



3D STAR

3D tisk ve stavebnictví a architektuře
3D Print in civil engineering and architecture



OBSAH
CONTENTS

01
ÚVODEM
INTRODUCTION

- 9 Impuls k projektu
- 10 Očekávání spojená s projektem

02
TISKOVÝ MATERIÁL, TISKOVÁ HLAVA, TESTBED
PRINT MATERIAL, PRINT HEAD AND TESTBED

- 14 Požadavky na tiskovou směs
- 20 Tisková hlava
- 24 TESTBED

03
TISKOVÝ ROBOT „PRINTING MANTIS“ -
UNIKÁTNÍ ROBOTICKÉ ZAŘÍZENÍ PRO 3D TISK
PRINTING MANTIS - A UNIQUE ROBOTIC DEVICE
FOR 3D PRINTING

- 36 Kinematika, dynamika a řízení robotu
- 40 Využití fyzikální modelů
- 43 Popis konstrukce ramene 1:2

04
SOFTWAREVÉ ŘEŠENÍ A SOUVISLOSTI
SOFTWARE CONCEPT AND CONTEXTS

- 56 Projektová příprava tištěných staveb
- 55 Softwarové řetězce pro 3D tisk stavebních konstrukcí z betonu
- 62 Příprava G-kodu pro 3D tisk

05
TIŠTĚNÉ STAVEBNÍ KONSTRUKCE, TISK VZORKŮ, VÝSLEDKY
PRINTED BUILDING STRUCTURES, SAMPLE PRINTING, RESULTS

- 72 3D tisk cementových kompozitů
- 79 Vyztužování tištěných prvků a konstrukcí
- 86 Stropní nosníky
- 88 Sledování změn tvaru stěnového segmentu 3D skenováním

06
POSTUP TISKU NA STAVBĚ, LOKALIZACE ROBOTU
PRINTING PROCEDURE ON CONSTRUCTION SITE, ROBOT LOCALISATION

- 99 Postup tisku
- 102 Lokalizace a navigace 3d tiskového robotu
- 104 Navrhované koncepty lokalizace stroje v projektu 3D STAR

07
TIŠTĚNÉ STAVBY
PRINTED STRUCTURES

- 116 3D tisk cementových kompozitů - proč tisknout z betonu
- 117 Jak tisknout z betonu
- 120 Trial House 01
- 125 Hypotetický tisk kostela v Neratovicích

08
NĚKOLIK VĚT ZÁVĚREM
A FEW FINAL SENTENCES

- 137 Kam jsme došli
- 138 Co ještě chceme stihnout
- 139 Jak v budoucnu dál





01

ÚVODEM

INTRODUCTION

Jiří Suchomel, Petr Zelený

IMPULS K PROJEKTU

Záměr Technické univerzity v Liberci věnovat se technologii 3D tisku ve stavebnictví vznikl a byl postupně upřesňován počátkem roku 2015. Prvotní úvahy probíhaly v diskusi mezi pracovníky Fakulty umění a architektury a Fakulty strojní, záhy se ale tým rozšířil o odborníky z Fakulty mechatroniky, informatiky a mezioborových studií a Fakulty textilní. Vzhledem k jedinečné odborné kompetenci a potřebnému laboratornímu zázemí byl také osloven Kloknerův ústav Českého vysokého učení technického v Praze. Po důkladné a intenzivní přípravě podkladů získal výzkumný tým pro financování svých záměrů podporu z operačního programu Věda výzkum vzdělávání, financovaného z Evropských strukturálních a investičních fondů. Ve výzvě Předaplikační výzkum uspěl s projektem 3D tisk ve stavebnictví a architektuře (ve zkratce 3D STAR) a mohl tak počátkem března 2018 zahájit svoji čtyřletou práci.

FIRST IMPULSE FOR THE PROJECT

The decision on the part of the Technical University in Liberec to engage in 3D printing technology first emerged and was gradually refined at the beginning of 2015. The initial considerations resulted from a discussion between the staff of the Faculty of Arts and Architecture and the Faculty of Mechanical Engineering, but soon the team expanded to include experts from the Faculty of Mechatronics, Informatics and Interdisciplinary Studies and the Faculty of Textile Engineering. The Klokner Institute of the Czech Technical University in Prague was also invited for their unique professional competence and laboratory facilities. After a long search, the research team succeeded in a call for Pre-Application Research and received funding from the Operational Programme Science Research in Education, financed by the European Structural and Investment Funds. The four-year project on 3D printing in construction and architecture, abbreviated from its Czech name as 3D STAR, was launched at the beginning of March 2018.

PODMÍNKY PROJEKTU

Vzhledem k omezením stupně rozpracovanosti řešení na technologické úrovni (Technology Readiness Levels) TRL 1 až TRL 3, z důvodu stanovených podmínek financování, byla v rámci projektu řešena pouze koncepce tiskového zařízení s experimentálním ověřením jejích částí v laboratorním prostředí. V rámci projektu byly zároveň na obdobné úrovni řešeny navazující souvislosti v oblasti stavebních materiálů a konstrukcí a v oblasti navrhování staveb a jejich realizace pomocí vyvíjeného zařízení. Tyto vztahy byly v rámci projektu studovány a získané poznatky průběžně aplikovány na konstrukční a softwarové řešení vyvíjeného tiskového zařízení.

LIMITS OF THE PROJECT

Because grant requirements limited maturity level to Technology Readiness Levels TRL 1 to TRL 3 the project dealt only with the concept of the printing device and its experimental verification under laboratory conditions. Connections to building materials, building structures, building design and their making with the proposed equipment were addressed at a similar level. Studying these relationships was part of the project and the knowledge gained was continuously applied to the hardware and software of the printing equipment under development.

OČEKÁVÁNÍ SPOJENÁ S PROJEKTEM

Cílem projektu bylo prověřit možnosti 3D tisku jako varianty ke konvenčním způsobům provádění betonových konstrukcí a staveb. Na rozdíl od nich umožňuje 3D tisk snadno realizovat odlehčené, duté, tenkostěnné a tvarově složité konstrukce. Nabízí tak možnost úspory užitých stavebních materiálů, zejména cementu a kameniva, jejichž těžba a výroba je spojena s významnou spotřebou energie a zátěží pro životní prostředí. 3D tisk navíc prakticky nevyžaduje bednění, snižuje nároky na manuální pracovní sílu a při vhodné organizaci tiskového procesu umožňuje zkrátit dobu výstavby.

EXPECTATIONS FOR THE PROJECT

The goal of the project was to examine the possibilities of 3D printing as an alternative to conventional methods of making concrete structures and buildings. Unlike these, 3D printing makes it possible to easily create lightweight, hollow, thin-walled and complex structures. It offers the possibility of saving building materials, especially cement and aggregates, the production of which is associated with significant energy consumption and environmental burden. In addition, 3D printing practically does not require formwork, reduces the demands on manual labor and, with the appropriate organisation of the printing process, makes it possible to shorten construction time.

PRŮBĚH A ROZSAH PROJEKTU

Projekt byl zaměřen na využití technologie 3D tisku ve stavebnictví a architektuře, zejména na vývoj robotického zařízení, schopného na stavbě tisknout konstrukce bez nutnosti užití bednění a bez dopravy prefabrikátů ze vzdálené výroby. Jeho cílem bylo koncepční hardwarové a softwarové řešení tiskového robotu, spojené s ověřením některých jeho částí na funkčních vzorcích. Zároveň byly zkoumány a vyvíjeny vhodné stavební materiály a hledány optimální stavebně konstrukční principy, využívající unikátní možnosti této technologie. Součástí práce byl i výzkum logiky postupu tisku a způsobu navigace, umožňující tisk na staveništi.

PROGRESS AND SCOPE OF THE PROJECT

The project focused on the use of 3D printing technology in construction and architecture, particularly on the development of a robotic device capable of printing structures on the construction site without the need for formwork and for transportation of prefabricated parts from a distant factory. Its goal was to develop conceptual hardware and software of the printing robot and to test some of its parts in functional prototypes. At the same time, suitable building materials were researched and developed and optimal construction principles were sought, using the unique possibilities of this technology. The work also included research into the logic of the printing process and the method of navigation which would make on-site printing possible.

PŘÍSTUP K ŘEŠENÍ TISK CEMENTOVÝCH KOMPOZITŮ

Přístup k řešení vycházel ze tří základních rozhodnutí, vymezujících a upřesňujících další postup práce. Prvním byla volba cementových kompozitů (cementové malty, jemnozrnného betonu) jako tiskového materiálu. Beton je v současné době celosvětově nejpoužívanějším stavebním materiálem. Má velmi dobrou pevnost v prostém tlaku a po vyztužení dobře vzdoruje i dalším typům namáhání – ohybu, smyku, kroucení i tahu, což umožňuje větší variabilitu konstrukcí. K jeho přednostem patří i požární odolnost a odolnost proti korozi. Betonové konstrukce se vyznačují tuhostí a díky své hmotnosti i akustickým útlumem.

FIRST DECISION - PRINTING OF CEMENT COMPOSITES

The approach was based on three basic decisions which defined and specified the ensuing progress of work. The first was the choice of cement composites (cement mortar, fine-grained concrete) as printing material. Concrete is currently the most commonly used construction material worldwide. It has very good strength in normal compression and when reinforced resists other types of stress – bending, shearing, twisting and tension, which allows greater variability of constructions. Its advantages include fire resistance and corrosion resistance. Concrete structures are characterised by rigidity and, thanks to their weight, also acoustic attenuation.

DRUHÉ ROZHODNUTÍ METODA POSTUPNÉHO TISKU

Druhým rozhodnutím byla volba způsobu provádění stavby metodou postupného tisku, kdy se relativně malý mobilní tiskový robot pohybuje po staveništi a postupně tiskne jednotlivé části a podlaží stavby. Tento princip umožňuje na rozdíl od portálových systémů tisknout velké stavební objekty bez omezení pracovním prostorem tiskového robotu. Na stavbě může zároveň pracovat i více navzájem koordinovaných robotů. Jejich pracovní prostory pak mohou překrývat, což umožní tisk velkých konstrukčních dílů.

SECOND DECISION - SEQUENTIAL PRINTING METHOD

The second decision was to use the sequential printing method where a relatively small mobile printing robot moves around the construction site and gradually prints individual parts and floors of the building. Unlike gantry systems, this principle makes it possible to print large building objects without being limited by the working space of the printing robot. Multiple coordinated robots can work on the construction site simultaneously. Their workspaces can then overlap, making it possible to print large structural parts.

TŘETÍ ROZHODNUTÍ – SPECIFICKÝ ROBOT MÍSTO STANDARDNÍHO PRŮMYSLOVÉHO RAMENE

Třetím rozhodnutím byl vývoj unikátního tiskového robotu, navrženého specificky pro potřebu 3D tisku cementových kompozitů, kdy je tiskový materiál postupně ukládán v horizontálních vrstvách. Při tom se tisková hlava pohybuje zejména ve vodorovné rovině a ke svislému pohybu dochází jen při přechodu na další vrstvu. Těmto požadavkům optimálně odpovídá v projektu 3D STAR navržená rozšířená SCARA struktura. Na rozdíl od standardních průmyslových ramen nespotřebovává běžná SCARA struktura k udržení stanovené výšky energii. Avšak v případě tisku zlomu tištěné křivky je nutné provést zastavení celého mechanismu s následným rozběhem v jiném směru. To vede ke ztrátě kinetické energie, která je značná. Proto byl přidán dodatečný rotační článek, který umožňuje téměř zachovat kinetickou energii mechanismu s tím, že se zastavuje pouze koncový bod posledního článku robota, osazený tiskací hlavicí. Tím dochází k výrazným úsporám energie při tisku budov. Běžná průmyslová ramena jsou navíc vyráběna zejména pro provoz ve strojírenství, kde jsou na ně kladeny jiné nároky než na stavbě. Pro požadovaný rozměr tiskového prostoru s poloměrem přes pět metrů je ale nabídka takových ramen velmi omezená.

THIRD DECISION – USING A SPECIFIC ROBOT INSTEAD OF A STANDARD INDUSTRIAL ARM

The third decision was to develop a unique printing robot, designed specifically for the 3D printing of cement composites where the printing material is gradually deposited in horizontal layers. In doing so, the print head moves mainly in a horizontal plane, and vertical shift occurs only when getting to the next layer. The extended SCARA structure proposed in the 3D STAR project meets these requirements optimally. Unlike standard industrial arms, the SCARA structure does not consume energy to maintain a set height. However, when printing a break in the printed curve it is necessary to stop the entire mechanism and start in a different direction. This results in a considerable loss of kinetic energy. Therefore, an additional rotary link was used to preserve almost all of the kinetic energy of the mechanism, stopping only the end point of the robot's last link which is fitted with a print head. This results in significant energy savings when printing buildings. In addition, common industrial arms are manufactured especially for operation in the engineering industry where different demands are placed on them than on a construction site. Furthermore, for the required size of the printing area with a working radius of over five meters, the supply of such arms is very limited.



02

TISKOVÝ MATERIÁL, TISKOVÁ HLAVA A TESTBED PRINT MATERIAL, PRINT HEAD AND TESTBED

Leoš Beran, Josef Břoušek, David Čítek, Michael Gabriel, Karel Hurtig, Aleš Hvízdal, Jiří Kolísko, Jiří Kubín, Oto Melter, Tomáš Myslivec, Tomáš Petr, Petr Zelený

Tato kapitola objasňuje vývoj tiskové směsi, tiskových hlav a testovacího tiskového zařízení (TestBedu) v rámci projektu. Jsou zde vysvětleny experimenty, které vedly k vytvoření vhodného složení směsi a uvedeny tiskové parametry pro úspěšný 3D tisk objektů na TestBedu. Čtenář tu nalezne soupis pomocných zařízení pro 3D tisk a pro zkoušení vytištěných vzorků. Je zde uveden vývoj a zkušenosti s různými variantami konstrukčního řešení tiskových hlav, trysek a systémů pro dodávání aditiv pro řízení procesu tuhnutí směsi. Čtenář je seznámen s postupem přípravy dat pro samotný 3D tisk. Je zde popsán postup návrhu a vývoje testovacího tiskového zařízení TestBedu DYANA, jeho uvedení do provozu, způsob jeho ovládání a dalšího budoucího vývoje. V kapitole jsou uvedeny základní technické parametry TestBedu i jeho architektura řízení.

This chapter explains the development of the print compound, print heads and the test printing device (TestBed). It first describes the experiments that led to the development of a suitable composite formula. Next it presents printing parameters for the successful 3D printing of objects on the TestBed. The reader will find an inventory of ancillary equipment for 3D printing and testing of printed samples. The development and experience with different design variations of print heads, nozzles and additive delivery systems for controlling the solidification process of the mixture are presented. The reader is introduced to the operation of preparing data for the 3D printing process itself. Next the chapter describes the process of design and development of the TestBed DYANA printing device, its first launch, its operation and future developments. Finally the chapter presents the primary technical parameters of the TestBed and its control architecture.

POŽADAVKY NA TISKOVOU SMĚS
PRINT COMPOUND REQUIREMENTS

Na začátku realizace projektu byl 3D tisk cementových kompozitů novinkou jak na poli technologickém z hlediska strojního řešení, tak i na poli samotné technologie betonu a vůbec cementových kompozitů. Beton je svým charakterem velmi odlišný od běžně tištěných materiálů jako je plast nebo kov – k samotnému tisku nelze využít zahřátí a následného zchladnutí vstupního materiálu. Cementová pojiva potřebují k vytvrzení proces hydratace cementu. Jeho nejrychlejší fáze trvá významně pomaleji v řádu dnů a není plně ukončena ani v horizontu několika let. Hydratací cementu dochází nejprve k procesu k tuhnutí a následně procesu tvrdnutí cementem pojeného materiálu. Proces tuhnutí závisí na mnoha faktorech, ale obecně tato fáze probíhá v řádu hodin. Proces tvrdnutí volně navazuje na tuhnutí. Zásadní problematikou, se kterou se potýká 3D tisk cementových kompozitů, je navržení směsi tak, aby po extruzi a opakovaném nanášení jednotlivých vrstev na sebe odolávala vlastní tíže a bylo možné tisknout/stavět tištěný element do výšky. Směs musí mít vhodnou konzistenci, aby byla čerpatelná a následně snadno opouštěla extrudér, ale zároveň musí po extruzi dostatečně rychle zatuhnout nebo mít tuhou konzistenci, aby bylo možné opětovné nanášení vrstev na sebe. S tím dále souvisí samotná problematika stability čerstvě vytištěného tištěného objektu, který není dostatečně vytvrzený. Tyto požadavky na směs vedou v konečném důsledku k návrhu cementového kompozitu poměrně komplikovaného složení s obsahem řady různých aditiv včetně urychlovačů tuhnutí. Výsledná mechanická pevnost je jistě také důležitá pro celkový návrh výsledného prvku, ale z hlediska procesu samotné extruze méně podstatná.

HLAVNÍ CÍL LABORATORNÍCH ČINNOSTÍ
THE MAIN GOAL OF LABORATORY ACTIVITIES

Pro projekt 3D STAR a účely 3D tisku byla vyvinuta v laboratořích Kloknerova ústavu speciální jemnozrná cementová směs. Důvodem pro vývoj vlastní směsi byla v první řadě možnost libovolné optimalizace vyvíjené směsi v libovolné fázi projektu a pro libovolný druh aplikace. Velmi důležitým faktorem při úvaze o návrhu směsi bylo, že tiskové zařízení s tiskovou hlavou a celým systémem od míchání po extruzi bylo předmětem výzkumu a vývoje daného projektu. Obě tyto problematiky bylo tedy nutné řešit paralelně a reagovat v obou odvětvích na skutečnosti vyplývající z dílčích výsledků jednotlivých skupin podílejících se na vývoji. Druhým důvodem byla reálná nedostupnost komerčních směsí v úvodu řešení projektu a později i jejich vysoká cena. Třetím a neméně podstatným důvodem bylo prověřit možnost vytvářet směs tzv. ambulantně z lokálně dostupných surovin, a tím zajistit i ekonomičnost aditivní technologie.

Výhodou vlastního vývoje směsi je možnost reakce na libovolné vnější vlivy, jako je nedostupnost vstupních surovin, druh tištěné konstrukce a variabilita požadavků na fyzikálně mechanické parametry výsledné směsi požadované projektantem, architektem či statikem. Během výzkumné fáze projektu došlo k vytvoření rozsáhlé databáze vstupních surovin, které lze v případě potřeby modifikace směsi dle realizovaného objektu aplikovat.

SLOŽENÍ TISKOVÉ SMĚSI
THE COMPOSITION OF THE PRINT MIXTURE

Směs byla sestavena z jednotlivých vybraných složek typických pro jemnozrné mikrobetony a malty (jemnozrné kamenivo, cement, speciální přísady a příměsi) tak, aby splňovala požadavky jak na mechanicko - fyzikální vlastnosti, zpracovatelnost, čerpatelnost směsi čerpadlem a tuhost po extruzi z tiskové hlavy. Základem pro sestavení směsi byl důkladný rozbor dílčích složek z hlediska granulometrie a optimální přizpůsobení jejich jednotlivých poměrů. Z hlediska tixotropie směsi a omezení smrštění byla směs doplněna rozptýlenou výztuží ve formě PP vláken. Úvodní testy byly provedeny i se směsí s přidavkem PVA vláken. Cílem přidavku vláken je automatizované vyztužování tenkostěnných prvků a rozptýlená výztuž (například ocelovými vlákny) je jednou z možností, jak tištěnou strukturu vyztužovat. Výsledná směs byla několikrát modifikována vzhledem i k postupnému vývoji tiskového zařízení. V úvodu byla, po vybrání vhodných vstupních surovin, navržena základní směs jemnozrné cementové pasty, na které byly stanovovány úvodní mechanicko - fyzikální vlastnosti a úvodní ruční testy tisknutelnosti. Velkých změn doznala směs po instalaci samotného TestBedu a kompletního čerpacího zařízení, na které bylo nutné směs modifikovat.

Do směsi byly přidávány vhodné plastifikátory a superplastifikátory z důvodu snížení vodního součinitele a tím pádem zlepšení mechanických vlastností a také zlepšení konzistence nutné pro čerpání směsi. Základní složení směsi je uvedeno v následující tabulce:

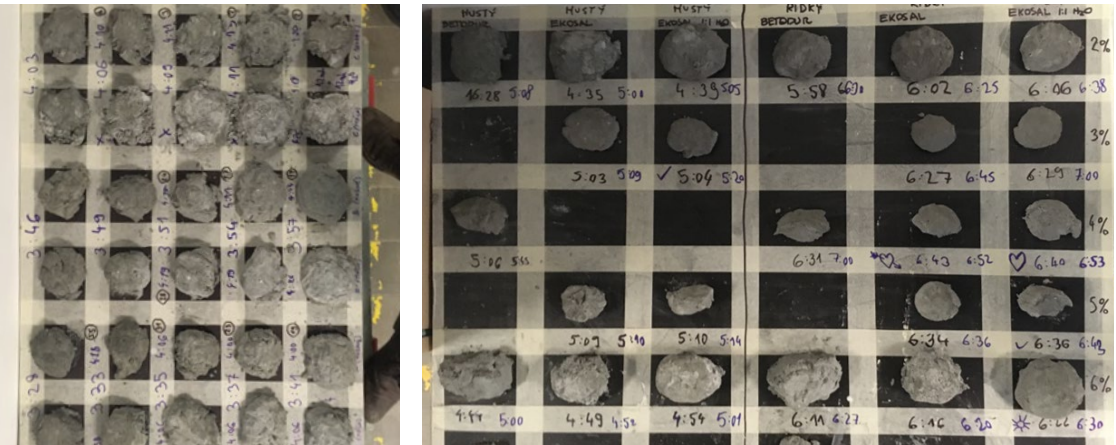
	Surovina	kg/m ³
Směs 3D STAR	Křemenný písek 0 - 1,25 mm	1080
	Mikroplniva	495
	CEM II 52,5	395
	Mikrosilika	105

Obecné složení matrice směsi 3D STAR
General composition of the 3D STAR compound matrix

Dalším milníkem v modifikaci směsi bylo zajištění tixotropie – kompaktnosti směsi po extruzi tak, aby nedocházelo k roztékání směsi a tištěná vrstva odolala tlaku vrstev tištěných na tuto vrstvu. Tato vlastnost je ve směsi ovlivňována jednak přidáváním příměsí ovlivňující konzistenci směsi (WMA příměsi) a také aplikací již zmíněného urychlovače tuhnutí.

APLIKACE URYCHLOVAČE TUHNUTÍ
APPLICATION OF SOLIDIFICATION ACCELERATOR

Přísada urychlující tuhnutí směsi ihned po extruzi se v případě 3D tisku ukazuje jako zásadní, a to z hlediska okamžitého nárůstu základní pevnosti. Základní pevností je míněn stav, ve kterém je jednotlivá vytisknutá vrstva schopna odolávat tlaku vrstev nad sebou bez toho, aniž by docházelo k plastické deformaci vlivem stlačení, roztékání atd. V úvodu vývoje směsi byla realizována analýza různých druhů urychlovačů tuhnutí a úvodní experimentální program tak, aby byly určeny základní okrajové podmínky pro další směřování vývoje. Jednotlivé urychlovače tuhnutí byly vmíchány mechanicky do prefabrikované směsi jednotného složení a na čerstvé hmotě byl měřen čas počátku tuhnutí. Klasickým zařízením pro sledování tuhnutí cementových hmot jsou různé typy penetrometrů. Měření času tuhnutí je pro běžný cement prováděno přístrojem s tzv. Vicatovou jehlou. Tento přístroj a samotná metoda není ale vhodná na předpokládané krátké časy v řádu minut, které jsou při extruzi směsi pro 3D tisk potřeba. Proto byl využit systém měření aplikovaný v minulosti pro sledování účinnosti urychlovačů používaných pro stříkané betony v rámci nové rakouské tunelářské metody v kombinaci se senzorickým hodnocením tuhnutí směsi. V rané části vývoje byly vyzkoušeny různé druhy urychlovacích přísad, a to nejenom v tekutém skupenství, ale jako sypké složky. Jejich použití bylo však záhy zamítnuto. Tyto složky musely být dávkovány již do suché směsi a reakční doba je tak zahájena okamžikem přidáním záměsové vody. Na základě zkušenosti jsme došli k závěru, že čerpání tiskové směsi s urychlovačem může být velmi riskantní z hlediska neplánovaných technologických pauz, změn rychlosti tisku a dalších okrajových podmínek. Pro účely 3D tisku bylo využito urychlovače tuhnutí, jejichž bází nebylo vodní sklo, používaného pro aplikaci stříkaných betonů. Způsob aplikace bude popsán v následujících kapitolách.



Vizuální zhodnocení účinků urychlovače tuhnutí
Visual evaluation of the effects of the solidification accelerator

MECHANICKÉ VLASTNOSTI TISKOVÉ SMĚSI
MECHANICAL PROPERTIES OF THE PRINT COMPOUND

Detailní výzkum byl prováděn zejména v oblasti urychlení tuhnutí směsi pomocí tekutých urychlovačů tuhnutí. Celý navržený systém 3D tisku pracuje se směsí, která je namíchána, transportována a čerpána v mokřém stavu až do tiskové hlavy, kde je v poslední fázi extruze přidáván tekutý urychlovač. Jeho množství je upravováno podle rychlosti tisku, množství extrudovaného materiálu a náročnosti z hlediska tvaru tištěného prvku. Tento systém umožňuje prakticky libovolné tiskové prostředí (délku hadic nutných k čerpání směsi, umístění míchacího zařízení versus tiskové zařízení a okrajové parametry jako je teplota, vlhkost nebo oslunění). Směs je v tekutém či plastickém stavu transportována celým systémem bez rizika zatuhnutí směsi v systému při případném výpadku či technologické pauze. K urychlení dochází až v úplném závěru tiskového procesu a reakční doba tj. nastartování procesu hydratace a tuhnutí se pohybuje v řádu minut. Parametry výsledné směsi byly zkoušeny před čerpáním směsi a po přečerpání směsi s urychlovačem tuhnutí. Důležitými vstupy pro optimalizaci směsi byla teplota směsi v čase po míchání, před a po čerpání, konzistence směsi a její změna v čase. Tyto parametry jsou důležité z hlediska návrhu systému pro tisk na staveništi či proměnných okrajových podmínkách prostředí. Zkoušky čerstvé směsi byly prováděny na střešacím stolku využívaném pro klasické zkoušky zpracovatelnosti malt dle řady norem ČSN EN 1015. Tímto způsobem bylo stanovováno rozlití směsi po aplikaci zvoleného počtu rázů. Zkoušky byly prováděny v různých časech s cílem určit dobu zpracovatelnosti směsi, aby bylo možné stanovit stanovení dobu použitelnost v čerpacím systému a množství směsi ve výsypce čerpadla. Případný rozdíl mezi laboratorně vyráběnými tělesy (ukládáním směsi do forem) a zkoušením parametrů kompozitu po vyřezání/vyvtání z vytištěného objektu byl průběžně ověřován a směs byla na základě průběžných výsledků optimalizována. Snahou bylo dosažení co možná největší shody a homogenity tištěné směsi před vstupem a po extruzi. Výsledkem modifikací jak technologie tisku, tak i směsi bylo dosaženo očekávaných rozdílů v řádu 5-10 %. Zhoršení materiálových parametrů je očekávané vzhledem k rozdílnému ukládání (vrstvení a nehtnutí) směsi. Čerpáním a extruzí dochází ke zvýšení obsahu vzduchu ve směsi, a tím i ke snížení objemové hmotnosti. Objemová hmotnost vyvíjené směsi se pohybuje v rozmezí 2080-2120 kg/m³ . V rámci experimentálního programu byla provedena celá řada různých typů zkoušek materiálových vlastností tiskové směsi v různých stádiích realizace projektu. Kromě mechanických parametrů vytištěných vzorků byla ověřena například i soudržnosti této směsi s různými druhy vkládané žebřikové výztuže. Obecné parametry směsi v různém stáří a na různých typech těles popisuje následující tabulka. Obvyklým kritériem pro hodnocení parametrů cementových materiálů jsou jeho vlastnosti ve stáří 28 dní. Pro účely 3D tisku z hlediska návrhu náročných tištěných konstrukcí jsou však velmi důležité také vlastnosti směsi v raném stádiu tuhnutí/tvrdnutí směsi. Proto následující tabulka uvádí i tyto termíny.

Stáří materiálu	Směs bez urychlovače tuhnutí				Směs s urychlovačem tuhnutí		
					Dávka 70 ml/min		
	Pevnost v tlaku (trámečky 40x40x160 mm)	Pevnost v tahu za ohybu (trámečky 40x40x160 mm)	Statický modul pružnosti v tlaku (válec 100/200 mm)	Smrštění	Pevnost v tlaku (trámečky 40x40x160 mm)	Pevnost v tahu za ohybu (trámečky 40x40x160 mm)	Pevnost v tlaku na vývrtu Ø80 mm
[dny]	[MPa]	[MPa]	[GPa]	[mm·m ⁻³]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	10	3					
2	24	5,7	20,3	0,12			
5	37,5	7,8		0,53			
7	41,5	8,3		0,84			
14	54	10,2	29,4	1,04			
21	60	10,8		1,16			
28	64,5	11,1	32,1	1,18	60	9,6	60
56	73	11,9		1,37			
90	76,5	12,2		1,49	62,5	10,1	

Obecné shrnutí parametrů vyvíjené směsi projektu 3D STAR
General summary of the parameters of the 3D STAR mixture

MÍCHACÍ ZAŘÍZENÍ
MIXING EQUIPMENT

Veškeré laboratorní činnosti vývoje cementové směsi probíhaly v laboratořích Kloknerova ústavu na různých typech míchacích zařízení. V úvodní fázi výběru vhodných vstupních surovin a základního návrhu prvotních směsí byla využívána 5litrová míchačka. Tato míchačka je schopná namíchat cca 2 litry požadované směsi a je vhodná pro maloobjemové zkoušky velkého počtu různých druhů záměsí. Mícháný objem je využit pro výrobu trámečků o rozměru 40×40×160 mm, na kterých jsou stanovovány základní mechanické parametry jako tah za ohybu a tlak. Další alternativou pro pokračování vývoje bylo míchací zařízení o maximální kapacitě 20 litrů, tzn. schopné zamíchat cca 8 litrů záměsí. Tento objem čerstvé směsi byl využit na výrobu většího počtu těles a potvrzení vlastností vybraných směsí. V průběhu projektu bylo následně přistoupeno k velkoobjemovému míchání směsí v objemu 60-160 litrů. Pro tyto účely bylo v rámci investic pořízeno velkoobjemové míchací zařízení s maximální kapacitou cca 200 litrů. Míchačka je opatřena frekvenčním měničem pro plynulou regulaci otáček. Zařízení je využíváno pro míchání požadovaných objemů pro zkušební tisky v TestBedu.



Míchací zařízení využívané v rámci vývoje cementové směsi, vlevo s maximální kapacitou 60 litrů, vpravo s kapacitou 200 litrů
Mixing equipment used in the development of the cement mixture; left: maximum capacity of 60 litres; right: 200 litres

ČERPACÍ ZAŘÍZENÍ
PUMPING EQUIPMENT

Po úvodních testech základní směsi, ve které byla naladěna její čerpatelnost, bylo přistoupeno k výběru vhodného čerpadla pro připojení do transportního systému před tiskové zařízení/tiskovou hlavu. V rámci investic bylo zakoupeno šnekové čerpadlo firmy FILAMOS a to typ C20 - COM-F. Čerpací zařízení bylo upraveno pro potřeby projektu z hlediska navýšení objemu násypky, a to na 150 litrů směsi. Dále bylo upraveno pro potřeby komunikace čerpadla s TestBedem pro řízení rychlosti čerpání pomocí frekvenčního měniče a softwarově zakomponováno kompletní řízení čerpadla do systému řízení tisku. Při úvodních tiscích byla směs čerpána pomocí systému hadic průměru DN 25 o délce hadice 10 metrů. Při optimalizaci směsi došlo postupně ke změně konzistence směsi a zvýšení rychlosti tisku. Tyto změny se projevily zvýšením tření směsi v hadicích a výrazným zahříváním směsi, což mělo za následek nekontrolovatelné tuhnutí směsi v hadicích a ve spojkách. Z tohoto důvodu byl celý systém čerpání předělán na hadice průměru DN 35. Tyto hadice byly již délky 3 m, aby bylo docíleno jejich snazšího čištění. Systém je opatřen manometrem pro sledování tlaku za výstupem šnekového čerpadla a všechny hadice jsou opatřeny rychlospojkami pro snadnou montáž a demontáž. Po ukončení tisku je celý systém hadic rozebrán a dopraven společně s čerpadlem do mycího prostoru, kde jsou všechny součásti umyty, promazány a připraveny na další použití.



Čerpadlo betonové směsi s frekvenčním měničem
Concrete mixing pump with frequency converter

ZKOUŠEBNÍ ZAŘÍZENÍ A HLAVNÍ ZKOUŠENÉ PARAMETRY TESTING EQUIPMENT AND MAIN TESTED PARAMETERS

Směs a její parametry byly zásadní pro dílčí modifikace vstupních surovin a jejich poměrů. Kromě zkoušek čerstvé směsi popisované v minulých kapitolách jsou pro návrh a výpočet konstrukcí stěžejní mechanické parametry. Zkoušky materiálových vlastností byly prováděny ve zkušebně Kloknerova ústavu. Nejčastější zkoušky – stanovení pevnosti v tahu za ohybu a stanovení pevnosti v tlaku na trámečcích o rozměru 40×40×160 mm byly prováděny na zatěžovacím stroji Matest 300/15 s maximální kapacitou 300 kN.

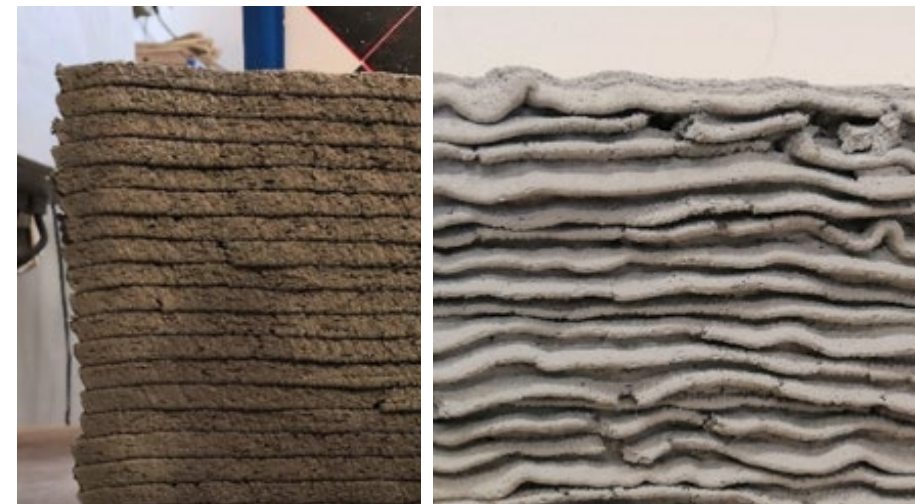


Zkoušky trámečků v tahu za ohybu (vlevo) a v tlaku (vpravo)
Tests of beams in tension after bending (left) and in compression (right)

Mezi další zkoušky patří stanovení pevnosti v tlaku na krychlích a válcích různých rozměrů. Vzhledem k faktu, že tiskem jsou vyráběny tenkostěnné objekty, byly ve vývojové fázi využívány tělesa menší než zkušební tělesa pro běžný beton, a to krychle o hraně 100 mm (běžně 150 mm) a válce průměru 100 mm a výšky 200 mm (běžně 150/300). Tato tělesa jsou zkoušena ve zkušebních lisech INSTRON 3000 s maximální kapacitou 3MN. Dalším zkoumaným parametrem je statický modul pružnosti betonu v tlaku, neboli závislost přetvoření materiálu na zatížení. Tento parametr je důležitý pro deformační výpočty, průhyby konstrukcí a celkovou stabilitu prvků. Zkoušky pevnosti cementového kompozitu v osovém tahu jsou doprovodnými zkouškami na vytištěných vzorcích. Na nich jsou tyto parametry popisovány tahovou pevností/soudržností jednotlivých vrstev mezi sebou. Zkoušky v betonu v tlaku byly prováděny na vývrtech z tištěných bloků a zkoušeny obdobně jako tělesa z forem. Samotnou kapitolou jsou trvanlivostní zkoušky směsi jako je nasákavost, mrazuvzdornost a odolnost proti účinkům chemicky rozmrazovacích látek. Některé z těchto zkoušek jsou dlouhodobého charakteru, probíhají průběžně a jsou důležité pro navrhování konstrukcí pro stanovení životnosti konstrukce.

PRVNÍ POKUSY TISKU A ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY FIRST ATTEMPTS AT PRINTING AND ISSUES ADDRESSED

S vývojem tiskové směsi na Kloknerově ústavu probíhal souběžně vývoj testovací platformy na liberecké univerzitě. Než bylo toto zařízení vyvinuto do použitelného stavu, byla pro prvotní testy využita ruční extruze, pomocí nádob s nasazovacími tryskami/hlavicemi. Na této zjednodušené verzi byla testována mimo konzistence i stavitelnost a soudržnost „tiskových“ vrstev. Postupným vývojem směsi (přidáváním přísad ovlivňujících konzistenci) bylo dosaženo požadovaných vlastností vhodných pro další testování již na samotné 3D tiskárně – TestBedu.



Ručně tisknuté vrstvy cementové směsi na sebe – pilotní testy „stavitelnosti“
Manually printed layers of cement mixture on top of each other - pilot tests of "buildability"

Pro tisk větších objektů bylo nutné řešit řadu souvisejících technologických problémů, jako jsou technologické pauzy dané jak charakterem materiálu, tak třeba maximálním tiskovým prostorem. Jedním z běžných scénářů při tisku byla například nutnost pokračovat v tisku na již vytištěný objekt. Předpokladem byl správný soutisk v prostoru, kde se nachází stávající poslední vrstva předchozího tisku. Tyto záležitosti přerušení a dotisku byly zkoušeny pro různé situace a ukázalo se, že při běžném pohledu byla spára stávajícího a nového vizuálně zanedbatelná. Test probíhal po standardní tiskové zkoušce, kdy na začátku byl vytištěn testovací objekt, na který byl realizován dotisk po uplynutí cca 10 - 45 min. Zásadním problémem k řešení byla co nejdokonalější navigace tiskové hlavy na konečný bod, rozběh tisku a bezchybné kopírování původní vrstvy. V rámci vývoje se podařilo dosáhnout velmi uspokojivého výsledku, tj. že u prvků nebyl znatelný vizuálně patrný rozdíl mezi původní a novou vrstvou, kromě bodu konce a začátku soutisku. Dokonalé navázání vrstev bylo dáno také tím, že u předchozí struktury nedošlo k výraznějším deformacím, ovlivňujícím okrajové podmínky pro novou vrstvu.

VÝVOJ A ZKUŠENOSTI S TISKOVOU HLAVOU
PRINT HEAD DEVELOPMENT AND EXPERIENCE

První verze tiskové hlavy se vydala cestou otevřené soustavy obsahující zásobník betonu o objemu cca 20 litrů. Tento zásobník byl průběžně doplňován standardním vřetenovým čerpadlem na beton umístěným po boku tiskárny. Do tiskové hlavy je tiskový materiál dopravován hadicí DN 35 mm. Na zásobník navazovalo šnekové řízení dávkování směsi do trysky. První verze tiskové hlavy umožnila po několika testovacích tiscích najít přibližné rozmezí výchozích hodnot nastavení tiskových parametrů a dále zpřesnila nutné rozmezí konzistence tiskové směsi. Jako nevýhoda se záhy ukázalo, že pro požadované parametry tisku a zejména vyvinuté směsi není otevřená soustava příliš vhodná. To se projevilo především nespolehlivým podáváním směsi ze zásobníku ke šneku a tím pádem nekonzistentní tiskovou stopou. Otevřená soustava se šnekovým podáváním vyžadovala výrazně tekutější směs. Přílišné ztekucení ale způsobovalo nestabilitu směsi po extruzi. Touto cestou byl však ověřen systém řízení podávání směsi hlavou k trysce.

S důrazem na odstranění problémů pozorovaných u první tiskové hlavy byla naprojektována druhá tisková hlava. Ta měla odzkoušet ožívování směsi v zásobníku lopatkami připojenými na hřídel řízení dávkování betonu. Tentokrát byl šnek experimentálně nahrazen vřetenovým čerpadlem, což si zároveň vyžádalo i změnu pohonu z důvodu požadavku na vyšší krouticí moment. Tato tisková hlava měla zároveň obsahovat další řízenou osu – otáčení celé tiskové hlavy s vykonzolovanou tryskou. Díky této úpravě je možné přitiskávat nové vrstvy ke stávající vertikální konstrukci. Současně s druhou verzí otevřené tiskové hlavy, vyvíjené společně s TUL, byla ověřena možnost použití uzavřené tiskové hlavy bez zásobníku. Tato strategie tiskové hlavy je v několika ohledech jednodušší, zato vyžaduje pečlivější naladění celé dávkovací soustavy a přesnou synchronizaci všech komponent. Využitím uzavřené soustavy odpadá nutnost použití rozměrného a těžkého zásobníku a řešení potíží s „ožívováním“ tiskové směsi v zásobníku, celá tisková hlava je tak kompaktnější a v základní verzi má menší počet pohyblivých mechanických komponent. Čerpání a podávání směsi bylo po modifikaci kontinuálnější a nedocházelo k nehomogenitě tiskové stopy.



Postupný vývoj tiskových hlav, vlevo nahoře otevřená soustava, vpravo nahoře otevřená soustava s vřetenovým čerpadlem, vlevo dole uzavřená soustava se statickým promíchávacím zařízením, vpravo dole uzavřená soustava se šnekovým podavačem

Sequential development of print heads; top left open system, top right open system with spindle pump, bottom left closed system with static mixing device, bottom right closed system with screw feeder

V úvodu přechodu na nový systém tiskové hlavy bylo nutné znovu hledat výchozí hodnoty nastavení pro tisk a rovněž se v několika verzích iterovat návrhy jednotlivých komponent tak, aby nedocházelo k destrukci během běžného tisku, zaseknutí celé tiskové hlavy, a to vše zároveň s alespoň elementární možností hlavu přiměřeně jednoduše čistit a servisovat. Po základním odladění tisku na předchozích verzích a v momentu, kdy byly vyřešeny všechny zásadní mechanické nedostatky, bylo přistoupeno k testování přidávání urychlovače do tiskové směsi. Po testování, které bylo popsáno v předchozích kapitolách, bylo zvoleno a navrženo přidávání tekutého urychlovače přímo v tiskové hlavě. Urychlovač bylo nutné co nejlépe promísit s tiskovou směsí, a to poměrně rychle na velmi krátké vzdálenosti v tiskové hlavě těsně před tryskou. Potřebná délka pro promísení byla zjištěna experimentálně na hlavici s tělem z čírého plastu a za použití barevného signálního kapalného média.

Po odladění potřebné délky promíchání doznala pohyblivá část šnekového podavače dílčích změn (úprava na lopatky). Modifikací hlavy bylo ve výsledku dosaženo optimálních rychlostí tisku v rozmezí 100 – 200 mm tiskové stopy za sekundu. Tato rychlost může být zvýšena, ale pro menší tiskový prostor TestBedu je prozatím nevyužitelná.

Výstupní trysky a jejich tvarová různorodost byla také předmětem důkladného vývoje. V úvodu byly vyvíjeny obdélníkové, oválné či kruhové trysky s výplní tak, aby byl nalezen vhodný poměr mezi výstupním objemem trysky a jejím půdorysným rozměrem. Celý systém byl navržen pro možnost rychlé instalace/ rychlé demontáže. Ve variantě nenatáčející hlavy byla nejčastěji využívána kruhová tryska průměru 20-50 mm. Tento typ byl a je používán pro veškeré tisky s výškou tiskové stopy 10mm. Měřením tloušťky a výšky byla prokázána optimální shoda mezi předpokladem a výsledným rozměrem prvku. Všechny tyto trysky jsou tištěné z odolných plastů na 3D tiskárnách a tedy snadno modifikovatelné a nahraditelné. U složitějších tištěných struktur lze také využívat prodloužení trysky.



Aktuálně používaná tisková hlava se vstřikováním urychlovače tuhnutí, rychloupínací systém
Currently used print head with solidification accelerator injection and quick clamping system

Pro účel dokonalého promíchání a řízení tiskové rychlosti byl vyvinut systém speciálně tvarovaných pohyblivých lopatek mechanicky spřažených s pohonem dávkování tiskové směsi a bylo testováno několik typů tvarování samotného vtoku urychlovače. Lopatky nejenže musí směs dokonale promíchat s urychlovačem tuhnutí, ale zároveň by měly co nejméně omezovat průtok materiálu tiskovou hlavou a nesmí být náchylné k zanášení komponenty tiskové směsi během tisku. Po experimentálním ověření několika základních tvarů lopatek byla vybrána varianta, která svými vlastnostmi nejlépe splňovala většinu požadavků. Tato varianta dále podstoupila vývoj mechanického a materiálového řešení tak, aby lépe odolávala abrazivnímu prostředí v tiskové hlavě a i po několika tisících litrech průtoku cementové směsi nejeví žádné výrazné známky opotřebení.

SYSTÉM VSTŘIKOVÁNÍ URYCHLOVAČE TUHNUTÍ
SOLIDIFICATION ACCELERATOR INJECTION SYSTEM

V rámci výzkumu bylo postupným definováním požadavků na tištěnou cementovou směs přistoupeno k vývoji varianty urychlování tuhnutí vstřikováním kapalného urychlovače v poslední fázi tisku. Tato varianta má pro vyvíjený komplexní systém několik výhod. Jednou z nich je rychlá reakce na změny okolních klimatických podmínek, která není možná při variantě tisku směsi s práškovým urychlovačem v sytké směsi. Další výhodou je i jistota, že při zastavení tisku nebude urychlená směs tuhnout v dopravním hadicovém systému. Nesporným plusem je i možnost urychlení tuhnutí směsi, kdy prvotní pevnost přichází v rámci 3 až 5 minut po aplikaci, tedy extruzi. Tato rychlost tuhnutí je vhodná pro tisk sloupových prvků, které mají v jedné vrstvě poměrně krátkou stopu, a tím i nutnost co nejkratší doby tuhnutí. Při takto rychle stoupajících tiscích je důležitá rychlost tuhnutí, aby se dalo stavět na již vytištěné vrstvy. Bylo použito zubové čerpadlo se senzorem průtoku, aby bylo možno regulovat průtok a současně vyrovnávat protitlak v hadičkách dopravujících kapalný urychlovač do tiskové hlavy.

