

SEQUENTIAL ON-SITE PRINTING OF BUILDING STRUCTURES

POSTUPNÝ TISK STAVEBNÍCH KONSTRUKCÍ NA STAVENIŠTI

Autoři: Suchomel Jiří, Bureš Vladislav

Abstract

A complex research program at the Technical University of Liberec is dealing with the 3D printing of buildings and their load-bearing structures. A case study of a printed multi-level house was used to simulate mutual influence between the technology and the structural design of buildings.

The design of the house is based on sequential printing of walls and slabs on site. The calculations of physical volumes and time requirements show among other things the importance of the printing material characteristics for reducing construction time when using this method.

Keywords:

3D printing; concrete; construction; architecture; printed building structures

Abstrakt

Na Technické univerzitě v Liberci je řešen komplexní výzkumný a vývojový projekt, zabývající se využitím technologie 3D tisku pro realizaci budov a jejich nosných konstrukcí. Jeho součástí je i zpracování případové studie tištěného víceúrovňového domu pro simulaci vzájemného ovlivňování užití technologie a konstrukčního řešení budovy.

Při návrhu domu je užit postupný tisk svislých i vodorovných konstrukcí na stavbě. Výpočty fyzických objemů a časových nároků na realizaci dokládají mimo jiné význam vlastností užitého tiskového materiálu pro zkrácení doby výstavby touto metodou.

Klíčová slova:

3D tisk; beton; stavebnictví; architektura; tištěné stavební konstrukce

1 - ÚVOD

Snahy o praktické využití 3D tisku v oblasti stavebnictví a architektury mají již více než desetiletou historii. Průkopníkem v tomto směru byl Behrokh Khoshnevis, který v roce 2005 prezentoval svůj koncept, nazvaný Contour Crafting a vzniklý na University of Southern California, Los Angeles [1]. Jeho metodu, založenou na stavbě svislých konstrukcí postupným ukládáním vrstev betonu, aplikovaly v pozměněných podobách později další subjekty. Mezi nimi bylo významné například úsilí čínské firmy Winsun [2] a amerického stavebního podnikatele Andreje Rudenka [3]. V současné době patří mezi zajímavé aktivity v oblasti tisku betonových konstrukcí například projekty TU Eindhoven [4], dánské firmy COBOD [5], holandské firmy CyBe [6] ruské firmy ApisCor [7] nebo TU Dresden [8]. K technologicky pokročilým systémům je možno zařadit i zařízení Bauminator rakouské firmy Baunit [9], které je ale určeno pouze pro tisk menších výrobků. Většina dosud realizovaných stavebních experimentů nezahrnuje tisk vodorovných (stropních a střešních) konstrukcí. Výjimkou jsou například některé objekty z produkce čínské firmy Winsun,

provedené vytištěním prefabrikátů ve výrobně a dopravených na staveniště [10] [11]. Některé subjekty tisknou pouze nenosné vertikální prvky (ztracená bednění), které jsou následně využity pro tradiční stavební postupy. Dosud nevyřešené problémy statického návrhu tenkostěnných a nekonvenčně vyztužených konstrukcí z materiálu se silně nelineárním chováním a v návaznosti na to i neexistující stavební předpisy pro tištěné konstrukce navíc brání jejich schválení jako nosných prvků budovy [5]. Nosná funkce pak musí být zajištěna jinými konstrukcemi.

Existující experimentální stavby vznikly často vytištěním prefabrikátů ve výrobní hale, jejich přepravou a montáží na staveništi [2][4]. Další užívanou možností je tisk malých budov na místě pod provizorním zastřešením [5][6][7]. Důvodem k těmto postupům je ochrana robota a tištěného díla před nežádoucími klimatickými vlivy. Potřeba tisknout pod střechou, stejně jako užívání portálových tiskových systémů, omezují rozměry tištěného díla.

Jako tisková zařízení jsou nejčastěji používány portálové tiskové systémy [1][2][3][4][5][8], v menší míře komerčně dostupná robotická ramena [6][9]. Výjimečně se vyskytují řešení 3D tisku, založená na unikátních konstrukcích robotických zařízení [7][8].

Předmětem naší práce je vývoj tiskového procesu realizovatelného na staveništi bez nutnosti užití bednění a bez dopravy prefabrikátů ze vzdálené výroby. Projekt využití technologie 3D tisku ve stavebnictví a architektuře 3D-STAR, řešený na Technické univerzitě v Liberci, se proto zabývá vývojem vlastního robotického zařízení (hardwarové a softwarové části) a principů navigace, umožňujících tisk na staveništi. Dále též vývojem vhodných tiskových směsí, konstrukčních principů a logiky organizace tisku na stavbě. Jeho cílem je vývoj technologie, umožňující realizaci půdorysně rozsáhlejších vícepodlažních objektů metodou jejich postupného tisku na staveništi.

Naše práce vychází z předpokladu, že je možno vhodnou kombinací odpovídajícího tiskového zařízení, materiálového a konstrukčního řešení dosáhnout optimálního uspořádání jejich vzájemných vztahů a zkrátit tak dobu potřebnou pro realizaci vícepodlažního tištěného objektu. Při postupném tisku je ale nutno konstrukční řešení a často i architektonické uspořádání tištěného objektu přizpůsobit možnostem užitého tiskového zařízení. Jedním z cílů projektu je proto objasnění vztahů mezi architektonicko stavebním řešením budov a jejich realizovatelností uvedenou metodou. Pro ověření těchto vztahů je vypracována studie malého třípodlažního objektu Trial House 01. Předmětem studie je návrh obytné budovy s tištěnými svislými a vodorovnými konstrukcemi. Z návrhu jsou odhadnuty potřebné fyzické objemy a časové nároky na proces tisku.

