Bylo nezbytné u materiálu zajistit dostatečnou tixotropii při zachování vysokých mechanických parametrů. Dosažení použitelné tixotropie v tomto případě znamenalo poměrně rozsáhlé téměř celoroční experimentální šetření zaměřené na hledání vhodné přísady a jejího dávkování. Vzhledem k technologii fabrikace vyvinuté SFD nebylo nakonec nutné použít urychlující přísadu, čímž odpadl poměrně vysoce variabilní a komplikovaný činitel, který by ovlivňoval výsledné parametry UHPC. Směs UHPC byla pro účely fabrikace modifikována také PVA vlákny.

Pro účely statického návrhu byla požadována minimální pevnost v tlaku 100 MPa a minimální pevnost v prostém tahu 5 MPa. Vzhledem k šíři stěny tištěných segmentů 30 mm bylo ověřování mechanických vlastností realizováno na trámečcích  $40 \times 40 \times 160$  mm, a to jak z těles vyrobených klasicky z namíchané směsi, tak z těles vyřezaných z dodaných vytištěných stěnových prvků. Z měření vyplynulo, že vyvinutá metoda nezpůsobuje vrstevnatost tištěného elementu. Rozdílnost výsledků na vyřezávaných tělesech a tělesech připravených z čerstvých směsí před průchodem tiskovým systémem byla zanedbatelná. Pevnost v tlaku oscilovala v rozmezích 115 až 130 MPa a pevnost v tahu za ohybu oscilovala v rozmezí cca 20 až 28 MPa. Z rozsáhlých provede-

ných testů jak modifikovaného vstupního UHPC Valucem, tak již vytištěných prvků vyplývá, že požadavky návrhu byly naplněny.

### Statická analýza sochy

Statický návrh probíhal v několika fázích, z nichž první – konceptní – proběhla již na začátku hledání tvarového řešení sochy. Celkovou statickou analýzu zajišťovali pracovníci KÚ. Na dílčích částech spolupracovali se samostatným statikem Ing. Janem Ducheckem. Po prvních analýzách na zjednodušeném modelu geometrie vznikl koncept dutého nosného pláště hlavní hmoty podepřeného dvanácti nosnými sloupy seskupenými v konfiguraci po třech dvojicích z každé podélné strany sochy. Na základě tohoto schématu a diskuzí s Ing. Kněžem z KÚ vznikl finální tvar návrhu sochy.

Nejsložitějším elementem celého sousoší byla největší socha, označená pro účely návrhu jako objekt B, a proto ji zde bude věnována větší pozornost. V rámci statických analýz sousoší proběhla řada výpočtů právě sochy B s cílem ověřit statickou spolehlivost a bezpečnost návrhu její geometrie. Výpočty proběhly na několika modelech, na nichž docházelo k postupnému vývoji geometrie a jejímu upřesňování se snahou přiblížit se reálnému působení konstrukce.

První analýzy proběhly na modelech lineárních a byla na nich ověřována zejména napjatost v nosných nohách a celková stabilita konstrukce při zatížení větrem. Následovala parametrická studie vlivu tuhosti pevných kontaktů mezi dílčími segmenty na chování konstrukce při zatěžování teplotou. Cílem této studie bylo popsat, jaký vliv na napjatost v konstrukci bude mít výsledná tuhost spojů a zda je nutno se zabývat provedením spojení z hlediska tuhosti, resp. zda bude třeba provést spoje co možná nejtužším způsobem (lepením), či zda bude vhodné zvolit volnější typ spojení, který bude blíže spíše kloubovému spojení (šrouby s pružnými vložkami). Na závěr proběhly nelineární analýzy – geometricky a kontaktně nelineární analýza v programu Ansys pro vyhodnocení globálních a lokálních účinků na segmenty spojované pomocí šroubů a materiálově i geometricky nelineární analýza detailů souvisejících s kotvením pomocí šroubů v programu Atena 3D.

Ze základní lineární analýzy vyplynula nutnost vyztužení nosných nohou po celé výšce, neboť v určitých zatěžovacích případech docházelo ke vzniku tahových namáhání v nohách na návětrné straně sochy.