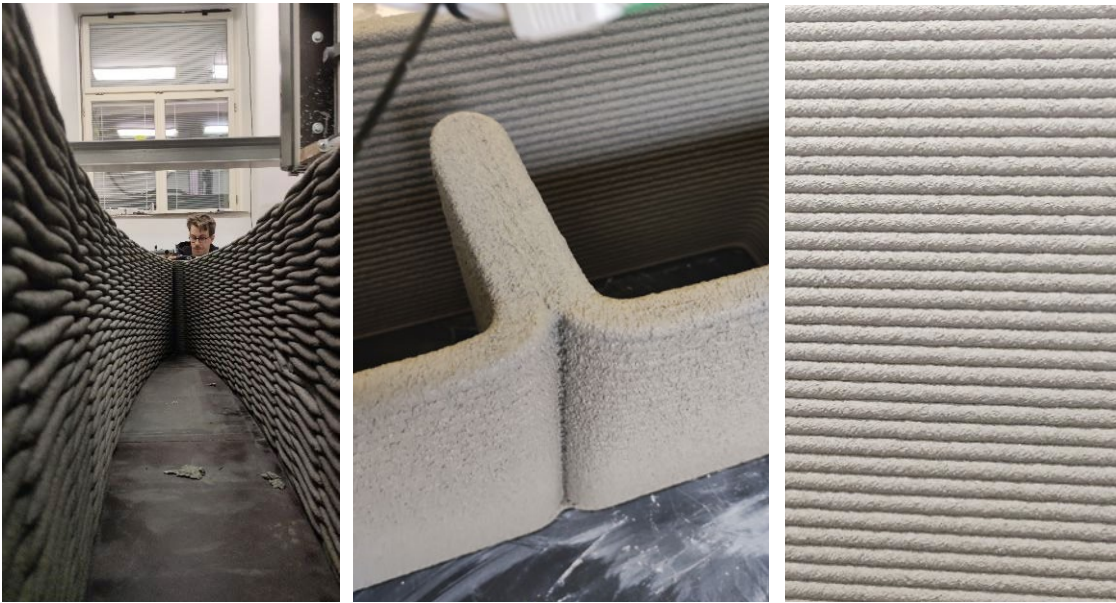
Mezi výhody tohoto způsobu dávkování je robustnost systému jako celku - pokud dojde k zastavení během tisku nebo přerušení při přesouvání na další tiskový objekt, nehrozí nebezpečí zatuhnutí tiskové směsi v přírodních hadicích či pumpě – aktivovaná tisková směs se v samotném stroji nachází jen ve velmi malém objemu, a to těsně před vytištěním v tiskové hlavě. Stačí tedy pouze vyextrudovat již aktivovanou směs z tiskové hlavy a počkat na začátek dalšího tisku, na který je technologický časový prostor při občasné promíchání směsi v rámci desítek minut. Tento čas je samozřejmě ovlivněn teplotou směsi a teplotou okolí. Se zvyšující se teplotou dochází k výraznému zrychlení procesu tuhnutí a případné změně konzistence.

Výhodou tohoto řešení je také možnost úpravy dávkování libovolného množství a směsi urychlovače až v návaznosti na aktuální podmínky při tisku (viskozita směsi, okolní teplota a vlhkost). To umožňuje také minimalizovat vliv urychlovače na ztrátu pevnosti cementového kompozitu. Se zvyšujícím se množstvím urychlovače dochází ke snižování pevnosti. Přesným řízením dávkování je možné dávkovat urychlovač pouze v nejnižším možném množství pro zajištění stability konkrétního výrobku při tisku. Pro tisk velkých objektů se tak nemusí používat silně urychlená směs jako pro objekty menší, kde je nutné přidat více urychlovače pro zajištění stability tištěného objektu.

TISKOVÁ GEOMETRIE
PRINT GEOMETRY

Samotnou a přitom nedílnou disciplínou systému aditivní fabrikace je příprava potřebných dat pro tisk. Od tvarování samotných tiskových objektů až po volbu vhodné tiskové strategie a vstupních parametrů. Tvarování objektů bylo ze začátku podřízeno především nutnosti zkaližovat tiskové nastavení a vytisknout vzorky po změření základních mechanických vlastností vytištěného materiálu. V momentě, kdy byly tyto testy provedeny, bylo možné se přesunout k tvarování objektů za účelem odzkoušení hranic tiskového systému a také k hledání optimálního tvaru pro 3d tisk konstrukcí. Obecně ze zkušeností zkoušek vychází pro výrobu 3D tiskem tvarovat tištěné prvky do prohnutých tvarů a co nejvíce omezit ostré rohy. S dobrými výsledky proběhly experimenty s křížením tiskové dráhy v jedné vrstvě. Takto tištěný průnik zaručoval dobré propojení tiskové hmoty a nedocházelo k občasné půdorysné delaminaci tiskových stop, jak bylo někdy pozorováno u bodově tečně napojených tiskových stop.

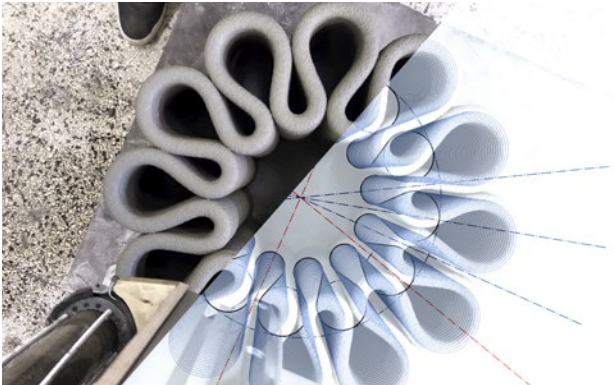
Předmětem dalšího zkoušení bylo také architektonicko - estetické pojednání tištěného povrchu, které bude zároveň respektovat výše zmíněné poznatky. Vydali jsme se cestou práce s geometrií tiskové stopy v rámci linky povrchu a přijali estetiku tištěných vrstev jako stopu tiskové technologie. Kombinací posunutí průníků o polovinu výšky tiskové vrstvy vznikl esteticky pojetý povrch bez prasklin a defektů. Výhodou takto rozmanitého povrchu je i případné zakrytí tiskových vad. Dlouhodobá odolnost povrchu je stále předmětem dalšího zkoumání.



Detaily tisknutých ploch a soutisků
Details of printed surfaces and overprints

PŘÍPRAVA TISKOVÝCH DAT
PREPARATION OF PRINT DATA

Pro první pokusy řízení TestBedu byl použit ručně psaný G-kód – v zásadě pro tisk jednoduchých tvarů jako čtverce a kruhy. Pro další pokusy a možnost jednoduššího zadávání složitějších tvarů a průníků tiskových drah byl připravován skript v grafickém programovacím prostředí Grasshopper pro Rhinoceros3D. Ze začátku šlo pouze o převod křivek na G-kód v potřebném formátu, později přibyla možnost zadat přímo 3D objekt a parametricky nastavit roztiskávací dráhu před samotným tiskem objektu. Postupně pak přibýly další možnosti parametrizace některých nastavení. Tento slicer mimo jiné umožňuje zadat tiskovou dráhu s proměnnou zetovou souřadnicí – jednotlivé tiskové vrstvy tak nemusí být pouze vodorovné – tzv. non-planarprinting. Během testování takto vystaly určité praktické problémy a stabilizovaly se postupy přípravy materiálu i zařízení, a některé z těchto postupů bylo možné automatizovat. Slicer také umožňuje automatickou analýzu parametrů tisku jako například přibližnou délku trvání tisku, množství spotřebovaného materiálu a předpokládanou váhu výtisku. V neposlední řadě byl pro tvorbu tiskového modelu používán na TUL vyvíjený software StarSlicer, který je komplexnějším řešením, vyvíjeným přímo na míru tisku cementových směsí. V základu obsahuje možnost nastavení mnoha parametrů, jako například přizpůsobení rychlosti tisku požadovanému tiskovému času na jednu vrstvu nebo možnost spirálové dráhy tisku (více k danému SW v kapitole 4).



Prolnutí modelu a skutečného výtisku
Blending the model and the actual print

TESTBED
TESTBED

Pro účely vývoje a testování cementové směsi, bylo nutné vytvořit pracovní stroj tzv. TestBed. Je vhodné zmínit, že TestBed nebyl cílovým zařízením pro provádění tisku stavebních konstrukcí na staveništi. Pro tyto účely byl v rámci projektu navržen robot Printing Mantis popsaný v kapitole 3.

V roce 2018 se více i méně seriózně věnovalo 3D tisku konstrukcí z cementových směsí poměrně velké množství týmů po celém světě. Po prostudování dostupných článků a videoprezentací bylo zřejmé, že se rýsují dvě základní cesty pro konstrukci našeho testovacího pracoviště:

- Portálová konstrukce (Gantry) - hlavní částí tiskárny je nosný rám ve tvaru portálu, který je umístěn nad tiskovou plochou. Tisková hlava umístěná na tomto rámu vykonává posuvný pohyb ve všech směrech souřadného systému. Výhodou konstrukčního řešení je vysoká pevnost a tuhost konstrukce. Nevýhodou řešení je možnost tisknout jen v prostoru pod nosným rámem tiskárny.

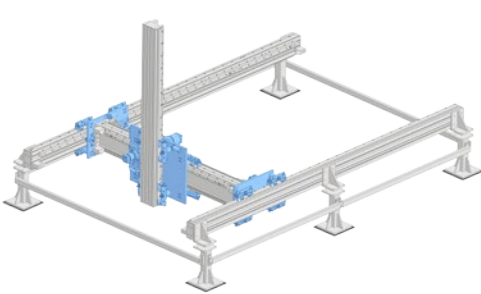
- Robotické rameno - hlavní částí tiskárny je robotické rameno složené z jednoho až tří kloubů, které vykonává obecný pohyb kolem pevného výchozího bodu rámu. Na konci robotického ramene je umístěna tisková hlava. Při umístění výchozího bodu rámu na pojízdný podvozek je tak možné dosáhnout takřka neomezené tiskové plochy. Nevýhodou tohoto řešení je složitost konstrukce a limitující hmotnost tiskové hlavy umístěné na konci robotického ramene.

Pro první fázi testování byl jako nejvhodnější zvolen portálový systém (Gantry) a to na základě tří kritérií. Prvním kritériem bylo zohlednění prostorových možnosti laboratoře, která disponuje navazujícími procesy, jako je míchání směsi nebo testování vytištěných dílů. Rozměry této laboratoře jsou 4,8 x 7,1 x 3,7 m. Druhým požadavkem bylo tisknout objekty o maximální velikosti X - 3,5; Y - 1,1; Z - 1,3 m. Třetím požadavkem byla skutečnost, že na počátku projektu nebyla známa hmotnost tiskové hlavy. Proto byl návrh směřován na těžší variantu, která obsahovala i mezi-zásobník na cementovou směs. V návrhu bylo počítáno s hmotností hlavy až 150 kg.

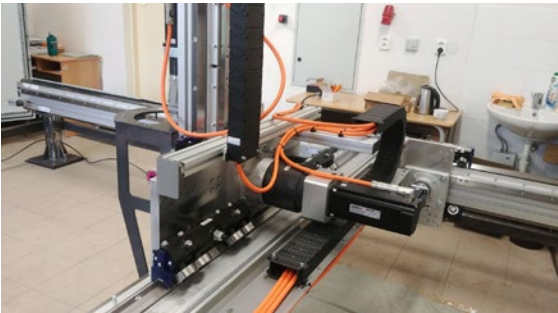
Vlastní konstrukce strojní i elektro části umožňuje mít všechny parametry stroje pod kontrolou. Navíc lze v průběhu řešení projektu upravovat SW zařízení tak, aby odpovídal požadavkům technologie, které se s přibývajícími zkušenostmi mění.

Podařilo se sestavit stroj, který neomezuje vývoj technologie v žádném ohledu. Pro řízení pohybu slouží synchronní servomotory, které umožňují pohyb koncovým bodem tiskové hlavy s vysokou dynamikou. Krokové motory, které byly použity ve většině projektů z naší rešerše, nebyly využity, protože jejich vlastnosti neodpovídaly našim požadavkům. Pro malé levné a pomalé stroje je využít lze, ale pro náš záměr by byla jejich volba velmi nevhodná.

Pro konstrukci mechanické části byly zvoleny tuhé hliníkové profily s pohonem pomocí pastorku a broušeného ozubeného hřebene. Vytvořená sestava z hliníkových profilů, ozubeného hřebene a elektromotorů byla nejdříve uchycena na provizorním ocelovém rámu. Díky tomuto rámu bylo možné testovat a optimalizovat řízení elektromotorů na TUL. Návrh této sestavy spolu s umístěním ve zkušebně je zobrazen na obrázku.



TestBed na provizorním rámu
TestBed on a temporary frame



Následným krokem bylo vytvoření stabilní ocelové konstrukce, která by zařízení umožnila tisknout do požadované výšky a zároveň by disponovala dostatečnou tuhostí pro požadovanou přesnost tisku. Díky tuhosti mechanické konstrukce bylo dosaženo přesnosti polohování cca 0,1 mm, což je pro stavební účely přesnost převyšující očekávání. Zde je nutné podotknout, že jde o přesnost polohování koncového bodu tiskové hlavy. Přesnost vytištěného objektu je pak ovlivněna zejména parametry cementové směsi. Díky zvolené konstrukci je možné pohony a jejich mechanismus provozovat v prašném prostředí. V průběhu tisku a přípravy tištěné směsi dochází k usazování cementového prachu na všechny části stroje. Pokud by nebyly jeho části dostatečně odolné, mohlo by dojít k jeho poškození.

Po dokončení výroby ocelové konstrukce byl celý mechanismus testovacího zařízení demontován z provizorního rámu umístěného v laboratoři TUL a spolu s touto ocelovou konstrukcí přepraven do ČVUT do Kloknerova ústavu, kde byl následně sestaven.



Montáž TestBedu v prostorách KÚ
Assembly of TestBed in the Klokner Institute laboratories

V následující tabulce jsou uvedeny základní parametry finální verze zařízení TestBed. Z uvedené tabulky je patrné, že parametry stroje jsou vzhledem k rychlosti tisku cementových směsí v řádu 0,3 m/s, navrženy velmi velkoryse. Tento návrh vzešel s ohledem na budoucí vývoj, kdy bude možné testovat i vysokorychlostní tisk z cementových směsí. Jakmile se 3D tisk stavebních konstrukcí osvědčí v běžné praxi, bude nutné jeho využití zrychlit. Díky zrychlení dojde k zefektivnění a snížení ceny takto pořízené stavby.

Parametr	X	Y	Z
Pracovní prostor [m]	3,5	1,1	1,3
Max rychlosti [m/s]	3	3	2
Zrychlení [m/s ²]	5	4	3
Opakovatelnost [m]	±2·10 ⁻⁴	±2,5·10 ⁻⁴	±2,5·10 ⁻⁴
Přesnost [m]	< 10 ⁻⁴		
Max. zátěž [kg]	150		
Hmotnost TestBedu [kg]	3920		

Základní parametry TestBedu
Basic parameters of TestBed

ŘÍDICÍ SYSTÉM A POHONY PRO TESTBED
CONTROL SYSTEM AND DRIVES FOR TESTBED

Pro řízení TestBedu byl zvolen standardní průmyslový systém, který dodává rakouská společnost BaR. Výběr standardizovaného řešení umožní zařízení provozovat a udržovat, aby na něm mohl vývoj a výzkum cementových směsí pokračovat 10-15 let. Pokud se použijí nestandardní nebo vlastní moduly pro řízení stroje, pak je jejich servis nebo rozšíření velmi problematické v případě, že se realizační tým rozpadne do jiných projektů.

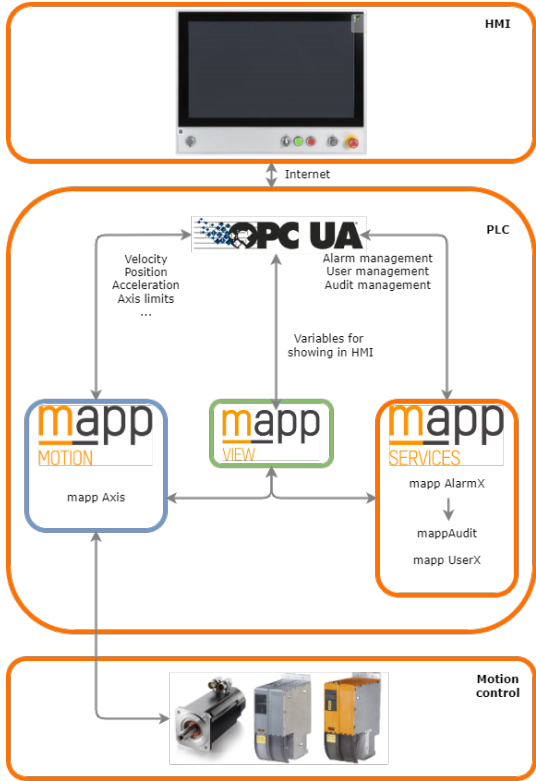


Schéma využití mapp komponent pro vývoj SW TestBedu
Diagram of the use of mapp components for the development of TestBed SW

Řídicí systém je složen ze čtyř základních částí. První část reprezentují aktuátory - synchronní motory, které zajišťují pohyb tiskové hlavy v tiskovém prostoru TestBedu. Druhá část je sestavena z průmyslového PC a IO modulů. Třetí částí je bezpečnostní PLC, aby bylo možné zajistit bezpečnou obsluhu stroje. Vzhledem k hmotnosti a rychlostem je zařízení velmi nebezpečné, kdy může dojít i ke smrtelnému zranění. Poslední, pro obsluhu velmi důležitou částí, je HMI rozhraní, díky kterému může zaškolená obsluha stroj ovládat. Vývoj SW byl zajištěn vlastními softwarovými inženýry. Díky technologii mapp bylo možné vývoj SW udělat poměrně rychle, kdy byly využity standardní SW balíky, které bylo nutné nakonfigurovat a propojit. Pro vývoj byly využity např. mappMotion, mappCNC, mappView a další.

ELEKTRICKÉ POHONY - AKTUÁTORY
ELECTRIC DRIVES - ACTUATORS

Pro přesné a dynamické pohyby je potřeba zvolit pohon, který těmto požadavkům vyhoví. Na základě zkušeností z předešlých aplikací bylo rozhodnuto stroj vybavit synchronními servomotory s permanentními magnety na rotoru. Pro měření polohy je každý motor vybaven absolutním enkodérem. Jde tedy o nepřímé odměřování, které je pro tisk stavebních konstrukcí dostatečně vyhovující. Motory jsou doplněny převodovkami, aby se upravila jejich rychlost a výstupní moment na požadované velikosti pro TestBed. Přehled použitých motorů a převodovek je uveden v tabulce níže.

Osa	Typ	Popis
X	Motor	PMSM, TMax = 14,4 Nm, IMax = 10,6 A, nMax = 6 029 ot/min, TRms = 2,98 Nm
X	Převodovka	Planetární koaxiální, T2Max = 131 Nm, n1Max = 7 000 ot/min, i = 5:1, 97,0% Účinnost, J = 1,343e-4 kg·m²
Z	Motor	PMSM, TMax = 38 Nm, IMax = 36,5 A, nMax = 5 336 ot/min, TRms = 7,84 Nm
Z	Převodovka	Planetární koaxiální, T2Max = 736 Nm, n1Max = 5 500 ot/min, i = 20:1, 96,0% Účinnost, J = 0,0011183 kg·m²
Y	Motor	PMSM, TMax = 38 Nm, IMax = 36,5 A, nMax = 5 336 ot/min, TRms = 8,25 Nm
Y	Převodovka	Planetární koaxiální, T2Max = 131 Nm, n1Max = 7 000 ot/min, i = 5:1, 98,0% Účinnost, J = 4,76e-5 kg·m²
E	Motor	PMSM, TMax = 14,4 Nm, IMax = 10,6 A, nMax = 6 029 ot/min, TRms = 3,4 Nm
E	Převodovka	Planetární koaxiální, T2Max = 192 Nm, n1Max = 5 500 ot/min, i = 16:1, 94,0% Účinnost, J = 0,5 kg·m²

Parametry motorů TestBedu
Parameters of electric motors of TestBed

Pro řízení osy X byly použity dva pohony, aby nedocházelo ke křížení portálu v případě, že by byl řízen pohyb jen z jedné strany. Takové řízení vyžaduje elektronickou hřídel, aby se oba motory pohybovaly synchronně a nedocházelo k mechanickému přetěžování celé konstrukce.

Osy Y a Z mají jen jeden motor. V případě osy Z je motor ještě vybaven brzdou, aby při vypnutém stroji nedocházelo k samovolnému pohybu tiskové hlavy směrem dolů. Osa E slouží pro dopravu cementové směsi ze zásobníku do výstupní trysky tiskové hlavy. Její rychlost musí být opět synchronizována na rychlost pohybu tiskové hlavy, aby bylo množství směsi položené do tiskového prostoru konstantní. Zejména jde o místa, kde musí stroj projet předepsanou konturu sníženou rychlostí. Takovým místem jsou typicky ostré úhly.

V průběhu vývoje bylo nutné dodělat další osu, která slouží pro dávkování urychlovače tuhnutí cementové směsi. Díky využití standardizovaných komponent bylo možné připojit frekvenční měnič od dodavatele Danfoss s asynchronním motorem, který dodává přesné pumpy pro podobné účely.

PRŮMYSLOVÉ PC A IO MODULY
INDUSTRIAL PC AND IO MODULES

Aby byla zajištěna možnost pohodlného řízení stroje pomocí PLC a zároveň obsluha mohla používat SW pro Windows pro pre-procesing, bylo využito průmyslové PC se dvěma operačními systémy. Na každém jádru CPU je spuštěn jeden systém. Prioritu má systém reálného času, který vyžaduje softwarové PLC. Pro řízení trajektorie tiskové hlavy je nutné, aby byly všechny pohony synchronizované pomocí časových značek, které odpovídají např. reálné běžícímu času. Systém CNC pak posílá data v přesně stanovených časech na všechny pohony, které se pohybují ve shodě s předem definovanou trajektorií pomocí G-kódu.

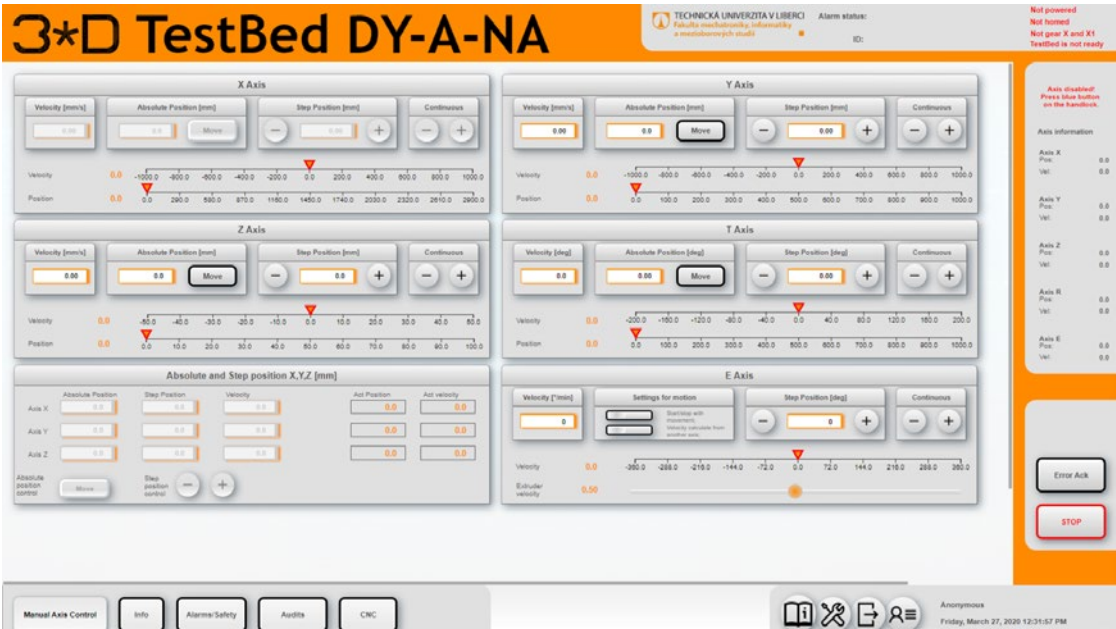
K PLC je připojen modul vstupů a výstupů, který zajišťuje možnost připojení senzorů a aktuátorů. Díky konfiguraci modulu lze připojovat ke stroji např. tlačítka nebo kontrolky, které jsou pro obsluhu důležité. Díky sběrnici IO-lík lze připojit inteligentní senzory např. pro sledování výšky tištěné konstrukce. Pokud známe skutečnou výšku, lze korigovat výšku osy Z v reálném čase, jak se tisková hlava pohybuje nad vytištěným objektem.

BEZPEČNOSTNÍ PLC
SAFETY PLC

Bezpečnostní PLC slouží k ochraně zdraví lidí, kteří se pohybují v tiskovém prostoru. Stroj se může pohybovat plnou rychlostí jen v případě, že je uzamčena bezpečnostní klika plotu, který odděluje pracovní prostor stroje od okolního prostoru laboratoře. V případě, že dojde k otevření vstupní branky, stroj musí zpomalit na bezpečnou rychlost. Tento stav nastává při servisu a ladění stroje, kdy je nutné, aby byl člověk přítomen v tiskovém prostoru, ale zároveň nebyl ohrožen na zdraví. Díky funkci Safety Limited Speed lze tento stav SW i HW zajistit. Do bezpečnostního PLC jsou také zapojena všechna tlačítka nouzového zastavení. Díky možnosti změny SW lze v případě potřeby bezpečnostní požadavky na stroj upravit dle poznatků obsluhy z reálného provozu.

HMI ROZHRAŇÍ
HMI INTERFACE

Pro snadné ovládání a používání TestBedu byl pořízen dotykový panel. Ten slouží pro zobrazení HMI rozhraní. Ovládání a rozvržení prvků je navrženo tak, aby bylo intuitivní a zaučení obsluhy nevyžadovalo žádné odborné znalosti z oblasti řízení el. pohonů. Obsluha může ovládat jednotlivé osy, které byly popsány výše. Zároveň může nahrávat programy formou G-kódu , které slouží k řízení CNC jádra TestBedu. Jde o standardní sadu příkazů, které se využívají u CNC strojů při výrobě strojních částí. Není tedy nutné vymýšlet vlastní řídicí jazyk pro tisk stavebních konstrukcí.



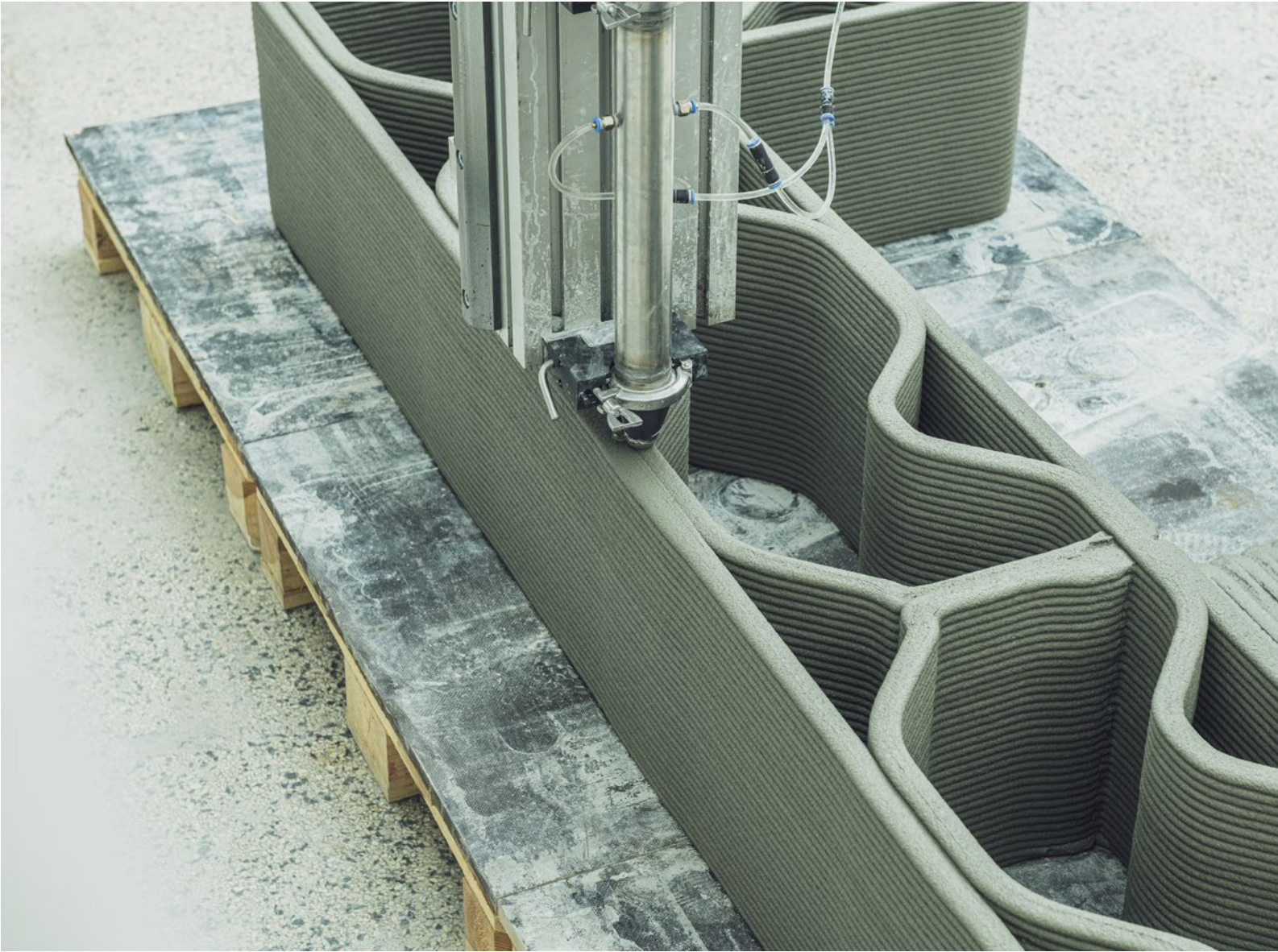
HMI rozhraní pro obsluhu TestBedu
HMI interface for operating TestBed

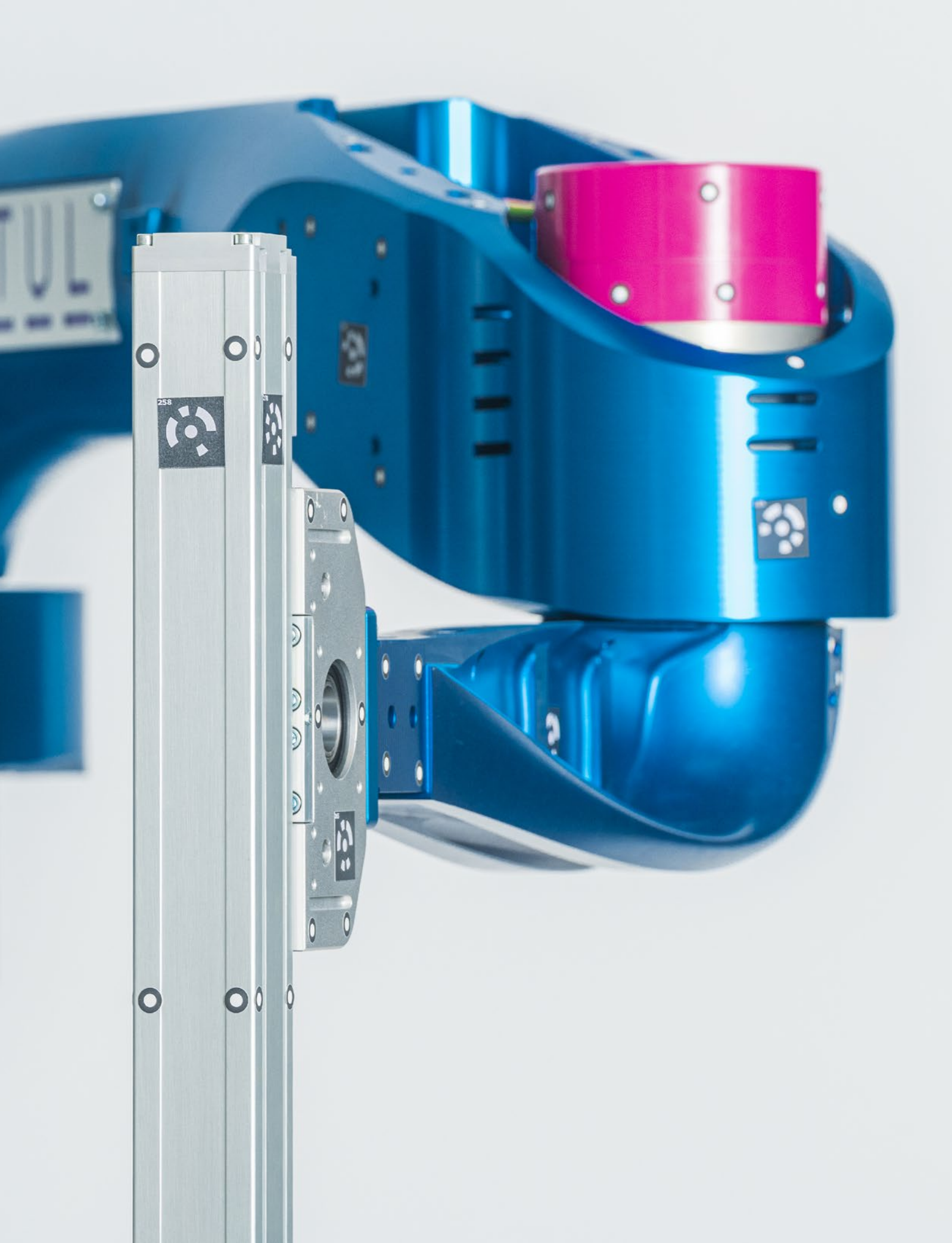


Ovládací panel s HMI rozhraním pro obsluhu TestBedu
Control panel with HMI interface for operating TestBed

Takto sestavený a zprovozněný stroj slouží pro vývoj cementových směsí v Kloknerově ústavu při ČVUT. V průběhu projektu byl stroj průběžně vyvíjen a upravován tak, aby vyhověl požadavkům technologie, která se také v průběhu vyvíjela. Předpokládá se, že vývoj stroje bude pokračovat i v navazujících projektech. Vývoj cementové směsi a technologie tisku jsou základním kamenem pro 3D tisk ve stavebnictví. TestBed je zařízení pouze pro vývoj. Není určen jako finální stroj pro provádění tisku na staveništi.







03

TISKOVÝ ROBOT „PRINTING MANTIS“ - UNIKÁTNÍ ROBOTICKÉ ZAŘÍZENÍ PRO 3D TISK PRINTING MANTIS - A UNIQUE ROBOTIC DEVICE FOR 3D PRINTING

Leoš Beran, Václav Záda, Daniel Kajzr, Květoslav Belda, Robert Voženílek, Josef Břoušek,
Tomáš Petr, Tomáš Myslivec, Martin Diblík

V této kapitole se čtenář seznámí s vývojem tiskového robotu, který je určen pro tisk přímo na staveništi. Zabýváme se rozбором kinematických, dynamických a prostorových požadavků pro takové zařízení. Robotické rameno není navrženo jen po teoretické stránce, ale během řešení projektu vznikl funkční model v měřítku 1:2. Jde o unikátní řešení, které nebylo ještě v oblasti 3D tisku budov prezentováno. Je popsán kompletní řídicí systém včetně SW řešení pro jeho řízení. Výsledek našeho projektu bude sloužit pro další výzkum a vývoj v oblasti aditivní technologie na bázi cementových směsí.

In this chapter, the reader will learn about the development of the printing robot designed for printing directly on the construction site. We deal with the analysis of kinematic, dynamic and spatial requirements for such a device. The robotic arm was not only designed at a theoretical level but in the course of the project a functional sample was created to scale 1:2. This is a unique solution that has not yet been presented in the field of 3D printing of buildings. Next, the complete control system is described, including its SW concept. The result of our project will be used for further research and development in the field of additive technology based on cement mixtures.

KINEMATIKA, DYNAMIKA A ŘÍZENÍ ROBOTU PRO 3D TISK

KINEMATICS, DYNAMICS AND ROBOT CONTROL FOR 3D PRINTING

NÁVRH KINEMATICKÉ STRUKTURY ROBOTU

DESIGN OF THE KINEMATIC STRUCTURE OF THE ROBOT

S ohledem na požadavky aplikace 3D tisku betonu v architektuře se tisková hlava pohybuje převážně ve vodorovné rovině. Ramena robotů nesoucí tiskovou hlavu mívají značnou hmotnost, proto je vhodné volit takovou kinematickou strukturu robotu, ve které se články ramena zabezpečující tisk pohybují výhradně vodorovně, tím nemění svou potenciální energii a přirozeně tak zamezují zbytečným ztrátám. Tomuto požadavku vyhovují kartézské, cylindrické a SCARA kinematické struktury, kde SCARA reprezentuje zkratku „Selective Compliance Articulated Robot Arm“, tedy selektivně poddajné kloubové robotické rameno.

Podle konstrukce se jeví nejvíce příznivě SCARA struktura, která obsahuje jen rotační spojovací klouby pro pohyb ve vodorovné rovině. Samotné rameno musí mít dosah okolo 6 metrů pro tisk průměrně velké stavební jednotky. Hmotnost ramena a příslušné momenty setrvačnosti proto vychází poměrně velké. Při tisku zlomu tištěné křivky se musí celý mechanismus zastavit – tj. zabrzdit. To vede k úplné ztrátě kinetické energie ramena robotu, kterou musí opět získat rozjezdem obecně v jiném směru.

Z popsání důvodu bylo přikročeno k úpravě SCARA struktury přidáním dalšího článku, spojeného opět rotačním kloubem s původní strukturou. Tím dochází ke zvýšení kinematické a dynamické pružnosti celého zařízení pro tisk, neboť při tisku zmíněného zlomu tištěné křivky se mechanismus nemusí zastavovat, ale dále pokračuje v pohybu. Tím dochází prakticky k zachování kinetické energie, resp. k jejím minimálním změnám v okolí bodu zlomu. Poznamenejme, že v tomto případě se poslední článek robotu, který nese tiskovou hlavu, otáčí právě okolo bodu zlomu, a to na nezbytně nutnou dobu. Ostatní články robotu přitom pokračují ve svém vlastním pohybu. Důsledkem tohoto technického návrhu jsou výrazné úspory potenciální i kinetické energie celé řízené soustavy.

KINEMATIKA ROBOTU

ROBOT KINEMATICS

Vlastní hlava pro tisk betonu se musí pohybovat po předem stanovené trajektorii, kterou zpravidla navrhuje příslušný návrhář na základě požadavků architekta stavby. Poněvadž shora uvedená struktura mechanismu robotu získala přidáním dalšího článku jeden stupeň volnosti navíc, má robot tři mechanické stupně volnosti pro tisk v rovině, která reprezentuje dva stupně volnosti. Důsledkem je skutečnost, že zaujme-li tisková hlava konkrétní polohu, ostatní články robotu se mohou ještě pohybovat, a to se stupněm volnosti jedna.

V praxi to znamená, že máme k dispozici nekonečně mnoho možných voleb pohybu jednotlivých článků robotu, což výrazně zvyšuje kinematickou pružnost celé struktury. Ve srovnání se standardními kinematickými strukturami užívanými v průmyslu je ve shodě známé jednoznačné řešení přímé kinematické úlohy, ale není dané jednoznačné řešení inverzní kinematické úlohy. Inverzní úloha je dána požadavkem nalezení natočení jednotlivých článků robotu na základě aktuálně zvoleného bodu trajektorie koncového bodu, tj. tiskové hlavy. V našem případě má inverzní úloha nekonečně mnoho přijatelných řešení, tj. řešení, která splňují požadavky dosažitelnosti ramena robotu. V bezprostředně následujícím textu se zaměříme na dva možné přístupy, které se ukázaly jako velmi vhodné pro praktické aplikace.

INVERZNÍ ÚLOHA SE ZADANÝM POHYBEM JEDNOHO ČLÁNKU

INVERSE PROBLEM WITH A SPECIFIED MOVEMENT OF ONE LINK

Poloha bodu ve vodorovné poloze je dána dvěma souřadnicemi, např. x , y . V této rovině máme tři úhly natočení ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 jednotlivých článků robotu. K určení jednoznačného řešení je možné přikročit dodatečnou volbou vazby mezi dílčími úhly natočení. To znamená, že k rovnicím pro polohu x , y přidáme třetí obecnou rovnici, čím získáme dostatečný počet rovnic pro určení dílčích natočení článků robotu. To vede obecně k poměrně komplikovaným numerickým výpočtům.

V průmyslové robotice platí požadavek minimalizace numerických výpočtů, což je řešeno preferováním výpočtů analytickou cestou. Výsledkem bývají výpočty v tzv. reálném čase, tj. výpočty, které trvají výrazně kratší dobu, než je požadovaný průběh stanovené trajektorie pohybu robotu. Z těchto důvodů byly ověřovány i následující jednoduché volby, které vedly k analytickým výsledkům, které lze snadno implementovat v řídicím systému robotu bez zdlouhavých numerických řešení.

První možnost je vymezena volbou některého z úhlů jako proměnného parametru, na jehož základě se určují zbylé dva úhly. Např. úhel ϕ_1 se v diskrétních časových okamžicích vzorkování pravidelně mění o zvolenou hodnotu a druhé dva úhly se průběžně dopočítávají analytickými postupy s využitím analytické geometrie a exponenciálního počtu. První rotační kloub ramena robotu lze uvážit jako unášecí rotační zařízení pro zbývající část ramena robotu. Byly ověřovány i jiné přístupy, které jsou však méně významné a nejsou zde proto uvedené.

Druhou možností je volba přímé vazby mezi úhly ve tvaru $\phi_3 = k - \phi_2$, kde k je vhodné číslo, např. $\phi_3 = \phi_2$, $\phi_3 = -\phi_2$. V prvním případě se má rameno robotu stáčet do tvaru písmene C, ve druhém případě naopak dochází ke skládání ramena do tvaru písmene Z. Z důvodu dosažitelnosti dané pozice koncové tiskové hlavy je vhodné využít někdy první a jindy zase druhý případ. Dále byly řešeny algoritmy přechodu od jednoho postupu ke druhému, např. od tvaru Z do tvaru C, a to bez porušení stanoveného pohybu koncového členu, tj. tisková hlava se pohybuje stanovenou rychlostí po předepsané dráze tak, aby byly plně splněny veškeré požadavky na kvalitu tisku betonu.

Byly zkoušeny i další alternativy vazeb, a to spíše z výzkumných než praktických důvodů. Zde bylo nutné užít numerických metod, které výrazně prodlužovaly výpočty, a proto byly vyloučeny ze seznamu vhodných, tj. prakticky aplikovatelných postupů. Nicméně představují jistou zásobu postupů do budoucna, v případě, že by se dodatečně ukázala výhodnost některých z nich.

INVERZNÍ ÚLOHA JAKO OPTIMÁLNÍ ŘÍZENÍ NA BÁZI KINEMATIKY

INVERSE PROBLEM AS OPTIMAL CONTROL BASED ON KINEMATICS

V zásadě zcela jiným možným postupem je zavedení vhodného funkcionálu, který váže úhly a úhlové rychlosti natočení jednotlivých rotačních členů kinematického řetězce ramena robotu. Vhodným funkcionálem je např. funkcionál tvořený integrálem váženého součtu kvadrátů úhlových rychlostí spolu s vazbami na danou polohu koncového členu ramena v daném časovém okamžiku. V principu jde o variační úlohu s omezeními, ze které vyplyne soustava nelineárních diferenciálních rovnic s okrajovými podmínkami. Řešení je nutno provádět výhradně numerickými postupy, což narušuje shora uvedený požadavek hledání analytického řešení. Nicméně výhodou je, že zcela odpadá řešení inverzní úlohy, neboť ta je vlastně implicitně určena v rámci řešení variačního problému.

DYNAMIKA ROBOTU

ROBOT DYNAMICS

Matematický model dynamiky robotu představuje souhrnné informace o jeho fyzikálních charakteristikách. Kromě popisu poloh, rychlostí a zrychlení explicitně zahrnuje vlivy hmotností a momentů setrvačnosti jednotlivých článků robotu, které mají zcela zásadní vliv na výsledné chování robotu v pracovním prostoru. Hmotnosti jednotlivých článků ramena robotu během pohybu zůstávají konstantní. Naproti tomu momenty setrvačnosti se velmi rychle mění, a to v závislosti na konkrétní konfiguraci robotu. Důsledkem je nutnost využít model dynamiky robotu pro návrh vhodného způsobu řízení. Nejpoužívanějším způsobem odvození pohybových rovnic popisujících dynamiku robotu jsou Lagrangeovy rovnice, viz následující část. Druhým používaným způsobem jsou Newton-Eulerovy rovnice, zejména u návrhářů – strojních inženýrů.

VYUŽITÍ LAGRANGEOVA FORMALISMU

USING THE LAGRANGIAN FORMALISM

Lagrangeovy rovnice jsou často využívány při odvozování diferenciálních rovnic dynamiky daného mechanického, resp. elektro-mechanického systému, který se jeví jako velmi složitý, ale lze u něj úspěšně určit jeho celkovou potenciální a kinetickou energii. Potom lze bezprostředně aplikovat tzv. Lagrangeovy rovnice pro získání popisu dynamiky pohybu daného systému.

Výskyt rotačních kloubů u vícerozměrných robotických systémů vede na obtížné aplikování standardních metod rozkladu používaných ve strojírenství, neboť hrozí, že i malá nepřesnost může do odvozovaného modelu zavést chyby, které zcela znehodnocují výsledné rovnice. Lagrangeovy rovnice naproti tomu vedou řešitele přímo k odvození s minimální možností chyb. Dané rovnice byly využity v odvození diferenciálních rovnic popisujících dynamiku robotu pro 3D tisk. Tyto rovnice byly namodelovány v prostředí MATLAB a ověřeny chováním simulovaného systému v různých situacích, a to ať teoretického, či praktického významu.