Ačkoliv jsou některé parametry ve studii stanoveny na základě odborného odhadu a předpokladů, vyplývajících z návrhových parametrů vyvíjeného robotického zařízení, je možno dojít k některým zjištěním a závěrům. Hlavním zjištěním je skutečnost, že i přes opatrně nastavený výkon tiskového zařízení je hlavním faktorem, ovlivňujícím rychlost postupu stavby, chování tiskové směsi. Z výpočtů vyplývá, že rychlost jeho tuhnutí, tvrdnutí a nabývání požadované pevnosti rozhodujícím způsobem ovlivňuje časové nároky na realizaci stavby. Vyšší výkony tiskového zařízení, nedoprovázené vhodnými vlastnostmi tiskové směsi, pak vedou pouze k větší diskrepanci.

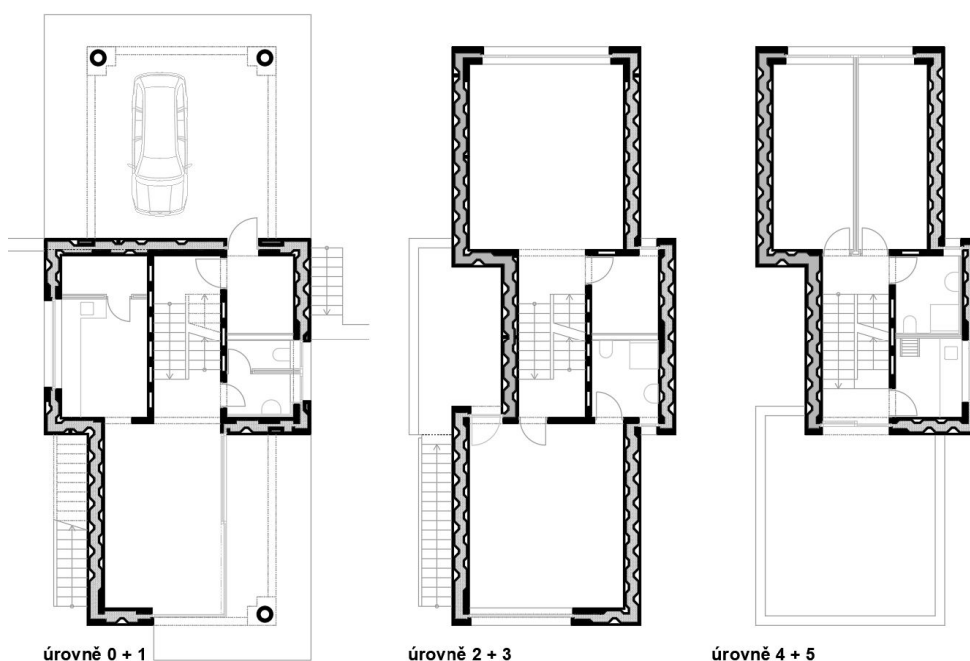
2 - METODA A DATA

Popisovaná práce je součástí projektu 3D-STAR, realizovaného na Technické univerzitě v Liberci v letech 2018 – 2022. Jeho cílem je vyvinout technologii 3D tisku, použitelnou pro realizaci nosných konstrukcí na staveništi. Projekt se zabývá vývojem robotického zařízení a souvisejícího know-how pro tisk svislých a vodorovných stavebních konstrukcí budov. Zároveň jsou zkoumány a vyvíjeny vhodné tiskové směsi a konstrukční principy, využívající možnosti 3D tisku.

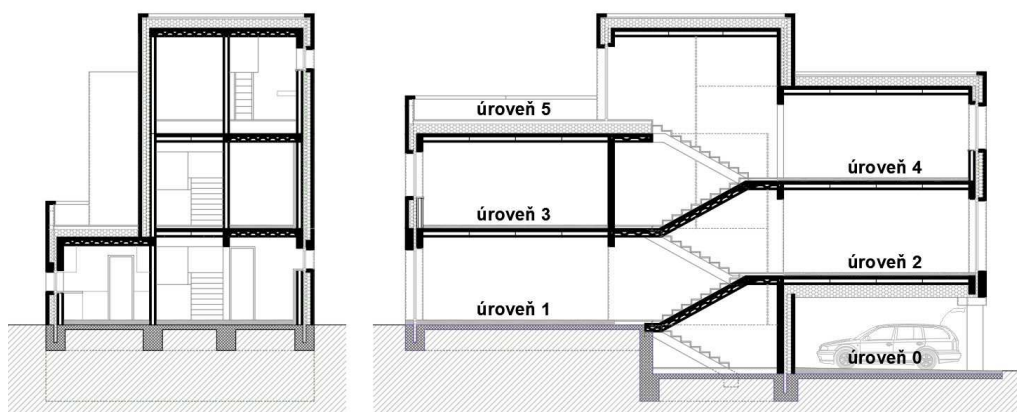
Mezioborově sestavený řešitelský tým, ve kterém je kromě čtyř fakult TUL zastoupen i Kloknerův ústav ČVUT v Praze, se zabývá všemi dotčenými souvislostmi. Vzhledem k pravidlům operačního programu Výzkum, vývoj a vzdělávání ve výzvě Předaplikační výzkum v prioritní ose 1 OP, na jehož základě je projekt financován, je výzkum omezen na první fáze vývoje (Technology readiness levels 1-3). Řada souvislostí, ověřitelných pouze experimenty na vyšší úrovni vývojových prací, tak může být zkoumána je na základě návrhových a výpočtových simulací.