Základní lineární analýza byla poté doplněna o parametrickou studii

vlivu tuhosti pevných kontaktů na samotné podélné tělo při zatížení teplotou. Z analýzy vyplynulo, že tuhost pevných kontaktů mezi segmenty má na výsledné hodnoty deformace i napětí velmi malý vliv. Deformace je dána především tuhostí samotných nosných nohou a spoje na samotném podélném těle sochy již k jejím změnám moc nepřispívají. Z analýzy současně vyplynulo, že tuhost spojů nemá ani významný vliv na vznikající tahová napětí na segmentech těla sochy. Zvýšená napětí nad předpokládanou tahovou pevnost UHPC (5 MPa) byla výjimečná a pouze lokální, a to zejména v místech, kde je na skutečné konstrukci realizován náběh, který tato napětí bude redukovat.

Pro statické posouzení prvků sochy a sochy jako celku byla provedena rozsáhlá škála nelineárních výpočtů pomocí softwaru Atena. Ilustrativní výsledek teplotního zatížení je na obr. 7. Do výpočtu je uvažována základní teplota  $T_0 = 10^\circ\text{C}$ . Od této teploty se odvíjí následně uvažované ochlazení konstrukce o  $\Delta T = -30^\circ\text{C}$ , resp. její oteplení o  $\Delta T = 40^\circ\text{C}$ . Uvažovaný teplotní rozsah konstrukce je tedy od  $-20$  do  $+50^\circ\text{C}$ .

Na základě předchozích analýz se přistoupilo k vytvoření geometricky a kontaktně nelineárního modelu. Jeho cílem bylo ověřit chování konstrukce při uplatnění navrženého způsobu spojování dílčích segmentů těla sochy – svísele pomocí výztuh a šroubů a vodorovně pomocí dvojice věnců. Výsledky této analýzy prokázaly, že nedochází k výraznějšímu nárůstu deformací ani napětí. Na modelu se vy-

skytují pouze lokální špičky způsobené zjednodušením šroubů. K jednomu ze spojovaných segmentů byl druhý segment vždy připojen pevným kontaktem a v těchto místech docházelo ke koncentraci napětí. V místech, kde byl ponechán pouze třecí spoj, k těmto jevům nedocházelo, docházelo zde pouze k lokálním otlacím vlivem páčení šroubů pevně vetknutých do sousedního prvku. Napětí na prvcích, resp. šroubech dosahovala poměrně nízkých hodnot. Pouze v limitovaných lokálních špičkách bylo dosaženo napětí ve šroubech do 250 MPa.

Pro ověření působení šroubů spojujících výztuhy byly vytvořeny dva nelineární modely v programu Atena 3D, na nichž byla provedena analýza únosnosti detailu. Posuzováno bylo vytržení šroubu z výztuhy vlivem smyku a též protlačení výztuhy vlivem osového namáhání šroubu. U obou analýz došlo dříve k selhání navržených šroubů M20 než k selhání v oblasti UHPC.

Vzhledem k nízkým napětím ve šroubech získaným analýzou globálního modelu v programu Ansys, kdy nedocházelo k dosažení meze kluzu, lze konstatovat, že navržené detaily jsou bezpečné a vyhovující. Pro omezení velikosti lokálních namáhání bylo doporučeno zachovat navržený rastr šroubů ve vzdálenosti 200 mm.

### Výroba a montáž

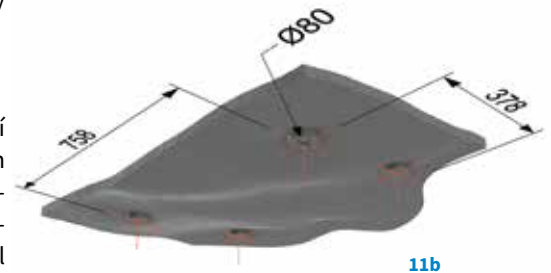
Výroba sousoší probíhala ve výrobní hale Studia Federico Díaz v pražských Holešovicích. Zde bylo zbudováno robotické pracoviště zahrnující robotické rameno (v tomto případě model

ABB IRB6640), míchací stanici, betonovou míchačku, pumpu a speciální systém polohovatelných stolů pro výrobu. Jedna výrobní brigáda byla složena z operátora robota, jeho asistenta a pracovníka obsluhujícího míchačku a pumpu.