VYUŽITÍ HAMILTONOVA FORMALISMU USING THE HAMILTONIAN FORMALISM

Přibližně v polovině 19. století odvodil lord Hamilton své rovnice jako alternativní přístup k rovnicím Lagrangeovým. Zatímco Lagrangeovy rovnice pracují s proměnnými, které reprezentují polohy a rychlosti, Hamiltonovy rovnice pracují s polohami a tzv. zobecněnými hybnostmi. Ačkoli se Hamiltonovy rovnice v robotice používají velmi zřídka, je jejich význam dosud nedoceněn. Důvod spočívá ve skutečnosti, že Lagrangeovy rovnice pracují se stavových vektorem reprezentovaným kinematickými veličinami (polohy a rychlosti), zatímco Hamiltonovy rovnice tím, že využívají zobecněné hybnosti mají ve svém stavovém popisu zahrnuty i dynamické parametry řešeného systému. Tato skutečnost pak umožňuje využít jednodušších regulačních přístupů, než je tomu u řízení systému vycházejících z Lagrangeových rovnic. Tato skutečnost dosud nebyla plně doceněna.

V projektu 3D tisku robotu bylo k tomuto závažnému faktu přihlédnuto a příslušné Hamiltonovy rovnice byly odvozeny, a to ve dvou variantách. První varianta představuje přímo rovnice dynamiky bezprostředně odvozené na základě Hamiltonova přístupu, ve druhé variantě byl proveden rozklad rovnic na části se symetrickou a antisymetrickou částí. Tento rozklad je výhodný zejména při odvození asymptotické stability při řízení robotu k pevnému bodu a v některých dalších otázkách.

NEWTON-EULEROVY ROVNICE NEWTON-EULER EQUATIONS

Využití těchto rovnic je alternativou používanou v robotice zejména strojnými inženýry. Ačkoli se zdají být přirozenější při odvozování modelu dynamiky robotu, ze zkušenosti je známo, že při jejich používání jsou velmi často odvozovány chybné modely. Jsou ovšem výhodné při řešení popisu dynamiky pohybu systémů do dvou až tří stupňů volnosti. U robotů, které mívají běžně šest stupňů volnosti je jejich výhodnost diskutabilní a kdo si již zvykne na využití Lagrangeových resp. Hamiltonových rovnic, zpravidla Newton-Eulerovy rovnice odmítá. Zde je vhodné poznamenat, že sami fyzikové téměř výhradně preferují Lagrangeovy a Hamiltonovy rovnice, které lze výhodně používat nejen při popisu mechanických, ale i elektrických systémů (zobecněný Lagrangián a Hamiltonián), a běžně se jejich popis používá i v kvantové mechanice. Pro popis robotu pro 3D tisk betonu byly tyto rovnice odvozeny hlavně z cvičných důvodů.

Poznamenejme, že všechny výše uvedené postupy 1.-3. jsou ekvivalentní, tj. vedou k rovnicím se shodnými výstupy. Jejich matematické odvozování a fyzikální náhled je však odlišný. To dále umožňuje i jiný pohled na problematiku řízení robotu.

IDENTIFIKACE DYNAMICKÝCH PARAMETRŮ IDENTIFICATION OF DYNAMIC PARAMETERS

Znalost dynamických parametrů robotu má zcela zásadní význam pro přesnost řízení koncového efektoru po stanovené dráze. Pod dynamickými parametry se zde rozumí hmotnosti a momenty setrvačnosti jednotlivých článků ramena robotu. Tyto parametry nejsou u robotických manipulátorů zpravidla plně známy. Lze je laboratorně určit fyzikálními měřeními na jednotlivých člancích při rozložení robotu. To je však velmi zdlouhavé a v praxi téměř nemožné.

Dále je možné využít softwarové nástroje CAD/CAM k výpočtu daných parametrů z geometrie objektů z 3D modelu robotu. Zde je však potřeba mít velmi přesně vytvořený 3D model robotu, který musí zahrnovat i fyzikální vlastnosti objektů, jako jsou hustoty materiálů, ze kterých jsou jednotlivé komponenty zhotoveny, momenty setrvačnosti motorů a převodových ústrojí atd. I u velmi pečlivě vytvořeného 3D modelu však dochází téměř vždy k jistým zjednodušením, resp. zanedbáním,

a proto získané parametry nemusí odpovídat skutečnosti. V našem případě byl tento přístup použit pro prvotní určení parametrů simulačních modelů např. pro verifikaci zvolených pohonů pro robot v měřítku 1:2.

V neposlední řadě lze uvážit tzv. experimentální identifikaci dynamických parametrů. Tento přístup je mnohem efektivnější pro získání přesných odhadů parametrů oproti dříve zmíněným možnostem. Kromě dynamických parametrů lze rovněž identifikovat i parametry tření. V těchto souvislostech se často mluví o odhadu parametrů a identifikace reprezentuje jejich postupné zpřesňování. Nicméně se často oba pojmy prolínají.

Pro účely identifikace parametrů je potřeba, aby se robot pohyboval po vhodných budících trajektoriích. V našem případě byla použita budící trajektorie složená ze sumy harmonických funkcí. Vhodné buzení má vliv na rychlost a kvalitu identifikace. Je-li počáteční odhad (resp. výpočet) parametrů dostatečně přesný, probíhá identifikace relativně rychle. Je-li ale počáteční odhad velmi nepřesný, může identifikace selhávat, nebo trvat velmi dlouho. Z těchto důvodů je potřebné celý proces určování parametrů předem připravit simulací ve vhodném softwarovém prostředí. V našem případě bylo využito prostředí MATLAB.

NÁVRHY ŘÍZENÍ ROBOTU ROBOT CONTROL DESIGNS

Řízení pohybu jednotlivých článků ramena robotu představuje komplexní problém. Naivní představa, že se nějak řekne robotu, kam a jak se má pohybovat a robot to provede, zcela selhává. Získáme-li např. model popisu dynamiky robotu, mohlo by se zdát, že stačí žádanou trajektorii parametrizovat v čase, vypočítat její první, resp. i druhou derivaci, dosadit do rovnic dynamiky a určit tak průběh žádaného řízení. Již jednoduché modely ukazují, že tomu tak není. Hlavní důvod spočívá ve skutečnosti, že ať se provede jakkoli přesná identifikace parametrů robotu, vždy zůstanou nepatrné rozdíly, které způsobí, že se robot pohybuje po odlišné trajektorii, než která je mu předepsána. Tuto odchylku mezi skutečnou a žádanou trajektorií je pak nutné využít k opravě řídicích vektorů tak, aby se skutečná trajektorie, v rámci předepsané přesnosti, shodovala s trajektorií žádanou. To je podstata řízení pohybu robotu po předem stanovené, žádané trajektorii.

Problematika řízení technických systémů se někdy řadí do tzv. Technické kybernetiky. Tu lze velmi zhruba rozdělit na teorii lineárního a teorii nelineárního řízení. Roboty vlivem rotačních členů představují výrazně nelineární systémy, proto se využívá teorie nelineárního řízení, která právě pro účely řízení robotů získává specifický charakter. V dalším výkladu se budeme věnovat jen vybraným postupům.

ŘÍZENÍ INVERZNÍ DYNAMIKOU – TZV. SILOVÉ ŘÍZENÍ CONTROL BY INVERSE DYNAMICS - THE SO-CALLED FORCE CONTROL

Zde byly aplikovány dva přístupy, a to jeden pro popis dynamiky reprezentovaný Lagrangeovými rovnicemi a druhý pro popis reprezentovaný Hamiltonovými rovnicemi. V prvním případě bylo postupováno v podstatě standardní cestou, kdy je vektor zrychlení nahrazen novým vektorem, u kterého se zvolí vhodný PD resp. PID regulátor na rozdíl žádané a skutečné trajektorie (sledová chyba) a odvodí se asymptotická stabilita pro vhodnou volbu parametrů regulátoru. V případě Hamiltonových rovnic byla navržena náhrada vektoru zobecněných hybností novým vektorem. Další postup byl analogický. V obou případech je třeba provést velmi přesnou identifikaci dynamických parametrů, jinak hrozí že regulační obvod se dostane mimo oblast stability, a to zejména v případech většího dynamického namáhání.

PREDIKTIVNÍ ŘÍZENÍ PREDICTIVE CONTROL

V případě prediktivního řízení bylo postupováno standardně. Z matematického popisu dynamiky robotu je odhadován budoucí vývoj pohybu a na základě zpravidla kvadratického kritéria kvality je odvozen akční zásah tak, aby toto kritérium bylo minimalizováno. Prediktivnímu řízení bylo v rámci všech verifikovaných metod věnováno nejvíce místa. Bližší popis je mimo možnosti této zprávy.

ADAPTIVNÍ ŘÍZENÍ

ADAPTIVE CONTROL

Adaptivní řízení představuje vyšší formy řízení, kdy identifikace parametrů řízeného systému je buď částečně, nebo úplně opominuta. Je nahrazena tzv. zákonem adaptace. V průběhu řízení se tak robot pohybuje ze začátku po odlišných trajektoriích, než jsou mu předepsány, postupně si však pozměňuje své vnitřní parametry v modelu pro řízení tak, aby po řadě opakování se skutečná a žádaná trajektorie shodovaly v rámci předepsané přesnosti řízení. Pro potřeby 3D tisku se předepsaná přesnost řízení pohybuje od několika mm do cca 1cm, ale může být i vyšší na základě návrhu architekta. Adaptivní řízení bylo prozatím realizováno v rámci vyvíjené teorie a částečně simulováno v MATLABu.

SIMULACE CHOVÁNÍ ROBOTU

SIMULATION OF ROBOT BEHAVIOUR

Sestrojené matematicko-fyzikální modely robotu včetně řídicích algoritmů byly prioritně modelovány na počítači za účelem ověření správnosti jednak popisu kinematiky a dynamiky robotu, a jednak za účelem prokázání správnosti návrhu řídicích algoritmů, které zajišťují co nejpřesnější dodržení pohybu robotu po stanovené trajektorii. Jsou-li splněny veškeré požadavky stanovené na dodržování přesnosti a rychlosti pohybu robotu v rámci počítačových simulací, lze přikročit k realizaci programu řízení skutečně fyzicky realizovaného technického systému pro 3D tisk betonu. V této věci byly provedeny následující dva podstatné kroky.

MODELOVÁNÍ V PROSTŘEDÍ MATLAB

MODELLING IN THE MATLAB ENVIRONMENT

Prostředí MATLAB bylo pro výše uvedené účely zvoleno z důvodu relativní jednoduchosti, velmi široké použitelnosti a oblíbenosti u technické veřejnosti a zároveň z důvodu možnosti použití automatického generování kódu pro přímou implementaci navržených řídicích struktur na reálná zařízení. V rámci specializovaného jazyka tohoto prostředí byly naprogramovány modely chování robotu na bázi kinematiky a dynamiky, včetně navazujících metod řízení, tak jak bylo shora uvedeno. Byly odhadovány vhodné volby regulačních parametrů tak, aby bylo dosaženo co možná nejlepší úrovně řízení. Odhady regulačních parametrů lze sice provádět pomocí teoretických výpočtů, ale s ohledem na ne zcela přesné parametry délek, hmotností, momentů setrvačnosti a koeficientů tření je nutné většinu regulačních parametrů korigovat tak, aby výsledné řízení probíhalo podle předem stanovených kritérií.

VYUŽITÍ FYZIKÁLNÍCH MODELŮ

USE OF PHYSICAL MODELS

Jelikož úkolem tohoto projektu nebyla stavba prototypu robotu pro 3D tisk, byly postaveny celkem 4 mechanické modely laboratorního charakteru pro ověření všech postupů na reálných zařízeních. Prvním z nich je zařízení zvané „TestBed“, které je určeno výhradně pro ověřovací tisky vlastní tiskové hlavy a je popisováno v kapitole 2 této zprávy.

Druhé zařízení je představováno jednoduchým mechanickým systémem se dvěma stupni volnosti a je používáno pro prvotní ověřování identifikace parametrů a některých metod řízení.

V pořadí třetím mechanickým zařízením je model skutečného zařízení v měřítku 1:4, které má již kinematickou strukturu uvedenou v první části. Na této struktuře byla již ověřována celá řada řídicích algoritmů, které byly přeneseny z prostředí MATLAB, jak bylo výše uvedeno. Kromě využití matematických modelů popisu kinematiky a dynamiky, byly provedeny opakované identifikace dynamických parametrů, odhady třecích koeficientů na základě vybraných modelů tření a odzkoušeny shora uvedené metody řízení robotu.

Tzv. čtvrtinový model (tj. model 1:4) byl zatížen nedostatky zejména kvůli použití planetových převodovek a hřídelových spojů typu pero-drážka, které měly za následek vůle u jednotlivých os, a tím bylo způsobeno výrazné snížení přesnosti koncového bodu. Proto setestování často dostalo do řady problémů, které musely být řešeny jak změnami trajektorií, tak i mechanickými úpravami a řadou dalších zásahů.

Kromě těchto modelů, byl rovněž postaven tzv. poloviční model, tj. model skutečné struktury robotu v měřítku 1:2, u kterého byly výše zmiňované nedostatky odstraněny použitím bezvůlových, harmonických převodovek. Bohužel, dosud nejsou k dispozici některé technické komponenty, takže toto fyzikální zařízení, přestože skutečně stojí, nebylo možné oživit a přenést na něj výše uvedené progresivní postupy k dalšímu testování.

PLATFORMA OTEVŘENÉHO ŘÍDICÍHO SYSTÉMU

OPEN CONTROL SYSTEM PLATFORM

Kombinace SW MATLAB/Simulink s automatickým generátorem kódu a prostředím Automation Studio tvoří platformu otevřeného řídicího systému umožňující postihnout veškeré kroky od samotného návrhu, simulace, implementace až po testování navrženého řízení na reálném zařízení.

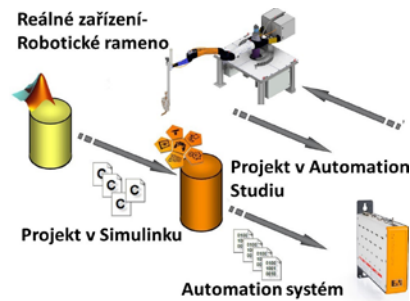
MATLAB, respektive Simulink umožňuje navrhování a vytváření simulačních modelů pomocí blokových schémat. Tento způsob návrhu a simulace je přehledný, intuitivní a časově efektivní. Další výhodou použití prostředí Simulink je možnost využití nejrůznějších Toolboxů např. Robotics Toolbox a Robotic System Toolbox, které poskytují knihovny robotických algoritmů a nástrojů pro návrh, simulaci testování a nasazení robotických aplikací na cílový systém. Automatický generátor kódu umožňuje transformovat simulační model ze Simulinku na PLC kód respektive na kód v jazyce C/C++, který je přímo spustitelný na řídicím systému tedy PLC či průmyslovém PC. Podobných generátorů kódu je v dnešní době více a liší se možnostmi převodu a jazykem PLC kódu. Pro náš řídicí systém byl použit automatický generátor kódu Automation Studio Target for Simulink, protože je plně automatický a odpadá u něj nutnost ruční implementace vygenerovaného kódu do PLC.

Automation Studio je integrované vývojové prostředí určené pro programování PLC, které obsahuje nástroje pro všechny fáze projektu - umožňuje konfigurovat regulátory, pohony, komunikaci a vizualizaci.

AUTOMATICKÉ GENEROVÁNÍ KÓDU

AUTOMATIC CODE GENERATION

Pro možnosti implementace Simulink modelů je použito automatické generování kódu za pomoci doplňku BR Target for Simulink. Tento doplněk umožňuje jednoduše „převést“ navržená simulační schémata z prostředí Simulink do programu Automation Studio a následné spuštění na reálném PLC. Simulační schémata jsou automaticky převedena pomocí SimulinkCoder® nebo EmbeddedCoder® na zdrojový kód v jazyce C/C++, a tím odpadá ruční psaní programu. Principiální proces implementace řízení založeného na modelu navrženém v MATLAB/Simulink dokumentuje obrázek níže.

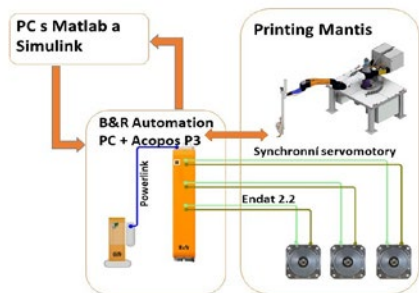


Proces implementace řízení založeném na Simulink modelu
Process of implementing control based on a Simulink model

ŘÍDICÍ SYSTÉM ZALOŽENÝ NA MODELU

MODEL-BASED CONTROL SYSTEM

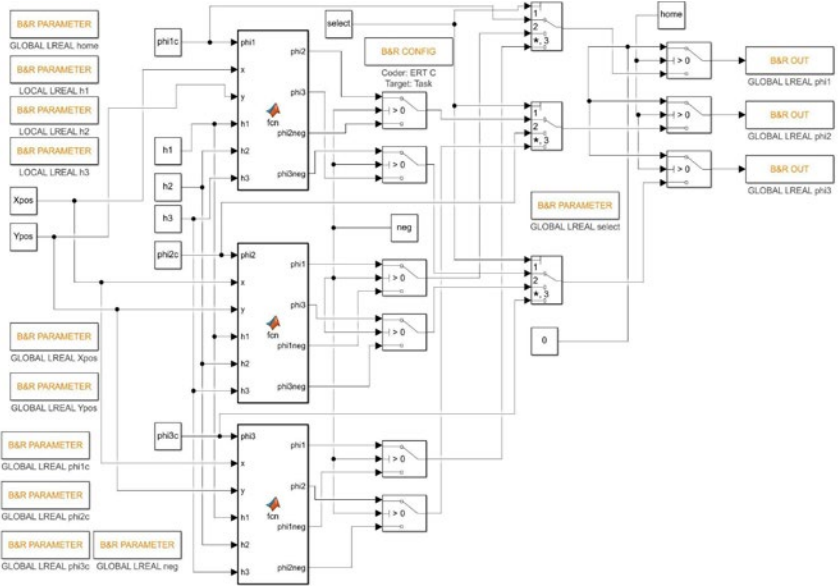
Řídicí systém robotického ramene je navržen tak, aby bylo možné k jeho řízení využívat modely navržené pomocí Simulinku prostřednictvím jejich automatické implementace do cílového řídicího systému – PLC / průmyslového PC. Řídicí systém sestává z průmyslového PC B&R a pohony jednotlivých os jsou řízeny servoměniči B&R Acopos P3. Blokové schéma řídicího systému založeného na modelu je ukázáno na následujícím obrázku.



Blokové schéma řídicího systému založeného na modelu
Block diagram of the model-based control system

ŘÍDÍČÍ SW ZALOŽENÝ NA MODELU MODEL-BASED CONTROL SW

Řídicí SW založený na modelu je využíván ve vrstvách pro generování trajektorie a vrstvách pro řízení pohybu. Ve vrstvě pro generování trajektorií se automaticky generovaný kód ze Simulinku používá k řešení přímé a inverzní kinematiky robotického ramene a k implementaci interpolačních funkcí (např. Spline funkcí). Ve vrstvě pro řízení pohybu se automaticky generovaný kód používá pro možnost centralizovaného řízení robotického ramene pro dynamicky náročné aplikace. Obrázek demonstruje ukázkou řídicího Simulink modelu pro řešení přímé a inverzní kinematiky prvních třech os robotického ramene v reálném čase využívaného pro možnosti ovládání robotického ramene v režimu koncového bodu. Jedná se o standardní Simulink model vytvořený z běžně dostupných bloků, které MATLAB nabízí. Tento je navíc doplněný o bloky z knihovny BR Automation Studio Toolbox. Tato knihovna obsahuje bloky vstupů, výstupů a parametrů, které slouží pro propojení s fyzickými vstupy a výstupy řídicího systému. Stěžejním blokem této knihovny je blok BR Config, kde se nastavují konfigurační parametry pro automatické generování kódu (kodér, programovací jazyk, podpora softwarového prostředí, vzorkovací perioda, atd.). Samotný výpočet přímé a inverzní úlohy kinematiky je realizován pomocí bloku Matlab function. Následně jsou vypočteny žádané hodnoty kloubových proměnných, které jsou přímo posílány na bloky výstupů. V bloku Matlab function je též řešena přímá úloha kinematiky, tedy výpočet kartézských souřadnic koncového bodu z již vypočítaných kloubových souřadnic pro možnost ověření správnosti výpočtu inverzní úlohy a určení chyby výpočtu řídicího systému robotického ramene. Celý výpočet přímé a inverzní úlohy je prováděn řídicím systémem robotického ramene v reálném čase se vzorkovací periodou 400 μ s.



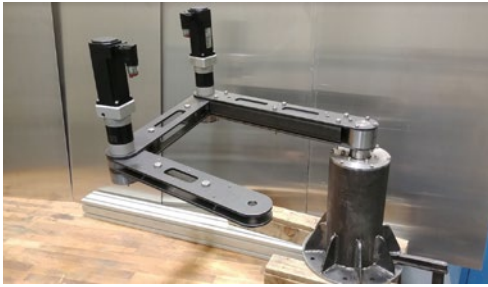
Ukázka modifikovaného simulink modelu pro automatické generování kódu
Example of a modified Simulink model for automatic code generation

POPIS KONSTRUKCE RAMENE 1:2, PROBLÉMY K VYŘEŠENÍ

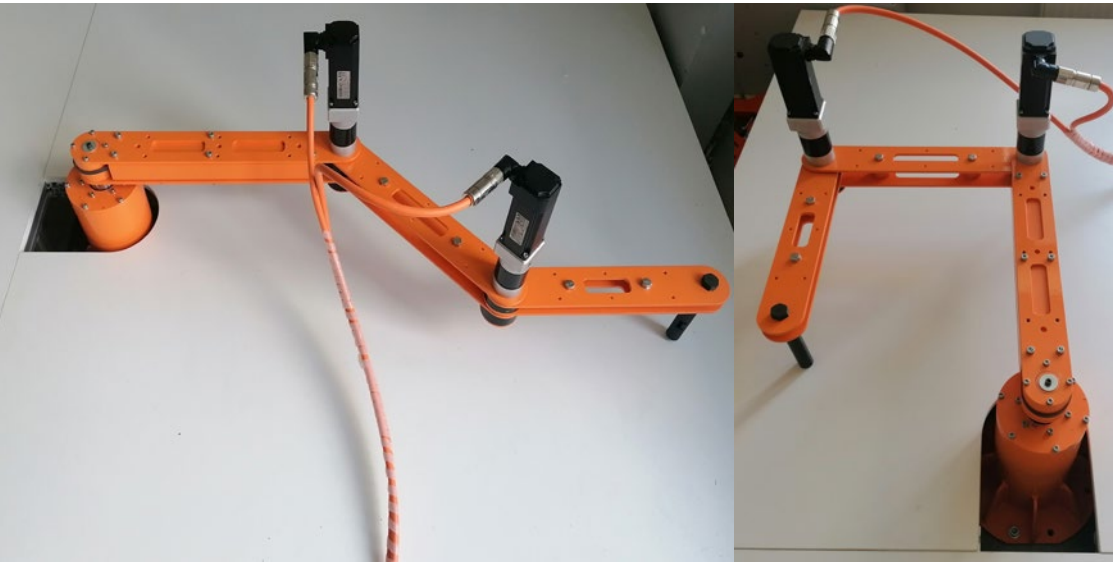
DESCRIPTION OF THE 1:2 ARM CONSTRUCTION, PROBLEMS TO BE SOLVED

V průběhu řešení projektu byly vytvořeny celkem dvě experimentální pracoviště. V obou případech se jednalo o robotická ramena v určitém měřítku délky finálního tiskového ramene, které bude určeno pro stavbu na skutečném staveništi. Délka tohoto ramene pro tisk na staveništi je plánována na 5,6m. Tato délka ramene umožní adekvátní dosah pro tisk budov obvyklých velikostí jejichž studie jsou uvedeny v Kapitole 7. V prvotní fázi projektu jsme navrhli a postavili robotické rameno v měřítku 1:4 vůči délce finálního tiskového ramene. Zvolili jsme velmi jednoduchou konstrukci a standardní pohony s planetovými převodovkami. Díky tomuto řešení jsme získali brzy po zahájení projektu fyzický model pro testování řídicích algoritmů. Jednoduchost na druhou stranu přinesla určitá mechanická omezení. Druhé robotické rameno bylo vytvořeno v měřítku 1:2 s maximálním důrazem na mechanickou přesnost a užité vlastnosti.

Na základě požadavků na délku jednotlivých ramen v poměru 1:4 vůči délce finálního tiskového ramene jsme navrhli konstrukci ramene z laserem vyřezávaných plechových dílů. Toto technické řešení nám poskytlo rychlou a dostupnou výrobu v kombinaci s dostatečnou tuhostí ramene pro prvotní testy s tímto typem uspořádání robotického ramene. Základna ramene je vyrobena z ocelového válce s plechovou základnou, která je připevněna k pracovnímu stolu. Stůl je řešen hliníkovými systémovými profily a deska stolu je vyrobena z laminované dřevotřískové desky s bílým povrchem, na který je možné znázorňovat trajektorii koncového bodu.



Konstrukce experimentálního robotického ramene v měřítku 1:4 (vlevo)
 Fotografie výroby experimentálního robotického ramene v měřítku 1:4 (vpravo)
Construction of the experimental robotic arm in 1:4 (left)
Photograph from the making of the 1:4 experimental robotic arm (right)

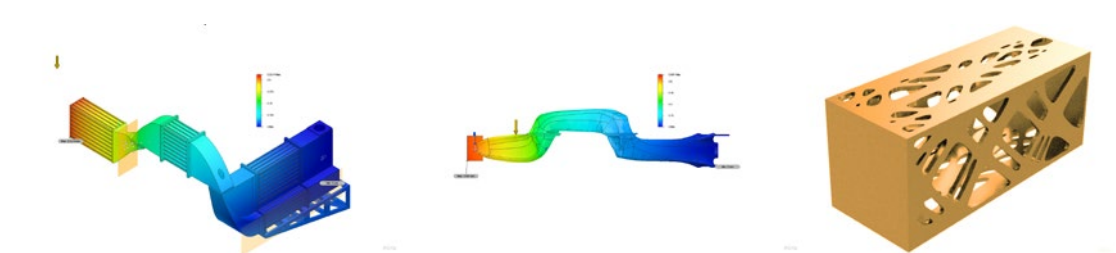


Fotografie experimentálního robotického ramene v měřítku 1:4
Photograph of the experimental robotic arm in 1:4

Zadáním pro konstrukci experimentálního robotického ramene o délce v poměru 1:2 vůči délce finálního tiskového ramene bylo vytvoření takové konstrukce ramene, která umožní ověření konstrukce ramene struktury SCARA s přidanou rotační osou pro potřeby 3D tisku cementových směsí. Požadavky na konstruované experimentální rameno byly tedy následující:

- délka ramene: 2,8 m
- struktura ramene: SCARA s přidanou rotační osou
- vertikální zdvih celého ramene: 2,5 m
- vertikální zdvih koncového bodu: 1 m
- max. zatížení koncového bodu: 35 kg

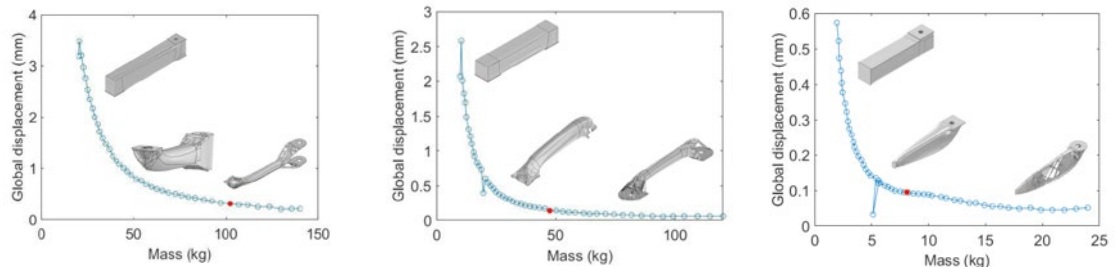
Po úzkém specifikování zadání jsme provedli studium a analýzy konstrukčních řešení experimentálních robotických ramen. Museli jsme zohledňovat možné dosahované parametry a vlastnosti jednotlivých přístupů konstrukcí, jako jsou deformace a hmotnost jednotlivých členů ramene, cena a dostupnost technologie výroby, dosahovaná přesnost a opakovatelnost konstrukce, apod.



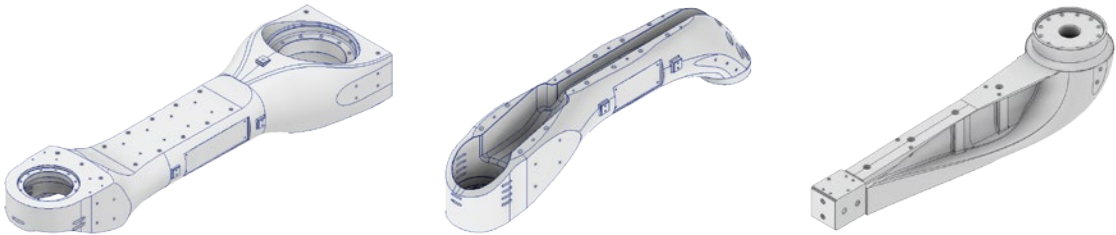
Příklady analyzování konstrukčních řešení pro experimentální robotické rameno
Examples of analysing design solutions for the experimental robotic arm

Experimentální robotické rameno se skládá ze tří členů, vyvažovacího ramene, koncového aktuátoru a základny. Jednotlivé členy ramene byly navrženy pomocí generativního designu a jsou vyrobeny ze slitiny hliníku technologií třískového CNC obrábění. Na následujících obrázcích jsou zobrazeny výsledné tvary jednotlivých členů robotického ramene, které zohledňují výše zmíněné požadavky.

Jak je vidět na následujících grafech, tento konstrukční návrh poskytuje robotickému rameni dostatečnou tuhost a relativně nízkou hmotnost při zajištění odpovídající bezpečnosti. Modře jsou pro každý člen vyznačeny jednotlivé iterace, v rámci kterých se software snažil najít optimální řešení podle zadanych kritérií a také s ohledem na hmotnost a posuv koncového bodu jednotlivých členů. Červeným bodem jsou pak vyobrazeny námi zvolené iterace. Na těchto výsledných tvarech byly provedeny drobné technologické úpravy, které zajistily bezproblémovou výrobu jednotlivých dílů

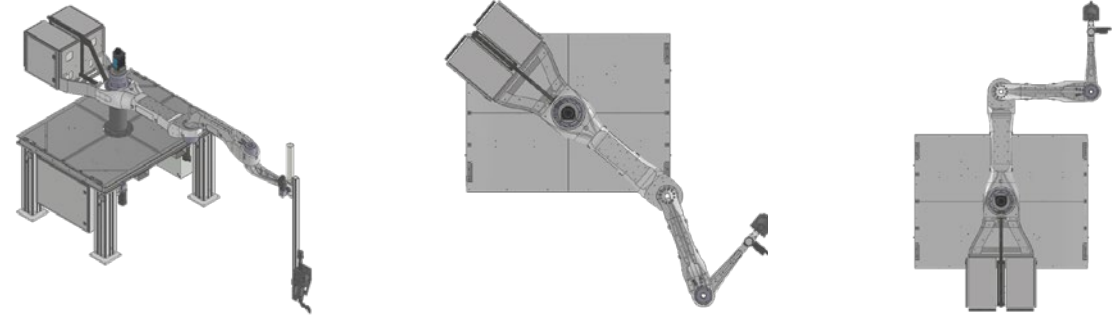


Grafy ilustrující dostatečnou tuhost, nízkou hmotnost a odpovídající bezpečnost
Graphs showing sufficient rigidity, low weight and adequate safety



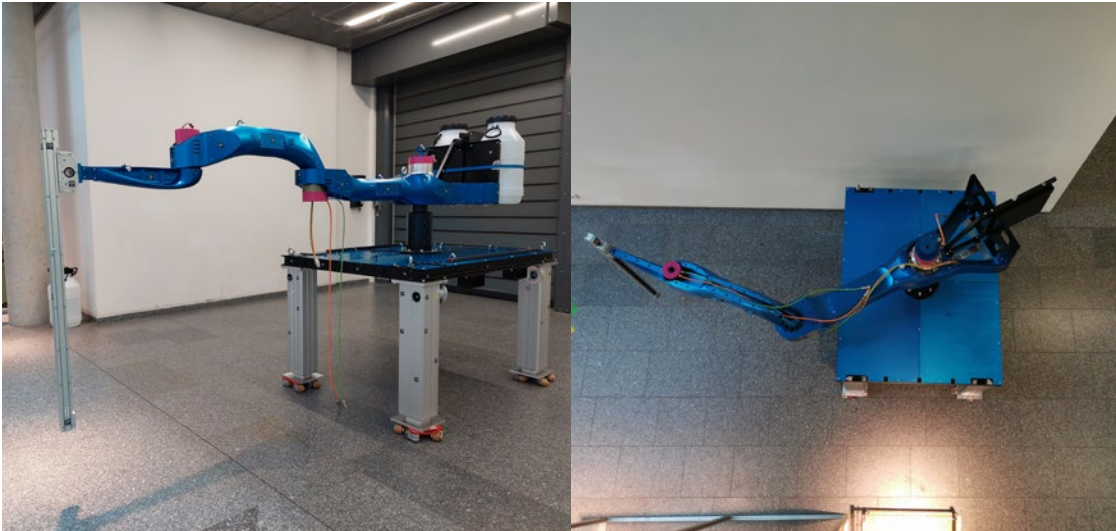
Výsledné tvary jednotlivých členů robotického ramene
Resulting shapes of individual members of the robotic arm

Členy ramene jsou spojeny pomocí rotačních servopohonů Harmonic Drive s harmonickou převodovkou. Konstrukce vyvažovacího ramene je vyrobena z ocelových svařovaných dílů v kombinaci s prvky z hliníkové slitiny. Závaží na vyvažovacím rameni je tvořeno rozvaděči s řídicím systémem robotu. Na pracovním konci ramene se nachází koncový aktuátor, který umožňuje vertikální zdvih koncového bodu až do výše 1 m. Základna robotického ramene je tvořena ocelovými svařovanými prvky a čtyřmi zdvihacími sloupy s možností zdvihu až do výše 2,5 m.



Konstrukce experimentálního robotického ramene v měřítku 1:2 pro 3D tisk cementových směsí
Construction of the experimental robotic arm for 3D printing of cement mixtures in 1:2

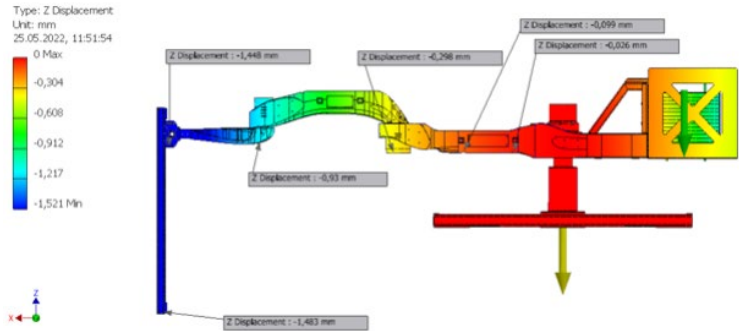
Koncepce použití rotačních servopohonů Harmonic Drive s harmonickými převodovkami v kloubech robotického ramene poskytuje nejlepší poměr objemu a výkonu. Společně s minimální dosahovanou vůlí toto řešení umožňuje přesné polohování koncového bodu, který je v případě 3D tisku cementových směsí reprezentován tiskovou hlavou.



Fotografie experimentálního robotického ramene pro 3D tisk cementových směsí v měřítku 1:2
Photograph of the experimental robotic arm for 3D printing of cement mixtures in 1:2

Poznámka: Na fotografiích je robotické rameno bez rozvaděčů elektroniky, které nebyly v čase zpracování závěrečné publikace dostupné.

Po sestavení robotického ramene bylo rameno zkušebně zatíženo břemenem o hmotnosti tiskové hlavy, tj. 35 kg, a byl ověřen celkový posuv jednotlivých zvolených bodů robotického ramena, který byl porovnán s výsledky získanými ze simulace. Tabulka níže zobrazuje výsledky z provedené simulace, v rámci které byl měřen posuv v ose Z v jednotlivých bodech vzdálených o určitou vzdálenost od centrální osy ramene. Jednotlivé body jsou vyznačeny na následujícím obrázku.



Vyznačení význačných bodů robotického ramene
Marking the salient points of the robotic arm

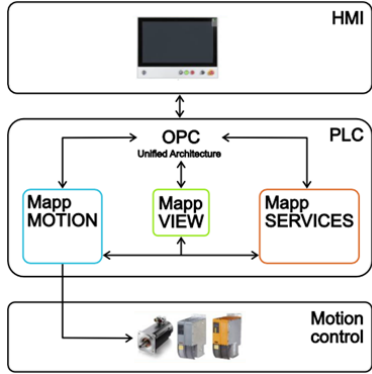
Z výsledných hodnot uvedených v tabulce vidíme, že například v bodě, který je vzdálený 340mm od centrální osy rotace robotického ramene dosahoval posuv v ose Z po zatížení hodnoty 0,124mm. Naproti tomu na konci robotického ramene ve vzdálenosti 2615 mm dosahoval průhyb hodnot 3,45mm. Hodnoty z provedené simulace byly následně ověřeny na skutečném zařízení pomocí úchylkoměru. Výsledky jsou uvedeny opět v tabulce. V tomto případě byl vertikální posuv bodu umístěného na konci robotického ramene a vzdáleného 2615mm od centrální osy rotace 3,65mm. To je o 0,2mm více než výsledná hodnota získaná pomocí simulace.

	Simulace				
	Vzdálenost bodu měření od osy [mm]				
	340	660	1140	2090	2615
Před zatížením	0,026	0,099	0,298	0,93	1,448
Po zatížení	0,124	0,349	0,82	2,21	3,45
Rozdíl mezi stavem zatíženo a nezatíženo	0,098	0,25	0,522	1,28	2,002

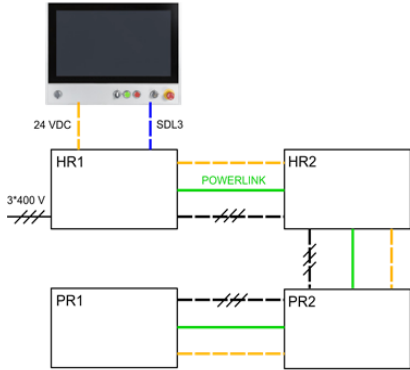
	Měření úchylkoměrem				
	Vzdálenost bodu měření od osy [mm]				
	340	660	1140	2090	2615
Před zatížením	0	0	0	0	0
Po zatížení (Posuv bodu v ose Z vzhledem k zemi)		0,46	0,91	2,44	3,65
Po odlehčení	0	0	0	0	0

Výsledky simulace a reálného měření vertikálního posuvu na rameni 2:1
Results of simulation and real measurement of vertical displacement on the arm 2:1

Řídicí systém(ŘS) pro robotické rameno v sobě zahrnuje průmyslové PC, HMI rozhraní a elektrické pohony. Celý ŘS jsme se snažili navrhnout tak, aby byl přijatelný a použitelný pro koncového uživatele a zároveň, aby byl dostatečně otevřený pro vědecké pracovníky z oblasti robotiky. Navržená kinematika ramene vyžaduje řešení inverzní úlohy, která může mít různá řešení. V každém okamžiku pohybu lze přepínat jednotlivé varianty řešení tak, aby byl pohyb všech částí robotického ramene plynulý. Pro tento účel je nutné mít dostatečně rychlé CPU pro výpočty inverzní úlohy.



Blokové schéma řídicího systému robotického ramene
Block diagram of the robotic arm control system



Blokové schéma HW propojení všech prvků ŘS ramene
Block diagram of the HW connection of all elements in the control system of the robotic arm

Zvolený ŘS od společnosti BaR umožňuje nahrávání a ladění navržených řídicích algoritmů ze SW MATLAB/Simulink, což významně urychluje výzkum a vývoj v oblasti řízení trajektorie koncového bodu - v našem případě jde o tiskovou hlavu.

Vzhledem ke konstrukci zařízení jsme zvolili distribuovaný systém rozdělený do čtyřech rozváděčů, který je propojený průmyslovou sběrnicí POWERLINK.

Rozdělení systému zohledňuje rozmístění elektrických pohonů na robotickém rameni. Zařízení je vybaveno celkem osmi pohony. Pohony J1-J3 lze označit za hlavní, které slouží k řízení polohy tiskové hlavy v tiskovém prostoru. Jde o speciální servopohony s harmonickými převodovkami. Díky nim je možné vytvořit bezvůlovou vazbu mezi jednotlivými rameny robotického ramene. Jakákoliv vůle v sériové kinematice způsobí odchylku v poloze koncového bodu. Pak by byl koncový bod z hlediska polohy velmi špatně řiditelný. Výsledná trajektorie by neodpovídala předem definované. Na tisku by se to konkrétně projevilo např. zvlněním rovných kontur.

Pohony M1-M4 jsou umístěny na stojínách základny tiskového robota. Jejich účelem je změna tiskové výšky. Pokud robot vytiskne několik vrstev celého tiskového plánu, pak pohony nadzvednou o předem definovaný úsek celý stůl, aby mohl robot pokračovat v tisku další vrstvy. Pohony mají mezi sebou vazbu elektronické hřídele, aby se pohybovaly synchronně, tedy udržovaly stůl ve vodorovné poloze. Na počátku je možné jednotlivé nohy na nerovnostech polohovat samostatně. Po vyrovnání stolu je možné pohony zavazbit. Změna polohy vysunutí stojen zajišťuje hrubé polohování výšky robotického ramene.

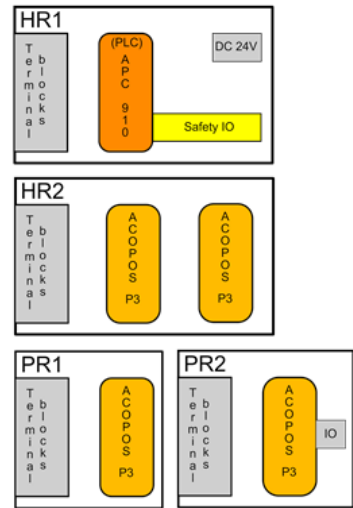
Pro jemné polohování slouží pohon Z, který zajišťuje vertikální pohyb koncového bodu. Díky tomu je možné v určitém rozmezí pohybovat vertikálně jen tiskovou hlavou bez nutnosti manipulace celého tiskového robota, který je mnohem hmotnější. Tisková hlava se vždy zvedne o výšku jedné tiskové vrstvy.

Systém je navržen i pro další pohony E a T, které bude nutné definovat později. Osa E bude sloužit pro vytlačování cementové směsi z tiskové hlavy. Osa T by měla zajišťovat natáčení prodloužení tiskové hlavy. Toto prodloužení by mělo sloužit k soutisku stěn, které je nedílnou součástí postupného tisku stavby, jak je popsáno v Kapitole 6.

Name	Type	Torque [Nm]	Current [A]
J1	CanisDrive – 58A–160	1840	8.5
J2	CanisDrive – 40A–160	841	7.2
J3	CanisDrive – 32A–100	433	9.1
M1–M4	8LSAA2.D9045S200–3 motor 8GA40–060—003S2J3 gearbox	3.81	1.31
Z	8LSA25.D9060S200–3 motor 8GA40–060—064S2L2 gearbox	33.28	0.71
E	will be defined later	–	–
T	will be defined later	–	–

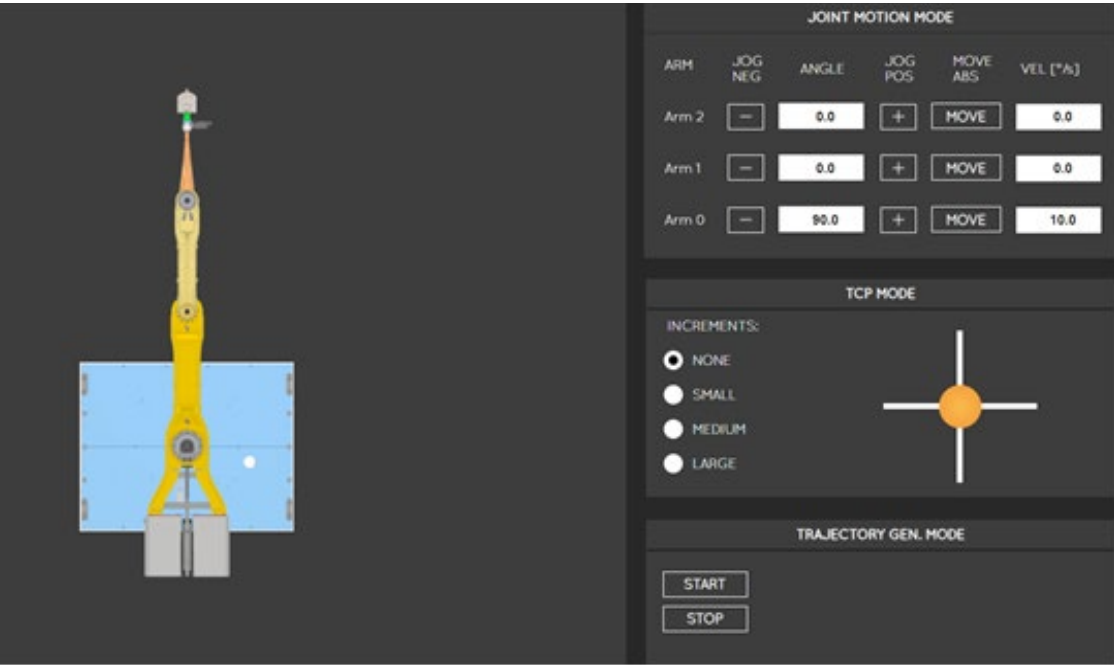
Přehled elektrických pohonů
Overview of electric drives

Distribuuovaný řídicí systém dovolil umístění jednotlivých prvků tak, aby se zohlednila poloha těžiště a zároveň potřebné protizávaží. Rozvaděče HR1 a HR2 jsou umístěny na spodní části mezi stojinami. V rozvaděči HR1 je umístěno průmyslové PC, které slouží jako PLC. Pro účel bezpečnostních funkcí je systém vybaven také Safety PLC. V rozvaděči HR2 jsou dva servozesilovače ACOPOS3. Každý může napájet a řídit pohony celkem tří elektrických servopohonů. Oba servozesilovače se využívají na řízení pohonu zvedacích nohou. Dva kanály jsou jako rezerva pro případné další rozšíření celého systému. Rozvaděče PR1 a PR2 slouží jako protizávaží ramene, aby bylo možné snížit namáhání centrální osy robotu. Každý rozvaděč obsahuje trojosý ACOPOS3. PR1 je vyčleněn pro tři hlavní pohony J1 až J3, které řídí koncovou polohu robotu na tiskové ploše. Poslední rozvaděč PR2 je vyčleněn na řízení aktuátoru v koncovém bodu pro jemné představení tiskové hlavy v ose Z. Druhý kanál je vyčleněn pro tangenciální osu T. Poslední kanál by měl řídit osu extruderu pro správné dávkování cementové směsi.