2.1 Ověřovací dům Trial House 01

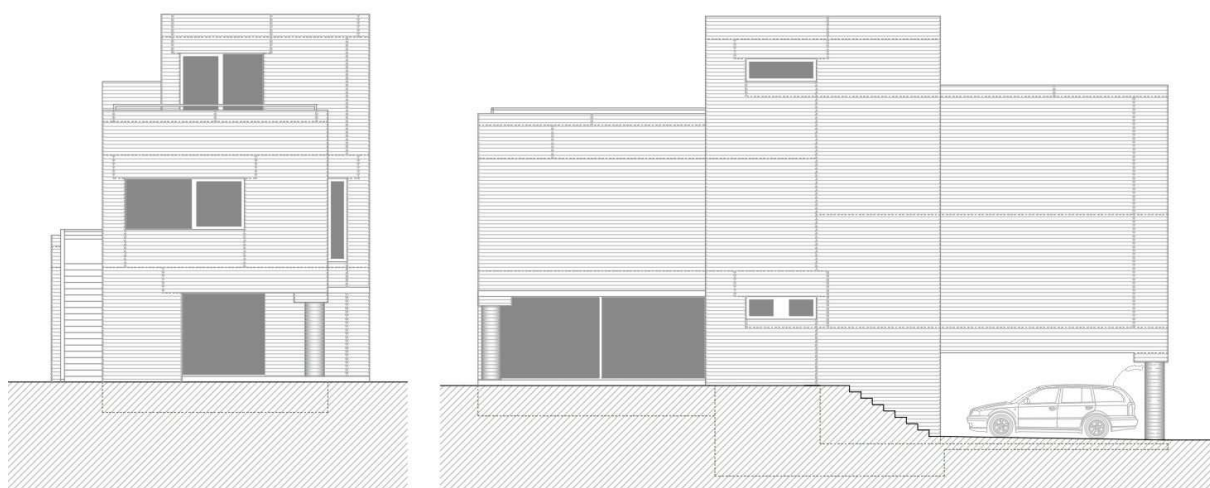
Pro upřesnění návrhových parametrů robotického zařízení a ověření jeho praktické využitelnosti při tisku konkrétních objektů jsou postupně zpracovávány studie konstrukcí a budov, umožňující výpočtové prognózy. Zároveň jsou zhotovovány na malé pomocné tiskárně fyzické vzorky konstrukcí z keramické hlíny a maltových směsí v měřítku 1:10. Ověřovací studie domu Trial House 01 (Obr. 1, 2, 3) je zpracována pro ověření souvislostí a vzájemného ovlivňování návrhu tištěných betonových stavebních konstrukcí a logiky postupu stavby, prováděné vyvíjenou technologií. Jejím cílem je poskytnout základní kvantifikované informace o fyzických objemech a výkonech, o časových nárocích při realizaci tištěného objektu a z nich vyplývajících nárocích na chování tiskové směsi.



Obr. 1.: Trial House 01 - půdorysy (Zdroj: 3D-STAR)



Obr. 2.: Trial House 01 - řezy (Zdroj: 3D-STAR)



Obr. 3.: Trial House 01 - pohledy (Zdroj: 3D-STAR)

Ověřovací rodinný dům je navržen pro dosažení co největší různorodosti stavebně konstrukčních vztahů a detailů. Dům je situován na abstraktní místo bez konkrétních vztahů k širšímu okolí. Je výškově uspořádán tak, že jeho jednotlivé úrovně jsou posunuty vždy o polovinu výšky podlaží. Budova v tomto provedení má sice celkem 7 úrovní, její celková výška ale odpovídá 3,5 podlažím. Tvarové řešení domu je omezeno na pravoúhlé půdorysné a hmotové uspořádání. Spodní stavba budovy je provedena tradičně.

2.2 Materiálové řešení

Uvažovaným materiálem pro tištěné nosné konstrukce je jemnozrnná betonová směs s vyšší pevností v tlaku (≥ 50 MPa) a vhodnými reologickými vlastnostmi, potřebnými pro její dopravu, vytlačování a ukládání tiskovou hlavou. Nezbytné vyztužování tažených částí konstrukcí je předpokládáno ohebnou výztuží (z ocelových, skleněných, karbonových nebo jiných vláken). Tato výztuž je ukládána tiskovou hlavou zároveň s tiskovou směsí. Zároveň je předpokládáno, že směs po uložení bude rychle tuhnout a nabývat požadovanou pevnost. Rychlost tuhnutí by měla umožnit kladení navazujících vrstev tisku bez deformace již vytištěných částí. Vytištěné díly musí být po určité době (cca do 3 až 5 dnů) schopné manipulace.

Kromě tištěných nosných stěn jsou v návrhu v malém rozsahu uvažovány i doplňkové nenosné sádkartonové konstrukce, zpravidla pro vytvoření instalačních stěn a příček. Pro svislou tepelnou izolaci stěn je předpokládáno užití sypaného materiálu (například vločky z EPS nebo PUR). Tento postup umožňuje vyplnit i tvarově členité prostory. Tepelná izolace stěn jednotlivých úrovní domu je předpokládána zasypaním dutin v plášti vždy na výšku jednoho podlaží po montáži stropů nad dotčeným podlažím. Provedení vodorovných tepelných izolací je předpokládáno běžnými postupy. Nespecifikováno je i složení podlahových vrstev v tloušťce 100 mm. Podlahy a stupně v prostoru schodiště jsou uvažovány jako duté truhlářské konstrukce, venkovní schody jako zámečnická konstrukce.

2.3 Konstrukční řešení

Na rozdíl od konvenčních postupů je možno při provádění stavebních konstrukcí metodou 3D tisku snadněji realizovat tenkostěnné, duté a odlehčené konstrukce. Tento typ konstrukcí je proto použit i v návrhu domu. Tištěné konstrukce jsou navrženy s ohledem na jejich funkci a předpokládané hlavní namáhání (u stěn tlak, u překladů a stropů ohyb). Návrh je proveden schematicky bez řešení některých tvarových a konstrukčních detailů.

Jeho smyslem je postihnout pouze hlavní logiku konstrukcí. V půdorysech je paralelními liniemi vyznačeno uspořádání tiskových stop. Šířka stopy je předpokládána 50 mm, výška ukládané vrstvy směsi 10 mm. Průměrná rychlost pohybu tiskové hlavy je uvažována 200 mm/s (12 m/min). Tiskové stopy jsou v návrhu tvarovány tak, aby pokud možno tvořily uzavřené křivky (polygony). Tištěná konstrukce domu se skládá z nehybných dílů (stěn a sloupů) a přemísťovaných staveništních prefabrikátů (stropních dílů, překladů, hlavic, parapetních a atikových dílů).