Robotické rameno bylo osazeno multifunkčním nástrojem vyvinutým SFD. Tento nástroj obsahoval extrudér na beton s řízeným spínáním a průtokem, frézku na ohraňování a dispenser na vytváření sypkých podpor (také ovládaný automaticky).

Zásadní pro betonovou aditivní fabrikaci je perfektní načasování jednotlivých činností procesu. Ten nesmí obsahovat výrazné prostoje a všechny činnosti, při kterých se průtok betonu může zastavit, musí být eliminovány na minimum. Jen tak lze zajistit konstantní rychlost výroby a předejít zatuhnutí směsi v hadicích.

Velkým tématem při vývoji technologie bylo vyladění materiálu pro co nejdelší dobu zpracovatelnosti a zároveň zajištění konstantních parametrů průtoku UHPC systémem a stavitelnosti (buildability) materiálu do výšky. V kombinaci s velkými nároky UHPC na přesnost poměrů smícháva-







12

**12** Zárodky noh sochy B s vloženou výztuží pro zachycení momentů vyvolaných zatížením větrem, pohled na montáž prvků rezervoáru vyrobených také aditivní fabrikací **13** Instalace segmentu sochy B **14** Střední stěnová vrstva (v modelu na obr. 9 zelená) horního těla sochy B: pohled na vyrobený segment s přípravou na šroubované spoje

**12** Legs of statue B with inserted reinforcement to capture wind-loading effects. In addition the photo documents the installation process of the reservoir elements also made by additive manufacturing

**13** Installation of a segment of statue B

**14** Middle wall layer (green in the model in fig. 9) of the upper body of the sculpture B: view of the fabricated segment with preparation for bolted joints

ných složek a časování jejich přidávání do míchačky to komplexitu vývoje a výroby ještě znásobilo.

Během výroby byly do řídicího systému robota postupně nahrávány soubory pohybových instrukcí vytvořené navrženým softwarem. Pomocí komunikačního rozhraní robota operátor kontroloval a ovládal parametry procesu. Asistent operátora zajišťoval optimální souběh vedlejších činností při výrobě, kontroloval správnost sekvencí automatizovaných činností a operativně řešil případné problémy. Pracovník obsluhující míchačku v přesně načasovaných intervalech míchal várky směsi, které poté posílal přes pumpu a hadici do extrudéru.

Konstrukce sochy byla na základě výrobních a montážních možností po výšce rozdělena na konstrukční patra složená z menších modulů. Konstrukce každého patra byla do jisté míry odlišná od ostatních. Tak např. sloupové prvky nohou byly řešeny jako duté válce s vnitřními žebříkovými výztuhami (obr. 12). Konstrukce hlavního roznášecího patra kleneb, kde hlavní hmota navazuje na sloupy, byla opatřena vnitřními komůrkovými výztuhami. Patro bočních stěnových prvků bylo z nepohledové strany ztužováno adaptivními žebírky, jejichž hustota se proměňovala dle složitosti tvaru. Všechny tyto pomocné a výztužné prvky byly tištěny pomocí aditivní fabrikace a nevyžadovaly tedy žádné další výrobní procesy.

Celkem je sousoší složeno ze 148 dílů. Škála rozměrů vyráběných modulů sousoší se pohybova-

la od poměrně útlých částí nohou (250 × 250 × 600 mm) až po velmi rozměrné díly horního pláště a střechy (až cca 3 × 2,5 × 0,8 m). Pořadí výroby dílů odviselo od jejich pozice v rámci sochy a navrženého postupu montáže směrem odspodu nahoru. Po fabrikaci byly díly ošetřovány ve vodní lázni po dobu jednoho týdne. Po zrání trvajícím 28 dnů byly díly převezeny na stavbu a smontovány.

Před montáží modulů sochy byla podkladová nosná konstrukce opatřena ocelovými patkami, střechním souvrstvím a byly provedeny instalační přípravy pro vodní prvky sousoší. Poté začala instalace rezervoárových dlaždic. Ty byly opatřeny vodními vtoky, přepady a tryskami.

Sloupové díly nohou sochy byly postaveny na ocelové patky, které byly předtím opatřeny ocelovými pruty výztuže. Smontované sloupové díly byly zmonolitněny betonovou směsí, čímž vytvořily tuhou základnu pro osazování dalších pater sochy. Na toto sloupové patro navázalo roznášecí klenbové patro, poté následovalo patro stěnové a záklop sochy tvořilo opět patro klenbové (střešní).