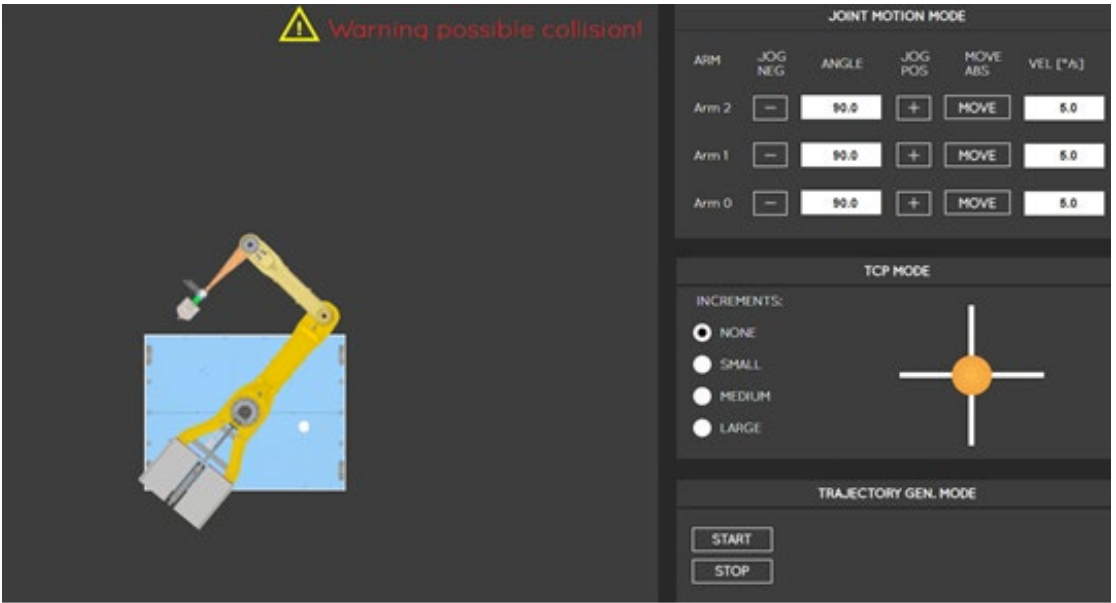
Rozdělení všech prvků řídicího systému do rozvaděčů
Division of all elements of the control system into switchboards

Pro snadné ovládání bylo vytvořeno rozhraní HMI. Díky němu je možné řídit robota bez znalosti vnitřního řízení robotických systémů.

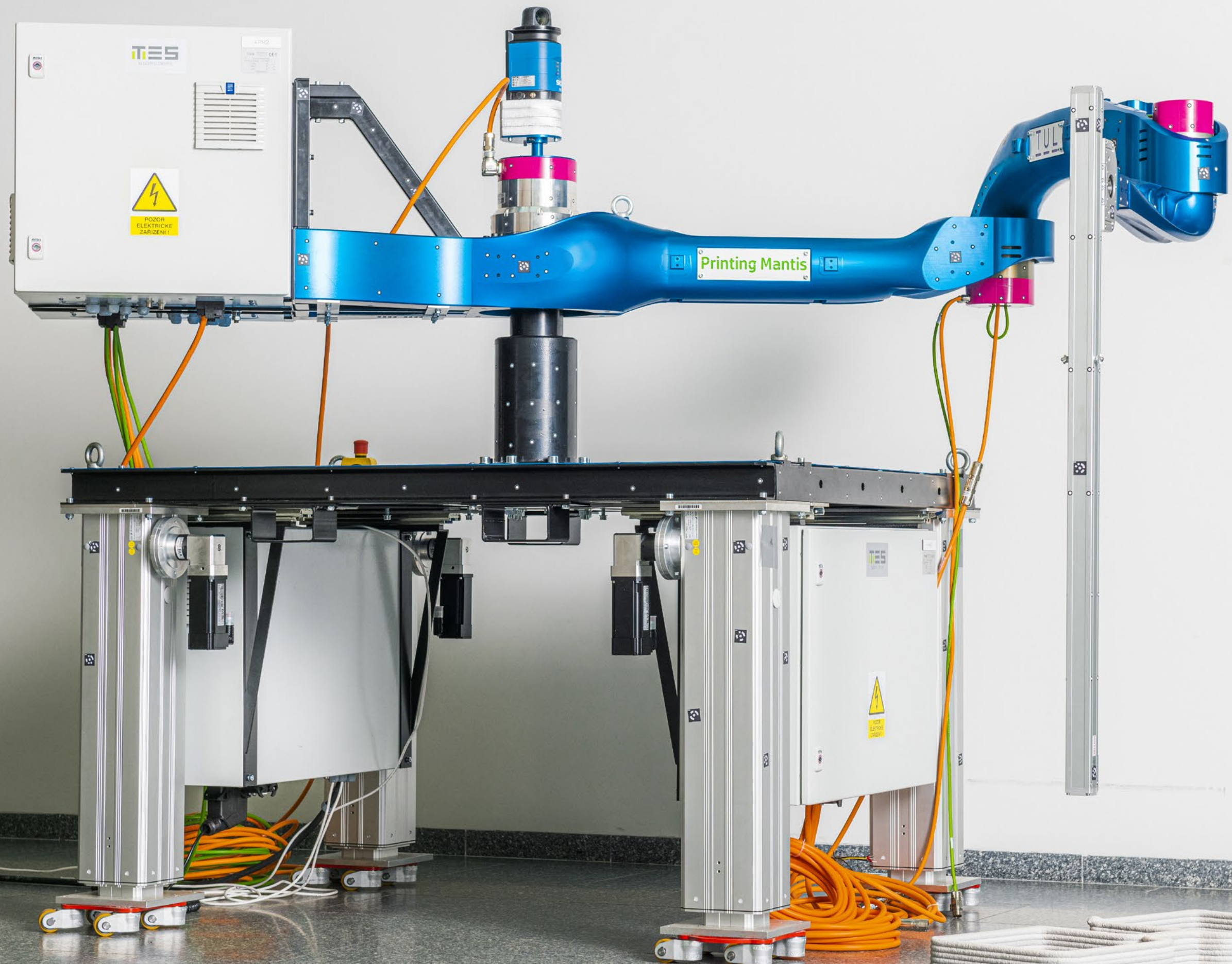


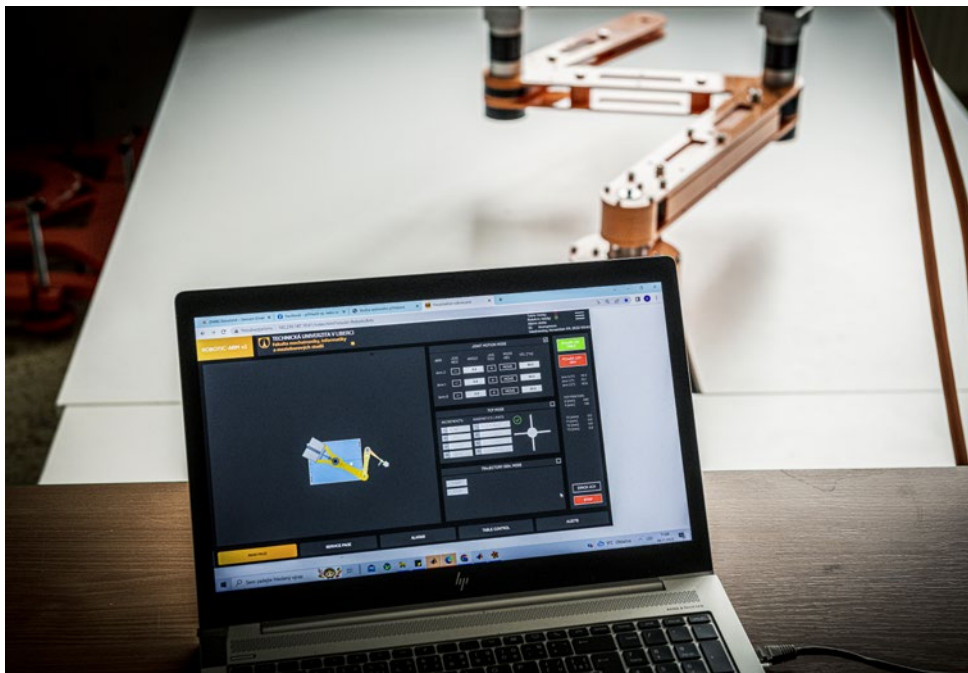
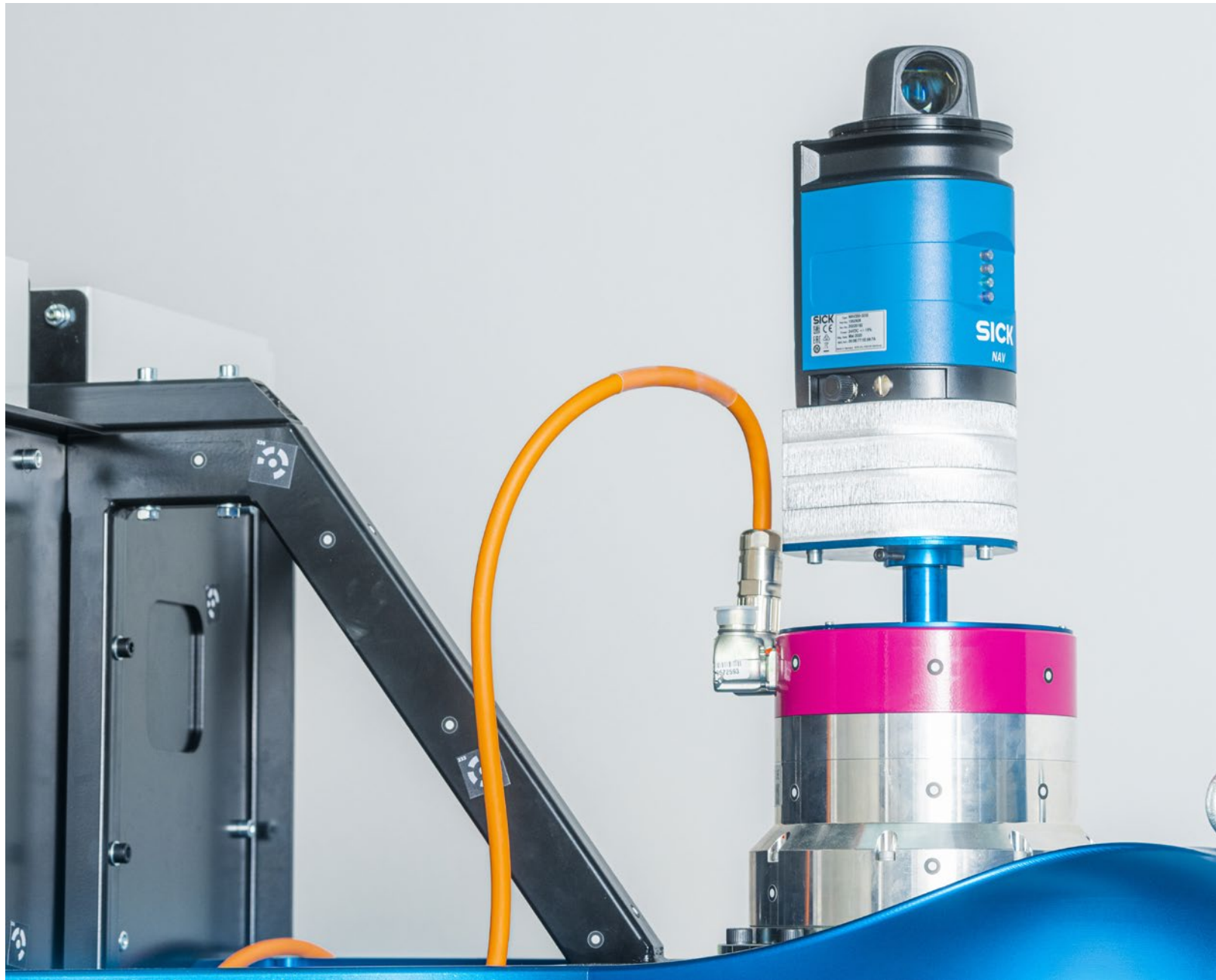
HMI rozhraní pro ovládání robota
HMI interface for controlling the robot

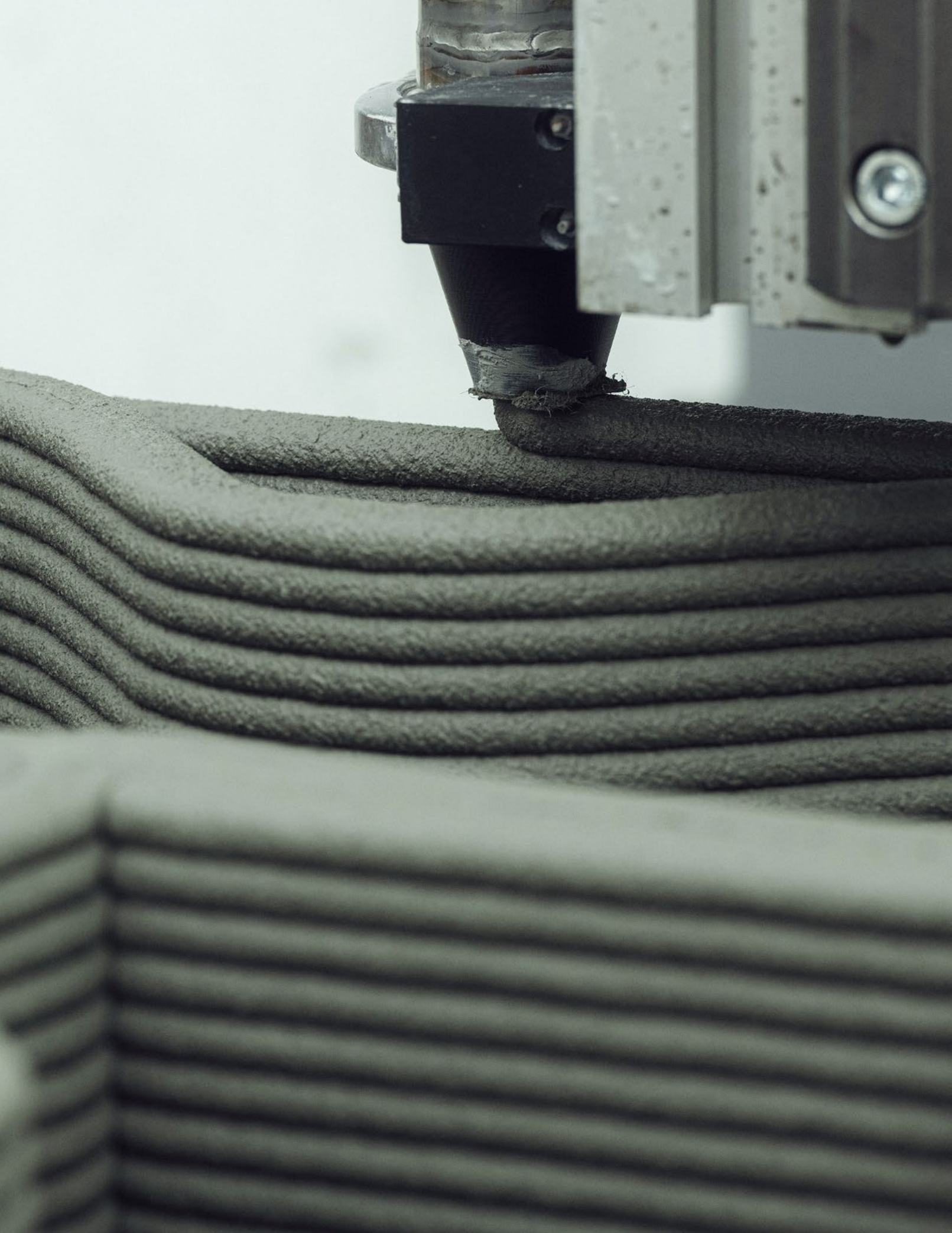
Uživatel může pohybovat jednotlivými klouby ramene nezávisle. Tím si může např. nastavit výchozí tiskovou pozici manuálně. Další možností je zadání pozice ve zvoleném souřadném systému. Řídicí systém po aktivaci pohybu vypočítá nastavení výsledných poloh jednotlivých kloubů a provede pohyb automaticky. SW je vybaven hlídáním koncových poloh, aby rameno nekolidovalo s pracovním stolem. Ostatní překážky v tiskovém prostoru nijak monitorovány nejsou. Předpokládá se, že v laboratorním provozu bude zajištěna volná tisková plocha bez překážek.



HMI rozhraní pro ovládání robota - jiná pozice koncového bodu robota
HMI interface for controlling the robot - different position of the end point of the robot







04

SOFTWAREVÉ ŘEŠENÍ A SOUVISLOSTI

SOFTWARE CONCEPT AND CONTEXTS

Vladimír Balda, Květoslav Belda, Petr Keller

Proces návrhu tištěné stavby má podobnou strukturu jako příprava konvenční stavby z běžných materiálů. Po návrhu formy následuje detailní projekt konstrukce. Zatímco při návrhu staveb z cihel nebo železobetonu je možné se bez specializovaných programů částečně obejít, u tištěných staveb je použití moderního softwaru nezbytnost. Kapitola Softwarové řešení a souvislosti se věnuje využití softwarových nástrojů při přípravě tisku reálných staveb. Softwarová příprava je řetězec navazujících kroků, který začíná návrhem a úpravou tvaru stavby a končí vygenerováním drah tiskové hlavy robotu. Východiskem celého projektu je tisk tenkostěnných konstrukcí, které však vyžadují specifický přístup při přípravě dokumentace. Všechny tištěné prvky jsou v programech a aplikacích reprezentovány ve formě ploch s nulovou tloušťkou. Plochy jsou současně středními plochami těchto prvků. Tomuto požadavku je nutné podřídit všechny kroky v softwarovém řetězci.

The structure of the process of designing a printed building is similar to the preparation of a conventional building from conventional materials. The architectural design is followed by a detailed design of the structure. While the design of buildings from bricks or reinforced concrete can be partially done without specialised software, for printed buildings the use of modern software is a necessity. The chapter “Software concept and contexts” discusses the use of software tools in preparing the printing of real buildings. Software preparation is a series of interrelated steps that starts with the design and modification of the shape of the structure and ends with the generation of the robot’s printing head paths. The starting point of the whole project is the printing of thin-walled structures, which, however, require a specific approach in the preparation of the documentation. All printed elements are represented in the programmes and applications as zero-thickness surfaces. The surfaces are also the mean surfaces of these elements. All the interrelated steps in the software must be subject to this requirement.

PROJEKTOVÁ PŘÍPRAVA TIŠTĚNÝCH STAVEB
PROJECT PREPARATION OF PRINTED BUILDINGS

Projektování staveb se dnes neobejde bez specializovaného softwaru, který zcela nahradil práci na rýsovacím prknu. Programy pro stavební projektování prochází intenzivním vývojem a specializací podle typu stavby typu, použité konstrukce apod. Software dnes provází stavby od jejich vzniku přes léta užívání a úprav až po demolici.

Návrh staveb je vysoce odborná činnost s vysokým podílem invence všech zúčastněných. Pro projektování jediné budovy se běžně používá i několik specializovaných programů. Neexistuje a zřejmě ani nebude existovat software, který by celou stavbu nakreslil sám.

Navrhování staveb, jejichž konstrukce vzniká strojovým vrstvením materiálu (3D tisk), není v tomto ohledu žádnou výjimkou. Spíše naopak, projektování tištěných staveb přináší zcela nové problémy a výzvy.

Projekt tištěné stavby

Proces projektové přípravy stavby, která je tisknuta, má obdobnou strukturu jako příprava běžné stavby. Po návrhu formy stavby (architektura) následuje návrh konstrukce (stavebně-konstrukční projekt).

Zcela rozdílná je fáze realizace. V případě tisku provádí stavbu stroj (robot) s menším podílem fyzické práce člověka. V běžném stavění, zcela naopak, převažuje fyzická práce člověka s menším přispěním stroje(ů). Pro podobu projektové dokumentace je zcela zásadní, zda stavbu provádí člověk nebo stroj. Stavební výkres je schematické zobrazení skutečnosti. Člověk (pracovník) ho „dešifruje“ a na jeho základě realizuje stavbu.

Návrh struktury tištěných konstrukcí je podstatně náročnější. U tištěné konstrukce nelze použít zjednodušení užívané v běžné projektové dokumentaci stavby. Připravit model pro 3D tisk tak znamená vymodelovat dům do posledního detailu jeho konstrukce.

Typ konstrukce

Tisk stavebních konstrukcí se ubírá, z hlediska tvaru stěnové struktury, dvěma směry. Tiskem jednovrstvých (silnostěnných) konstrukcí a tiskem vícevrstvých konstrukcí s výrazně menší tloušťkou stěny a se složitější vnitřní geometrickou strukturou. V obou případech se jedná o souvislé nanášení hmoty tiskovou hlavou v určené trase.

Tisk silnostěnné konstrukce je z hlediska generování trasy ze zdrojového modelu stavby relativně jednoduchý. Trasa tiskové hlavy je shodná s osou navrhované konstrukce. Tloušťka konstrukce je pak dána tvarem tiskové hubice a množstvím nanášeného materiálu.

U tenkostěnných konstrukcí je automatizované generování trasy podstatně náročnější. Geometrický tvar trasy se mění v závislosti na velikosti, zatížení nebo umístění stavební konstrukce v rámci domu. Rozdílná může být i trasa v jednotlivých vrstvách nad sebou. Z toho vyplývá, že trasu tiskové hlavy musí připravit nebo výrazně upravit konstruktér stavby.

Vnější podoba tištěné stavby je téměř shodná s jinou stavbou obdobné velikosti a funkce. Vnitřní výplň tištěného výrobku nebo modelu může mít mnoho různých podob.

Výplň může tvořit plná hmota tiskového materiálu nebo opakující se geometrická struktura ze stejného materiálu. Vnitřek modelu může být i dutý. Všechny druhy výplně modelu generuje specializovaný software (slicer) sám v rámci předtiskové přípravy. U tištěných staveb nelze automatický způsob generování vnitřní výplně použít na všechny části objektu, protože se vnitřní výplň proměňuje v závislosti na typu konstrukce a jejím umístění v rámci celé stavby.

Projektování tištěné (i běžné) stavby se skládá ze série po sobě jdoucích kroků. V rámci jednotlivých kroků lze najít postupy, které lze zautomatizovat za použití softwaru pro stavební navrhování.

Používaný SW

Pro návrh tištěných budov zatím neexistují specializované programy a používají veškeré dostupné modelovací programy. Od jednoduchých objemových modelářů až po specializované BIM systémy pro ucelené stavební projektování.

Nejrozšířenější typem programu, užívaným ve stavební projektování, je CAD, ve kterém se vytváří projektová dokumentace jako vektorová grafika. Vyspělost 2D kreslení v programech typu CAD umožňuje vytvářet tiskové trasy ve stavebních konstrukcích s poměrně velkou efektivitou. CAD programy obsahují mnoho nástrojů, jejichž kombinací lze tvorbu podkladu pro 3D tisk významně urychlit. Nezanedbatelnou výhodou je jednoduchost ovládání a stálý náhled na vytvářenou konstrukci.

BIM aplikace jsou primárně určeny pro návrh staveb z běžně užívaných stavebních materiálů. Návrh struktury 3D tištěných konstrukcí, je ale z podstaty věci zcela jiný. S určitostí lze předpokládat, že při přípravě a návrhu struktury tištěné budovy může pomoci a výrazně usnadnit práci software pro stavební navrhování systému BIM. Současně tyto softwary obsahují moduly pro generativní design, které lze pro návrh struktury tištěných konstrukcí použít.

Současné první pokusy tisku reálně využitelných budov jsou začátkem procesu, na jehož konci by mělo být využívání technologie 3D tisku v běžném stavitelství. Dá se předpokládat, že po počátečních stádiích, kdy se návrh stavby přizpůsobuje aktuálním možnostem technologie, přijde okamžik, kdy se technologie přizpůsobuje architektuře.

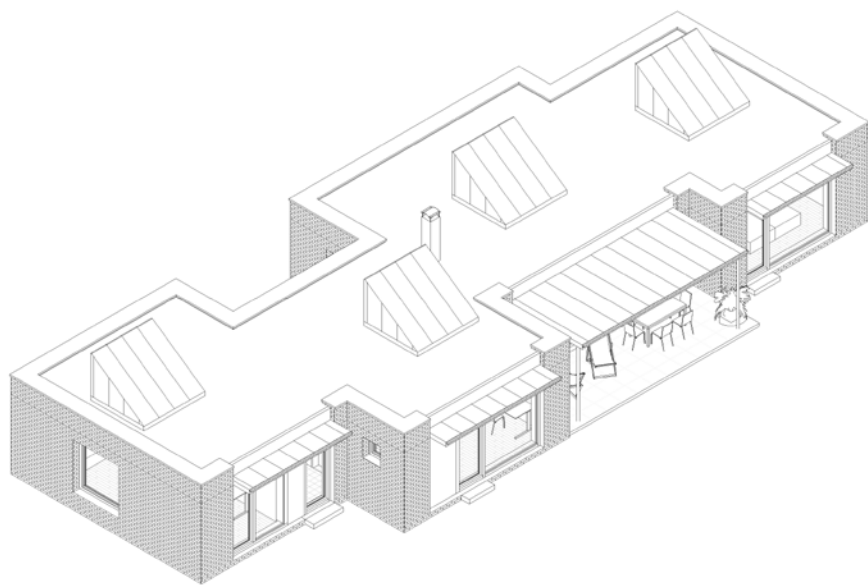
MODELOVÝ PŘÍKLAD PŘÍPRAVY KONSTRUKCE PRO TISK
MODEL EXAMPLE OF PREPARING A DESIGN FOR PRINTING

Pro modelový příklad byl vybrán nerealizovaný návrh přízemního rodinného domu s plochou střechou a s nepravidelným půdorysem. Geometricky složitější půdorys umožňuje navržený postup prověřit na tvarově komplikovanější stavbě. Pro původní návrh rodinného domu byla uvažována běžná stavební konstrukce z cihelných bloků.



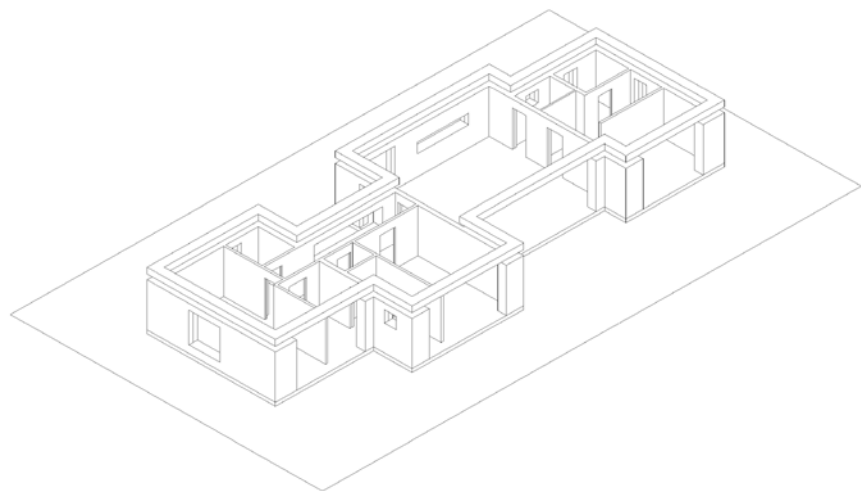
Architektonický návrh přízemního rodinného domu
Architectural design of the ground floor of a family house

Model domu byl vytvořen v programu Revit (aplikace typu BIM). Stejný software byl použit i k úpravě modelu a také k přípravě grafických podkladů sloužících k návrhu tras tiskové hlavy. V projektu rodinného domu byly upraveny tloušťky vnitřních nenosných stěn, tak aby pro jejich vytvoření bylo možné použít technologii 3D tisku. Rozměry nosných stěn byly ponechány beze změny.



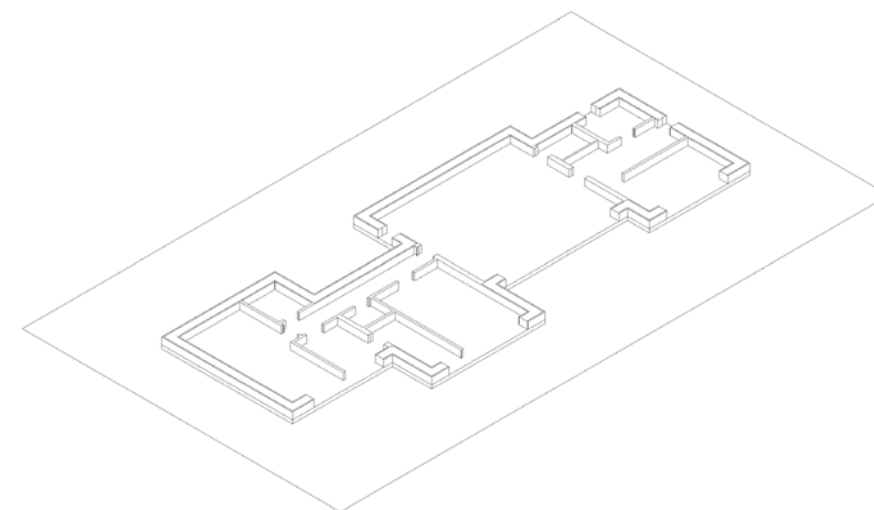
Model rodinného domu vytvořený v BIM aplikaci RevitArchitecture
Model of a family house created in BIM application Revit Architecture

Následně byly izolovány všechny vodorovné a svislé konstrukce, tak aby model zobrazoval pouze ty části stavby, které by měly být vytvořeny technologií 3D tisku. Software Revit umožňuje filtrovat stavební konstrukce dle zadaných vlastností a následně pracovat pouze s výběrem. V modelu byly skryty všechny konstrukce a prvky, které nebudou tištěny jako jsou výplně otvorů, pevné i mobilní vybavení interiéru, sanitární vybavení apod. Skryté stavební prvky ale zůstávají součástí modelu a je možné je kdykoliv zobrazit a dle potřeby upravit.



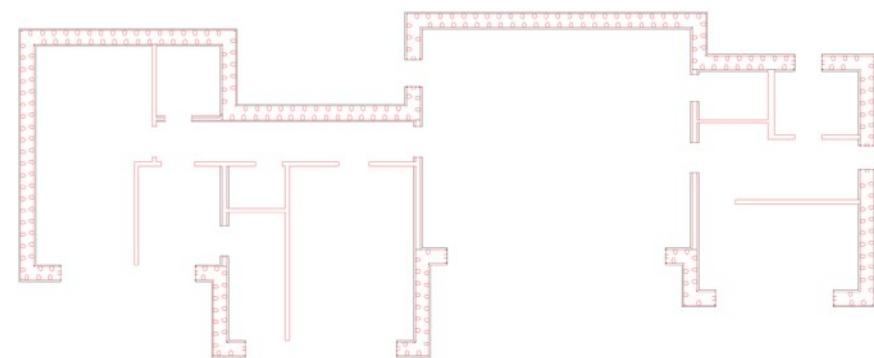
Model zobrazující pouze tištěné konstrukce
Model showing only printed structures

Model, který zobrazoval pouze tištěné konstrukce, byl vodorovně rozdělen na části, které mají v celé své výšce stejný tvar. V úrovni parapetu nebo nadpraží každého otvoru se mění půdorysný průmět konstrukce. Model byl předělen v každé úrovni, kde dochází ke změně půdorysného průřezu. Pro každou z těchto úrovní je nutné vytvořit jedinečnou trasu tiskové hlavy. Pro tvorbu úrovní byla v programu Revit použita funkce Podlaží. Každé podlaží lze jednoduše zobrazit jako půdorysný průřez konstrukce. Závěrečným krokem práce v programu Revit byl export všech Podlaží (půdorysných průřezů) do formátu CAD.



Část modelu s konstantním půdorysným průmětem
Part of the model with a constant planar projection

Pro následující fázi kreslení a modelování trasy tiskové hlavy byl použit program typu CAD. Pro modelový příklad byl použit program AutoCAD, který kromě kvalitních kreslicích funkcí nabízí i funkce pro modelování.

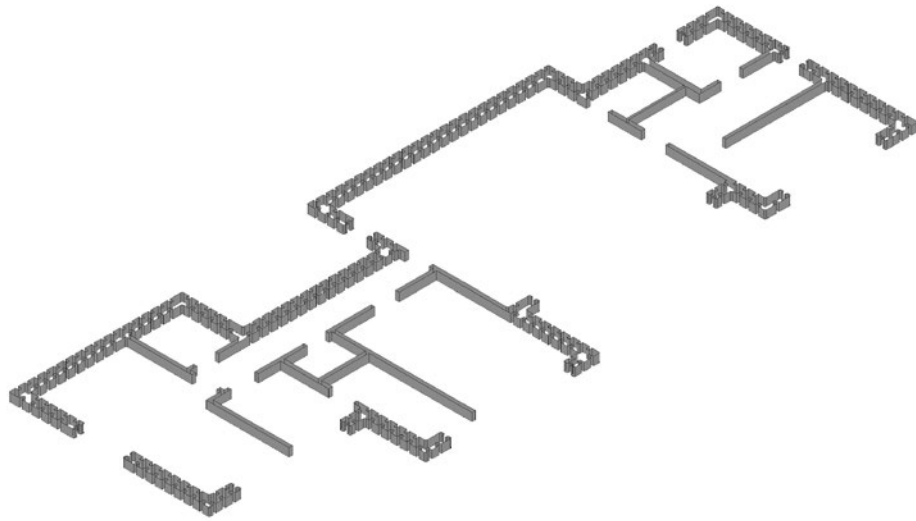


Půdorysný průřez konstrukce s návrhem trasy tiskové hlavy
Planar projection of the structure with the design of the print head trajectory

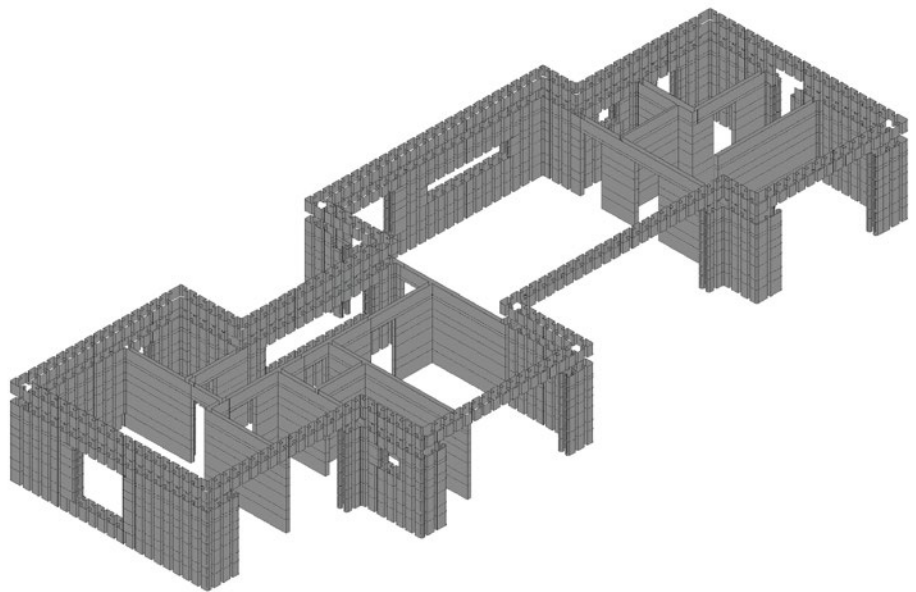
V každém podlaží byla nakreslena trasa tiskové hlavy. Bylo nutné dodržet obecnou konstrukční podmínku, aby trasy v místě stěn na sebe vertikálně navazovaly, stejně tak stěny nad sebou u běžné stavby. Průběh trasy tiskové hlavy u nosných i nenosných stěn musel zohlednit statické i stavbě-fyzikální nároky na konstrukci.

V návrhu tras se postupovalo od nejnižší úrovně po nejvyšší. Pro kreslení tras a jejich kopírování byly použity kreslicí a modifikační funkce programu, které danou činnost urychlují.

Z trajektorií byly v každé úrovni vytvořeny plochy s nulovou tloušťkou a výškou dosahující další úrovně. Z důvodu kontroly tvaru byly modely všech úrovní sloučeny do jednoho modelu. Takto připravený model je připraven k načtení do programu typu slicer.



Model tiskové trasy v jedné úrovni
Model of one layer printing



Celkový model domu
Model of the entire house

SOFTWAREVÉ ŘETĚZCE PRO 3D TISK STAVEBNÍCH KONSTRUKCÍ Z BETONU SOFTWARE CHAINS FOR 3D PRINTING OF CONCRETE BUILDING STRUCTURES

Softwarové řešení pro 3D tisk z betonu reprezentuje určitý ucelený řetězec činností od počátečního obecného architektonického návrhu stavebního díla až po plynulé generování vhodných referenčních dat (požadovaných hodnot) pro řídicí systém použitého zařízení pro 3D tisk.

V rámci projektu byl jednak uvažován tisk konvenčním zařízením s pravoúhlým vodorovným systémem pohybu tiskové hlavy v osách X a Y při tisku a manipulačním nevýrobním pohybem v ose Z pro vymezení zdvihu mezi jednotlivými tisknutými vrstvami – viz kapitola 2, části „Tisková hlava“ a „Testbed“. Dále se uvažoval vývoj originálního zařízení ve vhodných modelových měřítkách – tiskového robotu „Printing mantis“ – viz kapitola 3.

S uvážením zamýšlených zařízení ucelený řetězec obsahuje vývojově následující principiální kroky, které se mohou opakovat v iteračních smyčkách podle potřeby návrhu:

- prvotní obecný architektonický návrh (obecně pro jakoukoliv technologii stavby; grafický návrh tvaru, který vyhovuje požadavkům stavebníka)
- obecné konstrukční výpočty pro dimenzování stavebního díla a vytvoření 3D CAD modelu celého stavebního díla
- rozdělení celého díla na dílčí části a rozhodnutí o technologii, zda pro dané části lze použít technologie 3D tisku
- úprava 3D CAD modelů částí vybraných pro 3D tisk z hlediska konkrétního tiskového zařízení
- export 3D modelů konkrétních částí do datových formátů vhodných pro 3D tisk (např. standard *.STL), kde data reprezentují dráhy pohybu tiskové hlavy při tisku
- vlastní využití dat pro tisk:
 - a) přímé nahrání do řídicího systému konkrétního konvenčního zařízení(TestBed)
 ⇒ 1. možný konec řetězce
 - b) zpracování datových souborů do obecného datového formátu pro výrobní stroje (vyvíjený tiskový robot) a jeho odbavení konkrétním řídicím systémem
 ⇒ 2. možný konec řetězce

Kde varianta b) uvažuje obecný datový formát např. G-kód, který obsahuje souřadnice klíčových bodů (X, Y a Z souřadnice koncových bodů dílčích segmentů) a parametry pro časovou parametrizaci dráhy pohybu pro simulace nebo pro konkrétní řídicí systém např. B&R, který v sobě zahrnuje časové odbavování s uvážením znalostí konkrétního přepočtu souřadnic pohybu na souřadnice motorové, tzv. kinematickou transformaci.

SW řetězec 1: CAD (Autodesk: Revit, Inventor) ⇒ export dat ⇒ vnitřní SW řídicího systému

SW řetězec 2: CAD (Autodesk: Revit, Inventor) ⇒ export dat ⇒ obecný datový formát

- ⇒ i) časová parametrizace, simulace kinematických transformací a řízení(MATLAB/Simulink)
- ⇒ ii) SW řídicího systému s příslušnou vhodnou kinematickou transformací (B&R)

Uvedené dva řetězce reprezentují postup z pohledu uživatele – stavebníka nebo architekta, jak automatizovat generování požadovaného (referenčního) pohybu robotu v kartézských souřadnicích a jejich transformaci do souřadnic motorových.

Výstup z uvedených dvou řetězců – referenční trajektorie pohybu se následně využívá obecně v dalším řetězci, který je charakterizován algoritmy vlastního řízení robotu a jejich implementací v konkrétním reálném řídicím systému. Tento řetězec, respektive algoritmy a jejich možné softwarové řešení, je nastíněno v předchozí kapitole 3.

PŘÍPRAVA G-KÓDU PRO 3D TISK Z BETONU (PRÁCE S DRÁHOU REFERENČNÍHO POHYBU)
PREPARATION OF G-CODE FOR 3D PRINTING FROM CONCRETE (WORKING WITH REFERENCE MOVEMENT PATH)

Strategie řízení drah tiskové hlavy vychází z CAD modelu tištěného objektu. Předpokládá se, že se bude nejčastěji tisknout betonová stěna pouze na šířku jednoho průměru trysky, tj. jednoho perimetru. Pro takový způsob tisku bylo dohodnuto, že 3D objekty k tisku budou převedeny na plošné modely, kde vymodelovaná plocha tvoří osovou plochu budoucí zdi objektu. V aktuální fázi vývoje se předpokládá, že s ohledem na kontrolu statiky stavby budou stejným způsobem konstruovány i vnitřní výplně stěn, tj. nebudou počítány automaticky. 3D model objektu, který se bude tisknout, je tedy tvořen pouze plochami nulové tloušťky, které dohromady neuzavírají výsledný objem.

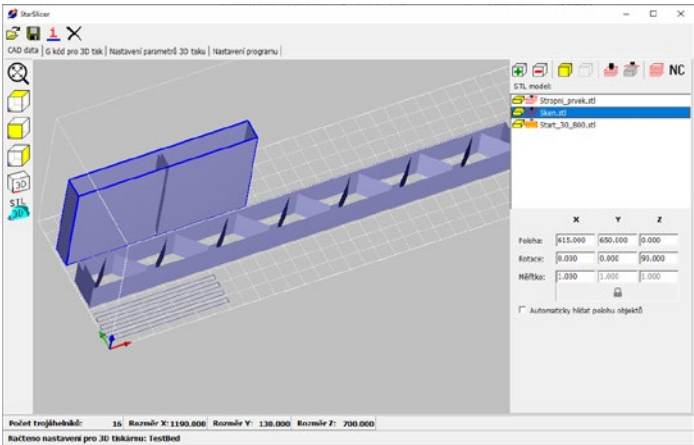
To ale přináší problém s přípravou G-kódu pro řízení pohybů tiskové hlavy. Nelze použít existující slicery, jako např. Slic3r, PrusaSlicer, CuraEngine, apod. Tyto programy jsou primárně připraveny pro 3D modely tvořící objemová tělesa, příp. plně uzavřená plošná tělesa a příprava tiskových dat z ploch nulové tloušťky je přinejmenším problematická, v řadě případů nemožná. Tyto programy také neumožňují plně optimalizovat a přizpůsobovat strategie tisku požadavkům pro 3D tisk z betonu.

Pro 3D tisk z těchto polotekutých materiálů, tvrdnoucích chemickou reakcí je dále třeba respektovat další omezení způsobu řízení tiskové hlavy. Je problematické nanášet novou vrstvu materiálu na ještě měkkou předchozí vrstvu. Vlivem gravitace hrozí deformace a tím nepřesný výtisk stěny. Je tedy třeba řídit nanášení materiálu tak, aby měl již nanesený materiál dost času vytvrdnout.

Dalším omezením při řízení pohybu tiskové hlavy jsou přejezdy trysky, kdy nedochází k extrudování materiálu. Je třeba dráhy těchto přejezdů minimalizovat, protože vzhledem k povaze tiskového materiálu může docházet k jeho samovolnému úniku a znečišťování prostředí stavby. Dále je vhodné řídit pohyby trysky mimo již vytištěný objekt, aby nedocházelo k riziku deformací a borcení již vytištěných částí.

Je vidět, že 3D tisk z betonu a podobných materiálů má celou řadu omezení, která je třeba respektovat. V rámci projektu byly vyvíjeny dva programy pro výpočet strategie pohybů tiskové hlavy. Úkolem obou programů je generovat potřebný G-kód (NC program), který obsahuje popis drah tiskové hlavy srozumitelný pro řídicí systém daného zařízení pro 3D tisk z betonu.

První program, PltSlicer, načítá pouze 2D křivky jako vzor jedné vrstvy. Tento vzor se opakuje ve všech zadaných vrstvách, ale pohyb hlavy je počítán s respektováním výše zmíněných kritérií. Tento program byl navržen pro rychlé počáteční experimenty, kde tvarová složitost tištěných objektů nebyla velká. Tvar 2D křivky/křivek v jednom řezu stěny je možné nakreslit např. v AutoCADu, vygenerovat zde PLT soubor sloužící pro výstup na perové plotry a tento soubor následně načíst do zmíněného programu pro přípravu G-kódů. Funkčnost programu byla úspěšně vyzkoušena v rámci prvních testů tisku z polotekutých materiálů, ale pro uvažované složitější objekty není tento program použitelný.

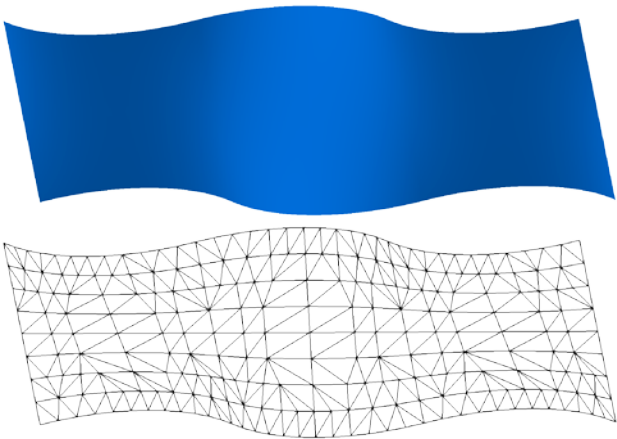


Příprava tiskové úlohy v programu StarSlicer
Preparation of the printing job in StarSlicer software

Proto byl zahájen vývoj programu StarSlicer, který již slouží ke generování drah tiskové hlavy z 3D ploch, představujících střední osu stěn ve formátu STL, tedy dle dohodnutých požadavků. V rámci přípravy jedné tiskové úlohy je možné v tomto programu načíst i více objektů v již zmíněném formátu STL. Program akceptuje STL objekty jak v binární, tak ASCII reprezentaci. Načtené objekty se zobrazují v grafické oblasti programu i v seznamu na pravé straně téhož okna.