Skutečnost, že technologie 3D tisku přirozeně vede k aplikaci zhruba 50 mm tlustých, tedy tenkostěnných, nekonvenčními způsoby vyztužených konstrukcí, otvírá celou škálu problémů v oblasti návrhu a dimenzování těchto konstrukcí. Zejména u tlačených, svislých nosných konstrukcí je třeba řešit problémy stability (vzpěr, boulení) tenkostěnných konstrukcí. To bude velmi pravděpodobně znamenat impuls k rozvoji nových metod v navrhování betonových konstrukcí. Jde o podobný problém, který byl v minulosti řešen v oblasti ocelových konstrukcí při přechodu na používání tenkostěnných konstrukcí ve větším rozsahu. V případě betonových konstrukcí je problém ještě komplikovanější v důsledku nejen geometricky, ale i fyzikálně nelineárního chování materiálu a konstrukcí (dotvarování a smršťování tiskové směsi). V rámci projektu 3D-STAR jsou, v jistém rozsahu, zkoumány i tyto problémy.

2.4 Svislé konstrukce (nehybné díly)

Tyto části konstrukce jsou tištěny v definitivní pozici a nejsou následně přemísťovány. Jejich maximální rozměry jsou omezeny pouze velikostí tiskového prostoru robota v dané tiskové pozici.

Dům je navržen s *dvojitými betonovými obvodovými stěnami*, mezi nimiž je umístěna vrstva tepelné izolace. Po konstrukční stránce je tak tvořen vnitřní základní stavbou, ke které jsou přidány samostatně stojící vnější stěny. Jejich stabilita je podpořena v úrovni stropních konstrukcí provázáním vložených kotev z nerezové oceli, případně i nekovových materiálů.

Vnější část obvodových stěn má výšku 1 až 2 podlaží (výjimečně až cca 11 m) a je ukončena atikovým dílem. Toto řešení eliminuje většinu tepelných mostů a umožňuje dostatečně dimenzovat vrstvu tepelné izolace. Vnější obvodové stěny mají do exteriéru rovnou plochu a na rubové straně jsou profilovány pro zvýšení stability.

Vnitřní část obvodových stěn je součástí nosné konstrukce domu. Vnitřní stěny jsou tvarovány a dimenzovány s ohledem na zatížení od stropních konstrukcí a horních částí stavby. Ve třech pozicích jsou v nosné konstrukci užity tištěné válcové duté sloupy s hlavicemi. Vzhledem k omezenému dosahu ramene robota a jeho přemísťování jsou i stabilní stěny děleny na postupně tištěné části.

2.5 Vodorovné konstrukce (přemísťované díly)

Tyto části konstrukce, které nemohou být vytištěny v definitivní pozici, jsou vyrobeny jako staveništní prefabrikáty. Po době, potřebné pro nabytí požadované pevnosti jsou autojeřábem osazovány na místa určení. Rozměry stabilních stěnových dílů jsou omezeny velikostí tiskového prostoru robota. Rozměry prefabrikátů jsou voleny tak, aby jejich hmotnost nepřesáhla 4 000 kg.

Prefabrikované stropní díly jsou tištěny v poloze pootočené na bok. Jejich konstrukce je pro odlehčení navržena s dutinami. Výztuž, uložená v jednotlivých vrstvách tak může být rozmístěna v odstupu 10 mm. Tiskové vrstvy obsahující výztuž mohou být střídavě kříženy a tím může být dosaženo vyztužení ve více směrech. To je potřebné zejména u schodišťových ramen, některých překladů a hlavic nad sloupy. Hlavní polohy výztuže u stropních dílů a schodišťových ramen jsou vyznačeny ve výkresech. Při montáži jsou stropní díly a schodišťová ramena před osazením sklápěny o 90°.

Prefabrikované překlady nad otvory jsou tištěny ve standardní poloze. V dolních vrstvách překladů je vložena výztuž. Horní část některých překladů není uvažována jako nosná, tvoří pouze výplň nad otvorem. Tato část je podle potřeby odlehčena dutinami.

Ve studii jsou navrženy i *prefabrikované vnější parapetní desky a zakrytí atik*. Tyto díly jsou tištěny v obrácené poloze tak, aby jejich tvarovaná a odlehčená část byla tisknuta na masivní krycí desku dílu. Při montáži jsou pak převraceny o 180°.

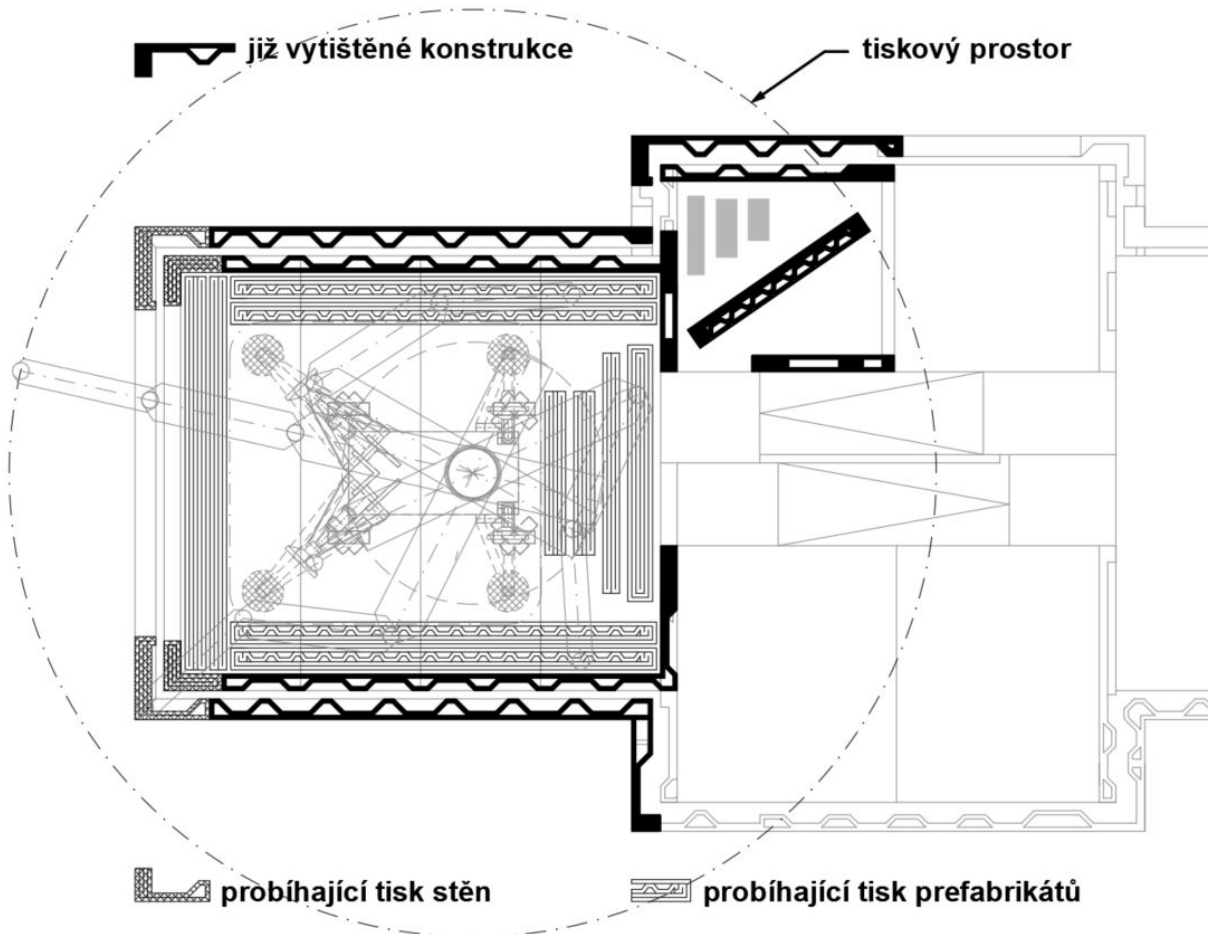
2.6 Zařízení pro tisk a manipulaci s prefabrikáty