Ve dvou výškových úrovních byla konstrukce na stavbě svázána ztužujícími monolitickými věnci. Bednění těchto věnců bylo navrženo jako ztracené a bylo vytištěno jako součást modulových dílů sochy. Nebylo tedy potřeba vytvářet tvarově složitě bednění konvenčními technologiemi. Moduly byly mezi sebou spojovány pomocí kombinace šroubovaných a monolitických spojů. (obr. 14)

13

14





15

**15** Střední klenbová vrstva (v modelu na obr. 9 fialová) horního těla sochy B sestavená z jednotlivých segmentů: ztužení vrstvy monolitickým vřemcem

**15** Middle arch layer (purple in the model in fig. 9) of the upper body of statue B, assembled from the individual segments: reinforcement of the layer with a monolithic perimeter beam

Na konstrukce celého sousoší vytvořené aditivní metodou bylo spotřebováno cca 21,3 m<sup>3</sup> UHPC Valucem. Na zmonolitnění a ztužení spojů nohou a spodní vrstvy segmentů nad nohami sochy bylo použito cca 10,5 m<sup>3</sup> litého betonu (na nohy byl použit Easycrte C30/37 a na část první vrstvy segmentů těla sochy byla použita cementová litá pěna Poriment). Celková hmotnost hlavní sochy je 60 t, tři menší sochy dohromady váží kolem 8 t. Výroba sousoší trvala týmu šesti až osmi lidí 25 týdnů a následná montáž zabrala týmu čtyř až šesti lidí 21 týdnů.

Po dokončení konstrukce byly po vnitřku sochy rozvedeny vodovodní trubky, ze kterých na vybraných místech pláště pomalu vytéká voda a postupně stéká po povrchu sochy do rezervoárů pod objektem. Tyto vodní rezervoáry byly též vyráběné metodou aditivní fabrikace v SFD. Jsou tvořeny velkoformátovými reliéfními UHPC dlaždicemi o tloušťce 35 mm osazovanými na bodové stojky. Technologie aditivní fabrikace byla u té-

to části výrazně modifikována, aby umožnila efektivní výrobu relativně plochých dílců, které jsou ale zároveň volně tvarované a neopakují se. Před samotnou extruzí betonu robot nejprve vyryl ve speciálně navržené modelovací hmotě požadovaný reliéf (obr. 10). Tato fáze procesu se dá označit jako subtraktivní (materiál je zde, na rozdíl od aditivní metody, odebírán). Poté na tento reliéf postupně nanášel extrudérem beton (zde začíná fáze aditivní). Toto nanášení však neprobíhalo konvenčním pohybem v jedné konstantní výškové vrstvě za druhou, ale sledováním povrchu vymodelované formy (výšková vrstva tedy měla stejný reliéfní tvar jako forma). Výhodou této technologie je mimo jiné recyklovatelnost modelovací hmoty, která se po odebdení použije pro další cyklus procesu. Mezi další zajímavosti rezervoárů patří i to, že se zde uplatnila přirozená výhoda UHPC v podobě minimálního průsaku vody. Nádrže tedy nevyžadovaly žádnou hydroizolaci.

Literatura:

- [1] KOLÍSKO, J. a kol. *Metodika 1 – Metodika pro návrh UHPC a materiálové zkoušky*. Výstup projektu TAČR TA 010110269. Metodika certifikovaná MD ČR. Praha: Kloknerův ústav ČVUT v Praze, 2014.
- [2] KOLÍSKO, J. a kol. *Metodika 2 – Metodika pro navrhování prvků z UHPC*. Výstup projektu TAČR TA 010110269. Metodika certifikovaná MD ČR. Praha: Kloknerův ústav ČVUT v Praze, 2014.
- [3] KOLÍSKO, J. a kol. *Metodika 3 – Metodika pro výrobu prvků z UHPC a pro kontrolu jejich provedení*. Výstup projektu TAČR TA 010110269. Metodika certifikovaná MD ČR. Praha: Kloknerův ústav ČVUT v Praze, 2014.
- [4] KOLÍSKO, J., TICHÝ, J., KALNÝ, M., HUŇKA, P., HÁJEK, P., TREFIL, V. *Vývoj ultra vysokohodnotného betonu (UHPC) na bázi surovin dostupných v ČR*. *Beton TKS. Betonové konstrukce 21. století – betony s přidanou hodnotou*. Samostatná příloha časopisu. 2012, s. 51–56. ISSN: 1213-3116.
- [5] ČSN EN 1990. *Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí*. Praha: ÚNMZ, 2004.
- [6] ČSN EN 1991-1-1. *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-1: Obecná zatížení – Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb*. Praha: ÚNMZ, 2004/2011.
- [7] ČSN EN 1991-1-4. *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-4: Obecná zatížení – Zatížení větrem*. Praha: ÚNMZ, 2007.