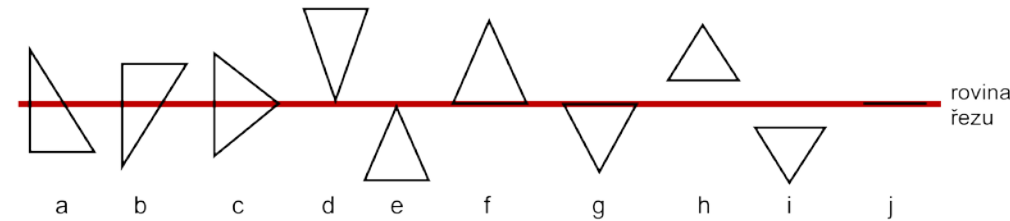
V rámci přípravy úlohy je možné definovat pro každý prvek transformaci v pracovním prostoru tiskárny (posun, rotaci a měřítko) a dále zda bude vybraný prvek zpracováván pro tisk, či zda se jedná např. o dříve vytištěný objekt, kterému se musí tisková hlava vyhnout. Tuto informaci spolu s informací o viditelnosti objektu znázorňují ikony v seznamu prvků vlevo od jejich názvů.

V okamžiku, kdy jsou všechny prvky pro následný 3D tisk na svém místě, je možné přistoupit k výpočtu a optimalizaci jednotlivých vrstev tak, jak se budou objekty postupně stavět. Prvním krokem je rozřezání všech STL objektů rovinami rovnoběžnými ze základnou XY s roztečí definovanou jako „Tloušťka vrstvy“ v záložce „Nastavení tiskových parametrů 3D tisku“. Protože je objekt ve formátu STL tvořen pouze trojúhelníkovými plochami, může v každém řezu pro každý trojúhelník objektu nastat jen jedna z možných situací, viz obrázky ukazující řezy STL daty.



Ukázka reprezentace obecné plochy (nahore) v STL formátu (dole)
Sample of general surface representation (above) in STL format (below)

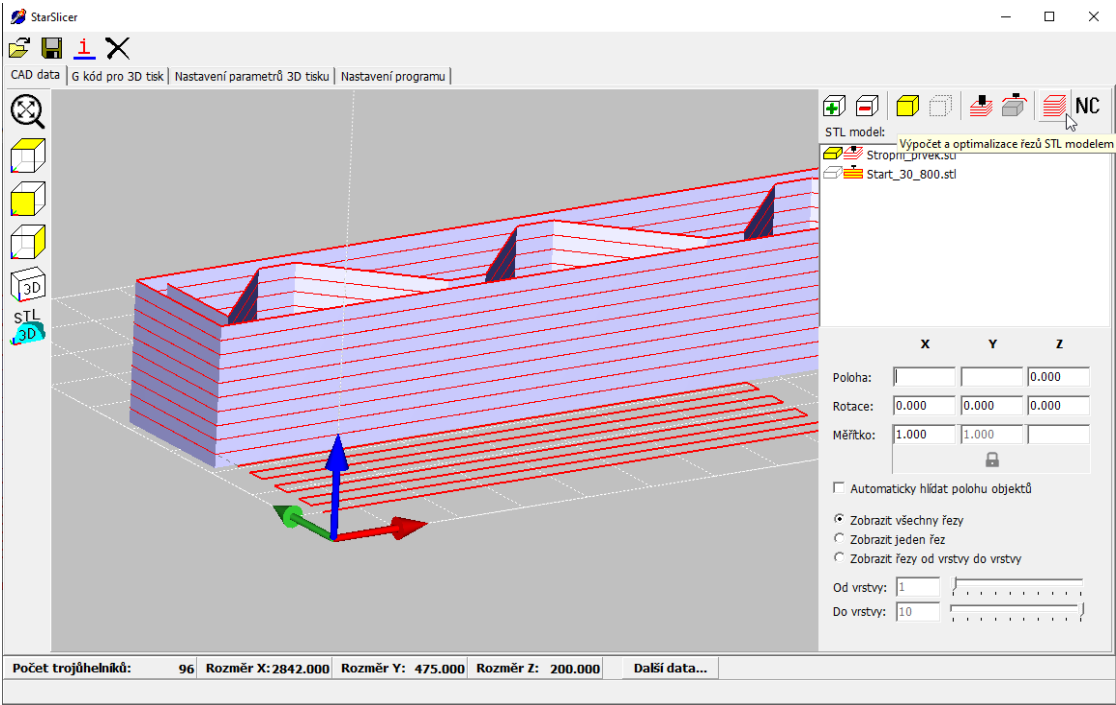
V případě, že rovina řezu protíná daný trojúhelník STL plochy (situace a, b, c na obrázku níže), jsou vypočteny průsečíky trojúhelníku s rovinou řezu a vzniklá úsečka je uložena do paměti pro další zpracování. Pokud má trojúhelník s rovinou řezu společný pouze jeden bod (situace d, e), není třeba tyto trojúhelníky (resp. dané body) pro daný řez zahrnout pro další zpracování v tomto řezu, podobně jako trojúhelníky ležící mimo rovinu řezu (situace h, i) nebo trojúhelník ležící celý v rovině řezu (situace j). Zbývají tedy trojúhelníky, které mají s rovinou řezu společnou jednu stranu (situace f, g). Tato strana by měla být také uložena pro další zpracování, problematické ale je, že by v datech mohly vznikat duplicitní úsečky díky navazujícím trojúhelníkům. Proto algoritmus použitý v programu StarSlicer používá pro další zpracování pouze stranu toho trojúhelníku, jehož třetí vrchol leží pod rovinou řezu (situace g).



Možné situace při generování řezu STL daty
Possible situations when generating a section through STL data

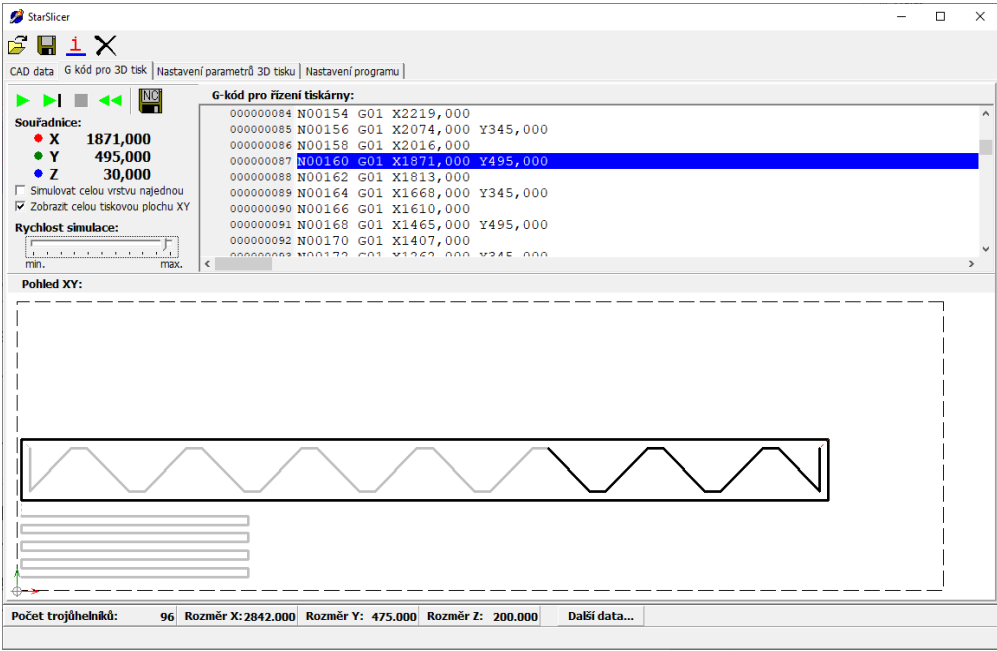
Výsledkem této první fáze generování řezů je tedy sada jednotlivých úsečků. Druhým krokem je uspořádání a pospojování navazujících úsečků do jednoho či více polygonů, dle složitosti objektu. Tyto polygony by již mohly být použity pro generování tzv. G-kódu pro řízení pohybů tiskové hlavy. Z důvodů uvedených výše je ale v případě tisku z betonu nutná další optimalizace. Základ této optimalizace spočívá v určení délek přejezdů v jedné vrstvě (pokud je v ní více polygonů), stanovení pořadí tisku polygonů a v případě uzavřených polygonů i stanovení místa napojení tak, aby délka přejezdů byla minimální. Dále se zohledňují a minimalizují i přejezdy mezi vrstvami. Další fází optimalizace je zjednodušení polygonů, kdy i rovinná stěna může být v STL datech reprezentována množstvím trojúhelníků. Řez takovou stěnou pak dá polygon úseček, které ale mají všechny stejnou směrnici, tzn., že takový polygon pak může být nahrazen jen jednou úsečkou.

Dále je možné volitelně v parametrech tisku zapnout i optimalizaci, která prokládá polygonem úseček kruhové oblouky, pokud je chyba proložení menší, než zadaná. Z principu formátu dat STL byly totiž původně matematické válcové plochy z CAD modelu nahrazeny polygonálními plochami složenými z trojúhelníků. Kvalita, tj. jemnost nebo hrubost, těchto ploch je dána nastavením parametrů exportu do STL formátu v CAD programech. Na obrázku níže je vidět zobrazení vygenerovaných řezů v programu StarSlicer.



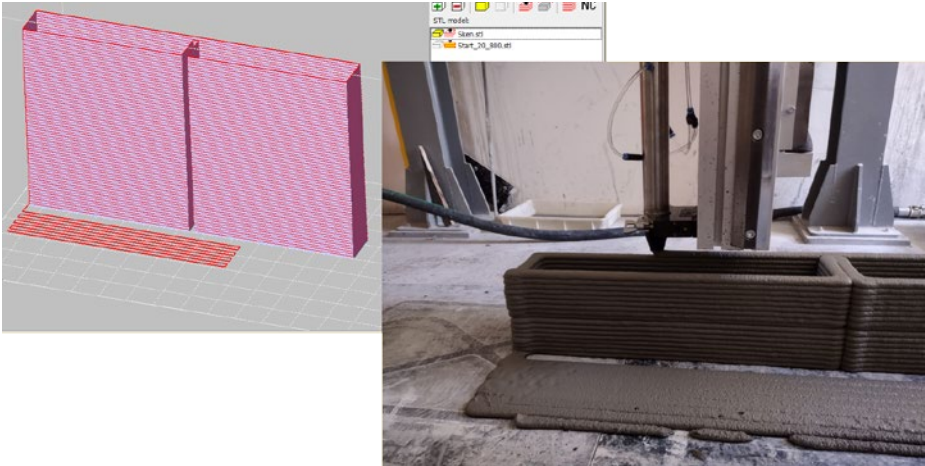
Vygenerované optimalizované řezy v programu StarSlicer
Generated optimised sections in StarSlicer software

Posledním krokem je samotné generování G-kódu. V principu se jedná o převedení optimalizovaných polygonů do „řeči“ stroje pro 3D tisk. V záložce „Nastavení tiskových parametrů 3D tisku“ je možné upravit rychlosti tisku, způsob řízení extrudéru tiskárny a řadu dalších parametrů, ovlivňujících vlastní tisk. Ověřenou konfiguraci parametrů je možné uložit pro jednodušší nastavení dalších tisků. Takže po uspořádání všech tištěných objektů ve virtuálním pracovním prostoru stroje v programu StarSlicer je příprava G-kódu poté záležitostí jen dvou kliknutí myši. Vygenerovaný G-kód je možné ještě před vlastním nahráním a spuštěním ve stroji v programu StarSlicer simulovat – viz obr. Simulace vygenerovaného G-Kodu



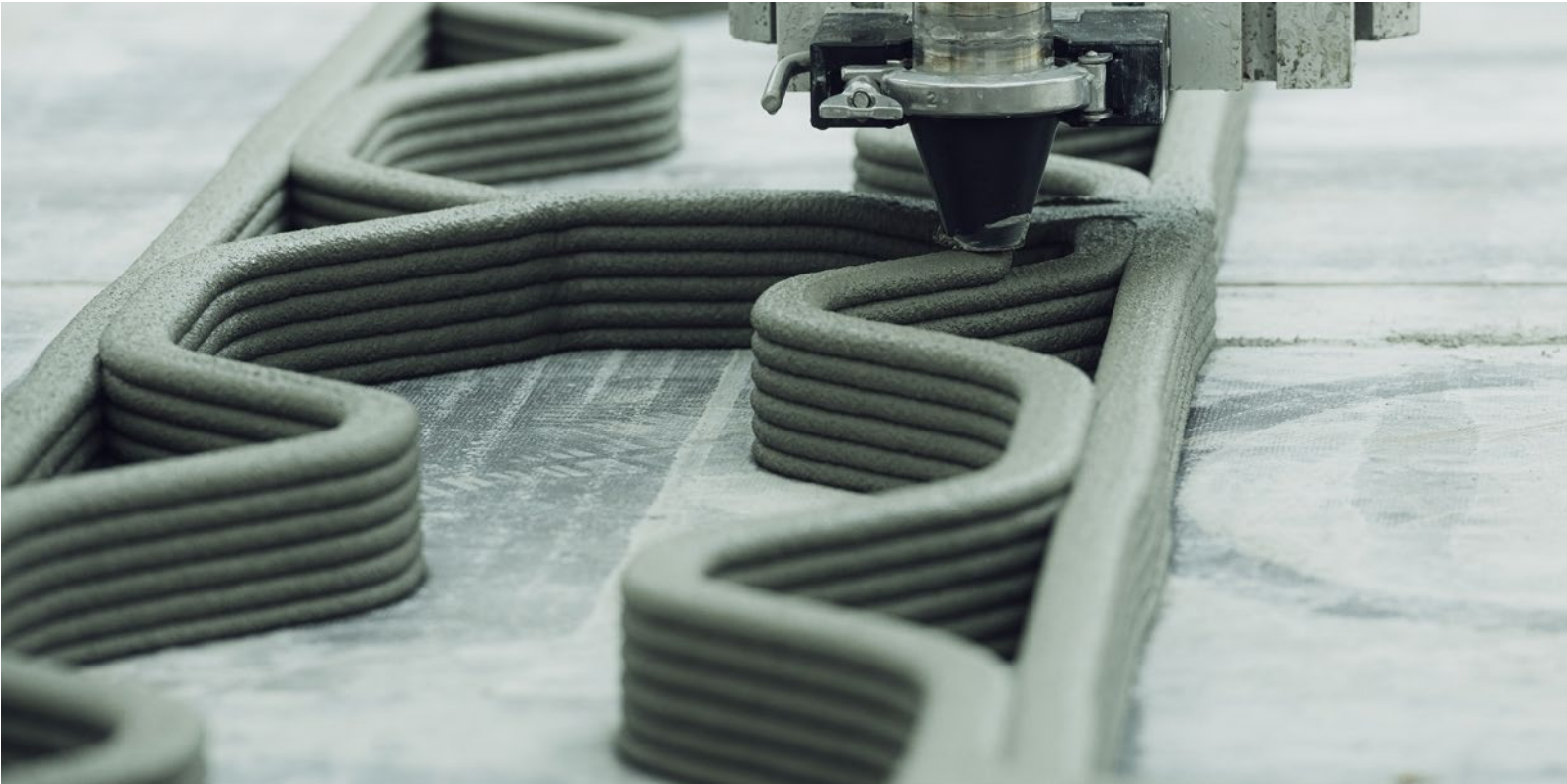
Simulace vygenerovaného G-kódu
Simulation of the generated G-code

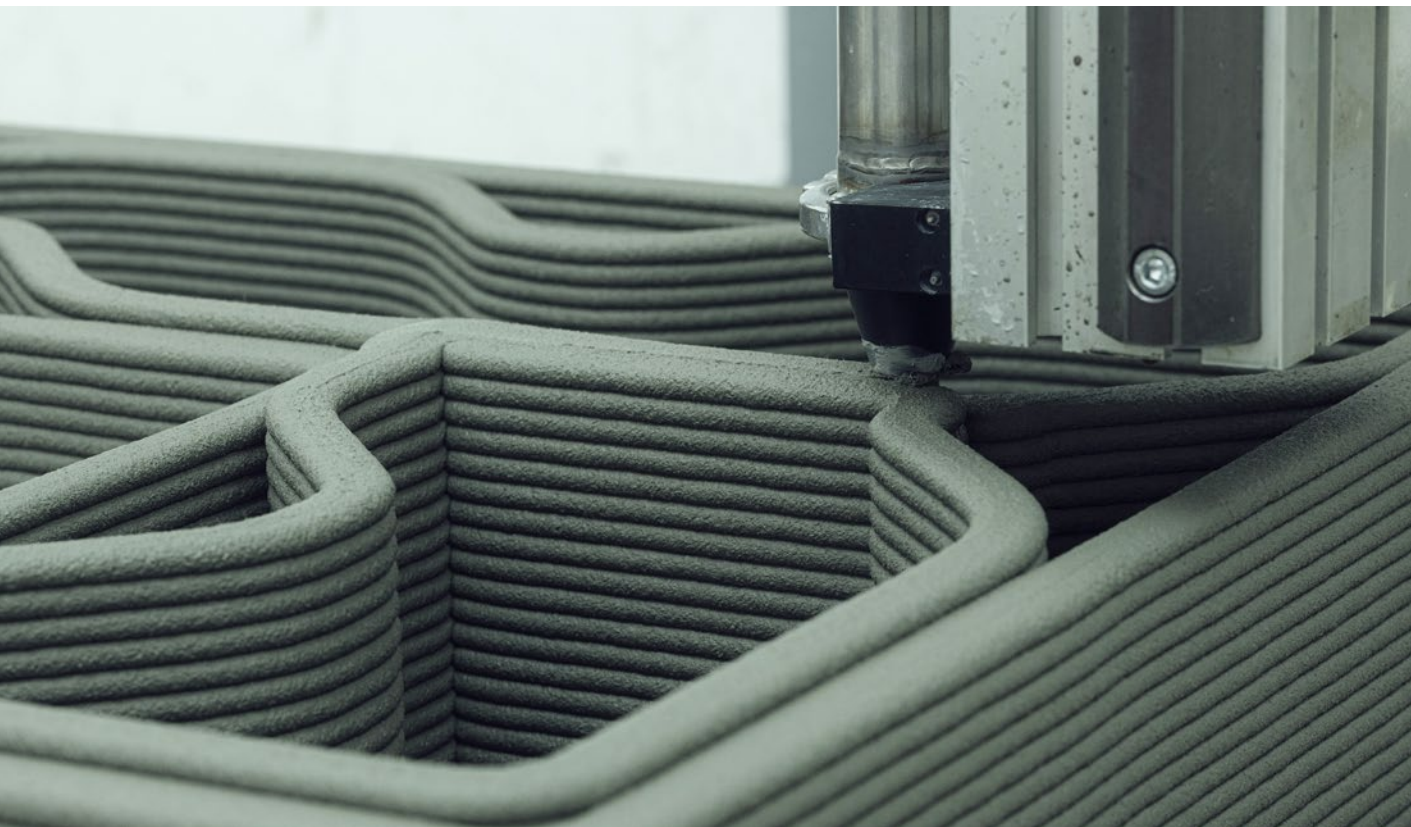
Program StarSlicer byl použit pro generování řady G-kódů od malé testovací tiskárny pro tisk z termoplastů až ve finále pro přípravu 3D tisku na TestBedu. Ukázka 3D tisku stěnového prvku z betonové směsi na TestBedu je vidět na obrázku níže



Příprava a 3D tisk objektu na TestBedu
Preparation and 3D printing of the object on TestBed

Při vývoji programu byla použita open-source komponenta GLScene, která slouží pro zobrazování a manipulaci s 3D objekty na obrazovce – pracovní prostor tiskárny se souřadným systémem, STL data a data řezů.







05

TIŠTĚNÉ STAVEBNÍ KONSTRUKCE, TISK VZORKŮ, VÝSLEDKY

PRINTED BUILDING STRUCTURES, SAMPLE PRINTING, RESULTS

Vladislav Bureš, Eva Burgetová, David Čítek, Libor Jendele, Radomír Mendřický, Ondřej Novák

V rámci projektu byly zkoumány možnosti uplatnění technologie 3D tisku cementových kompozitů u vícepodlažních domů. Stěny i stropy šestipodlažního bytového domu byly navrženy jako tenkostěnné příhradové s tiskovou stopou šířky 30 mm. Pozornost byla kromě statiky věnována i stavební fyzice a důležitým konstrukčním detailům. Byla zkoumána problematika vyztužování tištěných prvků se zaměřením na vodorovné nosné konstrukce. Výsledky testů odolnosti vytištěných stěnových i stropních prvků byly porovnány s hodnotami teoreticky stanovenými výpočtem. Získané poznatky umožnily zakomponování tištěného materiálu do speciálního modulu softwarového balíku Atena. Pro sledování změn tvaru vytištěných prvků byla vyvinuta metoda 3D skenování prvků, umožňující porovnání tvaru vytištěného prvku s původním digitálním modelem a následné sledování objemových změn prvku, způsobených především smršťováním materiálu.

The project examined the possibilities of using 3D printing technology of cement composites in multi-storey buildings. The walls and ceilings of a six-storey apartment building were designed as thin-walled trusswork with a print thickness of 30 mm. Besides statics, attention was paid to building physics and important structural details. The issue of reinforcing of the printed elements was examined, with focus on horizontal load-bearing structures. Results of resistance tests of the printed wall and ceiling elements were compared with the values determined theoretically by structural analysis. With the knowledge gained the printed material could be incorporated into a special module of the Atena software package. To monitor changes in the shape of the printed elements, a method of 3D scanning was developed, providing a comparison of the shape of the printed element with the original digital model and subsequent monitoring of changes in the volume of the element, caused primarily by material shrinkage.

3D TISK CEMENTOVÝCH KOMPOZITŮ

3D PRINTING OF CEMENT COMPOSITES

3D tisk cementových kompozitů otevírá nové možnosti uplatnění materiálů na bázi betonu ve stavebnictví. Umožňuje výrobu tvarově složitých prvků, které není možno zhotovit klasickou technologií odlévání do bednění. Zásadní je možnost optimalizace tvaru prvku z hlediska minimalizace spotřeby materiálu při dosažení maximální pevnosti nebo tuhosti prvku. Taková optimalizace je dnes běžná ve strojírenském průmyslu. Tvarová optimalizace z hlediska spotřeby materiálu přirozeně vede k navrhování tenkostěnných prvků, u kterých je jejich pevnost a tuhost zajištěna nikoli tloušťkou materiálu, ale jeho vhodným tvarováním do tenkostěnných útvarů, jako jsou skořepiny a lomenice a jejich odlehčením vhodně umístěné otvory. Proto je výzkum v oblasti 3D tisku zaměřen i na výzkum možností využití tohoto potenciálu v investiční výstavbě.

Snaha o úspory materiálu dobře zapadá do dnešních požadavků na úspory neobnovitelných zdrojů surovin, úspory energií, minimalizaci odpadů při odstraňování budov a udržitelnou výstavbu.

Ze zřejmých důvodů se nabízí tisk svislých konstrukcí, a to jak obvodového pláště stavby, tak i vnitřních dělicích stěn. Využití 3D tisku pro vodorovné stavební konstrukce je omezeno na tisk prefabrikovaných prvků, které ale musí konkurovat jiným, běžně užívaným typům konstrukcí, jako jsou silně odlehčené dutinové předpjaté panely a další, běžně známé systémy.

Ve většině dosud známých realizací 3D tištěných budov je vytištěná skořepina využita pro obvodový plášť stavby a pro vnitřní nenosné dělicí stěny. Funkci svislých nosných konstrukcí většinou zajišťují obvyklé typy konstrukcí – ocelové sloupy, popřípadě železobetonové sloupy, betonované do ztraceného bednění, vytvořeného 3D tiskem.

Využití tenkostěnných svislých nosných prvků, jako skořepin a lomenic pro svislé nosné stěny znamená novou výzvu pro betonové stavitelství. Je pravděpodobné, že další rozvoj 3D tisku přinese podobnou revoluci do betonového stavitelství, jakou přineslo rozšíření tenkostěnných, za studena tvářených prvků do ocelového stavitelství ve druhé polovině minulého století. Tato revoluce v ocelovém stavitelství si v minulosti vyžádala rozvoj nových návrhových teorií a vznik nových návrhových norem. Tenkostěnné prvky jsou obecně náchylné k různým ztrátám stability, jako je prostorová ztráta stability (vybočení, zkroucení) tlacených prutů, klopení ohýbaných průřezů a boulení stěn namáhaných kombinací tlaku a smyku.

V případě betonového stavitelství jde o ještě komplikovanější úlohu, než tomu bylo v případě stavitelství ocelového. Je to tím, že jak prostý, tak vyztužený beton jsou složitějšími kompozity, u kterých jsou stabilitní problémy komplikovány jevy, jako je smršťování a dotvarování betonu a oslabení tažených oblastí konstrukce trhlinami. Smršťování cementového kompozitu se projevuje zkrácením prvku, řádově o jednotky milimetru na jeden metr délky prvku, a pokud je volnému smršťování bráněno (například betonáží na starší železobetonový základ), vyvolává smrštění materiálu tahové síly, které způsobují porušení vytištěných prvků a konstrukcí tahovými trhlinami. Větší roli, než u ocelových konstrukcí, hrají i imperfekce prvků, vzniklé při výrobě. Nepříjemnou vlastností tištěné tenkostěnné konstrukce je křehký způsob porušení při mezním zatížení. Absence dukility materiálu vede k porušování prvků v důsledku koncentrace namáhání při zatížení, které není rovnoměrně rozdělené po průřezu. To všechno jsou jevy, ke kterým u ocelových prvků v takovém rozsahu nedochází.

VÍCEPDLAŽNÍ BUDOVA V TECHNOLOGII 3D TISKU

MULTI-STOREY BUILDING IN 3D PRINTING TECHNOLOGY

Cílem výzkumu je ověření možností využití technologie 3D tisku pro běžné vícepodlažní stavby, se zaměřením na bytové domy. Zamýšlené technologii tisku je nutno přizpůsobit jak dispoziční, tak konstrukční řešení stavby.

Předpokládáme, že nosné svislé konstrukce budou tvořeny převážně stěnami, které budou tištěny in situ. Stěny jsou řešeny ze dvou vzájemně oddělených, oboustranně nosných, tenkostěnných plášťů trapézového (lomenicového) typu. U obvodové stěny bude dutina mezi oběma plášti vyplněna tepelnou izolací. U vnitřních stěn může být prostor mezi oběma plášti ponechán prázdný (dutina zlepší akustickou neprůzvučnost mezibytových stěn), nebo může být vyplněný tepelnou či akustickou izolací. V úrovni pod stropní konstrukcí budou stěny po celém obvodu stavby svázány železobetonovým

vým ztužujícím věncem, který zajistí splnění požadavků na celistvost, tuhost a robustnost stavby. Do ztužujícího věnce bude zakomponován prvek pro přerušení tepelného mostu. V rámci projektu byl navržen a odzkoušen věncový prvek s přerušeným tepelným mostem s využitím izonosníku od firmy Schöck Wittek. Ztužující věnec bude vyroben jako železobetonový prefabrikát, betonovaný v rozsahu viditelného povrchu do bednění, vytištěného technologií 3D tisku. Jde v rámci použité technologie o cizí prvek. Na druhou stranu, i u dosud běžných technologií, jako jsou monolitické a železobetonové montované stavby, netrváme na absolutní čistotě a oddělení těchto technologií, ale v případech, kdy je to výhodné, je vzájemně kombinujeme. Běžnými příklady jsou použití prefabrikovaných schodišťových ramen v monolitických stavbách nebo betonáž monolitických membrán na stropích, montovaných z prefabrikátů. Z provedených zatěžovacích zkoušek vytištěných segmentů stěn a ze statických výpočtů plyne, že stěnové prvky trapézového typu s celkovou tloušťkou 400 mm pro vnější obvodovou stěnu a 320 mm pro vnitřní nosnou stěnu, vytištěné stopou šířky 30 mm, vyhoví pro bytovou stavbu o šesti podlažích.



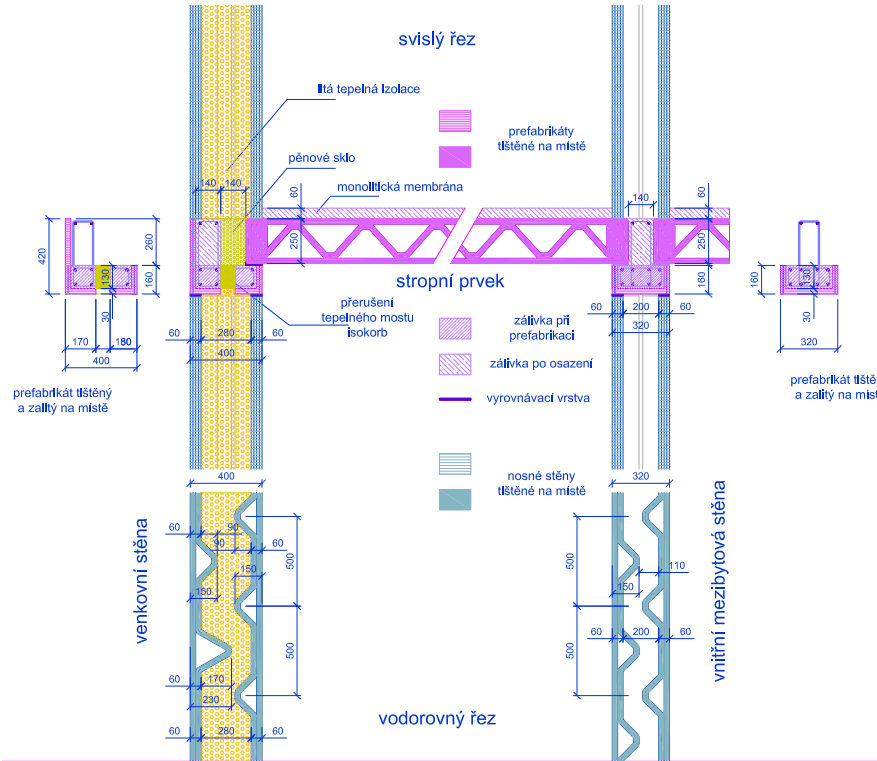
Segment stěn budovy v měřítku 1:1

Segment of the wall of the building in 1:1

Tisk stropních prefabrikovaných prvků příhradového typu předpokládáme přímo na stavbě, do finální polohy budou osazovány jeřábem. Po dokončení montáže stropu bude nad příhradovými nosníky vybetonována monolitická membrána v tloušťce 60 mm, která zajistí odolnost stropní konstrukce při zatížení lokálními osamělými břemeny. V rámci projektu byla do tažených prutů příhradoviny ukládána nutná tahová výztuž ručně při tisku. Příhradové stropní nosníky byly navrženy statickým výpočtem a jejich skutečné statické chování bylo ověřeno zatěžovací zkouškou v laboratoři. Stropní nosníky jsou navrženy pro bytový dům na teoretické rozpětí 5,62 m. Při výpočtu bylo uvažováno proměnné užité zatížení v bytě hodnotou 1,50 kN/m², v souladu s platnými normami pro navrhování staveb. Zatížení lehkými příčkami bylo uvažováno jako náhradní rovnoměrné plošné zatížení, konzervativně hodnotou rovněž 1,50 kN/m², a dále bylo uvažováno stálé zatížení podlahou v tloušťce 100 mm.

Při návrhu stěnových i stropních prvků uvažujeme se šířkou tiskové stopy převážně 30 mm.

Základní schémata, zahrnující řezy stropní a stěnovou konstrukcí, jsou na následujících obrázcích.



Svislý řez stropní konstrukcí a vodorovné řezy nosnými stěnami
Vertical section of the floor structure and horizontal sections of the load-bearing walls

MECHANICKÉ VLASTNOSTI TISKOVÉ SMĚSI
MECHANICAL PROPERTIES OF THE PRINTING MIXTURE

V rámci experimentálního programu byla provedena celá řada různých typů zkoušek materiálových vlastností tiskové směsi v různých stádiích vývoje, mechanických parametrů vytištěných vzorků a například i soudržnosti této směsi s různými druhy vkládané žebírkové výztuže. Detailní popis vývoje finální směsi využívané pro 3D tisk na zkušebním zařízení TestBed je popsán v kapitole 2 této publikace. Obecné parametry směsi v různém stáří a na různých typech těles popisuje následující tabulka. Nejvíce charakterizující jsou materiálové vlastnosti směsi ve 28 dnech stáří. Pro účely 3D tisku z hlediska návrhu náročných tištěných konstrukcí jsou důležité také vlastnosti směsi v raném stádiu tuhnutí/tvrdnutí směsi.

Stáří materiálu	Směs bez urychlovače tuhnutí				Směs s urychlovačem tuhnutí		
	Pevnost v tlaku (trámečky 40x40x160 mm)	Pevnost v tahu za ohybu (trámečky 40x40x160 mm)	Statický modul pružnosti v tlaku (válec 100/200 mm)	Smrštění	Dávka 70 ml/min		
					Pevnost v tlaku (trámečky 40x40x160 mm)	Pevnost v tahu za ohybu (trámečky 40x40x160 mm)	Pevnost v tlaku na vývrtu ø 80 mm
[dny]	[MPa]	[MPa]	[GPa]	[mm.m ⁻¹]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1	10,0	3,0					
2	24,0	5,7	20,3	0,12			
5	37,5	7,8		0,53			
7	41,5	8,3		0,84			
14	54,0	10,2	29,4	1,04			
21	60,0	10,8		1,16			
28	64,5	11,1	32,1	1,18	60,0	9,6	60,0
56	73,0	11,9		1,37			
90	76,5	12,2		1,49	62,5	10,1	

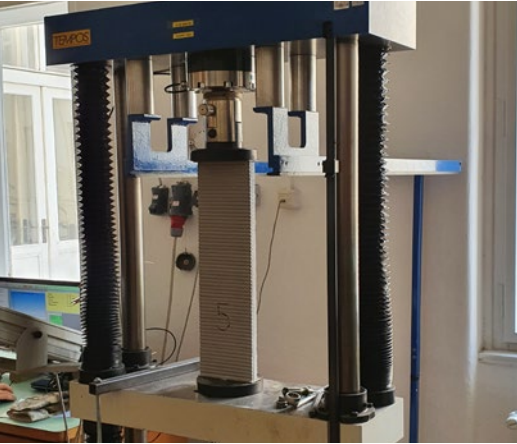
Příklad hodnocení pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu u tiskové směsi
Example of evaluation of the compressive and tensile strength of the printing mixture

TISK A TESTOVÁNÍ STĚNOVÝCH PRVKŮ
PRINTING AND TESTING OF WALL ELEMENTS

V rámci programu byly ve spolupráci architekta a statika navrženy základní tvary stěnových prvků tak, aby tyto stěnové prvky v co největší míře splňovaly požadavky stavební a architektonické, požadavky statické způsobilosti a požadavky plynoucí ze stavební fyziky. Z hlediska stavební fyziky byly zkoumány problémy tepelné izolace, problémy akustiky (neprůzvučnost) a další.

Základním problémem je statická odolnost vytištěných svislých nosných stěn. Proto byly testovány jak vytištěné jednoduché stěny tloušťky 20 až 30 mm, namáhané na vzpěr, tak celé stěnové prvky trapézového (lomenicového) tvaru, namáhané rovněž svislým zatížením.

Příklad testování jednoduché stěny ze směsi o krychelné pevnosti zhruba 60MPa na vzpěrný tlak je na následujícím obrázku. Prvek byl vyříznutý z vytištěného stěnového segmentu větších rozměrů. Tloušťka testované stěny kolísala od 26,5 mm uprostřed výšky tiskové vrstvy do 21,5 mm v úrovni ložné spáry mezi tiskovými vrstvami. Šířka stěny je 146 mm a výška stěny je 580 mm. K porušení stěny na obrázku došlo při zatížení 65,2 kN (6,52 tuny). To při uvažování průměrné tloušťky stěny 24 mm adeformačního modulu tiskové směsi $E_{cm} = 30\text{GPa}$ odpovídá zatížení při porušení ztrátou stability (vybočením) zhruba 44 % velikosti Eulerova kritického břemene, stanoveného pro ideální, dokonale přímý („Eulerovský“) prut z ideálně pružného materiálu, dokonale centricky zatížený.



Zkoušení únosnosti vzorku tištěné stěny ve vzpěrném tlaku
Testing of the bearing capacity of the printed wall sample in buckling pressure

Na následujícím obrázku je tisk stěnového segmentu, tištěného stopou šířky 30 mm, určenou pro tisky nosných stěn vícepodlažních objektů. Segment má výšku 800 mm, což je maximální výška stěny, kterou provozované laboratorní zařízení zatím umožňuje.



Tisk stěnového segmentu
Printing of the wall segment

V rámci ověřování pevnosti vytištěných stěn byly prováděny zatěžovací zkoušky celých stěnových segmentů různého tvaru. Testovaný dutý uzavřený prvek na následujícím obrázku má tloušťku tiskové stopy 20 mm.



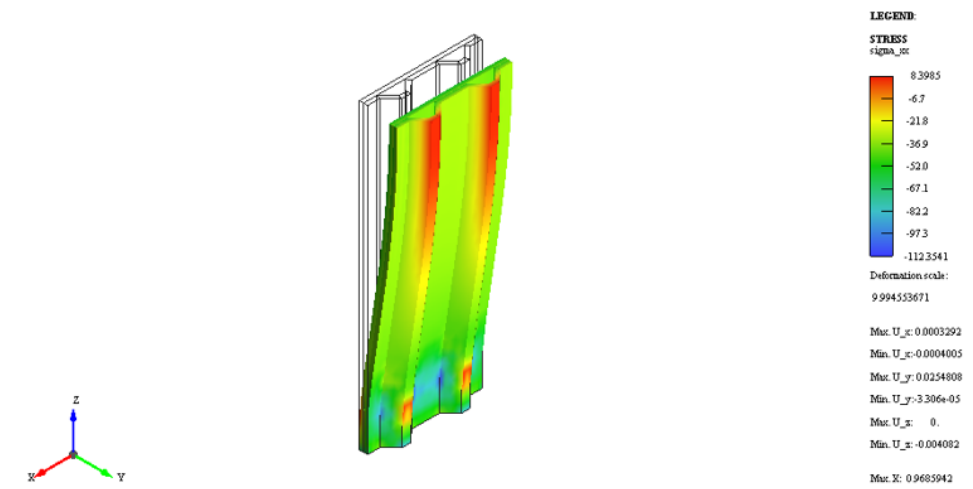
Zkoušení únosnosti tenkostěnného stěnového segmentu s tloušťkou stěny 20 mm
Test of the bearing capacity of the thin-walled wall segment with a print footprint of 20 mm



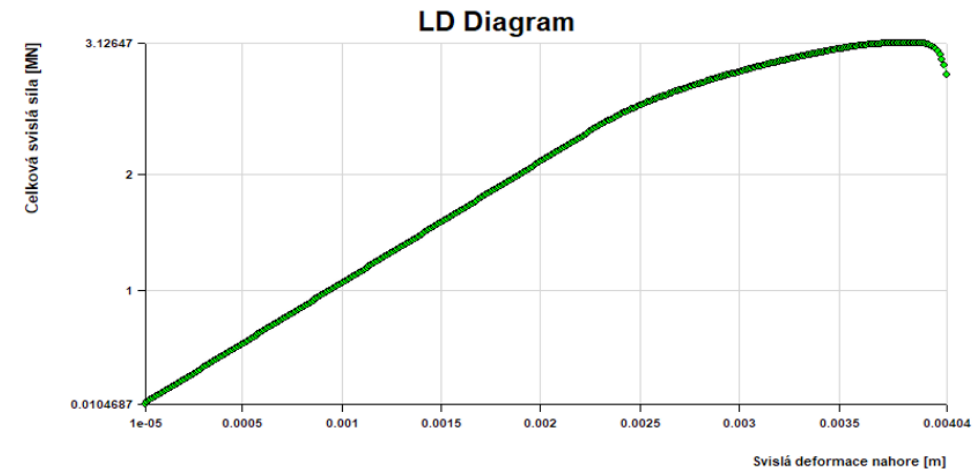
Příklad pracovního diagramu ze zkoušky na předchozím obrázku
Example of a stress-strain diagram from the test in the previous image

TEORETICKÉ OVĚŘOVÁNÍ ÚNOSNOSTI NOSNÝCH STĚN VÝPOČTEM
THEORETICAL EVALUATION OF THE BEARING CAPACITY OF LOAD-BEARING WALLS USING STRUCTURAL ANALYSIS

Souběžně s testováním tlačných stěnových prvků v laboratoři probíhalo modelování a teoretické ověřování tlačných stěn s použitím různých výpočtových postupů a programů. Po úvodních ručních odhadech bylo statické chování stěnových prvků ověřováno na geometricky nelineárním modelu v software Scia Engineer i s použitím dalších softwarových nástrojů. Největší pozornost byla věnována softwarovému nástroji Atena, určenému pro pokročilé geometricky i fyzikálně nelineární modelování betonových konstrukcí. Tento program vyvíjí česká firma Červenka Consulting s.r.o., jejíž pracovníci se rovněž na výzkumu podíleli. Konečným cílem je odladění výpočtového postupu takovým způsobem, aby bylo možno v dohledné budoucnosti spolehlivě navrhovat konstrukce pouze na základě počítačových modelů, jak je dnes obvyklé.



Model trapézového stěnového prvku výšky 2,55 m v software Atena
Atena model of a trapezoidal wall element 2.55 m high



Vypočtený průběh závislosti mezi zatížením a deformací prvku dle předchozího obrázku
Calculated load-deformation relationship of the element from the previous figure

Přes veškeré snahy se u tvarově složitějších stěnových segmentů zatím v rámci projektu nepodařilo dosáhnout spolehlivé shody mezi hodnotami únosností, dosažených v laboratoři, a hodnotami únosnosti na mezi porušení, stanovenými teoretickým výpočtem. Hodnoty zatížení na mezi porušení, stanovené výpočtem, byly zpravidla vyšší než hodnoty skutečně realizované při zatěžovací zkoušce v laboratoři. Důvody tohoto nesouladu spočívají jednak v komplikovaném chování materiálu, které se zatím nepodařilo dostatečně výstižně zakomponovat do výpočtových modelů, i v problémech se zkoušením vzorků v laboratoři.

Zásadním problémem se, na základě dosavadního výzkumu, jeví křehké chování materiálu a jeho tendence k porušování tahovými silami, vyvolanými vázaným smršťováním cementového kompozitu. Podle chování stavebního materiálu v procesu porušování při mezním zatížení můžeme materiály v zásadě rozdělit na materiály duktilní a materiály křehké. Duktilní materiál (typicky ocel, vhodně vyztužený železobeton nebo i většina základových půd) je schopen se před porušením plasticky přetvořit, případně i porušit trhlinami, aniž by došlo k okamžité ztrátě únosnosti. Křehký materiál (typicky prostý beton nebo běžné sklo) se poruší náhle, při vzniku první trhliny. Pro stavební materiály je duktilita materiálu žádoucí, protože při přetížení dojde k viditelným deformacím a vzniku širokých trhlin, aniž by bez varování došlo k náhlému kolapsu stavebního prvku.

Pevný a křehký materiál, jakým vytištěná tenkostěnná skořepina z nevyztuženého vysokopevnostního cementového kompozitu je, je velmi citlivý na rovnoměrné a dokonale centrické vnesení zatížení do testovaného prvku. Při jakékoliv excentricitě při zatěžování tvarově složitějšího prvku v lisu dochází ke koncentraci zatížení, které prvek nedokáže přerozdělit, což vede ke vzniku špiček napětí v prvku a k lokálnímu porušení prvku při nižším zatížení, než by odpovídalo teoretickému výpočtu. Lokální porucha pak velmi rychle vede k celkové destrukci prvku. Situaci navíc komplikuje možné oslabení prvku skrytými trhlinami, vzniklými v důsledku vnitřních tahových napětí od smršťování cementového kompozitu při jeho tuhnutí a tvrdnutí. Tento jev se v některých případech projevil i u testů jednoduchých tenkých štíhlých stěn, kdy se testovaný prvek porušil smykem v důsledku místní koncentrace namáhání dříve, než došlo k jeho („regulérnímu“) selhání vybočením.

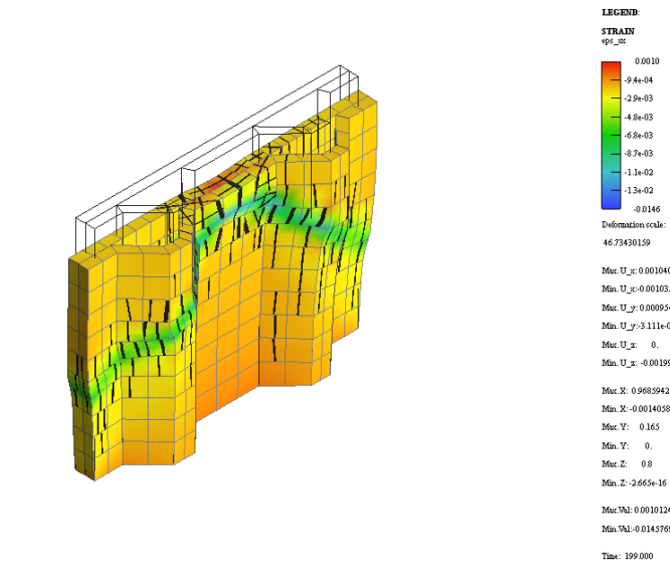
Proto je zatím nutno postupovat při navrhování velmi opatrně a konzervativně a ponechávat ve výpočtu rezervy s ohledem na výše uvedené jevy, které zatím neumíme výstižně popsat a zahrnout do výpočtového modelu. Problém modelování štíhlých a křehkých tenkostěnných tlačných stěnových prvků z cementových kompozitů bude jistě předmětem dalšího výzkumu.

Důležitou podmínkou pro možnost realizace vícepodlažních staveb v technologii 3D tisku bude také další výzkum objemových změn – především smršťování – tištěných cementových kompozitů. V rámci realizovaného výzkumu byly zkoumány možnosti sledování objemových změn na nevyztužených stěnových kompozitech 3D skenováním, což je popsáno v samostatné kapitole.

MOŽNOSTI VYUŽITÍ SOFTWARE ATENA A IMPLEMENTACE TECHNOLOGIE 3D TISKU DO PROGRAMOVÉHO BALÍKU

IMPLEMENTATION OF THE 3D PRINTING TECHNOLOGY INTO THE ATENA SOFTWARE PACKAGE

Softwarový balík Atena je určen a je nadále vyvíjen pro pokročilé, geometricky i fyzikálně nelineární ověřování železobetonových konstrukcí. Jde o špičkový FEM program v celosvětovém měřítku. Software umožňuje simulaci zatěžovací zkoušky železobetonového prvku až do porušení, včetně predikce rozvoje trhlin, plastických přetvoření betonu i výztuže a případné ztráty stability (vybočení, vyboulení) štíhlé konstrukce. Vzhledem k předchozím zkušenostem vývojářů programu s ověřováním stability stěn, zhotovených technologií 3D tisku v rámci jiného výzkumného projektu, se nabízelo využití tohoto software i v rámci našeho projektu.