Vyvíjený tiskový robot s otočným, svisle posuvným a délkově proměnným ramenem má půdorysný dosah cca 5,6 m. Výška tisku je uvažována do cca 3,2 m nad základní rovinu tisku v každé pozici robota. Hmotnost robota je odhadnuta na cca 2 500 kg. Robot je vybaven samohybným podvozkem a závěsem, umožňujícím jeho přemísťování pomocí autojeřábu.

2.7 Předpokládaný průběh tisku

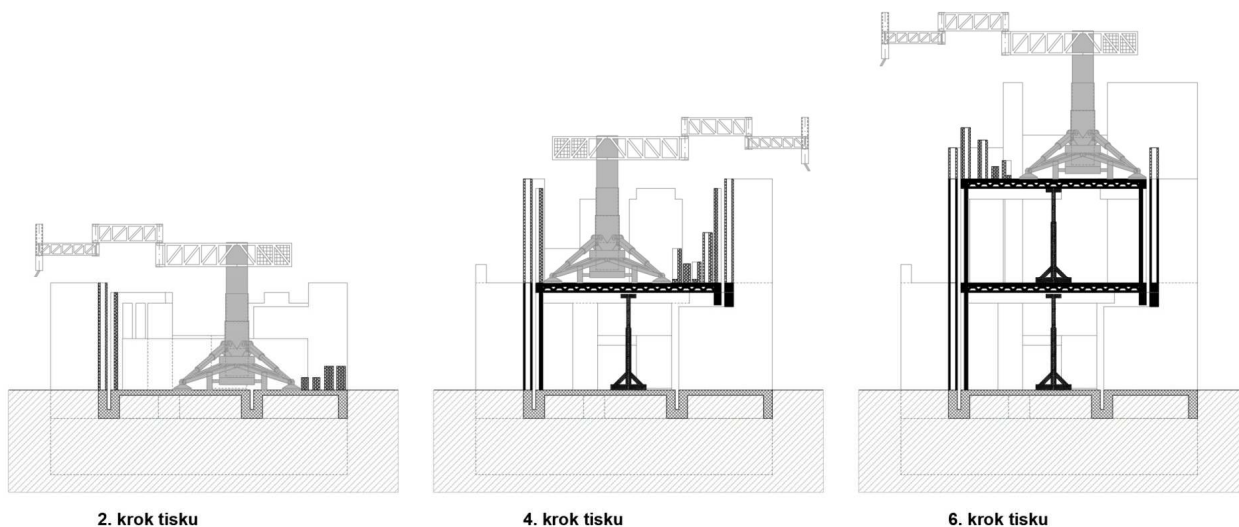
Při postupném tisku jednotlivých podlaží (úrovní) domu jsou zároveň tištěny jak stabilní svislé stěny, tak staveništní prefabrikáty vodorovných konstrukcí. Ty jsou po dosažení potřebné pevnosti betonu sklápěny, otáčeny a přemísťovány pomocí autojeřábu a ukládány na svislé konstrukce.

Pro tisk domu je robot postupně přemístěn do 18 míst, označených jako tiskové pozice robota. Ve výkresech jednotlivých pozic je vyznačen tiskový prostor, který robot dokáže využít. Tento prostor vymezuje rozsah konstrukcí (nehybných i přemísťovaných), které mohou být v jednom pracovním záběru vytištěny (Obr. 4).



Obr. 4.: Trial House 01 – tisk na tiskové pozici TP 07 (Zdroj: 3D-STAR)

Robot začíná tisknout nejnižší podlaží na podkladové železobetonové desce, provedené spolu se základy konvenčním způsobem a postupně se přesouvá do jednotlivých tiskových pozic. Pro tisk vyšších podlaží je robot jeřábem vždy přemístěn a uložen na stropní konstrukci dolního podlaží, smontovanou ze staveništních prefabrikátů vytištěných v předchozích pozicích. Robot následně tiskne konstrukce v daném podlaží. Podkladovou desku a stropní konstrukce je nutno dimenzovat tak, aby vyhověly zatížení tiskovým robotem a tisknutými prefabrikáty. V případě potřeby mohou být stropy během tisku podepřeny pomocnými teleskopickými stojkami (Obr. 5).