51





16



17

**16** Sousoší odkazuje na starou obchodní stezku, která lokalitou kdysi vedla, jeho tvary odkazují na břidlici a horniny, které pod Božislavkou miliony let sedimentovaly a které i dnes formují podobu města **17** Na sousoší je patrná pravidelná a zvrásněná struktura vytvořená strojem připomínající trvalost, která nás přesahuje, stejně tak jako schopnost člověka adaptovat sebe a své okolí

**16** While the concept of the sculpture refers to an old trade route that once led through the site, its shapes suggest the shale and rocks that have been sedimenting under Božislavka for millions of years and which continue to shape the town's appearance today **17** The sculpture shows the regular and wrinkled structure created by the machine, reminding us of the permanence that transcends us, as well as the ability of humans to adapt themselves and their surroundings

Technologii betonáže do roboticky vymodelovaných forem si Studio Federico Díaz již úspěšně odzkoušelo na projektu opláštění výdechového objektu z tunelu Blanka na pražské Letné (více v *Beton TKS 5/2020 – pozn. red.*). Tento projekt v roce 2020 získal první místo v soutěži o nejlepší betonovou stavbu, jež každých pět let vyhlašuje Česká betonářská společnost ČSSI.

### Závěr

Komplexní technika výroby vyvinutá Studiem Federico Díaz pro realizaci sousoší Na Horu nepřináší výhody pouze pro umělecké realizace. Tím, že umožňuje eliminaci bednění z procesu výstavby, snižuje náklady a výrazně zrychluje proces realizace jakéhokoli typu i rozsahu staveb. Ve výsledku je pro tuto technologii nepodstatné, zda má stavba tvar krychle nebo extrémně složitou geometrii. Potenciální doba realizace a náklady se s rostoucí tvarovou komplexitou snižují jen nepatrně.

Vhodně aplikovanou kombinací UHPC, aditivní robotické fabrikace (zjednodušeně 3D tisku) a komplexního softwarového řešení vznikly technologie i realizace výjimečné nejen v rámci České republiky, ale i v měřítku mezinárodním. Tuto novou technologii tým SFD intenzivně vyvíjel v letech 2018 a 2021 a nazval ji So Concrete. Následně založená společnost So Concrete a.s. v současnosti nabízí služby v oblasti navrhování a realizace atypických optimalizovaných betonových objektů.

V projektu sousoší Na Horu je technologie aditivní fabrikace z betonu (3DCP) posunutá na úplné hranice současných možností. A na oplátku poskytuje architektům, designerům a projektantům naprostou svobodu navrhování. Tím nastiňuje možný velký technologický posun pro stavební průmysl.

*Za podporu projektu děkujeme nadaci Karel Komárek Family Foundation a společnosti KKCG Real Estate Group a.s.*

*Fotografie a modely:*

*1, 3, 4, 9, 10, 12 až 15 – Studio Federico Díaz, 2, 16 a 17 – BoysPlayNice 5 až 8, 11 – Kloknerův ústav*



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



*MgA. Federico Díaz  
Studio Federico Díaz s.r.o.  
studio@federicodiaz.net*



*Ing. arch. MgA. Dmitrij Nikitin  
Studio Federico Díaz s.r.o.  
studio@federicodiaz.net*



*Ing. Petr Kněž  
Kloknerův ústav ČVUT v Praze  
petr.knez@cvut.cz*



*Ing. Karel Hurtig  
Kloknerův ústav ČVUT v Praze  
karel.hurtig@cvut.cz*