Výstup z výpočtu rozvoje trhlin na nízké stěně v okamžiku kolapsu – Atena
Calculation of the development of the cracks on the wall at the moment of collapse – Atena

Software lze využít pro statické posouzení konstrukcí v trvalé návrhové situaci (tedy po dokončení stavby, kdy mají materiály plnou návrhovou pevnost), tak do určité míry i pro posuzování stability tištěných prvků v průběhu tisku, což omezuje riziko kolapsu prvku při tisku. Výpočet stability prvku při tisku je však závislý na dostupnosti parametrů, popisujících mechanické i další vlastnosti tiskové

směsi v krátké době po vytištění, které se obtížně získávají. Užitečná je znalost průběhu generace hydratačního tepla, ze které se dá odvodit průběh hydratace v čase. Na jeho základě lze odhadnout vývoj některých dalších vlastností materiálu v čase, které jsou potřebné pro výpočet.



Stěnový prvek zkolabovaný při tisku v důsledku poruchy dávkování urychlovače tuhnutí směsi
A wall element collapsed during printing due to a batching failure of the mixture set accelerator

V rámci projektu byla provedena implementace materiálu, zhotoveného technologií digitální výroby (3D tisk) prvku z cementového kompozitu do modulu Atena3Dprint a do Simulátoru 3D tisku. Oproti klasické analýze železobetonové konstrukce zohledňuje nový modul některá specifika tištěné konstrukce. Jako vstupní vstupují do výpočtu následující parametry:

- Seznam všech prvků, které jsou digitálně tištěné
- Horizontální rychlost pohybující se hlavičky s tryskou v_h (1-10 cm/s)
- Tloušťka tištěné vrstvy h
- Šířka tištěné vrstvy w
- Vektor svislého posunu tisku hlavičky z jedné vrstvy do druhé $\vec{n}$
- Trasa pohybu hlavičky při tisku.
- Čas zahájení tisku t_{start} pro daný polygon.

Betony raného stáří mají výrazně odlišné vlastnosti od vyzrálých betonů. Pro tento účel byl vyvinut nový materiál CC Material With Variable Properties. Jedná se o jakousi nadstavbu původních materiálu pro beton, která umožňuje měnit v čase jednotlivé materiálové parametry. Děje se tak pomocí funkce ft, jejíž hodnotou se původní parametr násobí. Proces výstavby konstrukce je možné sledovat/simulovat už i během výpočtu. Kdykoliv lze přepínat mezi pohledem na celkovou konstrukci nebo na dosud vytištěnou konstrukci.

VYZTUŽOVÁNÍ TIŠTĚNÝCH PRVKŮ A KONSTRUKCÍ
REINFORCEMENT OF PRINTED ELEMENTS AND STRUCTURES

Jak je obecně známo, beton a rovněž i cementové kompozity používané pro 3D tisk mají vynikající pevnost v tlaku, ale poměrně malou pevnost v tahu, která nepostačuje pro přenesení napětí v tažených oblastech průřezů ohýbaných prvků. Proto u železobetonových konstrukcí vkládáme do tažených oblastí průřezů ocelovou výztuž. Vyztužování konstrukcí, zhotovovaných 3D tiskem cementových kompozitů, bude nezbytné pro tisk ohýbaných prvků, tedy prvků vodorovných stropních konstrukcí a překladů nad otvory ve stěnách. Svůj význam má ale i ve svislých stěnových prvcích, kde může zachytávat tahové síly, vznikající v důsledku vázaného smršťování tiskového materiálu, ale i další tahové síly, plynoucí z tvarového a konstrukčního uspořádání konstrukcí a z jejich zatížení. Příkladem mohou být tahové síly, vznikající v nadpraží okenních a dveřních otvorů, a síly, způsobené nerovnoměrným sedáním základů, nebo silovým zatížením geometricky nepravidelné stěnové konstrukce.

Otázky vyztužování tištěných konstrukcí nejsou dosud uspokojivě vyřešeny. Tištěné prvky lze obecně vyztužovat buď orientovanou prutovou nebo ohebnou výztuží, nebo rozptýlenou výztuží krátkými vlákny různého typu, zamíchanými přímo do betonové směsi.

Vkládání prutové výztuže při tisku je samozřejmě z hlediska technologie cizí proces. Prutovou výztuž lze vkládat buď ručně do ložných spár mezi jednotlivé tiskové vrstvy nebo automaticky strojově. Ani jedno z těchto řešení není z hlediska tiskové technologie příliš vyhovující.

Další možností je automatické ukládání ohebné výztuže (výztužné lanko, vlákna nekovové výztuže) upravenou tiskovou hlavou přímo při tisku. Tiskové hlavy, které současně s tiskem ukládají do tiskové vrstvy ocelové lanko, navinuté na cívce, upevněné na tiskovou hlavu, ve světě existují a příklady lze dohledat na internetu. Možnost vývoje tiskové hlavy, ukládající při tisku automaticky výztužné ocelové lanko, byla v rámci našeho projektu diskutována, nebyla však realizována. V rámci projektu byly zkoumány možnosti vyztužování tiskové směsi soustředěnou ohebnou nekovovou výztuží (uhlíková, skleněná a další typy vláken). Problematika je popsána v následující samostatné kapitole.

Nejelegantnějším postupem z hlediska technologie tisku by bylo vyztužování tiskové směsi rozptýlenou výztuží krátkými (kolem 10 mm) a tenkými vlákny na způsob drátkobetonu. Používání tiskové směsi s ocelovými drátky je ale náročné na dopravu tiskové směsi hadicemi i na uspořádání a materiál tiskové hlavy, které musí být pro směs s ocelovými drátky speciálně upraveny tak, aby nedocházelo k jejich rychlému opotřebení a k ucpávání ježky ze shluků výztužných drátků.

Při návrhu tištěných, ohýbaných, příhradových stropních prvků v rámci projektu jsme používali výhradně ruční vkládání výztužných prutů do tažených oblastí průřezů stropních nosníků a vědomím, že jde o přechodnou etapu vývoje stropních prvků. Předpokládáme, že v dalším vývoji ohýbaných stropních konstrukcí bude ruční vkládání výztuže nahrazeno vhodnější technologií.



Ruční vkládání výztuže do příhradového stropního prvku při tisku
Manual insertion of the reinforcement into the truss floor element during printing

VYZTUŽOVÁNÍ NEKOVOVOU VÝZTUŽÍ **NON-METALLIC REINFORCEMENT**

Jedním z problémů tenkostěnných konstrukcí je obtížné dosažení potřebné tloušťky krycí vrstvy cementového kompozitu, potřebné k ochraně kovové výztuže před korozi. Ve zdravém a dobře navrženém železobetonu ocelová výztuž nekoroduje. Je to dáno vysokou zásaditostí betonu, který výztuž pasivuje a tím zabraňuje korozi. Při uložení betonu v prostředí, obsahující vlhkost (vodní páru) a vzdušný kyslíčník uhlíčitý, dochází ke změnám betonu, tzv. karbonatace betonu, jejímž projevem je mimo jiné pokles zásaditosti povrchové vrstvy betonu. Pokud pH této vrstvy klesne pod určitou mez, výztuž přestane být pasivována a začne korodovat. Aby ke korozi výztuže v praxi nedocházelo, je potřeba, aby betonová vrstva, kryjící ocelovou výztuž, byla málo porézní a měla dostatečnou tloušťku. Dnešní normy požadují z hlediska dostatečné trvanlivosti železobetonu tloušťku krycí vrstvy nejméně 20 až 30 mm. To však je u tenkostěnné konstrukce s e šířkou tiskové stopy typicky 30 mm nerealizovatelné. Zvětšování tloušťky krycí vrstvy s ohledem na ochranu kovové výztuže před korozi tedy vede k širším tiskovým stopám a větší spotřebě materiálu.

Jednou z možností, jak se tomuto problému vyhnout, je použití nekovové, nekorodující výztuže. Může jít o kompozitní tyčovou výztuž na bázi skleněných vláken, čedičových, popřípadě uhlíkových vláken.



Příklady kompozitní tyčové výztuže - převzato z webu www.kompozitnityce.cz
Examples of composite bar reinforcement - taken from www.kompozitnityce.cz

V rámci našeho projektu byly zkoumány možnosti vyztužování cementových kompozitů svazky ohebných nekovových vláken, které by bylo možno automaticky ukládat tiskovou hlavou při tisku. Vlákná ve svazku mají velmi malý průměr. To jim dává některé pozitivní i negativní vlastnosti. Z hlediska kladení je výhodou minimální ohybová tuhost, protože vlákna ve svazku nejsou vzájemně spojena, v jejich kontaktech je pouze třecí vazba. Nevýhodou však je, že pokud nejsou vlákna po uložení do betonu následně propojena, ať už cementovou kaší nebo jiným pojivem, dochází při jejich namáhání k přetrhu jednotlivých vláken, nikoliv celého svazku. Teoretická pevnost svazku tak nemůže být dosažena a plně využita. Lineární výztuže jsou v podobě pramenů (rovingů) nebo kábliků. Jedná se o nekonečná vlákna, v počtu několika tisíc v jednom svazku. Konkrétní počet, jemnost, délka a mechanické vlastnosti se liší podle konkrétního typu použitého materiálu i výrobce. Vlákná jsou dodávána v návinech křížových (viz následující obrázek) nebo, dle přání zákazníka, je lze přesoukat i na jiný formát.



Cívka s návínem skelných vláken - převzato z webu <https://www.rg.de/en/home.html>
Coil of glass fibres - taken from <https://www.rg.de/en/home.html>

Z celé řady možných vláken uvádíme jenom ty, které mají vhodné mechanické vlastnosti - vysoký počáteční modul a vysokou pevnost v tahu a také dostatečnou odolnost vůči alkalickému prostředí.

Skleněná vlákna

Sklo lze připravit v celé řadě variant v závislosti na poměrech složek sklářského kmene a přídavných látek. Nejběžnější typ skla je E-sklo, dále vysokopevnostní sklo (S) a chemicky odolné sklo (C). Nevýhodou skla je jeho vyšší hustota (2450 kg.m⁻³) a nižší odolnost vůči alkáliím. Výhodou je nízká cena, dobrá adheze a vysoká tepelná odolnost (až 1200°C).

Kevlar

Materiál patřící do skupiny paramidů, tedy polyamidů s aromatickým jádrem. Kevlar se vyrábí v základním provedení pod názvy K29 a K49. Dále existují jeho modifikace. Vybrané vlastnosti jsou níže v tabulce. Hustota je 1,47 kg.m⁻³. Kevlar má dobrou termickou odolnost, avšak výrazně nižší v porovnání se sklem. Teplotní odolnost se krátkodobě pohybuje okolo 500 °C. Levnější alternativou Kevlaru je Nomex. Patří do stejné skupiny polymerů, má však vyšší tepelnou odolnost a horší mechanické vlastnosti.

Zylon (PBO)

Vlákna s vysokou pevností a dobrou mechanickou odolností. Výhodou je nízká hustota (1550 kg.m⁻³) a nižší cena. Zylon je termoset, má proto vynikající termické vlastnosti.

Uhlíková vlákna

Na trhu je celá řada uhlíkových vláken,lišících se svými mechanickými vlastnostmi. Výhodou uhlíkových vláken je jejich extrémní pevnost a vysoký modul, tepelná odolnost a vodivost. Nevýhodou vysoká cena, křehkost, oxidace při vyšších teplotách a vyšší hustota 1705 – 1940 kg.m⁻³.

PBT

Polybutylerterftalát (PBT) je vysokopevnostní vlákno patřící do skupiny polyesterů o hustotě 1570kg.m-3. Má dobré mechanické vlastnosti a vysoké elektroizolační, termické a chemické odolnosti. Jedná se o termoplastické vlákno.

Dyneema, Spectra

Vlákna na bázi vysokomolekulárního polyetylenu připraveného zvlákněním z gelu. Hustota vlákna 970 kg.m⁻³. Nevýhodou je nízká tepelná odolnost (do 100 °C). Naopak vykazují vysokou odolnost vůči extrémně nízkým teplotám (hluboko pod -100 °C).

Vysokopevnostní polyetylen

Materiál s nejnižší hustotou a vysokou pevností. Nevýhodou je nízká tepelná odolnost a hydrofobnost spojená s nízkou adhezí.

Čedič

Složením a vlastnostmi je podobný sklu, vykazuje vyšší tepelnou a chemickou odolnost a vyšší pevnost. Hustota je vyšší než u skla (2700 kg.m⁻³).

Mechanické vlastnosti vláken jsou v následující tabulce.

	Sklo (E)	Sklo (S)	Sklo (C)	Kevlar (K29)	Kevlar (K49)	PBO (AS)	PBO (HM)	Uhlík (AS)	Uhlík (HMS)	PBT	Spectra	Dyneema	Čedič
Pevnost [GPa]	1,7-3,5	2,0-4,5	1,7-2,8	2,8	3,1	5,8	5,1	2,1	1,8	3,1	2,3-3,2	3,5	2,8-4,8
Modul [GPa]	69-72	85	70	69-72	85	180	270	224	385	320	60-120	115	86-90

Mechanické vlastnosti vláken vhodných pro vyztužování betonu

Mechanical properties of fibres suitable for concrete reinforcement

Legenda: E – electric -vyšší elektrická odolnost; S – strenght – vysokopevnostní; corrosion – se zvýšeno chemickou odolností; AS – as spun – bez dalších úprav; HM, HMS – highmodulus – s vysokým modulem; Dyneema, Spectra

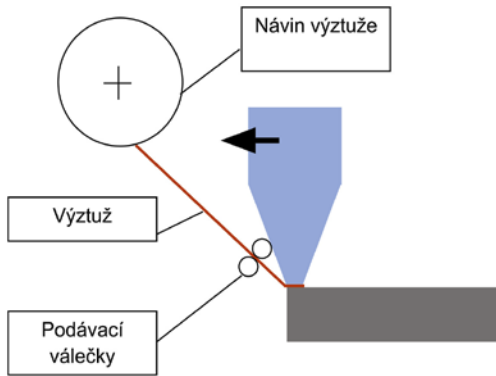
Zpracovatelské vlastnosti některých vláken, přicházejících v úvahu jako výztuž pro tištěné budovy, jsou uvedeny v následující tabulce.

	Požární odolnost	Chemická odolnost v alkalickém prostředí	Odolnost vodě	Adheze	Možnost zvyšování adheze	Možnost povrchové ochrany	Mechanické vlastnosti
Sklo	Vysoká	Nízká	Vysoká	Dobrá	Ano	Ano	Velmi dobré
Čedič	Vysoká	Dobrá	Vysoká	Dobrá	Ano	Ano	Velmi dobré
Uhlík	Vysoká	Vysoká	Vysoká	Nízká	Ano	Ano	Excelentní
Spectra, Dyneema	Žádná	Vysoká	Vysoká	Žádná	Obtížněji (hydrofilizace , plazma)	Obtížněji	Velmi dobré
Kevlar	Zvýšená	Dobrá	Velmi dobrá	Dobrá	Obtížněji (plazma)	Ano	Velmi dobré
Nomex	Zvýšená	Dobrá	Vysoká	Dobrá	Obtížněji (plazma)	Ano	Velmi dobré
Polypropylen	Žádná	Vysoká	Vysoká	Žádná	Obtížněji (hydrofilizace , plazma)	Obtížněji	Nízké

Zpracovatelské vlastnosti vybraných vláken

Processing properties of selected fibres

Vyztužování tištěné konstrukce nekovovými ohebnými vlákny lze realizovat postupem, který byl již v některých zahraničních experimentálních zařízeních použit. Podávací zařízení lineární výztuže (pramen, lanko...) lze připojit k tiskové hlavě. Podávací zařízení by mělo podávat shodnou rychlostí jako je rychlost pohybu trysky k předchozí (již vytvořené) vrstvě. Jedná se se o nucený způsob podávání, kdy výztuž není tažena pohybem trysky a směsí, ale je vhodným způsobem vpravována do tiskové trysky.



Koncept vyztužování flexibilní lineární výztuží

Concept of flexible linear reinforcement

KONCEPCE NÁVRHU ZE STAVEBNĚ FYZIKÁLNÍHO HLEDISKA

DESIGN CONCEPT FROM THE PERSPECTIVE OF BUILDING PHYSICS

Aby bylo v budoucnu možno realizovat v technologii 3D tisku cementových kompozitů plnohodnotné stavby, bude nezbytné vyřešit problémy stavební fyziky a příslušné detaily. Pro stavebně fyzikální řešení tištěných stavebních konstrukcí jsou navrhovány primárně nosné systémy (ve variantě třívrstvé – tepelná izolace uvnitř konstrukce, dvouvrstvé – nosná konstrukce s chráněnou tepelnou izolací a jednovrstvé – materiál zajišťující jak fyzikální, tak mechanické vlastnosti) a nenosné systémy, které již neřeší mechanické vlastnosti, ale pouze ochranu proti klimatickým vlivům. Jednotlivé varianty řešení byly analyzovány a ekonomicky hodnoceny. Hlavním cílem byl výběr vhodných materiálových variant pro obalové konstrukce, které při rozumné tloušťce splní náročné tepelně izolační požadavky platné pro pasivní budovy. Současně byly řešeny klíčové detaily návazností (stropní a obvodové konstrukce, obvodové konstrukce a střechy, nároží, ostění, nadpraží) s cílem maximální možné eliminace nepříznivého vlivu tepelných mostů.

Možným řešením dané problematiky - jako alternativa ke klasickým způsobům zateplování (ETICS) - se nabízí tepelně izolační panel vytvořený technologií 3D tisku pro kontaktní zateplování staveb. Tepelně izolační panel je možné vyrobit technologií 3D tisku jako jednodlitý celek. Použitím materiálů s nízkou tepelnou vodivostí se získá panel, který je lehký, dokáže odolávat nárazům a slouží k izolaci proti hluku. Základním předpokladem je splnění požadavků na kontaktní zateplovací systémy. Hlavní výhoda panelu spočívá v možnosti použití na zakřivené fasády, tzv. freeforms, tedy tvary s volnou geometrií, které 3D tisk umožňuje a není možné je vytvořit jinou technologií. Panel lze libovolně upravovat. Vlastnosti panelu se dají dále vylepšit pomocí povrchové úpravy.

V rámci výzkumu byly hledány a analyzovány vhodné tepelně izolační materiály, které by splňovaly požadavky z technicko-fyzikálního hlediska. Ve světě prováděné pokusy ukazují mnohé možnosti 3D tisku např. polyuretanové pěny s příměsí korku. Tepelná vodivost těchto vzorků se pohybuje kolem hodnoty $\lambda = 0,045 \text{ W/m.K}$. Materiálem s ještě lepšími vlastnostmi je aerogel. Má velmi dobré tepelně izolační vlastnosti: $\lambda = 0,033 - 0,039 \text{ W/m.K}$, je lehký, pevný a odolný proti požáru. Dá se vyrábět technologií 3D tisku pomocí mikroskopického vytvrzování. Nevýhodou tohoto materiálu je však horší dostupnost, vyšší cena, pomalejší výroba a náročnější technologie.

Jak bylo uvedeno, technologií aditivní výroby je možné vytisknout téměř celou stavbu, přičemž tepelně izolační vlastnosti lze implementovat přímo do nosné konstrukce využitím vhodných materiálů a jejich vnitřní struktury. Proto je v současnosti rozšířenou variantou využití technologie 3D tisku in situ pouze k výrobě duté konstrukce a dutina mezi oběma pláštěmi je následně vyplněna tepelně izolačním materiálem. Výhodou takové konstrukce je rychlá a levná výroba a dostupnost potřebných materiálů a technologií. Nevýhodou je nutnost dodatečného plnění a možnost vzniku tepelných mostů. Zde se nabízí možnost použití kompozitní výztuže.

Důležitým bodem je výběr výplňového izolačního materiálu. Rozhodujícími faktory jsou tepelná vodivost, snadnost plnění a objemová stabilita. Lze použít stříkané nebo sypané izolace. Nejběžnější jsou stříkané pěny na bázi polyuretanu, které dokonale vyplní dutý prostor a dosahují výborných tepelně izolačních vlastností, součinitel tepelné vodivosti od $\lambda = 0,033 \text{ W/m.K}$. Nevýhodou je, že jsou expanzivní. Často používanou tepelnou izolací pro 3D tisk je kompaktní, paropropustná stříkaná pěna (PUR, Icynene). Další možnostmi jsou stříkané pěny z izokyanátu a pryskyřice, které ovšem výrazně expandují, součinitel tepelné vodivosti však může být až $\lambda = 0,021 \text{ W/m.K}$.

Problém s expanzí lze vyřešit použitím foukané/sypané izolace. Možností je tepelná izolace z celulózy, jejíž udávaná tepelná vodivost je $\lambda = 0,04 \text{ W/m.K}$. Běžnější jsou izolace z kuličkového polystyrenu (EPS). Mají dobré izolační vlastnosti, jsou lehké, nevýhodou je sedání. Příkladem je STYROBALL nebo Thermowhite, což jsou tepelné izolace z pěnového, stabilizovaného expandovaného polystyrenu, obohacené o mikrovláknو. Lze je volně sypat nebo vyplnění provést strojem na foukání izolace. Mezi deklarované parametry patří dobré akustické vlastnosti, zdravotní nezávadnost a nevyžadují parozábranu. Podle informace výrobce jsou prostorově stabilní, tedy nesedají. Objemová hmotnost je 17 kg/m^3 a součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 0,037 \text{ W/m.K}$.

Cílem výzkumu je ověření konstrukcí vytvořených technologií 3D tisku z hlediska zajištění tepelně technických parametrů. V rámci experimentálního ověřování možnosti vyplňování dutiny stěnových prvků tepelnou izolací byly aplikovány dva materiály - litý polystyrén Thermowhite a stříkaná pěna Icynene. Ve stěnovém prvku s vnější tloušťkou 400 mm a vytištěnou stopou šířky 30 mm splňují tyto izolační materiály normové požadavky na součinitel prostupu tepla U na úrovni pasivních objektů dle ČSN. Detaily vzájemné návaznosti jednotlivých konstrukcí je třeba numericky a experimentálně ověřit.



Aplikace tepelné izolace Thermowhite do segmentu vytvořeného 3D tiskem
Application of Thermowhite thermal insulation to a segment created by 3D printing



Aplikace stříkané pěny Icynene do dutiny segmentu stěnové obvodové konstrukce
Application of Icynene spray foam in the cavity of a segment of the perimeter wall structure

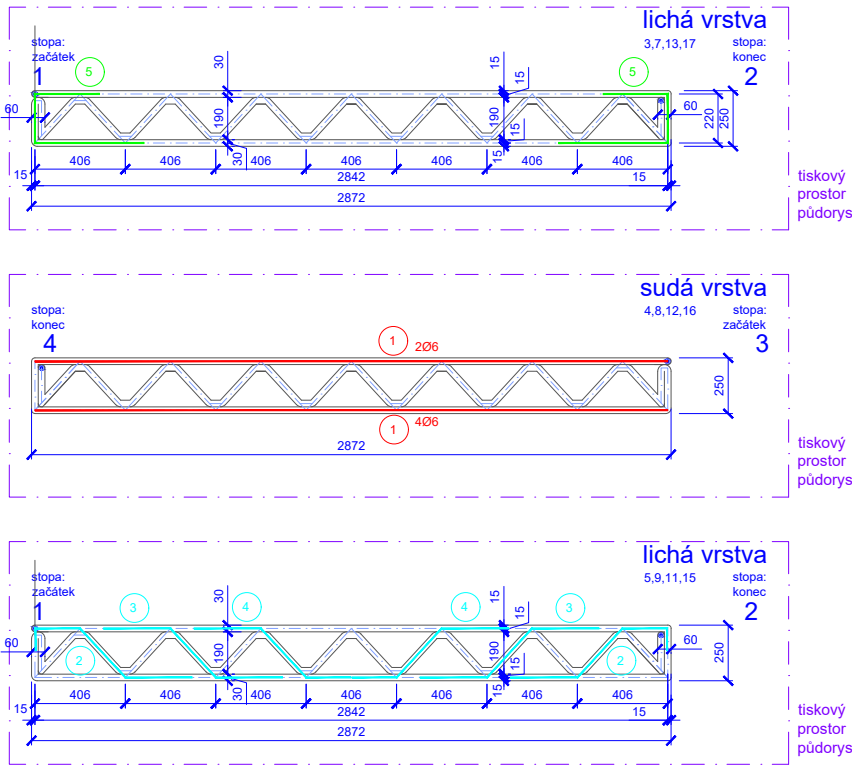
POŽÁRNÍ ODOLNOST TIŠTĚNÝCH KONSTRUKCÍ

FIRE RESISTANCE OF THE PRINTED STRUCTURES

Jedním z nejdůležitějších požadavků, kladených v současné době na nosné konstrukce, je jejich požární odolnost. V rámci projektu nebyla požární odolnost tištěných prvků zkoumána. Je však, s ohledem na malou tloušťku tištěných prvků, zřejmé, že otázky požární odolnosti budou při návrhu tenkostěnných nosných konstrukcí hrát důležitou roli. Otázky požární odolnosti prvků, zhotovených 3D tiskem cementových kompozitů by bylo vhodné řešit v rámci dalšího výzkumu.

STROPNÍ NOSNÍKY
FLOOR BEAMS

Kromě stěnových prvků byly v rámci projektu vyvinuty příhradové stropní nosníky. Využití technologie 3D tisku pro vodorovné konstrukce má svá omezení, plynoucí jednak z nemožnosti „tisku do vzduchu“ a dále z nutnosti vyztužování ohýbaných prvků v tažených oblastech. Z toho plyne, že 3D tisk vodorovných nosných prvků bude pravděpodobně omezen na prefabrikáty, tištěné na tuhé podložce. Na následujícím obrázku je příhradový nosník stropu, vytištěný tiskovou stopou šířky 30 mm. Nosník je vyztužen betonářskou výztuží profilu 6 mm, vloženou mezi tiskové vrstvy ručně v průběhu tisku. Nosná výztuž je uložena pouze do spodního pasu a do tažených diagonál. Horní tlačný pas je konstruktivně vyztužen dvěma profily betonářské výztuže o průměru 6 mm, s ohledem na manipulaci s prvkem při dopravě a montáži. Jde o první prototyp nosníku, vyrobený a testovaný především za účelem ověření vzájemné soudržnosti tiskových vrstev a soudržnosti tiskové směsi s výztuží. Nosník na obrázku má délku 2970 mm, s ohledem na prostorové možnosti tiskového a zkušebního zařízení v laboratoři. Je ale navržen tak, aby vyhověl pro bytovou stavbu na teoretické rozpětí 5,62 m. Příhradové nosníky na rozpětí 5,62 m lze navrhnout tak, aby srovnaná tloušťka materiálu byla kolem 100 mm.

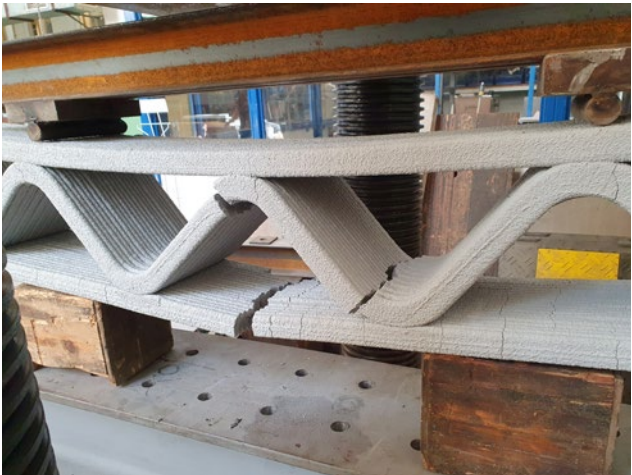


Tvar a výztuž příhradového nosníku
The shape and reinforcement of the floor truss beam

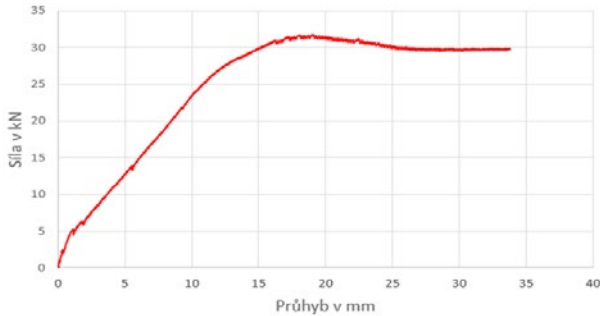
Testy vazníku, zatěžovaného čtyřbodovým ohybem, ukazují velmi dobré chování prvku, u kterého se neprojevily žádné známky delaminace tiskových vrstev a způsob porušení, kdy došlo k přetržení výztuže dolního pasu, byl v dobré shodě s předpokladem statického výpočtu.



Zatěžovací zkouška příhradového nosníku v laboratoři
Load test of a truss beam in the laboratory



Detail porušení prvku přetržením výztuže spodního pasu
Detail of element failure when reinforcement of the lower chord broke



Záznam ze zatěžovací zkoušky nosníku čtyřbodovým ohybem
Record of the load test of the beam by four-point bending

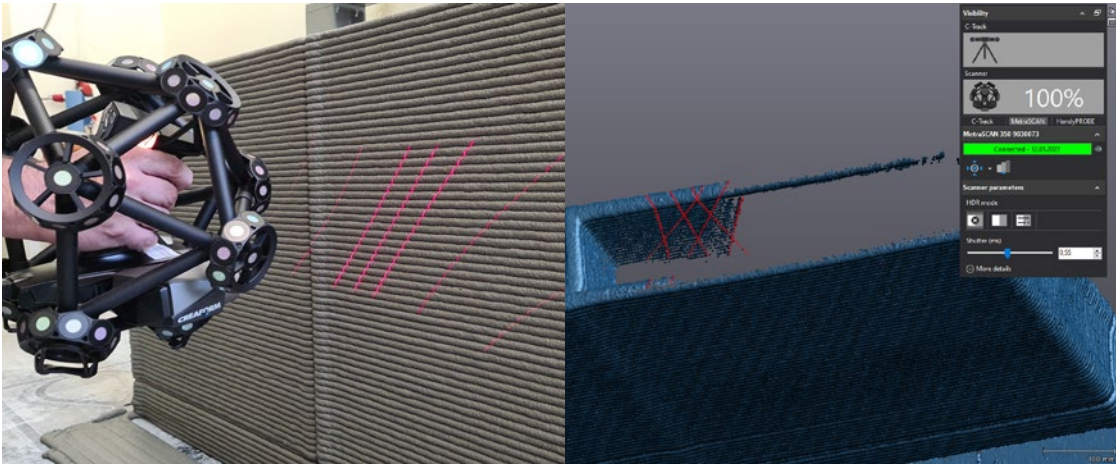
Výhodou příhradových stropních nosníků v porovnání s plnou železobetonovou deskou je úspora betonu. V následující tabulce je porovnání spotřeby materiálů plné stropní desky, působící jako prostý nosník na rozpětí 5,62 m při stejném zatížení, odpovídající bytovému domu.

	Příhradové nosníky	Plná železobetonová deska
Tloušťka stropu	250 mm	225 mm
Kvalita betonu	C40/50	C30/37
Kvalita výztuže	B500B	B500B
Spotřeba betonu	107 l/m ²	225 l/m ²
Spotřeba výztuže	15,25 kg/m ²	7,49 kg/m ²

Porovnání spotřeby betonu a výztuže pro plnou železobetonovou desku a příhradový nosník
Comparison of concrete and reinforcement consumption for a solid reinforced concrete slab and a truss beam

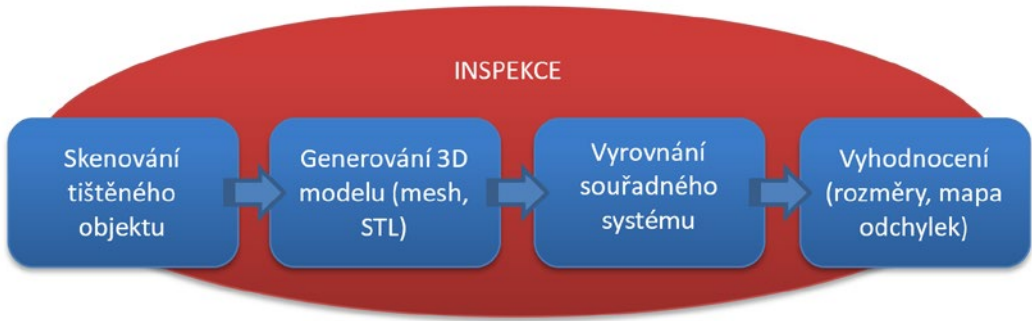
SLEDOVÁNÍ ZMĚN TVARU STĚNOVÉHO SEGMENTU 3D SKENOVÁNÍM
MONITORING CHANGES IN THE SHAPE OF A WALL SEGMENT BY 3D SCANNING

Metoda 3D skenování tvaru stěnového segmentu byla použita jednak pro kontrolu tvaru a jeho změn v důsledku reologických změn při tisku prvků a dále ke sledování rozměrových změn segmentu v důsledku smršťování cementového kompozitu v průběhu jeho tuhnutí a tvrdnutí. K digitalizaci vytištěných objektů byl použit optický 3D skener MetraSCAN 350 od společnosti CREAFORM. Jedná se o dvoukamerový bezkontaktní systém, který pro polohování v 3D prostoru používá optickou trekovací jednotku – C-track. Díky ní je možné skenovat v prostoru o objemu až 16,6 m³ bez nutnosti lepit na měřený objekt referenční značky. Přesnost systému v celém pracovním prostoru je dle výrobce až 0,12 mm. Rozměrová a tvarová kontrola (tzv. inspekce) vytištěných prvků následně probíhala v SW GOM Inspect.



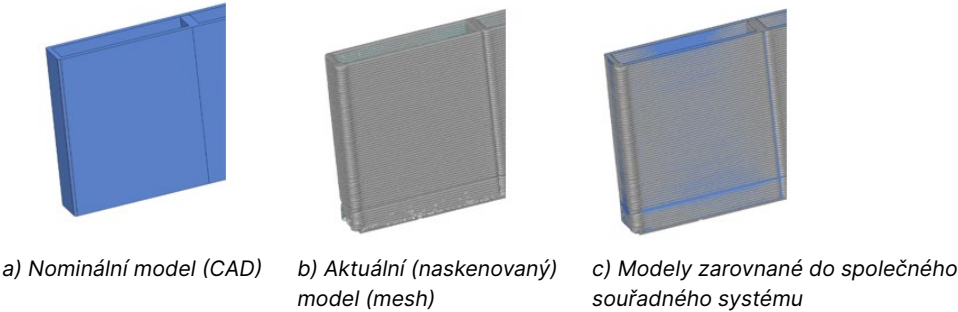
Ukázka skenování stěnového prvku
Example of scanning a wall element

Po kalibraci skenovacího systému byla provedena digitalizace požadovaného objektu podle předchozího obrázku. Výsledkem skenovacího procesu je velké množství bodů popisujících povrch objektu (tzv. mrak bodů). Z něho je po dokončení digitalizace zpravidla vypočítána optimalizovaná polygonální síť (tzv. mesh, model ve formátu STL). S tím lze již dále pracovat v inspekčním SW. Zde je nejprve nutné model zarovnat do souřadného systému – nejčastěji registrací na nominální model nebo na předchozí (referenční) sken. Poté je prováděna samotná inspekce – tedy měření rozměrů a úhlů, deformací, generování barevných map odchylek, výpočet tolerancí tvaru a polohy apod.

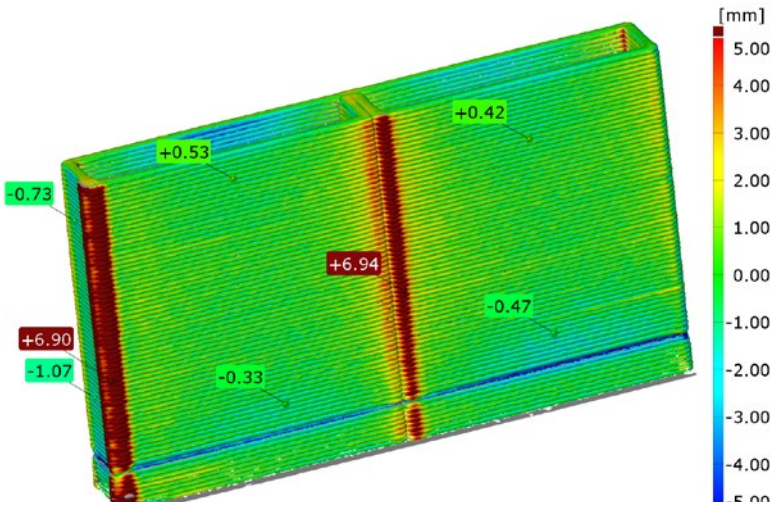


Kroky inspekce s využitím 3D skeneru
Inspection steps using a 3D scanner

V principu lze 3D model získaný digitalizací vytištěného objektu (tzv. mesh) využít buď ke kontrole přesnosti samotného 3D tisku nebo pro hodnocení deformací prvku v průběhu času (např. pro účely analýzy procesu smršťování, které je jednou z hlavních příčin možného vzniku trhlin). V prvním případě, tedy při kontrole přesnosti 3D tisku, je naskenovaný model reálného objektu porovnán s nominálním CAD modelem (obr. níže), který byl podkladem pro generování drah tiskového zařízení. Výsledkem takové analýzy mohou být jak informace o rozměrech, tak komplexní 3D výstup rozměrových odchylek ve formě např. barevné mapy (viz následující obrázky) nebo inspekčního řezu.

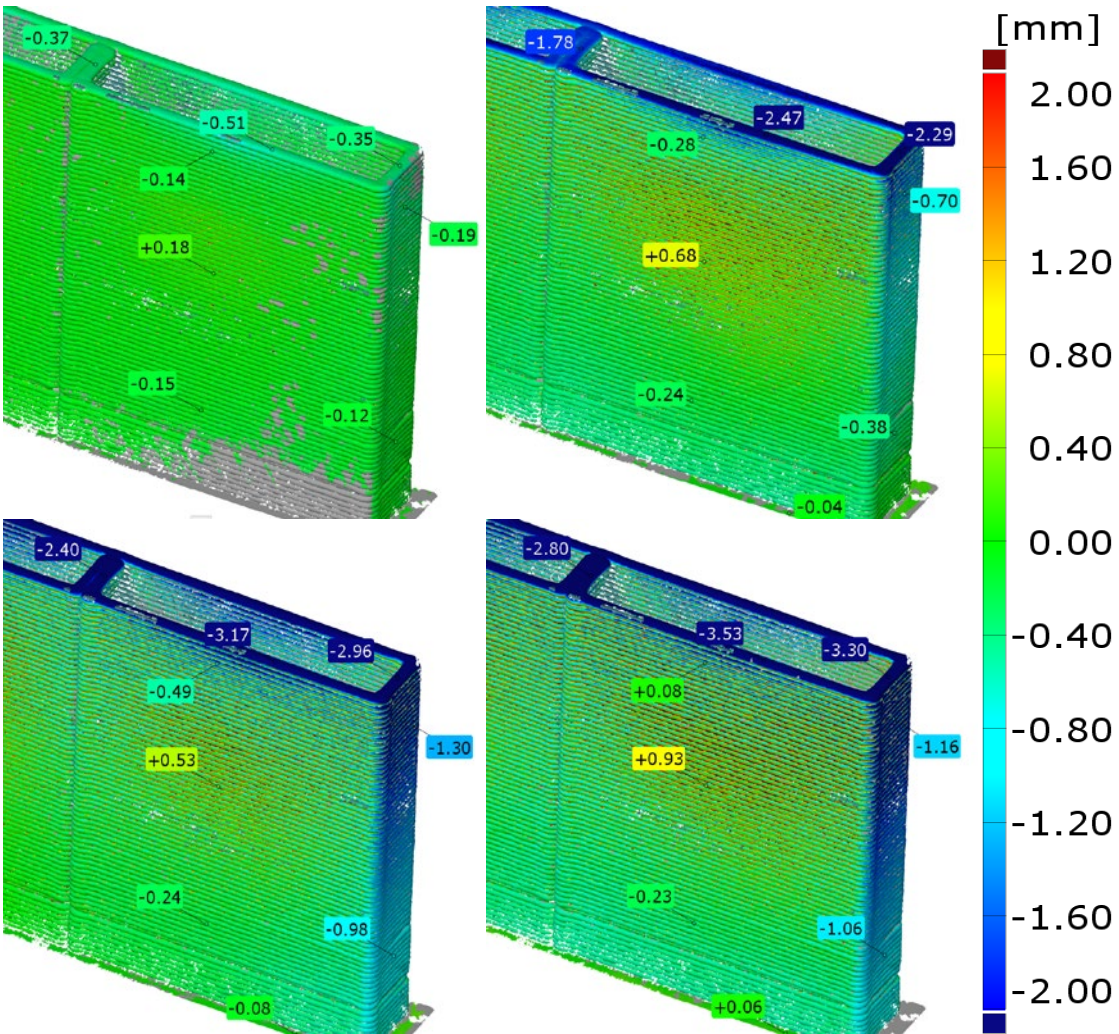


Modely pro inspekci rozměrové přesnosti 3D tisku (nominální vs. aktuální model)
Models for inspection of dimensional accuracy of 3D printing (nominal and current model)



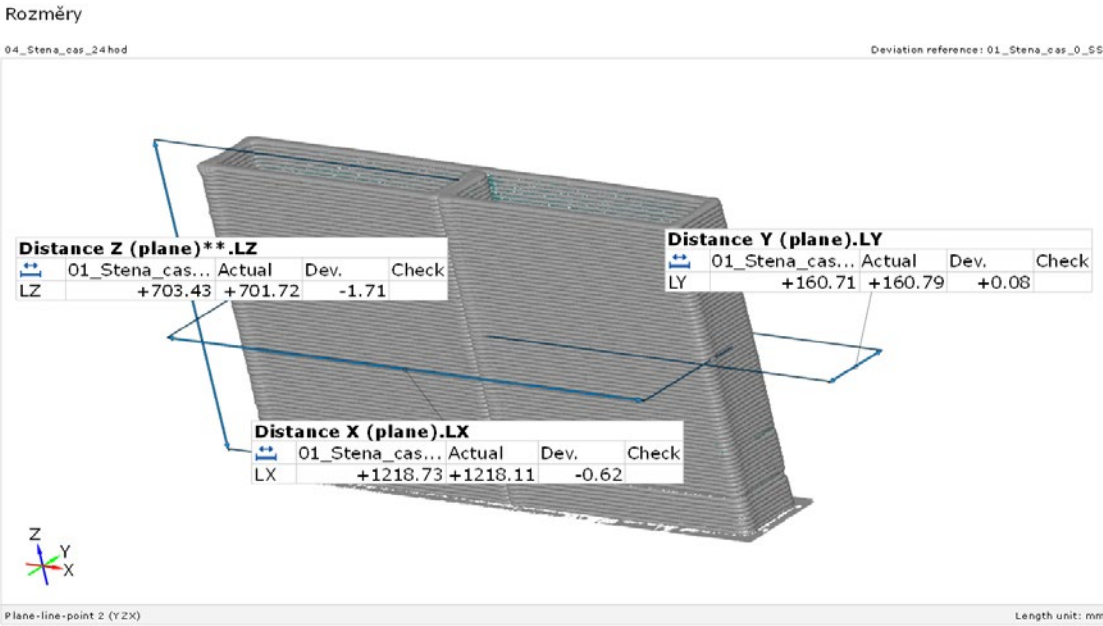
Barevná mapa vyjadřující odchylky mezi tištěným a nominálním modelem
Coloured map showing deviations between the printed and the nominal model

Druhou možností je porovnání skenovaných modelů mezi sebou a určení vzájemných odchylek v čase. Tak lze např. vyhodnotit deformace prvku bezprostředně po tisku nebo měřit rozměrové změny v důsledku smršťování cementového kompozitu v průběhu jeho tuhnutí a tvrdnutí. Ukázka této analýzy je uvedena v následující grafice. V tomto konkrétním případě bylo provedeno skenování vytištěného stěnového prvku o rozměrech 1190 × 130 × 700 mm, průměr tiskové trysky byl 20 mm. Skenování bylo provedeno opakovaně - bezprostředně po dokončení tiskového procesu (čas „0“), dále s odstupem 15 minut, 1 dne, 7 dní a 28 dní.

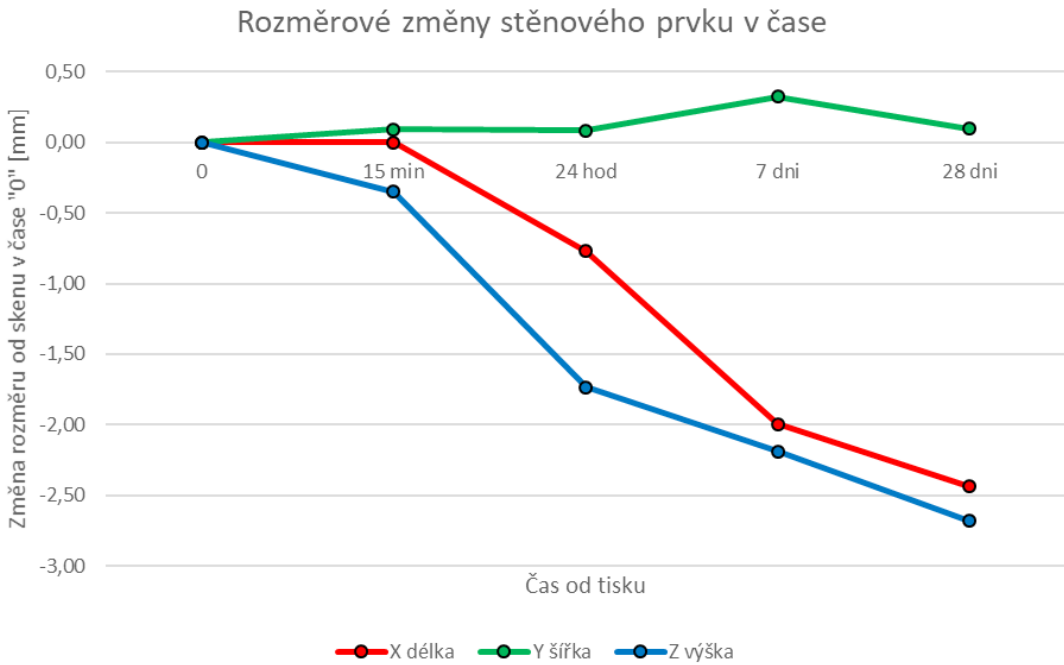


Barevná mapa vyjadřující odchylky od referenčního vzorku v čase „0“
Coloured map showing deviations from the reference sample at time "0"

Z barevných map odchylek je na první pohled patrné, že u tištěného dílu dochází ke smrštění především ve směru délky vzorku (osa X) a jeho výšky (osa Z). Po 24 hodinách došlo v podélném směru o zkrácení vzorku v průměru o cca 0,75 mm, na výšku vzorek poklesl dokonce o cca 2 mm. Po 28 dnech, kdy by mělo být dosaženo požadované pevnosti, bylo celkové smrštění v ose X kolem 2,5 mm (což činí zhruba 0,2 %), v ose Z kolem 3 mm (tedy zhruba 0,4 %). Ve směru šířky vzorku, tedy směru Y, se stěnový prvek dle provedeného měření nijak výrazně v čase rozměrově neměnil. Uvedené rozměrové změny tří základních rozměrů - délky (X), šířky (Y) a výšky (Z) - byly v inspekčním SW dále kontrolovány metodou měření vzdáleností proložených rovin. Příklad měření je na následujících obrázcích. I toto měření potvrdilo výše uvedený trend smrštění v ose X a Z.