Obr. 5.: Trial House 01 – pracovní podepření stropu (Zdroj: 3D-STAR)

Realizace tištěné části domu je rozvržena do 9 kroků. Jednotlivé kroky pokrývají vždy jednu úroveň domu a zahrnují 2 – 4 pozice robota. Po dokončení kroku je robot jeřábem přemístěn na další (vyšší) úroveň domu. S ohledem na dobu pro nabytí potřebné pevnosti tištěných dílů je cyklus těchto kroků stanoven na 7 dnů. To znamená, že robot je umisťován na vytvrzené a smontované části stavby po 15 – 21 dnech od jejich vytištění. Tato doba je pak kritická pro chování použité směsi, která musí získat potřebnou pevnost.

2.8 Výpočet fyzických objemů a časových nároků

Výpočet je proveden v MS Excel. Vstupní hodnoty jsou z části apriorně zadány (rychlost pohybu tiskové hlavy, výška a šířka tiskové vrstvy a hmotnost směsi), z části změřeny z návrhu, zpracovaného v SW Autocad LT 2019. Délky tiskových stop jsou odvozeny z půdorysných ploch tištěných dílů, konstruovaných jako sestavy z 50 mm širokých stop. Z objemu vytištěných dílů je vypočtena jejich hmotnost, sloužící jako informativní hodnota pro nároky na manipulaci se staveništními prefabrikáty. Doby tisku jsou vypočteny z délek tiskových stop a rychlosti pohybu tiskové hlavy.

Ve výpočtu časové náročnosti tisku je zahrnuto pravidelné čištění dopravní cesty a tiskové hlavy v rozsahu 30 minut po každých 3 hodinách tisku, pravidelná kontrola a seřízení robota v rozsahu 60 minut po každých 8 hodinách provozu. Přemisťované prefabrikáty i stabilní nosné stěny musí před manipulací a montáží dosáhnout potřebnou pevnost. Proto je po vytištění každého podlaží (dvou úrovní) domu započtena technologická přestávka v rozsahu 7 dnů. Během této přestávky mohou být prováděny i rozsáhlejší servisní úkony na robotu a další úkony.

3 - VÝSLEDKY

3.1 Kvantifikace procesu stavby tištěné konstrukce

Z tabulky bilancí fyzických objemů tištěné stavby a časových nároků na jednotlivé fáze stavby (vlastní tisk, čekání na vytvrdnutí betonu, manipulace s prefabrikáty a jejich montáž, čištění a údržba robota) vyplývají některá zjištění. S ohledem na různé rozměry a počet dílů, tištěných v jedné tiskové pozici robota se doba potřebná pro tisk jedné vrstvy při průměrné rychlosti pohybu tiskové hlavy 200 mm/s (12 m/min) pohybuje od cca 7 minut do cca 26 minut. Průměrná doba je 12,2 minuty. Po této době se hlava vrací na začátek tisku a tiskne další vrstvu. Tuto významnou veličinu, určující nároky na rychlost tuhnutí a tvrdnutí ukládané směsi, je možno ovlivnit rychlostí pohybu tiskové hlavy a návrhem obsazení tiskového prostoru tištěnými díly.

Celková doba, potřebná na realizaci hrubé stavby tištěné části v celkovém objemu činí 1 512 hodin, tj. 63 dnů při 24hodinovém provozu. Z toho na vlastní tisk připadá pouze 31% času (19,5 dne). Manipulace s prefabrikovanými

prvky a jejich montáž zabere pouze 4,5% času (2,8 dne). Hlavní podíl času připadá na servisní činnosti a technologické přestávky pro tvrdnutí betonu – 64,5% času (40,7 dne). Celkový objem zpracované betonové směsi je 168,6 m³. Na něm se podílejí stabilní konstrukce cca 55%, přemísťované prefabrikáty cca 45%. Celková délka tiskových stop je u navrženého domu cca 337 km. To ukazuje na nutnost pravidelných kontrolních intervalů robota a pravděpodobně i na potřebu cyklické výměny opotřebovaných částí tiskové hlavy (Tab. 1).

STAVBA CELKEM

parametry tisku				fyzické výkony tisku					doba tisku				servisní činnosti, technologické přestávky a montáž prefabrikátů				stavba tištěné konstrukce celkem		
rychlost tisku	výška vrstvy	šířka vrstvy	max. délka stopy tisku jedné vrstvy	celková délka stop	max. plocha tisku jedné vrstvy	objem tisku stavby	hmotnost stěn	hmotnost prefabrikátů	průměrná doba tisku jedné stopy		celková doba tisku všech pozic	čistění robota	kontrola, seřizování	technologické přestávky (tvrdnutí betonu)		montáž prefabrikátů	doba celkem		
									min.	hod.				hod.	dní		hod.	dní	hod.
0,2	12	10		337 218		168,6	199,3	167,3	12,2	0,2	468,4	19,5	66,9	50,2	858,8	67,8	2,8	1 512,0	63,0
							54,4%	45,6%			31,0%		4,4%	3,3%	56,8%	4,5%		100,0%	