Měření rozměrů stěnového prvku metodou proložení rovin
Measuring the dimensions of a wall element by interlacing planes



Smrštění stěnového prvku v čase
Shrinkage of the wall element over time





06

POSTUP TISKU NA STAVBĚ, LOKALIZACE ROBOTU PRINTING PROCEDURE ON CONSTRUCTION SITE, ROBOT LOCALISATION

Jan Koprnický, Milan Kolář, Lukáš Hubka, Jiří Suchomel

Koncept realizace stavby pomocí našeho tiskového stroje vychází z předpokladu postupného tisku svislých i vodorovných konstrukcí po jednotlivých sekcích – částech objektu. Mezi sekcemi se robot musí přesunovat, a po ustavení také zorientovat. Robot musí vždy přesně vědět, kde se na stavbě nachází a jak je otočený – potřebuje se lokalizovat. Navrhli jsme, otestovali a detailně popisujeme takový autonomní lokalizační systém stroje, který dokáže splnit nejen základní úlohu identifikace polohy robotu v prostoru, ale disponuje i schopností podílet se na navigaci tiskové hlavy.

The concept of constructing buildings with our printing machine is based on step-by-step printing of vertical and horizontal structures by individual sections – parts of the object. The robot has to move between the sections and also orientate itself after setting up. The robot must always know exactly where it is on the construction site and which way it is turned – it needs to locate itself. We designed, tested, and described in detail such autonomous localisation system for the device, which can fulfil the primary task of identifying the robot's position in space and also has the ability to participate in the navigation of the print head.

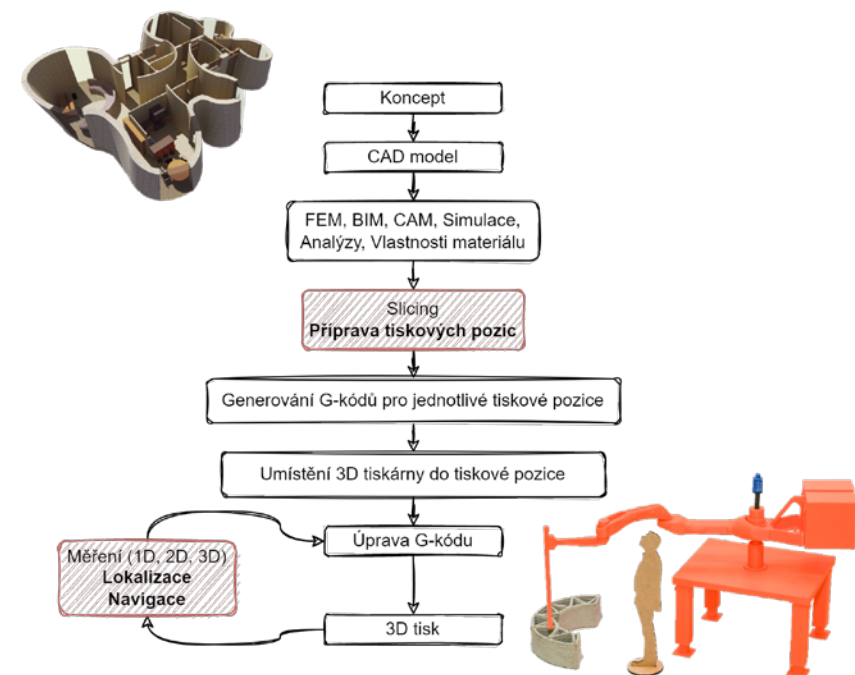
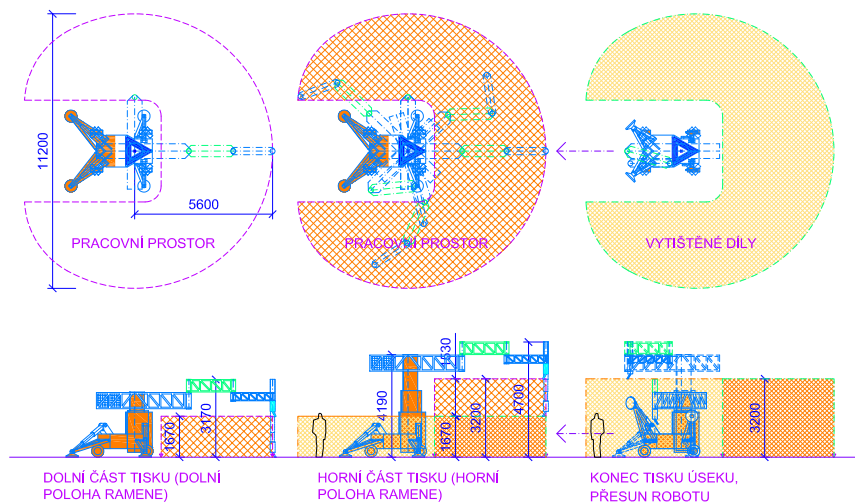


Schéma činností projektu 3DSTAR (vyznačení obsahu kapitoly 6)
Diagram of 3DSTAR project activities (Chapter 6 content outline)

Princip postupného tisku vychází z užití pohyblivého, relativně malého a lehkého tiskového zařízení – tiskového robotu, který se postupně přemísťuje po staveništi do jednotlivých tiskových pozic, v nichž tiskne stavební konstrukce v rozsahu svého pracovního prostoru. Půdorysně je pracovní prostor vyvíjeného tiskového robotu dán uvažovanou délkou tiskového ramene 5,6 metru. Svislý rozměr pracovního prostoru tiskového robotu je omezen jeho konstrukcí na výšku jednoho podlaží. Pro běžné typy obytných a občanských staveb se jeví pracovní výška do cca 3,2 metru jako dostatečná. U tohoto druhu staveb je možno využít nosnosti vytištěných stropních konstrukcí pro osazení tiskového robotu pro tisk následujících podlaží.



Rozměry pracovního prostoru tiskového robotu
Dimensions of working space of the printing robot

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

POSTUP TISKU

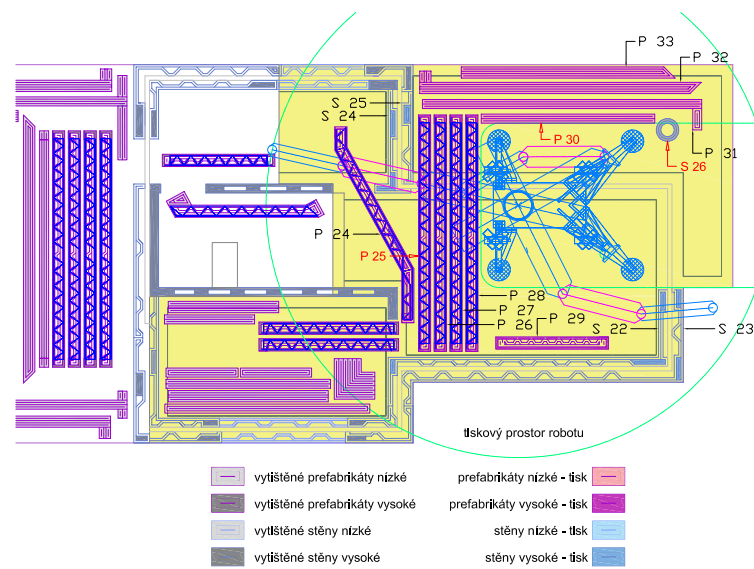
PRINTING PROCEDURE

Princip průběhu tisku byl analyzován na studii třípodlažního domu Trial House 01, zpracované pro simulaci situací během tisku a jejich dopadů na konstrukční řešení, jmenovitě na členění domu na jednotlivé tištěné díly.



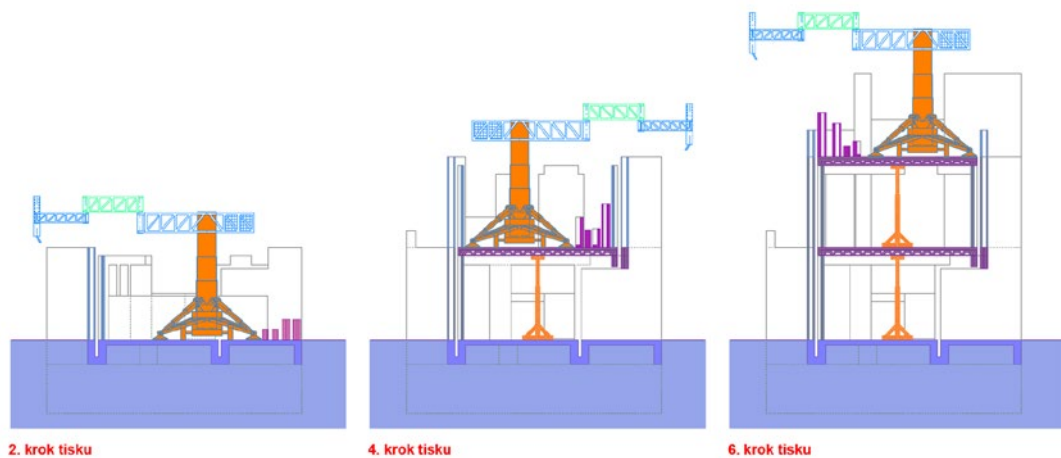
Trial House 01
Trial House 01

Ve studii je uvažováno s přemístěním robotu postupně do 18 tiskových pozic. 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.



Trial House 01 – jedna z tiskových pozic robotu
Trial House 01 – one of the robot's print position

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 vždy přemístěn jeřábem a uložen na stropní konstrukci dolního podlaží, smontovanou ze staveništních prefabrikátů vytištěných v předchozích pozicích. Robot následně tiskne konstrukce v daném podlaží. Podkladová deska a stropní konstrukce jsou dimenzovány tak, aby vyhověly zatížení tiskovým robotem a tisknutými prefabrikáty. V případě potřeby mohou být stropy během tisku podepřeny pomocnými teleskopickými stojkami.

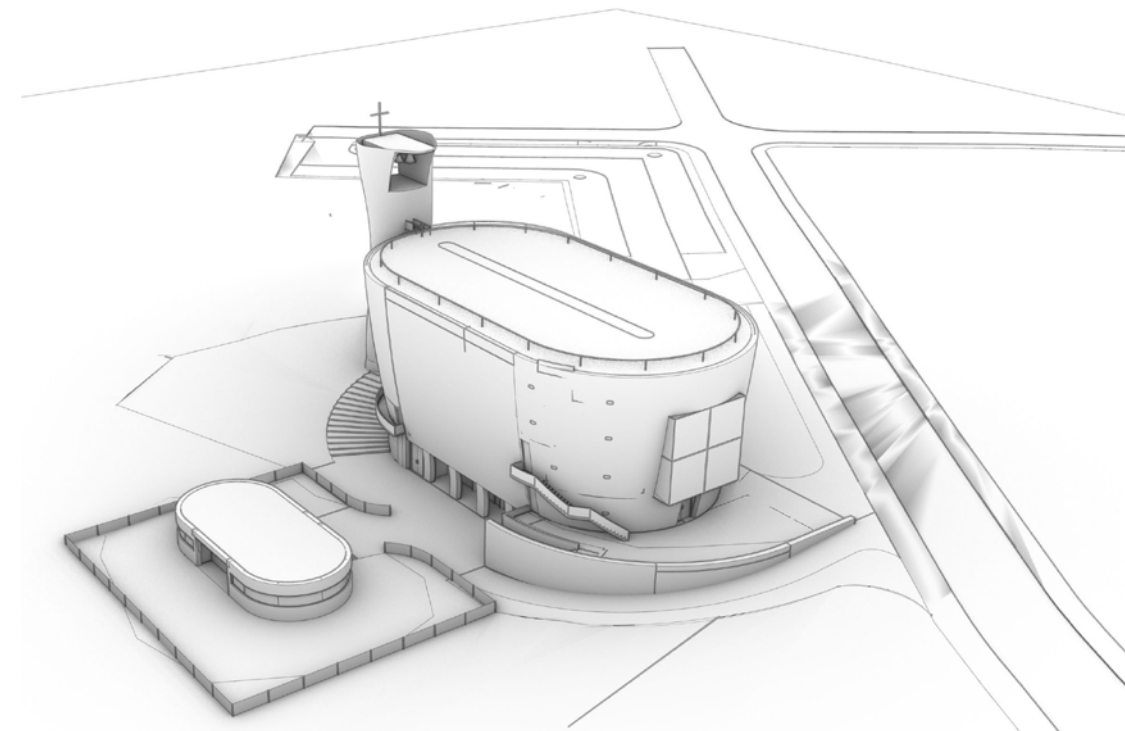


Trial House 01 – pomocné vyztužení stropů během tisku
Trial House 01 – auxiliary reinforcement of ceilings during printing

Časově je v tomto případě realizace rozdělena do 9 kroků. Jednotlivé kroky pokrývají vždy jednu úroveň domu a zahrnují 2 – 4 pozice robotu. Po dokončení každého kroku je robot jeřábem přemístěn na další (vyšší) úroveň domu. S ohledem na dobu pro nabytí potřebné pevnosti tištěných dílů je cyklus těchto kroků, předpokládán, sedmidenní. 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.

Tisk staveništních prefabrikátů na stavbě vyžaduje dostatečnou plochu pro jejich umístění. Ve studii Trial House 01 se podařilo všechny potřebné prefabrikáty umístit dovnitř půdorysu budovy, i když často za cenu minimálních odstupů mezi tištěnými díly. Pro následnou manipulaci s tištěnými prefabrikáty bylo ale zapotřebí uvažovat s další upravenou plochou mimo půdorys domu.

Pro porovnání byla vypracována podobná studie realizace větší budovy, která se týkala hypotetické možnosti tisku kostela v Neratovicích. Jako podklad byl, se svolením autora, užít architektonický návrh prof. Zdeňka Fránka.



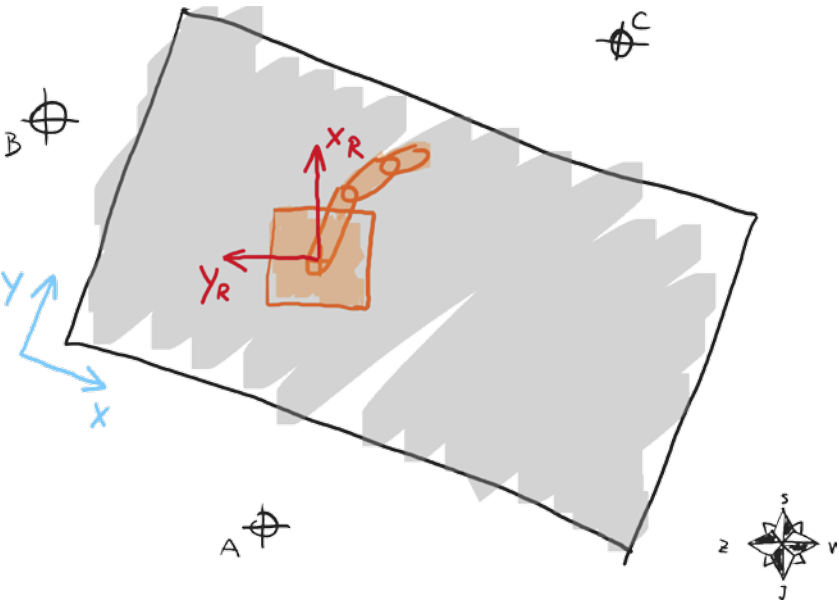
Kostel v Neratovicích
Church in Neratovice

Také u této řádově větší a složitější stavby bylo ověřeno, že půdorys stavebního objektu může být při vhodné organizaci postupu dostatečný pro tisk prefabrikátů. Pro manipulaci s nimi je ale zapotřebí další plocha.

Zpracované simulace procesu tisku a následné kompletace stavby z na místě tištěných prefabrikátů potvrdily možnost využití postupného tisku pro malé a středně velké budovy. Z obou studií vyplynul zásadní význam koordinace stavebního řešení s projektem postupu tisku. Rozměry pracovního prostoru tiskového robotu a organizace postupu tisku významně spoluurčují konstrukční řešení tištěné budovy.

LOKALIZACE A NAVIGACE 3D TISKOVÉHO ROBOTU
LOCALISATION AND NAVIGATION OF THE 3DPRINTING ROBOT

Lokalizace stroje na pracovišti je klíčovou otázkou pro dosažení akceptovatelně přesné polohy budoucích konstrukcí a polohy objektu v prostoru. Je důležité si uvědomit, že se nejedná jen o problém přesného umístění klíčových bodů stavební konstrukce, jako v případě aktuálně realizovaných staveb, ale o kontinuální dosahování požadované přesnosti polohy stroje a jeho pracovního nástroje na pracovišti. Naším cílem je navíc realizovat lokalizaci stroje i měření polohy pracovního nástroje, pokud možno pomocí jednoho přístroje nebo senzoru. Aktuálně se postupuje při zaměření stavby tak, že se pomocí geodetických přístrojů zaměří jeden či více orientačních bodů. Stavba se pak dále rozměřuje interně v souřadném systému vztaženém k těmto orientačním bodům. Využívá se zejména toho, že (manuální či poloautomatizované) měření vzdáleností a úhlů je možné s relativně vysokou přesností. I když mají řemeslníci k dispozici mnoho různých pomůcek a nástrojů na vyměření základních stavebních konstrukcí i dalších prvků, je takové měření časově náročné a náchylné k (lidským) chybám. Digitalizace layoutu stavby do podoby BIM (BuildingInformation Modeling) je prvním krokem v automatizaci celého postupu. Při realizaci stavby pomocí 3D tiskového stroje předpokládáme specifický postup zaměření stavby a jednotlivých stavebních konstrukcí. Výchozím předpokladem je opět manuální zaměření jednoho či více orientačních bodů geodetem. Po stroji se tak nepožaduje orientace pomocí GPS i proto, že dosahované přesnosti nejsou akceptovatelné. Stroj se ale naproti tomu musí autonomně orientovat (odvodit si svoji polohou) v definovaném prostoru staveniště. Naprostá autonomie při orientaci (nalezení pozice) stroje v neznámém prostředí by byla jistě vítanou výhodou a významným krokem v automatizaci celého procesu, nicméně to není naším aktuálním cílem.



Situační nákres souřadných systémů stavby a robotického systému (xy – souřadný systém stavby, xRyR – souřadný systém robotu, ABC – vytyčené body)
Site plan of the coordinate systems of the building and the robot system (xy – coordinate system of the building, xRyR – coordinate system of the robot, ABC – marked points)

V našem konceptu úlohy 3D tisku stavebního objektu předpokládáme, že bude nutný a možný přesun stroje po staveništi tak, aby svým pracovním rozsahem v jednotlivých krocích postupně pokryl celý konstruovaný objekt. Přesun mezi jednotlivými pozicemi pro tisk se předpokládá za pomoci jeřábu, případně díky vlastnímu mobilnímu podvozku. Přesun bude dávkový, tedy jednorázově před tiskem v určité oblasti. Při tisku samotném se změna polohy stroje na staveništi nepředpokládá, ba přímo vylučuje. Výběr vhodné pozice a velikosti sekce pro tisk je samostatnou otázkou pokročilé algoritmi-zace a optimalizace tiskové úlohy robotu. S přesunem robotu souvisí opakující se požadavek na jeho ustavení, přesněji na jeho přesnou lokalizaci na staveništi. Lokalizace musí být provedena vzhledem k souřadnému systému stavby a výstupem musí být jak poloha v rámci tohoto souřadného systému, tak orientace vůči osám souřadného systému.

Jen tak lze zajistit, že z nové pozice bude možné pokračovat v tisku s dostatečnou přesností a správným směrem. Je zřejmé, že vysoká přesnost měření při ustavení robotu do nové pozice povede k menším chybám při samotné tiskové úloze. Zejména kvalita soutisku je značně závislá na precizně změřené poloze robotu a jeho orientaci. Na druhou stranu je třeba podotknout, že vysoká přesnost při lokalizaci není jediným faktorem ovlivňujícím finální přesnost stavby. Při rozhodování o konečné kvalitě tisku hraje důležitou úlohu i samotná kinematika a dynamika robotu, stejně jako vlastnosti směsi, ze které se tiskne. Je však rozhodně možné konstatovat, že nepřesná lokalizace bude jistě zdrojem nepřesností při tisku. Zde je vhodné si povšimnout, že klíčem není přesné umístění tiskového robotu „na značku“ v přesně definovaném úhlu otočení. Naopak. Na samotnou přesnost umístění robotu na staveništi jsou relativně malé nároky. Rozhodující z hlediska dokonalého provedení stavebních tiskových úkolů robotem je precizní zaměření jeho pozice po ustavení a určení úhlu natočení. Za předpokladu, že robot je umístěn dostatečně blízko navrhované pozici, může obsloužit původně navrhovaný prostor a zrealizovat korektně a přesně svůj tiskový úkol.

PŘEHLED PROJEKTŮ S LOKALIZACÍ ROBOTICKÝCH STAVEBNÍCH STROJŮ
OVERVIEW OF PROJECTS WITH LOCALISATION OF ROBOTIC CONSTRUCTION MACHINES

Řešení 3DSTAR vychází z mobilní platformy 3D tiskového robotu. Pokud se budeme držet klíčového slova „mobilní“ a zároveň „3D tisk budov“, nenajdeme příliš mnoho srovnatelných projektů. Značná část projektů 3D tisku budov z betonu využívá portálový (kartézský, případně delta) robotický systém, podobně jako testovací zařízení TestBed 3DSTAR. Lokalizace koncového bodu (tiskové hlavy) je dána pevnými kinematickými vazbami statického (kotveného) robotického systému. Lokalizaci v našem pojetí se tyto projekty nezabývají. Zaměříme-li se na projekty mobilních robotických systémů ve stavebnictví schopných pracovat na stavbě (tzn. in-situ) s připevněnou nějakou formou robotického ramene, počet projektů se drobně zvýší. Přesto se jedná o jednotky projektů. Bohužel ne u všech projektů shrnutých v následující tabulce je jasné, jak je realizována lokalizace, případně navigace robotického systému. U některých z nich je využit laser trackovací systém, geodetické robotické totální stanice, případně kombinace lidar systémů a IMU (InertialMeasurement Unit) jednotek nebo systémů zpracování obrazové informace.

Projekt	Popis stroje	Web
Hadrian X (FBR, AU)	Mobilní stroj pro 3D tisk z tvárníc	https://www.fbr.com.au
DCP (MIT, USA)	Mobilní víceúčelová platforma pro realizaci výkopových prací, aditivní formy výroby, 3D tisk z PU pěny	https://www.media.mit.edu/projects/digital-construction-platform-v-2/overview/
RC 3DP (CyBe, NL)	Mobilní 3D tiskový robot pro tisk z betonu	https://cybe.eu/
In Situ Fabricator (ETH, CH)	Víceúčelový mobilní stavební stroj, svařování, 3D tisk z prefabrikátů	http://www.dfab.ch/portfolio/in-situ-fabricator/
Maxi Printer (Construction 3D, FR)	Mobilní 3D tiskový robot pro tisk z betonu	https://www.constructions-3d.com
Frank (ApisCor, USA)	Mobilní 3D tiskový robot pro tisk z betonu	https://apis-cor.com/
Jaibot (Hilti, LU)	Mobilní robotický vrtací stroj	https://www.hilti.group/
YHNOVA (BatiPrint)	Mobilní 3D tiskový robot pro tisk z PU pěny	https://www.batiprint3d.com/en
BAUBOT (Baubot, AUT)	Víceúčelový mobilní stavební stroj, svařování, 3D tisk z keramiky	https://www.baubot.com/
CONPrint3D (TU Dresden, DE)	Mobilní 3D tiskový robot pro tisk z betonu	https://tu-dresden.de/

Posledním projektem, který stojí za zmínku, je cca dvacetimetrový horizontální distributor betonové směsi vyvinutý firmou Takenaka v 80. letech 20. století. Kinematickou strukturou je podobný robotickému systému Printing Mantis 3DSTAR projektu. Tento distributor realizuje rozšířenou scara strukturu a využívá algoritmů vyhýbání se překážkám. Navigace koncového bodu však nebyla automatizovaná, ale realizoval ji lidský operátor sedící nedaleko vyústění potrubí. Přesnost navigace nebyla řešena, protože se jednalo o systém pro rozlévání betonové směsi, nikoli ke kladení extrudovaných vrstev na sebe, tak jako je tomu v projektu 3DSTAR.

NAVRHOVANÉ KONCEPTY LOKALIZACE STROJE V PROJEKTU 3D STAR
PROPOSED MACHINE LOCALISATION CONCEPTS IN THE 3D STAR PROJECT

Pokud se zaměříme na způsob zjištění polohy robotu na staveništi, máme velmi široké možnosti využití rozličných typů a principů měření, resp. senzorů a čidel. Problematika automatizovaného přesného určení polohy v prostoru není nová. Inspirativních nápadů je v literatuře popsáno několik. Prostým výčtem můžeme uvést technologie založené na třech různých principech.

Princip	Název technologie
Konvenční rádiové vlnění	Wi-Fi Bluetooth & Bluetooth Low Energy (BLE) Zigbee Ultra-wide band (UWB) Radio frequency identification (RFID) Indoor Global Navigation Satellite System (GNSS) Frequency modulation radio (FM-radio)
Neelektromagnetické vlnění	Ultrazvuk Geomagnetické vlnění
Elmg. vlnění ve viditelném spektru	Rozpoznávání obrazu Laser

Nejen pro náš účel je podstatná myšlenka, že primárně venkovní (satelitní) pozicovací systémy nemohou poskytnout dostatečnou a uspokojící přesnost, jak kvůli nízké přesnosti měření pomocí GNSS signálu, tak proto, že zejména v městské zástavbě může dojít k významnému blokování GNSS signálu. Z toho důvodu je nezbytné přemýšlet o vhodných vnitřních pozicovacích systémech, které jako jediné mají šanci dodat těm vnějším systémům požadovanou přesnost. Podobný přístup je aplikován v navigačních systémech automobilů, kde je využíván GNSS signál spolu se signály z vozu, tzv. deadreckoning. Zároveň se však nesmí zapomínat na nezbytnou robustnost a odolnost senzorů, které na stavbě mohou být vystaveny obtížným klimatickým podmínkám v podobě intenzivního slunečního svitu, zvýšené hladiny hluku, vibracím, prachu, působením vody a vysokých teplotních rozsahů.

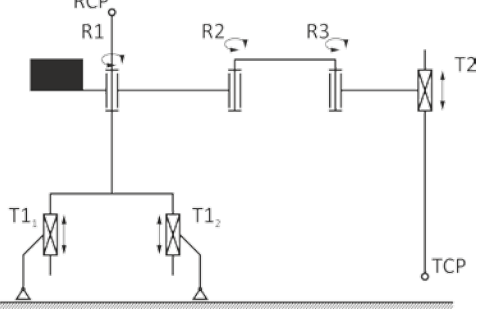
V našich úvahách jsme soustředili pozornost na radarové vzdálenostní senzory, ultrasonické senzory a optické senzory, včetně camera vision based. Další systémy využívající Wi-Fi, Bluetooth či RFID nedokáží poskytnout dostatečnou přesnost. Jiné, jako např. UWB (Ultra-wide band), mají sice vyšší přesnost, i když většinou ne dostatečnou pro tuto aplikaci, ale především mají i vyšší cenu.

Při možné komplikované struktuře stavebních konstrukcí by se jako optimální jevily senzory, které nepracují na optickém principu měření vzdálenosti dvou bodů, protože obecně není jisté, že dané dva body budou mít vždy volnou optickou trasu, čili nebude mezi nimi nějaká překážka či již vytištěný objekt. Bohužel takové senzory aktuálně nemají dostatečnou přesnost určení vzdálenosti, případně pozorovacího úhlu. Přistoupili jsme tedy k optickému měření vzdálenosti využívající laser (Lidar), s vědomím toho, že pracujeme s omezením v podobě zajištění viditelnosti měřeného bodu ze senzoru. Výhodou lidarů může být jeho schopnost změřit vzdálenost a úhel od měřeného bodu i překážek ve svém okolí s rozumně vysokou mírou přesnosti, a přitom provést sken okolí dostatečně rychle. Navíc je u některých modelů a typů lidarů možné detekovat a rozpoznat vybrané body v okolí (např. na základě zvýšené odrazivosti).

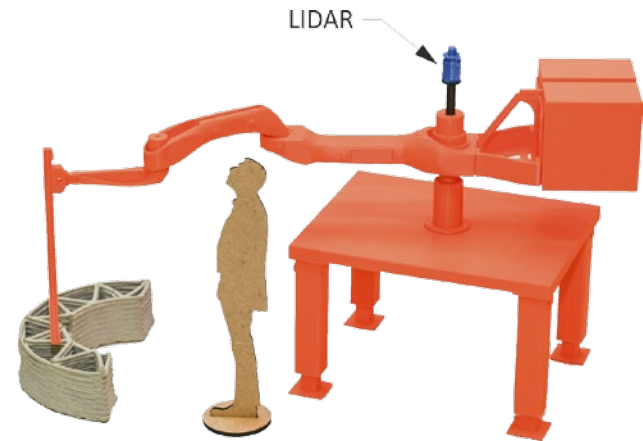
Nabízí se i využití geodetického přístroje tzv. totální stanice. Totální stanice pracuje na principu laseru spojeného s camera-vision, kdy systém umí sám vyhledat optický hranol (opticalprism). Stanice poskytují informaci o poloze sledovaného bodu obvykle s vysokou přesností, a navíc mají schopnost autonomně vyhledat sledovaný bod v okolí. Extrémní možností je nasazení strojírenských detekčních systému typu laser tracker, které mají přesnost určení polohy v prostoru v řádech tisícín milimetru. Proti jejich nasazení však jednoznačně mluví jejich velmi vysoká pořizovací cena, komplikované nastavování a dále i jejich malá robustnost.

Dalším úkolem, který chceme vyřešit, je navigace tiskové hlavy robotu (TCP – Tool Centre Point). V případě jistoty dostatečné pevnosti konstrukce a vhodného senzorického vybavení jednotlivých pohyblivých elementů robotu – kloubů je vhodné postupovat standardní cestou, která se u průmyslových robotů využívá. Průmyslový robot pracuje s interním senzorickým vybavením, které má velmi vysokou přesnost. Na druhou stranu zatížení průmyslového robotu je velmi limitované i proto, aby nedocházelo k odchylkám při měření a výpočtu polohy koncového bodu stroje. Průmyslové roboty jsou tak obvykle velmi masivní. Náš tiskový robot by naopak měl mít hmotnost co nejnižší, aby jej bylo možné snadno transportovat. Další cestou při určování polohy TCP v prostoru je instalace nějakého typu vnějšího odměřovacího systému, který by byl dostatečně robustní a přesný. Zároveň s tím se dosáhne možnosti odlehčit konstrukci při zachování dostatečně přesné informace o poloze koncového bodu. Při obecné konstrukci robotu je to úkol značně obtížný, protože pracovní oblast je obvykle výřezem prostoru a koncový bod robotu se v něm může libovolně pohybovat, většinou i v libovolném prostorovém úhlu natočení koncového bodu a může být mnohdy skrytý za překážkou, svým tělem nebo břemenem. Specifické požadavky na konstrukci i pohyb ramen a hlavy tiskového robotu vytváří značně odlišnou situaci. Pracovní prostor je sice opět velkým výřezem prostoru, ale tisková hlava i rameno robotu se v pracovní oblasti pohybuje definovaným a relativně omezeným způsobem. Toho se dá při návrhu vnějšího odměřovacího systému vhodně využít a zajistit tak duplicitní informaci k internímu odměřovacímu systému. Tento duplicitní způsob odměřování by měl zajistit zvýšení celkové přesnosti určení polohy TCP s tím, že může fungovat jak kontinuálně, tak v dávkách např. pouze při začátku tisku nové vrstvy apod.

Při vytváření konceptu lokalizačního a navigačního systému v našem projektu 3DSTAR jsme si vytyčili několik cílů a sestavili sadu předpokladů, na základě kterých je tento systém navržen a optimalizován. Primárním cílem je lokalizace stroje v prostoru představovaná bodem RCP (robot center point) s dostatečnou přesností v obou souřadnicích x a y. Přesnost byla stanovena s ohledem na potřeby stavebníků, technické možnosti i cenu zařízení na ±5 mm vertikálního posunu a 0,2° v úhlové orientaci.



Kinematická struktura Printing Mantis s označením lokalizovaného bodu RCP a navigovaného TCP
Kinematic structure of Printing Mantis with RCP localized point and TCP navigated label



Model Printing Mantis s umístěním systému Lidaru
Printing Mantis model with Lidar system location

Lokalizační systém musí zjistit polohu stroje v souřadném systému stavby a jeho rotaci vůči vybrané ose. Samozřejmou vlastností zařízení je schopnost opakované lokalizace stroje. Tím rozumíme stav, kdy je robot v rámci staveniště přesunut na novou pozici a lokalizační systém na povel zjistí souřadnice nové polohy stroje v rámci souřadného systému stavby a orientaci. Vedlejší cíl by měla být schopnost odměřovacího systému navigovat koncový pracovní bod stroje (TCP). Synergie dovedností lokalizace a navigace byla motivována i snahou dosáhnout co nejnižších pořizovacích nákladů, a tedy minimalizací počtu nutných senzorů pro měření polohy/vzdálenosti/úhlu. Využití totální stanice jsme sice také uvažovali, ale primárně jsme se soustředili na řešení pomocí lidarů.

Prvním předpokladem úspěšného tisku je existence dostatečně rovné základové desky stavby tak, aby první tištěná vrstva nemusela kompenzovat zvlnění terénu. Naopak podmínku na rovinnost v místě stání robotu nemáme, protože předpokládáme existenci interního nivelačního systému (s aplikací IMU jednotky), který zajistí, že robot stojí vždy vodorovně. Robot by tak mohl stát i mimo základovou desku, případně být částí svého podvozku na základové desce a částí mimo. Koncept navigačního systému pracuje s předpokladem, že pro přesné určení polohy stroje využijeme měření vzdálenosti od několika pevných bodů – trilaterace a velikosti vybraných úhlů – triangulace zároveň. Naše koncepce pracuje s předpokladem, že aktivní měřicí prvek je umístěn na stroji a snaží se zjistit svoji polohu v prostoru a orientaci pomocí vhodného měření vybraných známých bodů v okolí. Tato koncepce je odlišná od relativně běžně využívaných postupů, kdy aktivní měřicí prvek, nebo dokonce několik prvků, je ve stacionární pozici mimo staveniště a sleduje se poloha vybraného bodu přímo na stroji.

Problematika automatického určení výšky (nulové operační hladiny stroje) je samostatnou problematikou, která je nyní vyřešena poloautomaticky tak, že se odměří vzdálenosti jeho výchozí pracovní roviny od základové desky, případně jiného podlaží, laserovým dálkoměrem v místech, kde je robot podepřen stabilizačními podpěrami a manuálně se vybere informace z toho senzoru, který odpovídá podpěře na základové desce. Pokud žádná ze stabilizačních podpěr není na základové desce a celý stroj stojí mimo ni, musí se momentálně zadat jeho „nulová“ pracovní výška manuálně.

Pro lokalizaci jsou potřeba pevné orientační body stavby. Tyto body jsou z každé pozice stroje alespoň před započítáním tiskové úlohy viditelné a jejich pozice je předem určena geodetickým měřením. Navigačnímu systému stroje jsou souřadnice pevných bodů známy. V ideálním případě tvoří pevné body osy staveniště, ale to není nutnou podmínkou. Dalším předpokladem je přesnost. Jak bylo zmíněno výše, přesnost odměřovacího systému je předpokládána ± 3 mm při lokalizaci stroje na staveništi (otevřený prostor s maximální vzdáleností od měřeného bodu 50 m, statické měření) a ± 5 mm při navigaci TCP v operačním prostoru (kruh s poloměrem pod 6 m, dynamické měření – koncový bod v pohybu). Výhodou lokalizačního systému by byla jeho robustnost, protože prostředí stavby může generovat nepříznivé provozní podmínky, jak již bylo zmíněno. Z uvedeného plyne i rozsah měření. Rozsah pro navigaci by měl být do 6 m, rozsah/dosah měření pro lokalizaci pak ideálně 50 m či více. Orientační body by měly být umístěny mimo základovou desku, aby během stavby nepřekážely v tisku. Jako vhodné se ukazuje umístit reflexní prvky na válcovou plochu o vhodném průměru (více jak 80 mm), a tu pak umístit na stojan. Stojan musí být fixován na geodeticky zaměřenou pozici, být ve svislé poloze a dostatečně vysoký. Akceptovatelnou výškou stojanu, resp. výškou, v níž se nachází reflexní orientační prvek, je minimálně 20 cm nad pracovní výškou stroje, maximálně pak 60 cm nad touto rovinou. V rovině, kde se vyskytují reflexní body, by neměly být žádné překážky bránící ve výhledu stroje na tyto statické orientační body. V případě, kdy se tiskový robot nachází ve vyšším patře, je potřeba orientační body také patřičně vyvýšit. Nabízí se řešení pomocí teleskopického nástavce, případně je možné držáky fixovat do vhodných bodů vnějšího pláště již vytištěné konstrukce nižších pater.

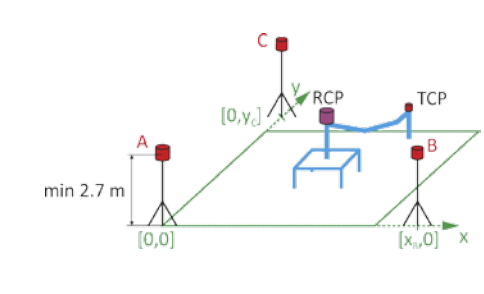


Možná umístění reflexních bodů v Trial House 1
Possible locations of reflective markers in Trial House 1

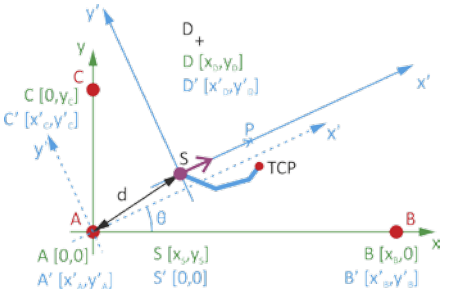
Spojením předpokladů a cenových požadavků se nám jako optimální řešení jeví 2D lidar. Výhodou 2D lidarů je splnění všech požadavků při udržení relativně nízké pořizovací ceny. Navíc může lidar disponovat funkcí automatického rozpoznání vyznačeného bodu, což se dá s výhodou využít při lokalizaci. Vyznačeným bodem se rozumí bod se zvýšenou odrazivostí světelného paprsku a je tvořen rovnou plochou nebo válcovou plochou. Využití detekce reflexní válcové plochy umožní selektovat v okolí lidarů vybrané body zájmu a zjistit jejich pozici s vyšší přesností než „běžný“ bod (bod jako součást plochy, která je v optické cestě paprsku lidarů, ale má nižší odrazivost než je nastavená mez). Experimenty potvrdily, že při zvýšení poloměru válcové plochy u vzdálených bodů, je následně skutečně při měření/pozicování dosaženo vyšší přesnosti při určení osy (středu) této plochy. Algoritmus lokalizace jsme primárně založili na výpočtu absolutní pozice lidarů vůči reflexním bodům. Tyto reflexní body musí být nejen viditelné, ale musí mít i známou polohu v rámci interního souřadného systému stavby a ideálně vhodně zvolenou vzájemnou topologii. Informaci lze dále rozšířit o další viditelné objekty v okolí s pevnou a známou polohou. Zde se zjevně nabízí obohacení informace pro lokalizační algoritmus o polohu vybrané zdi či zdí. Tento postup je aplikovatelný po realizaci prvního přesunu robotu po staveništi, kdy tisková úloha má nějakým způsobem navázat na již vytištěný objekt. V tom případě by se mohl aplikovat některý z přístupů rozšířených zejména při navigaci UAV pomocí lidarů, a na základě selekce by se detekovala hrana/hrany objektu v okolí robotu. Při znalostech konstrukčních plánů stavby a plánu její realizace, které by dnes již měly být běžně dostupné v elektronické podobě v BIM, se pak dá automaticky rozhodnout o místě, které je pro soutisk klíčové.

Náš tým pro účely lokalizace a/nebo navigace tiskového stroje navrhl a minimálně na virtuálním modelu vyzkoušel sedm různých konceptů lokalizace stroje na pracovišti. Výjimkou je koncept 8, který testován nebyl a je ověřen pouze úvahou – myšlenkovým experimentem. Většina řešení má navíc tu výhodu, že konfigurace senzorů a čidel umožňuje realizovat zároveň i úlohu navigace TCP. Všechny údaje o vzdálenostech, úhlech či vlastnostech reflexních prvků jsou dány zvoleným testovaným lidarem SICK NAV350. Při použití jiného zařízení je možné/potřebné tyto údaje upravit podle katalogových vlastností použitého měřicího zařízení typu lidar. Všechny koncepty využívají senzor umístěný na vhodném místě tiskového stroje a pevné orientační body v okolí robotu/stavby. Druhou možností by bylo umístit lidar na pevný bod stavby a reflexní body na tiskový stroj. Pro samotnou lokalizaci je tento přístup možný a v některých ohledech možná i výhodnější (lidar je daleko od zdroje vibrací a prachu), ale pro navigaci TCP je taková topologie nepoužitelná. Při pevném umístění lidarů by se muselo extra řešit dosažení jedné roviny mezi lidarem a odrazovým bodem, což je značně obtížné. Naopak pro robotickou stanici je taková konfigurace ideální.

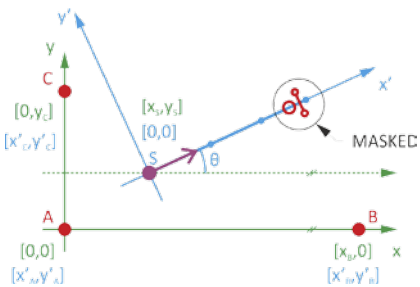
PŘEHLED JEDNOTLIVÝCH KONCEPTŮ (1 AŽ 7) **OVERVIEW OF INDIVIDUAL CONCEPTS (1 TO 7)**



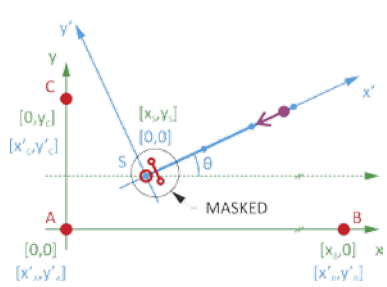
Nákres rozmístění reflexních bodů v konceptu č. 1
Drawing of the location of reflective markers in concept No. 1



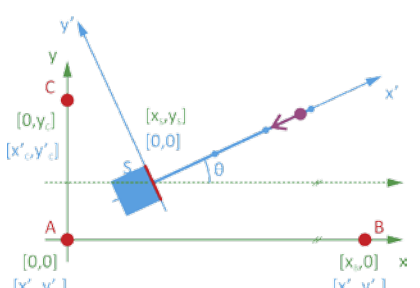
Nákres souřadných systémů v konceptu č. 1
Drawing of coordinate systems in concept No. 1



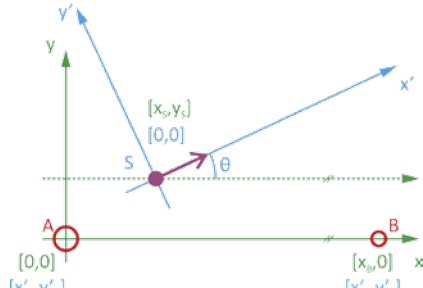
Nákres souřadných systémů v konceptu č. 2
Drawing of coordinate systems in concept No. 2



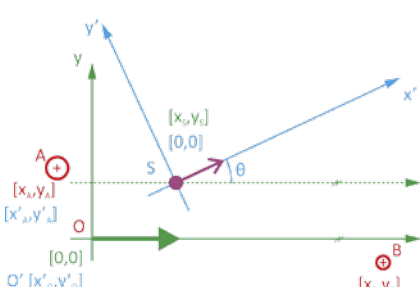
Nákres souřadných systémů v konceptu č. 3
Drawing of coordinate systems in concept No. 3



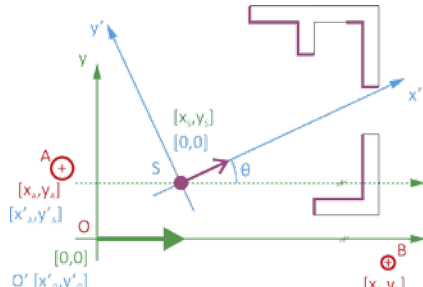
Nákres souřadných systémů v konceptu č. 4
Drawing of coordinate systems in concept No. 4



Nákres souřadných systémů v konceptu č. 5
Drawing of coordinate systems in concept No. 5



Nákres souřadných systémů v konceptu č. 6
Drawing of coordinate systems in concept No. 6



Nákres souřadných systémů v konceptu č. 7
Drawing of coordinate systems in concept No. 7

EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ KONCEPTŮ

EXPERIMENTAL VALIDATION OF CONCEPTS

Všechny výše uvedené koncepty byly simulačně ověřeny na virtuálních modelových situacích. Naším cílem během ověřovacích experimentů nebylo zkoumat vlastnosti senzorů, ale zejména správnost a použitelnost daného konceptu. Samozřejmě, že se provedly i reálné testy lokalizačního zařízení v interiéru a exteriéru. Jejich primárním cílem bylo vyzkoušet komunikační schopnosti lidaru, schopnost nalezení reflexního bodu v okolí, ale samozřejmě i skutečnou přesnost a kvalitu poskytovaných dat.