TISKOVÉ POZICE

TP 01	97	15 983	4,9	8,0	12,6	5,0	8,1	0,1	22,2	0,9	3,7	2,8	2,0	0,1
TP 02	317	26 165	15,9	13,1	3,2	25,6	26,4	0,4	36,3	1,5	6,1	4,5	8,1	0,3
TP 03	143	17 139	7,2	8,6	16,0	2,8	11,9	0,2	23,8	1,0	4,0	3,0	2,9	0,1
TP 04	84	17 808	4,2	8,9	12,1	7,5	7,0	0,1	24,7	1,0	4,1	3,1	2,4	0,1
TP 05	278	39 870	13,9	19,9	18,4	25,5	23,2	0,4	55,4	2,3	9,2	6,9	7,9	0,3
TP 06	95	25 385	4,8	12,7	24,9	3,1	7,9	0,1	35,3	1,5	5,9	4,4	2,1	0,1
TP 07	204	22 405	10,2	11,2	6,3	18,3	17,0	0,3	31,1	1,3	5,2	3,9	6,6	0,3
TP 08	110	19 312	5,5	9,7	10,4	10,9	9,2	0,2	26,8	1,1	4,5	3,4	3,0	0,1
TP 09	88	6 552	4,4	3,3	0,0	7,2	7,3	0,1	9,1	0,4	1,5	1,1	3,1	0,1
TP 10	105	21 576	5,3	10,8	19,2	4,5	8,8	0,1	30,0	1,2	5,0	3,7	3,0	0,1
TP 11	113	16 855	5,6	8,4	13,1	5,5	9,4	0,2	23,4	1,0	3,9	2,9	3,6	0,2
TP 12	119	30 729	5,9	15,4	30,5	3,3	9,9	0,2	42,7	1,8	7,1	5,3	2,1	0,1
TP 13	91	13 166	4,5	6,6	0,0	14,5	7,6	0,1	18,3	0,8	3,0	2,3	4,0	0,2
TP 14	94	8 196	4,7	4,1	6,5	2,5	7,9	0,1	11,4	0,5	1,9	1,4	1,8	0,1
TP 15	190	24 419	9,5	12,2	17,2	9,7	15,8	0,3	33,9	1,4	5,7	4,2	5,1	0,2
TP 16	130	5 046	6,5	2,5	1,9	3,6	10,8	0,2	7,0	0,3	1,2	0,9	2,4	0,1
TP 17	216	22 751	10,8	11,4	11,3	13,7	18,0	0,3	31,6	1,3	5,3	3,9	3,5	0,1
TP 18	216	3 861	10,8	1,9	0,0	4,2	18,0	0,3	5,4	0,2	0,9	0,7	0,0	0,0
MONTÁŽ (TP 19)	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,2	0,2

Tab. 1.: Trial House 01 – postup tisku (Zdroj: 3D-STAR)

4 - DISKUSE

4.1 Výchozí předpoklady

Nalezení vhodné tiskové směsi je pro řešení rychlejšího postupu tisku stěžejním úkolem. Základními nároky jsou vysoká pevnost v tlaku po vytvrzení, rychlé tuhnutí a nabývání pevnosti po vytištění při současně pomalém tuhnutí uvnitř tiskové hlavy a dopravní cesty od míchačky k tiskové hlavě. Jako základní materiál pro tisk je uvažován beton, jehož zrnitost je ale omezena jak profilem tištěné stopy, tak potřebou bezkonfliktního chování směsi v tiskové hlavě a při jejím transportu do hlavy. V projektu 3D-STAR je takový materiál vyvíjen. Zároveň jsou prověřovány i jiné možnosti, například využití geopolymérů. Teoreticky možná je i kombinace více druhů tiskových směsí. Tato možnost ale komplikuje řešení tiskové hlavy.

Na tvrdnutí tiskové směsi jsou kladeny tři základní časové nároky. Prvním je doba pro dosažení tuhosti vytištěné vrstvy pro uložení následující vrstvy nebo vrstev (ve studii uvažována od 7 do 26 minut). Druhým je doba pro dosažení potřebné pevnosti vytištěných konstrukcí (nehybných i přemísťovaných prefabrikátů) pro jejich montáž (ve studii uvažována 3 až 5 dnů od vytištění). Třetím pak je doba pro dosažení potřebné pevnosti těchto prvků pro pokračování tisku při zatížení robotem a tištěnými prefabrikáty. Ta je ve studii uvažována 15 – 21 dnů od počátku tisku.

Nezbytné vyztužování betonu pro realizaci konstrukcí namáhaných ohybem je ve studii předpokládáno užitím hustě rozmísťované tenké flexibilní výztuže, vkládané do jednotlivých vrstev směsi při jejich tisku. Nalezení vhodných materiálů a postupů jejich ukládání při tisku je předmětem samostatného vývoje v projektu 3D-STAR.

4.2 Otevřené problémy

Zásobování tiskovou směsí a její doprava k robotu nejsou ve studii domu detailně řešeny. Předpokládána je stabilní poloha zásobníku suché tiskové směsi a míchačky umístěné poblíž středu půdorysu tištěné budovy. Vzdálenost mezi míchačkou a robotem může být kritická s ohledem na možné nežádoucí tuhnutí směsi v příliš dlouhé propojovací hadici. Řešením by mohlo být přemístování míchačky a užití dvou zásobníků směsi. *Vlivy povětrnosti* mohou při tisku na staveništi vést k omezení tiskového provozu. V nezbytném rozsahu mohou být řešeny zakrytím plachtami. Kritická může být i *stabilita volně stojících vytištěných prefabrikátů* a neúplných částí stěn během tisku. Ta je řešitelná zejména konstrukčním řešením těchto dílů a stavby jako celku. Vliv na ni má i organizace postupu tisku.

Z celkového objemu tisku při realizaci navrženého domu jsou zřejmě *nároky na tiskové zařízení*, zejména na odolnost a snadnou udržovatelnost mechanických částí robota a tiskové hlavy. Spolu s potřebou dosažení přesnosti polohy výstupní hubice v rozsahu několika milimetrů při délce ramene robota cca 5,6 m tvoří nelehké zadání pro řešitele této části projektu 3D-STAR. Menší velikost robota by sice řešení některých problémů usnadnila, vedla by ale k potřebě většího množství tiskových pozic a omezila by i velikost tištěných prvků, zejména rozpětí stropních konstrukcí. Uvažovaná velikost tiskového robota, zejména volná plocha potřebná pro jeho umístění a obsluhu, je omezující pro tisk malých vícepodlažních objektů. V některých případech vede ke zbytečně častému přemístování robota.

5 - ZÁVĚRY

Ze studie ověřovacího domu Trial House 01 a její kvantifikace je možno dojít k následujícím závěrům:

S technologií 3D tisku bývá spojováno *očekávání úplné tvarové svobody* při návrhu budov a jejich konstrukcí. Tisk betonových konstrukcí má ale některá omezení, plynoucí z povahy užitého materiálu a z možností tiskového robota. Zatímco tvarování tištěných konstrukcí v horizontální rovině je relativně neomezené, podléhá jejich vertikální tvar v měkkém stavu během tisku gravitaci a je náchylný k deformacím. To omezuje zejména odklon těchto konstrukcí od vodorovnice. V řešené studii bylo proto užito výhradně svislé uspořádání navazujících tiskových vrstev.

Potřeba zohledňovat omezení plynoucí z povahy 3D tisku vyžaduje při zvoleném druhu konstrukcí detailní konstrukční řešení již v koncepční fázi návrhu. Ukazuje se nezbytnost pracovat od počátku ve 3D softwaru pro udržení přehledu o vztazích mezi jednotlivými díly konstrukce. Na základě zkušeností ze studie ověřovacího domu Trial House 01 se jeví jako žádoucí nalézt nebo vytvořit *specializovaný software* pro detailní řešení specifických tištěných konstrukcí a pro optimalizaci organizace postupu tiskového procesu dané stavby včetně rozmístění tištěných prefabrikátů s ohledem na zatížení stropních konstrukcí a přístupnost robota během tisku pro údržbu. Tyto souvislosti byly ve zpracované studii řešeny na základě odborného odhadu a jejich optimalizace v softwarovém prostředí by byla prospěšná.

V návaznosti na 3D tisk tlačených plošných, tenkostěnných betonových konstrukcí, nekonvenčními způsoby vyztužených, náchylných ke ztrátám stability (vzpěr, klopení a poulení), jsou kladeny velké nároky na statické řešení těchto konstrukcí. Pro navrhování konstrukcí tohoto typu nejsou zatím běžně dostupné metody. Tyto metody, které musí zohlednit geometricky i fyzikálně nelineární chování materiálu i konstrukcí, jsou v současné době v České republice i ve světě vyvíjeny.

Provedená simulace dokládá, že *tisk vícepodlažních objektů na staveništi* zkoumanou metodou je teoreticky možný. Vede k potřebě detailní trojrozměrné koordinace ve fázích návrhu stavby a řešení jejich konstrukcí i ve fázích provádění tisku a montáže vytištěných dílů. Vytvoření jednotného softwarového prostředí je pro takovou koordinaci významné.

Rychlost provádění tištěné stavby, která je potenciálně jednou z výhod zkoumané technologie, se řídí jednak parametry tiskového zařízení a organizací postupu tisku, jednak chováním užitého tiskového materiálu. Z provedených výpočtů vyplývá, že hlavní časové nároky plynou z rychlosti tuhnutí a tvrdnutí tiskové směsi. Nalezení vhodné směsi je proto klíčem k možnému zkrácení celkové doby výstavby.

K *přednostem 3D tisku* patří zejména možnost provádět betonové konstrukce bez bednění a možnost snadno realizovat tvarově složité konstrukce. To vede k úsporám nákladů a snížení dopadu na životní prostředí. Další potenciální výhody jako omezení rizikového vlivu lidského faktoru na kvalitu díla, snížení úrazovosti na stavbách a zrychlení procesu výstavby musí být ještě ověřeny

6 - PODĚKOVÁNÍ

Děkujeme ostatním členům týmu projektu 3D-STAR, kteří spolupracují na výzkumu, zejména Petru Zelenému za vedení projektu a vývoj tiskové hlavy robota, Václavu Zádovi za vývoj robotického ramene, Leoši Beranovi za vývoj zkušební testbedu a Janu Koprnickému za vývoj navigačního systému pro tisk.

Práce byla finančně podpořena z operačního programu Výzkum, vývoj a vzdělávání, výzva Předaplikační výzkum v prioritní ose 1 OP

POUŽITÉ ZDROJE

- [1] D. Hwang, B. Khoshnevis, An Innovative Construction Process Contour Crafting (CC), in: 22nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction ISARC 2005, Ferrara, 2005
- [2] Information on: www.winsun3d.com/En/
- [3] Information on: <http://www.totalkustom.com/>
- [4] Information on: <https://www.tue.nl>
- [5] Information on: <https://cobod.com/>
- [6] Information on: <https://cybe.eu/>
- [7] Information on: <https://www.apis-cor.com/en/faq/tehnologiya-stroitelstva>
- [8] M. Krause, J. Otto, A. Bulgakov, D. Sayfeddine, Strategic optimization of 3D concrete printing using the method of CONPrint3D®, in: 35th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2018), Berlin, 2018
- [9] Information on: <https://baumit.at/baumit-bauminator>
- [10] Information on: <https://blog.adafruit.com/2014/04/17/3d-printer-builds-ten-affordable-homes-in-24-hours-3dxarchitecture-3dthursday-3dprinting/>
- [11] Information on: <https://www.enr.com/articles/39692-office-built-out-of-3d-printed-components-opens-in-dubai>

Informace o autorech:

JIŘÍ SUCHOMEL, PROF., ING.ARCH., AKAD. ARCH.

Technická univerzita v Liberci, Fakulta umění architektury, katedra architektury

Studentská 1402/2, 461 17 Liberec

jiri.suchomel@tul.cz

Jiří Suchomel je architekt s padesátiletou praxí, zahrnující 140 projektů, z toho více než 20 realizací budov v tuzemsku i v zahraničí. Zabýval se projekty v oblasti energetické úspornosti staveb a využitím solární energie. V roce 1991 působil jako Visiting Associate Professor na College of Architecture and Urban Planning, University of Michigan, v roce 1994 jako Gastprofessor na Fakultät für Architektur, Technische Universität München. V roce 1994 založil v Liberci fakultu architektury. Byl jejím prvním děkanem a pracuje na ní dodnes.

VLADISLAV BUREŠ, ING.

Technická univerzita v Liberci, Fakulta umění architektury, katedra nosných konstrukcí

Studentská 1402/2, 461 17 Liberec

vladislav.bures@tul.cz

Vladislav Bureš je stavební inženýr, pracující v oboru statiky a dynamiky budov, s téměř čtyřicetiletou praxí v oboru betonového stavitelství. Zúčastnil se návrhu nosných konstrukcí desítek budov s realizacemi v tuzemsku i v zahraničí. Od roku 1991 vede vlastní konstrukční kancelář Statika, projekční kancelář s.r.o. Je členem České betonářské společnosti a Českého svazu stavebních inženýrů. Od roku 2000 působí jak pedagog fakulty architektury TUL, kde pracuje na katedře nosných konstrukcí.