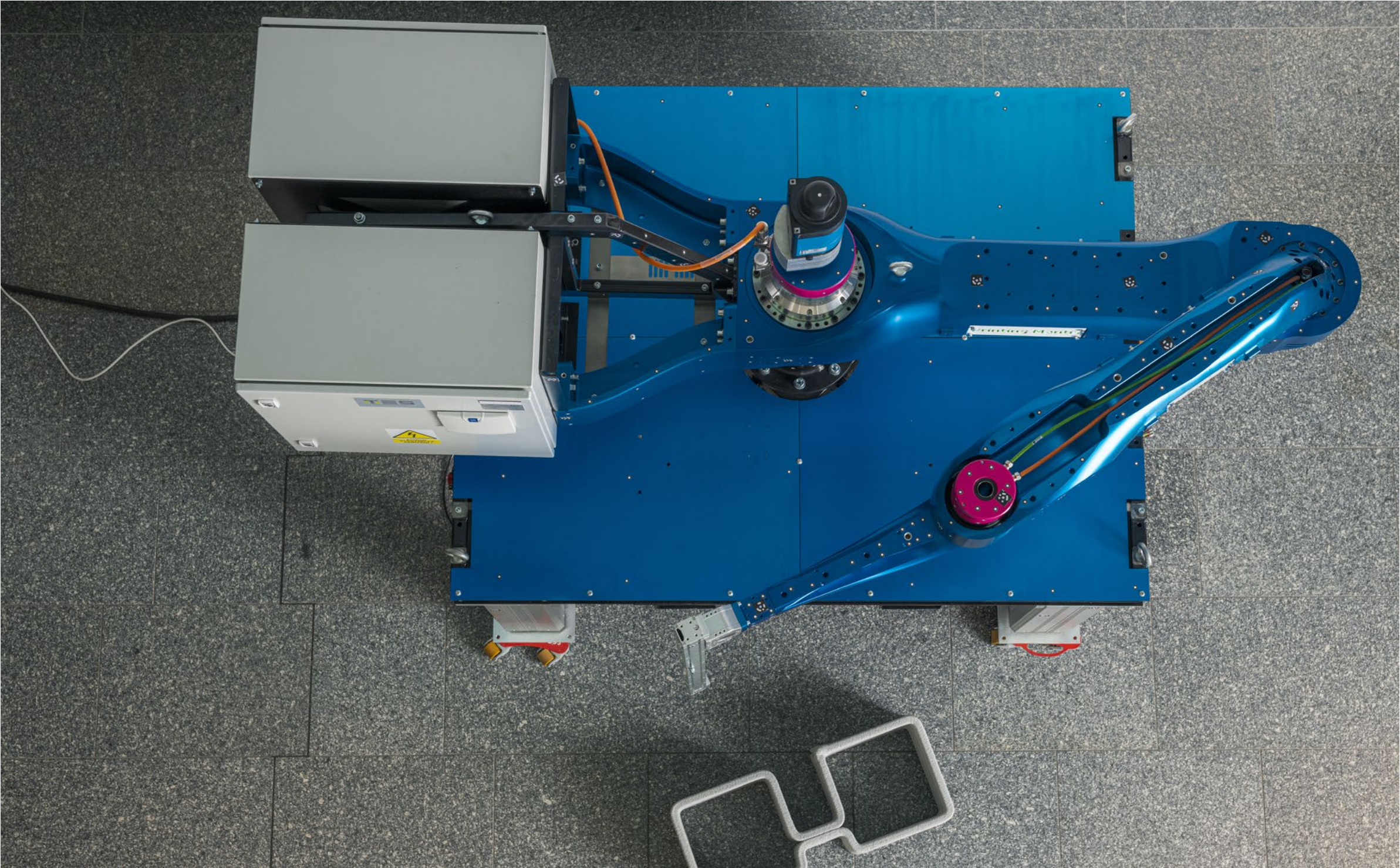
Při praktickém reálném experimentu (použité měřicí přístroje jsou uvedeny v následující tabulce) byla zjišťována schopnost detekce válcové plochy o průměru D110 mm za různých povětrnostních podmínek. Testovány byly zejména situace, kdy byl lidar přímo osvětlen sluncem, sluncem přímo osvětlená reflexní plocha, nebo reflexní plocha ve stínu. Dále probíhaly testy za zhoršených povětrnostních podmínek, zejména pak při dešti a sněžení. V interiéru pak proběhl test pod umělým osvětlením simulující tisk v noci. Testovala se i situace, kdy je lidar umístěn uvnitř PMMA trubky (viz koncept no. 3). Smyslem tohoto testu bylo zjistit možnost zakrytí lidaru před nepříznivým vlivem okolí a zároveň tak usnadnit údržbu. Všechny testy se realizovaly pro různé vzdálenosti mezi lidarem a reflexní plochou. Pro kontrolu výstupu z lidaru byla při všech experimentech zároveň, pomocí laserového dálkoměru, verifikována naměřená vzdálenost. Výsledkem testů je ověření vhodnosti lidaru jako senzoru pro lokalizaci a navigaci. V případě navigace je třeba počítat s omezenou frekvencí měření, která však nemusí být pro tisk limitující.

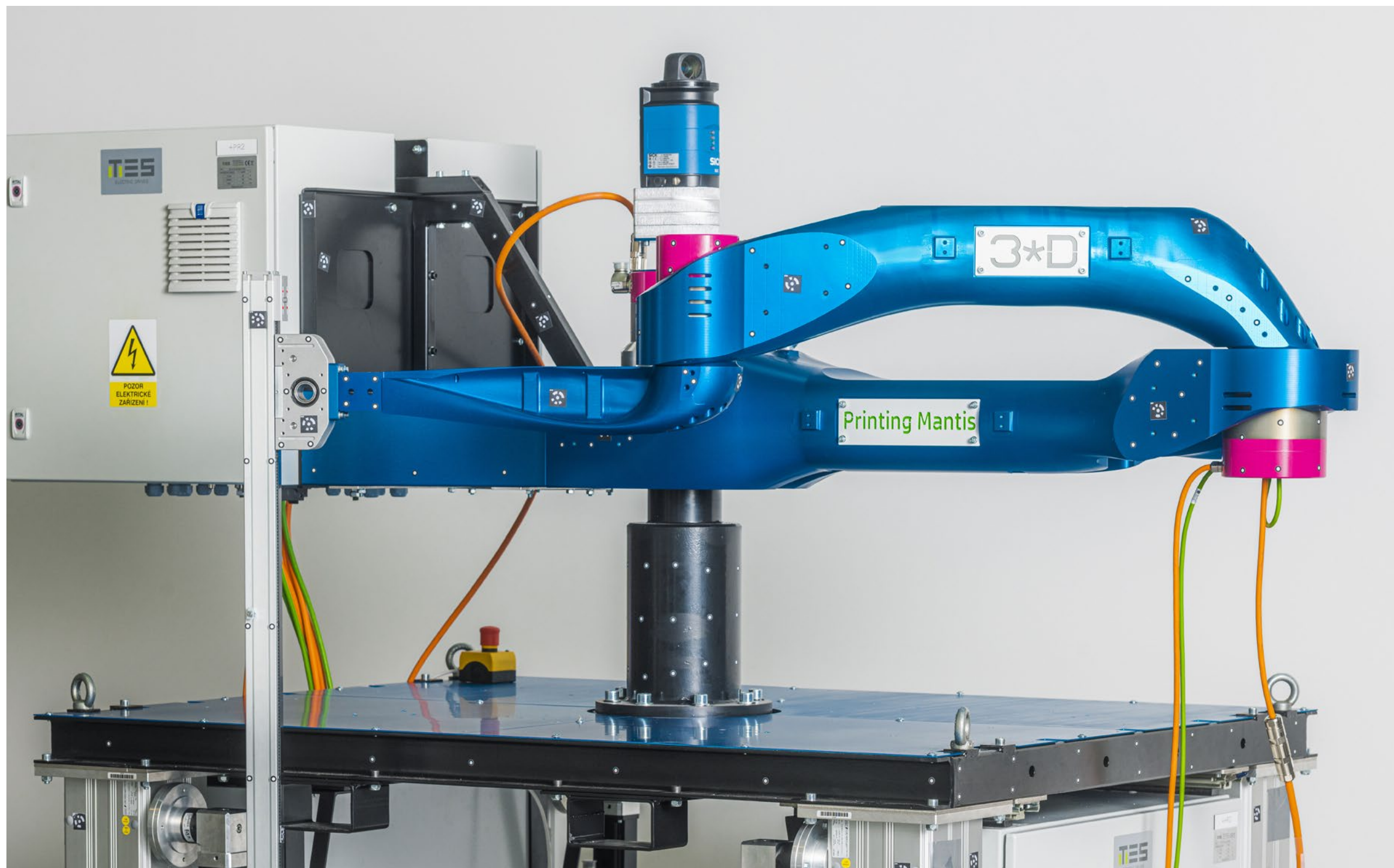
					protokol
Lidar	SICK350	360°, 100 m	8 Hz	± 4 mm	TCP/IP
Lidar	TIM781	270°, 8 m	15 Hz	± 60 mm	TCP/IP
Snímač sklonu	TMM88	360°	25 Hz	± 0,15°	Analogový
Snímač sklonu	TMM55	± 10°	18 Hz	± 0,15°	Analogový
Dálkoměr	DT50	200 mm ... 30 000 mm		± 7 mm	Analogový/IO-Link

SHRNUTÍ

CONCLUSION

Pro finální realizaci prototypu 3D tiskového stroje z betonu byla zvolena varianta konceptu č. 6. Tento způsob lokalizace je dostatečně přesný, robustní, minimalizuje nároky na přípravu na staveništi, a přitom nabízí univerzálnost v podobě možného přesunu stroje i do prostorů bez přímého výhledu na výchozí zaměřené body. Navíc je v rámci tohoto řešení možné uvažovat i o navigaci TCP, a to buď ve variantě plného a samostatného využití informace z lidaru, nebo ve variantě, kdy by tento systém byl v pozici doplňkového měřicího systému k internímu v tělese stroje, přesněji v jeho ramenech a kloubech. Možnost využití jednoho senzoru pro účely lokalizace stroje na staveništi i na navigování TCP je nespornou výhodou a velmi přínosným inovačním prvkem. Další pozitivum vybraného konceptu je minimalizace vnějších, geodeticky zaměřených bodů. Neopomenutelnou výhodou zůstává i snížení nákladů na lokalizační, resp. navigační systém v porovnání se sice přesnějšími, ale dražšími totálními stanicemi.





07

TIŠTĚNÉ STAVBY

PRINTED STRUCTURES

Jiří Suchomel

Beton je pevný, snadno tvarovatelný a odolný materiál, vhodný pro užití v tištěných konstrukcích. Jeho užití s sebou ale nese dopady na životní prostředí. Proto je nutno jeho spotřebu redukovat užitím technologií, které umožňují optimalizovat rozložení materiálu v tenkostěnných a dutých konstrukcích.

Problémy a omezení nastávají při tisku stěn odkloněných od svislice. Těm je možno čelit vhodnou charakteristikou materiálu, případně i dočasným zajištěním během tisku.

Ověřovací dům Trial House 01 byl navržen pro simulaci postupu tisku na stavbě, upřesnění parametrů vyvíjeného tiskového zařízení a ověření možností konstrukčního řešení. Byl navržen s dutými stěnami, vyplněnými podle potřeby tepelnou izolací a stropy sestavenými z tištěných prefabrikátů. Z rozboru vyplynul zásadní vliv chování materiálu na celkovou dobu realizace tištěné stavby.

Problémy tisku velké a tvarově složité stavby byly zkoumány na simulaci tisku kostela, navrženého architektem Zdeňkem Fránkem. Při něm bylo uvažováno užití dvou současně pracujících robotů a jejich umísťování během tisku na pomocné konstrukce.

Studentský návrh tištěného domu naznačuje další možnosti konstrukčního řešení tištěných staveb, využívajících prohnutých tvarů stěn pro zajištění jejich stability.

Concrete is a strong, easily shaped and durable material, suitable for use in printed structures. However, its use burdens the environment. Therefore, it is necessary to reduce its consumption by using technologies that optimise the distribution of material in thin-walled and hollow structures.

Problems and limitations occur when printing off-vertical walls. These can be countered by appropriate characteristics of the material, or even by securing the walls temporarily during printing.

Trial House 01 was designed to simulate the printing process on the construction site, specify the parameters of the developed printing equipment and verify the possibilities of the design concept. It was designed with hollow walls, filled with thermal insulation as needed, and ceilings assembled from printed prefabs. Analysis of construction time has shown that the behaviour of the material has a fundamental influence on the total printing time.

The printing problems of a large and complex building were examined by simulating the printing of a church designed by architect Zdeněk Fránek, using two robots working at the same time and placed on auxiliary support structures during printing.

Student design of a printed family house suggests other possibilities for the design of printed buildings, using the curved shapes of the walls to ensure their stability.

3D TISK CEMENTOVÝCH KOMPOZITŮ – PROČ TISKNOUT Z BETONU

3D PRINTING OF CEMENT COMPOSITES – WHY TO PRINT CONCRETE

Beton je v současné době bezpochyby celosvětově nejpoužívanějším stavebním materiálem. V blízké budoucnosti budeme stále zlepšovat jeho vlastnosti, ale nebudeme schopni ho ve větším měřítku ničím nahradit. Beton má celou řadu jedinečných kvalit.

Při porovnání se zdívek má zhruba desetinásobnou pevnost v prostém tlaku, což umožňuje navrhovat tenčí nosné zdi a docílit tak při stejném obrysu stavby větší využitelnou plochu půdorysu. Při dnešních cenách podlahové plochy bytů i staveb občanské vybavenosti je to často rozhodující parametr, ovlivňující zásadně ekonomiku výstavby. Vyztužený beton na rozdíl od zdiva dobře vzdoruje i dalším typům namáhání – ohybu, smyku, kroucení i tahu, což umožňuje větší variabilitu konstrukcí. Beton lze odlévat do téměř libovolných tvarů.

V porovnání s ocelí vynikne výrazně vyšší požární odolnost a odolnost proti korozi – tedy delší trvanlivost a životnost konstrukce při srovnatelné údržbě. Díky velké hmotnosti má beton velký akustický útlum, a tedy dobré vlastnosti z hlediska ochrany proti hluku. Při nastavení cen stavebních materiálů, jaké se uplatňuje v ČR, je také železobetonová konstrukce většinou levnější než konstrukce ocelová.

V době klimatických změn je při volbě stavebních materiálů velmi důležitá velikost uhlíkové stopy a množství emisí skleníkových plynů, vyprodukovaných při výstavbě. Ani v tomto porovnání beton nedopadá špatně. Ukazatele jako GWP (Global Warming Potential, vyjadřovaný v kg ekvivalentního CO₂) nebo PEI (Primary Energy Input – svázaná energie v MJ/kg) jsou srovnatelné pro betonové i zděné budovy a jsou významně příznivější ve srovnání s ocelovou konstrukcí. Výrazně lepší parametry z hlediska uhlíkové stopy má z běžných materiálů pouze dřevo, které má v tomto směru velkou budoucnost, ale které z různých důvodů nelze použít pro všechny typy konstrukcí.

Mezi problémy betonových konstrukcí patří emise skleníkových plynů, vznikající především při výrobě cementu a velké objemy těžby neobnovitelných nerostných surovin. Odhaduje se, že výroba cementu se na celosvětových emisích skleníkových plynů podílí zhruba 8 % z celkových emisí. Je pravda, že tento podíl v posledních 10 letech klesá s výrobou a používáním ekologicky šetrnějších cementů, což je dosahováno jednak využitím ekologičtějších zdrojů energie v cementárnách a dále částečným nahrazováním energeticky náročného portlandského slínku jinými surovinami, které byly původně odpadem (vysokopecní struska, elektrárenský popílek, mikrosilika a další). Velkým problémem je vysoká spotřeba nerostných zdrojů – vápence, a hlavně betonářského kameniva – šterku a písku. Písek začíná být celosvětově nedostatkovou surovinou. V ČR je už v současné době v některých regionech na trhu nedostatek kameniva do betonu a zhruba polovina aktuálně využívaných ložisek v ČR bude do 10 let dotěžena. Proto se u nás i ve světě rychle vyvíjí technologie betonu se 100 % použitím recyklovaného drceného kameniva, získaného při demolicích staveb.

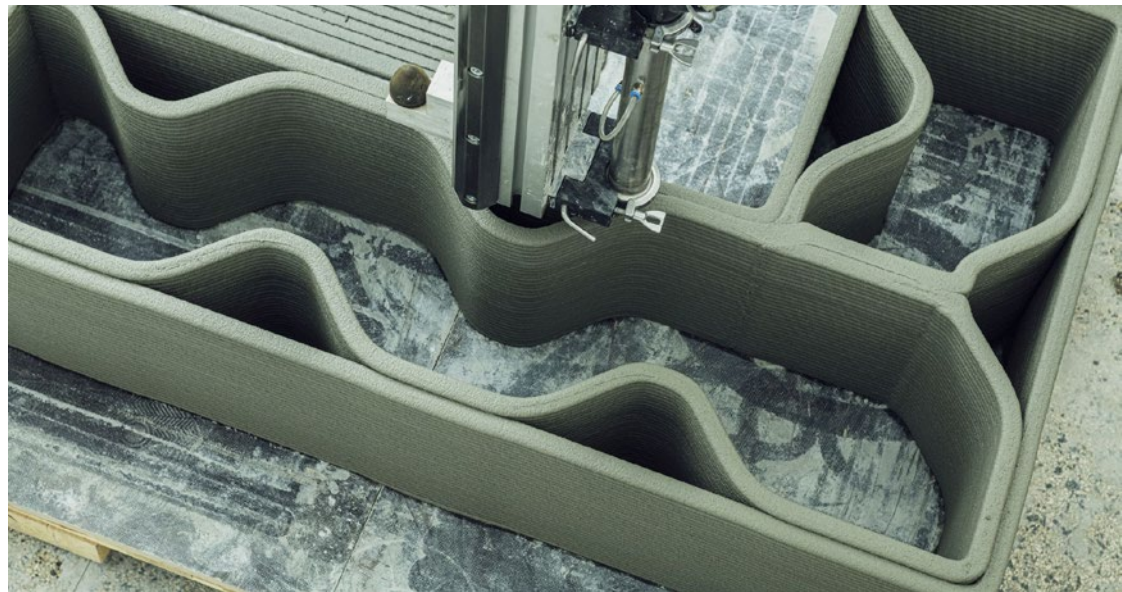
Zásadní otázkou v době tlaku na trvale udržitelný způsob výstavby je recyklovatelnost stavebních materiálů a z toho plynoucí požadavek minimalizace demoličních odpadů. Bude nutno změnit pohled na recyklovatelnost betonových konstrukcí a důsledně využívat betonový recyklát nejen do zasyplů, ale i jako plnivo (kamenivo) do nového betonu.

Velká hmotnost a velké objemy přepravovaného betonu způsobují problémy a další náklady při dopravě betonu na staveniště.

Jednou z možností, jak nepříznivé dopady používání betonu zmenšit, je redukovat množství zpracovávaného betonu. Pokud nechceme omezit celkový objem výstavby, nezbyvá než redukovat množství betonu v konstrukcích jejich optimálnějším návrhem. Tedy používat kvalitní, vysokohodnotné materiály, dnes označované jako HPC (High Performance Concrete) a optimalizovat spotřebu materiálu při zachování pevnosti a tuhosti stavebních prvků tak, jak je to běžné například ve strojírenském průmyslu. Dnešní masivní betonové konstrukce, především nosné stěny je možno nahradit tvarově složitějšími tenkostěnnými strukturami. To přirozeně vede na složitější tvary konstrukcí, které jsou obtížně dosažitelné při zhotovování betonových konstrukcí klasickou technologií – odléváním betonu do bednění.

V celém světě se hledají nové technologie, které by výrobu takových prvků umožnily. Jednou z nejdůležitějších a nejvíce se rozvíjejících je technologie 3D tisku. Protože tisková směs z technologických důvodů nemá zcela parametry betonu (chybí větší frakce kameniva) a jde o materiálový kompozit vyvinutý se zásadním přispěním stavební chemie, nehovoříme již o betonu, ale o cementových kompozitech, spadajících do kategorie HPC.

3D tisk cementových kompozitů je dnes nastupující technologií, která umožňuje používat výrazně menší množství materiálu. V rámci projektu 3D STAR byly úspěšně testovány vzorky svislých i vodorovných nosných konstrukcí, vytištěných s použitím tiskové stopy šířky 20 až 30 mm.



Tištěná tenkostěnná svislá konstrukce
Printed thin-walled vertical structure

Takové řešení umožňuje přesné umísťování tiskové směsi do míst konstrukce, kde je materiál efektivně využit pro dosažení potřebné pevnosti a tuhosti konstrukčních prvků při co nejnížší spotřebě tiskového materiálu. Přispívá tak k dlouhodobé udržitelnosti výstavby. Tím, že výroba konstrukce pomocí 3D tisku nepotřebuje bednění, dochází k jejímu zlevnění, zrychlení výstavby a omezení dalších nepříznivých dopadů při zhutňování betonu (hluk, vibrace).

Chceme-li udržet pozici betonového stavitelství do dalších desetiletí, a zdá se, že nám nic jiného nezbyvá, donutí nás v nejbližších letech požadavky na omezování uhlíkové stopy, úspory energie i docházející surovinové zdroje ke změnám v betonovém stavitelství a 3D tisk cementových kompozitů je jednou z cest, jak tyto změny uskutečnit.

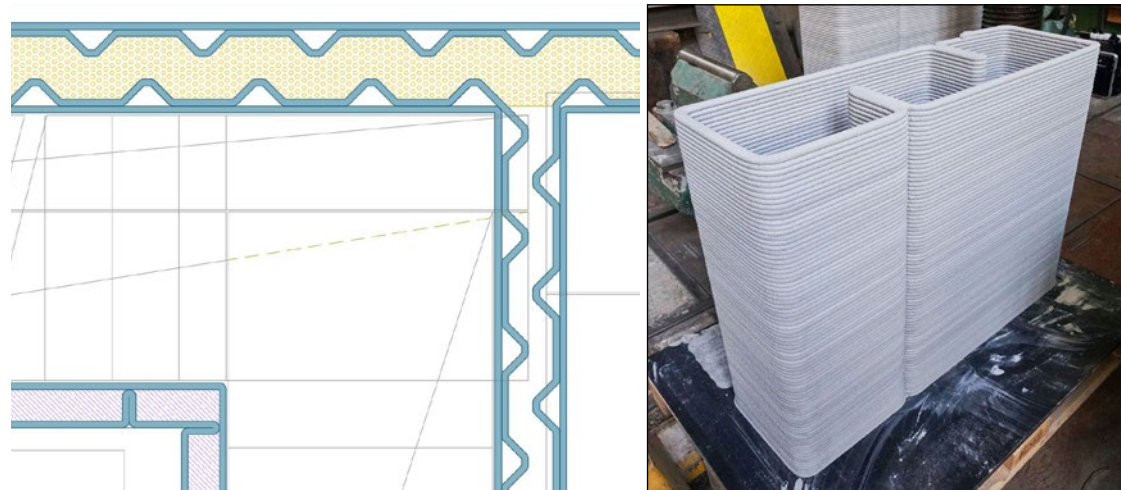
JAK TISKNOUT Z BETONU

HOW TO PRINT CONCRETE

Projekt 3D STAR se zabýval vývojem technologie pro tisk stavebních konstrukcí a budov. Ty se na rozdíl od jiných, drobnějších tištěných produktů vyznačují relativně velkými rozměry, nároky na pevnost a odolnost vůči klimatickým podmínkám, požadavky na životnost a ekonomičnost výstavby. Vzhledem k limitům, daným podmínkami financování, a vzhledem k logice postupu prací na projektu nebylo možno v daném čase vytisknout kompletní stavební objekt. Výstupy projektu, týkající se praktické využitelnosti tisku, se proto omezily na teoretické úvahy, studie budov pro simulaci tisku a návrhy a tisk vzorků stavebních konstrukcí.

Ze své podstaty je 3D tisk nejsnadněji uplatnitelný při vertikálním nebo jen mírně vychýleném nanášení tištěných vrstev materiálu. Výsledkem jsou pak víceméně svislé stěny, jejichž půdorysný tvar ale není nijak omezen. Jednou z hlavních předností tisku je možnost zacházet s užitým materiálem hospodárně a spotřebovávat ho co nejméně. To znamená tisknout tenkostěnné konstrukce, jejichž celkové tvarové řešení vychází z optimálního rozmístění hmoty do míst, kde je co nejlépe využita pro přenášení různých typů zatížení.

Tenké stěny mohou být pro získání potřebné stability s výhodou půdorysně zvlněny nebo zalámány. 3D tisk navíc nabízí možnost realizace dutých konstrukcí, jejichž venkovní povrchy mohou být tvarovány podle architektonických a provozních požadavků a potřebnou stabilitu zajišťují vnitřní tištěné výztuhy.

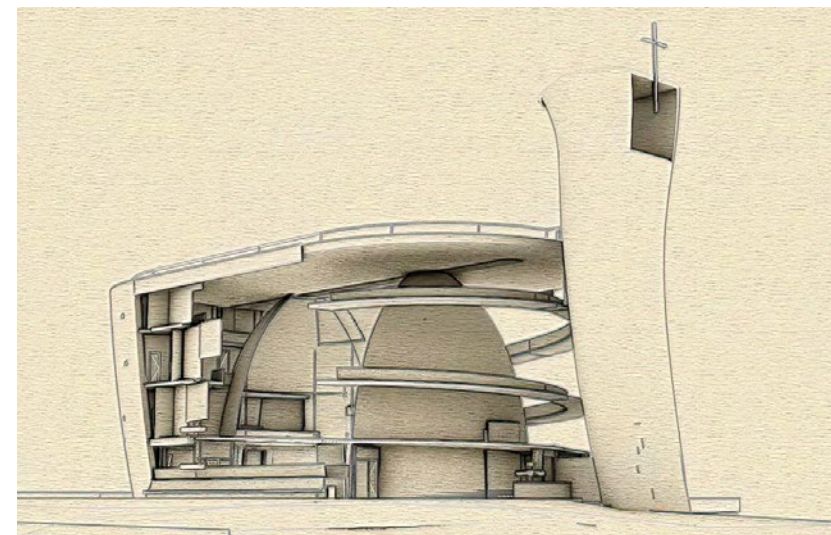


Duté konstrukce s vnitřními výztuhami
Hollow structures with internal bracing

Tvarová a konstrukční omezení se ale týkají tvaru tištěných stěn ve svislém řezu. Cementový kompozit, užitý jako tiskový materiál, je relativně hmotný a ve fázi ukládání měkký. Při překročení určité míry přesahu tiskové vrstvy oproti podkladu se začíná zřetelně deformovat. Tyto deformace mohou být do jisté míry zanedbány a vyrovnány následující vrstvou. Pokud ale je tento postup soustavně opakován a jsou obdobně tištěny další vrstvy před nabytím dostatečné pevnosti spodních vrstev tisku, může dojít ke zhroucení konstrukce během tisku.

Většina staveb, realizovaných dosud 3D tiskem, se proto většinou orientovala na tisk jedno- až dvou-podlažních objektů, jejichž nosné stěny byly zcela svislé. Tyto stěny byly dokonce velmi často tištěny jen jako ztracené bednění, do kterého byly nosné části následně vybetonovány klasickým způsobem a v klasických dimenzích. Důvodem byly, podle vyjádření autorů, zejména legislativní podmínky v jednotlivých zemích. Z čistě konstrukčního pohledu ale není důvod proč tyto doplňkové konstrukce nenahradit vhodně řešenými a dimenzovanými tištěnými částmi.

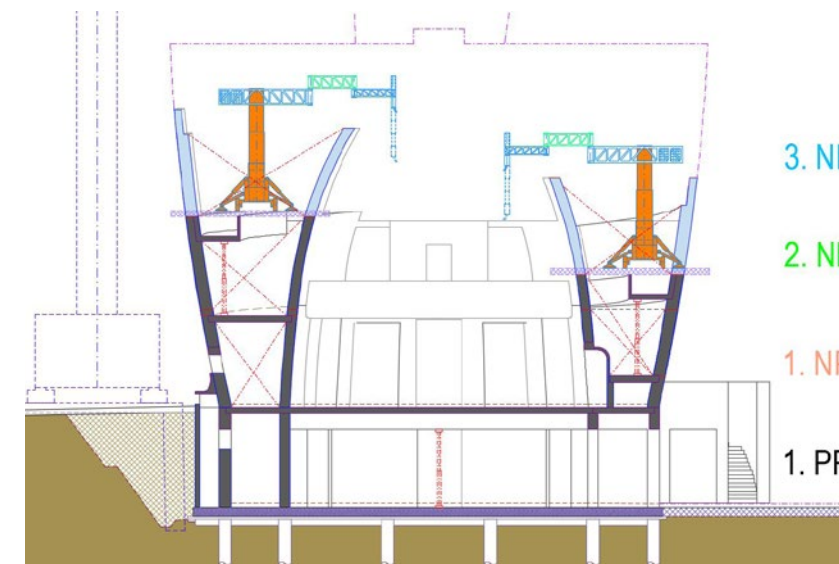
Potřeba tisku nesvislých stěn souvisí se specifickým charakterem některých staveb. U většiny budov, kde je možno tuto technologii úspěšně využít, zejména u bytových domů různé velikosti, bude pravděpodobně možné se bez nich většinou obejít. Jejich provozní výhodnost je sporná, nelze ale vyloučit konstrukční řešení, která prokážou výhodnost takových tvarů například v obvodových konstrukcích budov.



Kostel Neratovice, architekt prof. Zdeněk Fránek
Neratovice church, architect prof. Zdeněk Fránek

S technologií 3D tisku je často spojováno očekávání víceméně úplné tvarové svobody. Tvarová omezení v podstatě neexistují ve vodorovné rovině. Podstatně omezenější možnosti jsou ale ve svislém směru. Absolutní tvarové svobodě je možné se bezpochyby značně přiblížit při tisku plastů, kovů a některých organických materiálů. Ve velké většině případů se ale jedná o tisk výrazně menších objektů, než jsou stavební konstrukce nebo budovy s jejich statickými nároky a požadavky na vlastnosti stavebního materiálu. Ty výrazně zmenšují možnosti jeho výběru, a proto v současné době přichází do praktické úvahy jen omezený počet materiálových možností. Kromě cementových kompozitů jsou to zejména geopolymery, hlíny a kovy. Plasty a jejich kompozity mají problémy s požární odolností, což limituje jejich použití ve stavebnictví. Širšímu užití geopolimerů na úkor cementu brání zatím nedostatek vstupních surovin, tvořených většinou odpadními materiály a nevyrovnanost jejich kvality.

U tisku budov z cementových kompozitů, které se nejvíc blíží optimálnímu poměru vlastností a ceny, se projevují tvarová omezení, daná chováním tiskového materiálu během tisku a vlivem postupu tisku, kdy může být zapotřebí dočasně zajistit vysoké stěny podpěrami nebo táhly do doby dokončení celé konstrukce.

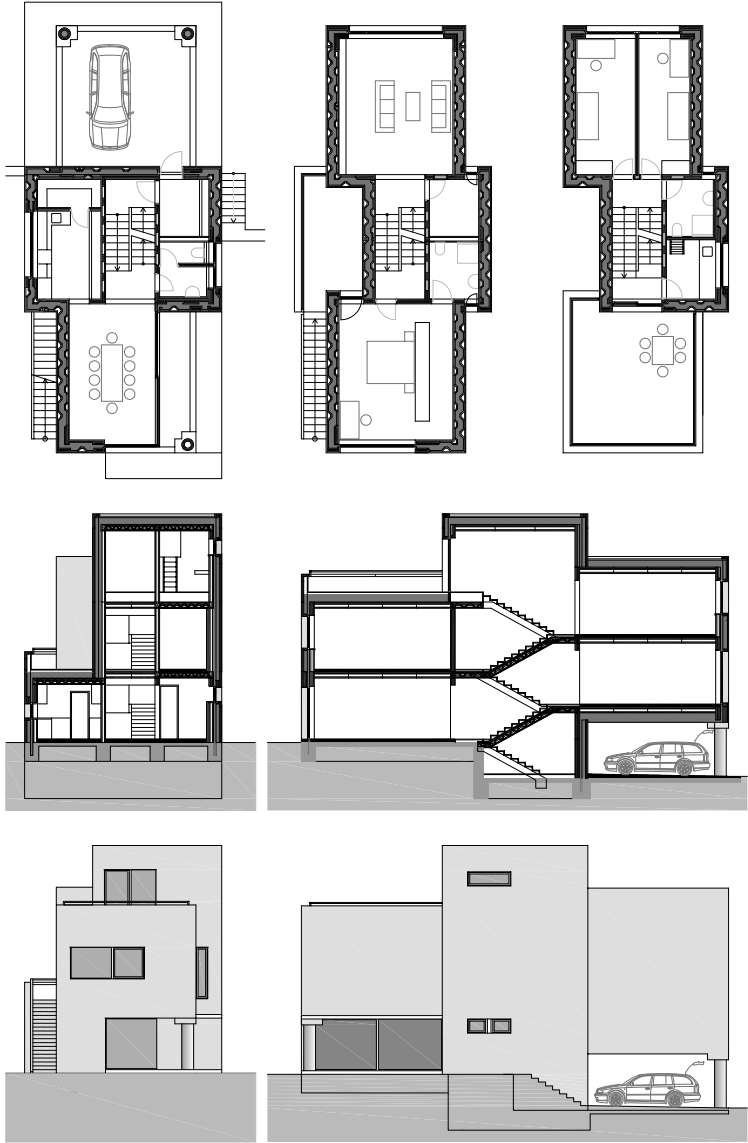


Kostel Neratovice – zajištění stěn během tisku
Neratovice church – securing the walls during printing

Tato opatření představují ale zřetelné komplikace a vhodnost užití 3D tisku pro realizaci takto tvarované budovy je ke zvážení. Optimální cestou je proto architektonický návrh, který od počátku vychází z možností a omezení, daných užitou technologií a parametry tiskového zařízení. Ty se pak promítají nejen do statického řešení celé stavby, ale mohou mít zřetelný vliv i na její konstrukční členění. Další vývoj tiskového materiálu, vedoucí k rychlejšímu tuhnutí a nabývání pevnosti, je základním předpokladem k možnosti tisknout výrazně nesvislé konstrukce.

TRIAL HOUSE 01
TRIAL HOUSE 01

Pro upřesnění návrhových parametrů vyvíjeného tiskového zařízení a ověření jeho praktické využitelnosti při tisku konkrétních objektů byly zpracovávány studie konstrukcí a budov, umožňující výpočtové prognózy. Studie domu Trial House 01 byla zpracována pro simulaci souvislostí a vzájemného ovlivňování návrhu tištěných betonových stavebních konstrukcí a logiky postupu stavby, prováděné vyvíjenou technologií. Jejím cílem bylo 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.



Trial House 01 – půdorysy, řezy, pohledy
Trial House 01 – floorplans, sections, elevations

Rodinný dům byl navržen pro dosažení co největší různorodosti stavebně konstrukčních vztahů a detailů. Budova, umístěná na abstraktní místo bez konkrétních vztahů k širšímu okolí, byla výškově uspořádána tak, že její jednotlivé úrovně byly posunuty vždy o polovinu výšky podlaží. Stavba v tomto provedení měla sice celkem sedm úrovní, její výška ale odpovídala třem a půl podlažím. Tvar domu byl omezen na pravoúhlé půdorysné a hmotové provedení, respektující svislost tištěných prvků. Spodní stavba budovy byla uvažována v tradičním provedení.

TISKOVÝ MATERIÁL
PRINTING MATERIAL

Uvažovaným materiálem pro tištěné nosné konstrukce byla jemnozrnná betonová směs s vyšší pevností v tlaku (≥ 50 MPa) a vhodnými reologickými vlastnostmi, potřebnými pro její dopravu, vytlačování a ukládání tiskovou hlavou robotu. Nezbytné vyztužování tažených částí konstrukcí bylo předpokládáno ohebnou výztuží (z ocelových, skleněných, karbonových nebo jiných vláken), ukládanou tiskovou hlavou zároveň s tiskovou směsí.

Kromě tištěných nosných stěn byly v návrhu v malém rozsahu užity i doplňkové nenosné sádkartonové konstrukce, zpravidla pro vytvoření instalačních stěn a příček. Pro svislou tepelnou izolaci stěn bylo navrženo užití sypaného materiálu (například vloček z EPS nebo PUR). Tento postup umožňuje vyplnit i tvarově členité prostory. Tepelná izolace stěn jednotlivých úrovní domu byla předpokládána vyplněním dutin v plášti vždy na výšku jednoho podlaží po montáži stropů nad dotčeným podlažím. Vodorovné tepelné izolace byly uvažovány v běžném provedení. Podlahy a stupně v prostoru schodiště byly navrženy jako duté truhlářské konstrukce, venkovní schody jako zámečnická konstrukce.

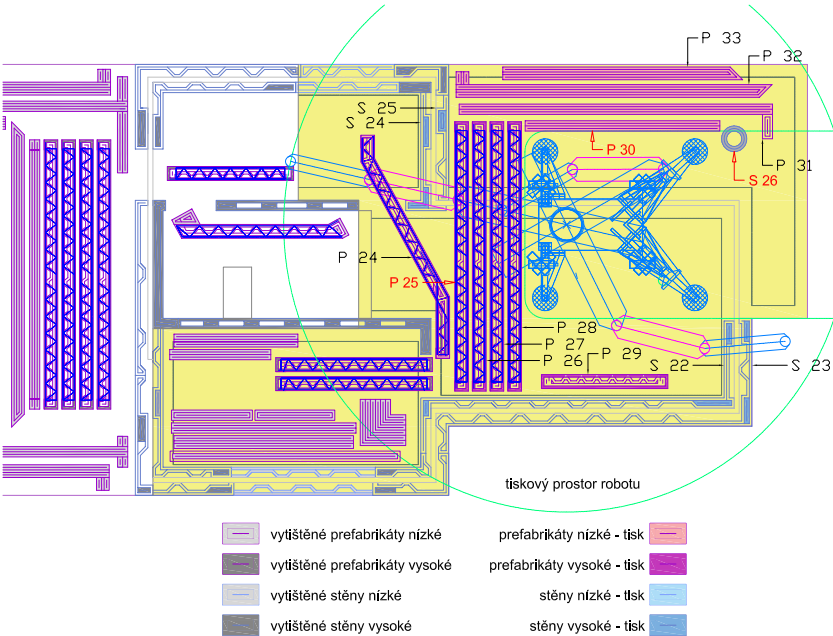
KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ
STRUCTURAL SOLUTION

Na rozdíl od konvenčních postupů je možno při provádění stavebních konstrukcí metodou 3D tisku snadněji realizovat tenkostěnné, duté a odlehčené konstrukce. Tento typ konstrukcí byl proto použit i v návrhu domu. Tištěné konstrukce byly navrženy s ohledem na jejich funkci a hlavní namáhání (u stěn tlak, u překladů a stropů ohyb). Návrh byl proveden schematicky bez řešení některých tvarových a konstrukčních detailů. Jeho smyslem bylo postihnout pouze hlavní logiku konstrukcí. V půdorysech bylo paralelními liniemi vyznačeno uspořádání tiskových stop. Šířka stopy byla předpokládána 50 mm, výška ukládané vrstvy směsi 10 mm. Průměrná rychlost pohybu tiskové hlavy byla uvažována 200 mm/s (12 m/min). Tiskové stopy byly v návrhu tvarovány tak, aby pokud možno tvořily uzavřené křivky (polygony). Tištěná konstrukce domu se skládala z nehybných dílů (stěn a sloupů) a přemísťovaných staveništních prefabrikátů (stropních dílů, překladů, hlavic, parapetních a atikových dílů). Návrh předcházel tisku vzorků na TestBedu a členění i dimenze konstrukcí byly proto jen odhadnuty.

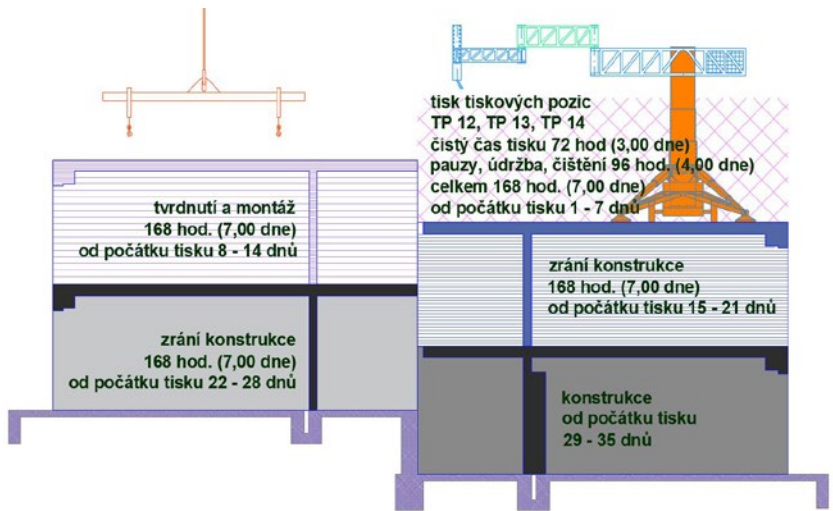
Skutečnost, že technologie 3D tisku přirozeně vede k aplikaci tenkostěnných, nekonvenčními způsoby vyztužených konstrukcí, otvírá celou škálu problémů v oblasti návrhu a dimenzování těchto konstrukcí. Zejména u tlačených, svislých nosných konstrukcí je třeba řešit problémy stability (vzpěr, boulení) 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 byly v jistém rozsahu zkoumány i tyto problémy.

POSTUP TISKU
PRINTING PROCEDURE

Během tisku byl robot umístěn do celkem 19 tiskových pozic, tvořících 9 kroků tisku a tištěných v týdenním taktu.



Trial House 01 – detail půdorysu tisku – tisková pozice TP 05
Trial House 01 –floor plan detail of printing procedure – printer position TP 05



Trial House 01 – pátý krok tisku, tiskové pozice TP 12, TP13 a TP14
Trial House 01 – fifth print step, printer positions TP 12, TP13 and TP14

SVISLÉ KONSTRUKCE (NEHYBNÉ DÍLY)
VERTICAL STRUCTURES (FIXED PARTS)

Tyto části konstrukce (značené v půdorysu S) by byly tištěny v definitivní pozici a nebyly následně přemísťovány. Jejich maximální rozměry by byly omezeny pouze velikostí tiskového prostoru robotu v dané tiskové pozici. Dům byl 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 máv návrhu 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 v tomto uspořádání 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 dosahu ramene robotu a jeho přemísťování během tisku jsou i nehybné stěny děleny na postupně tištěné části.

VODOROVNÉ KONSTRUKCE (PŘEMISŤOVANÉ DÍLY)
HORIZONTAL STRUCTURES (TRANSLOCATED PARTS)

Tyto části konstrukce (značené v půdorysu P), které nemohou být vytištěny v definitivní pozici, byly navrženy jako staveništní prefabrikáty. Po vytištění a době, potřebné pro nabytí požadované pevnosti, by byly autojeřábem osazovány na místa určení. Rozměry stabilních stěnových dílů byly omezeny velikostí tiskového prostoru robotu. Rozměry prefabrikátů byly voleny tak, aby jejich hmotnost nepřesáhla 4 000 kg.

Prefabrikované stropní díly by byly tištěny v poloze pootočené na bok. Jejich konstrukce je pro odlehčení navržena s dutinami. Výztuž, uložená v jednotlivých vrstvách, by tak mohla být rozmístěna v odstupech 10 mm. Tiskové vrstvy, obsahující výztuž, by mohly být střídavě kříženy, a tím by mohlo 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 byly vyznačeny ve výkresech. Při montáži by stropní díly a schodišťová ramena před osazením byly sklápěny o 90°.

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

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

ZAŘÍZENÍ PRO TISK A MANIPULACI S PREFABRIKÁTY
EQUIPMENT FOR PRINTING AND HANDLING PREFABRICATED PARTS

V rámci projektu 3D STAR vyvíjený tiskový robot s otočným, svisle posuvným a délkově proměnným ramenem má půdorysný dosah cca 5,6 m. Výška tisku bylapro obytné stavby uvažována do cca 3,2 m nad základní rovinu tisku v každé pozici robotu. Jeho hmotnost bylapro účely studie odhadnuta na cca 2 500 kg. Robot byl vybaven samohybným podvozkem a závěsem, umožňujícím jeho přemísťování pomocí autojeřábu. Jednotlivé pracovní pozice robotu na sebe mohou podle potřeby navazovat, a tak je možno tisknout ve vodorovné rovině prakticky neomezeně rozsáhlý objekt.

CELKOVÁ DOBA REALIZACE NOSNÉ KONSTRUKCE TIŠTĚNÉ BUDOVY
TOTAL CONSTRUCTION TIME OF THE LOAD-BEARING STRUCTURE OF A PRINTED BUILDING

Při předpokládané rychlosti tisku 0,2 m/s a různorodém obsazení tiskového prostoru díly stěn a pre-fabrikátů v jednotlivých pozicích robotu byly výpočtem zjištěny doby tisku jedné vrstvy v trvání cca 7 – 26 minut, v průměru cca 12 minut. Této vertikální rychlosti tisku by pak muselo vyhovět chování tiskové směsi, zejména její tuhnutí a nabývání pevnosti během tisku. Zároveň bylo předpokládáno, že vytištěné díly budou po cca 5 dnech schopné přemístění.

Časová bilance průběhu stavby (viz tabulka) vychází z nastavených parametrů tisku a odhadu dalších navazujících aktivit (čištění a údržba robotu, technologické přestávky na tvrdnutí tištěných dílů před manipulací a zatížením a montáž prefabrikátů). Vyplývá z ní, že vlastní doba tisku činí jen 31 % z cca 1500 hodin, potřebných pro kompletaci tištěných konstrukcí. I když některé uvažované doby navazujících aktivit mohou být v bilanci nadsazeny, je jejich podíl určující pro celkovou dobu stavební činnosti. Z bilance vyplývá, že pro rychlost celého procesu je rozhodující chování tiskového materiálu.

STAVBA CELKEM

parametry tisku				doba tisku				servisní činnosti, technologické přestávky a montáž prefabrikátů				stavba tištěné konstrukce celkem			
rychlost tisku	výška vrstvy	šířka vrstvy		průměrná doba tisku jedné stopy		celková doba tisku všech pozic		čištění robotu	kontrola, seřizování	technologické přestávky (tvrdnutí betonu)	montáž prefabrikátů	doba celkem			
				min.	hod.	hod.	dni					hod.	dni		
				12,2	0,2	468,4	19,5	66,9	50,2	858,8	67,8	2,8	1 512,0	63,0	
0,2	12	10	50	31,0%				4,4%	3,3%	56,8%	4,5%	100,0%			

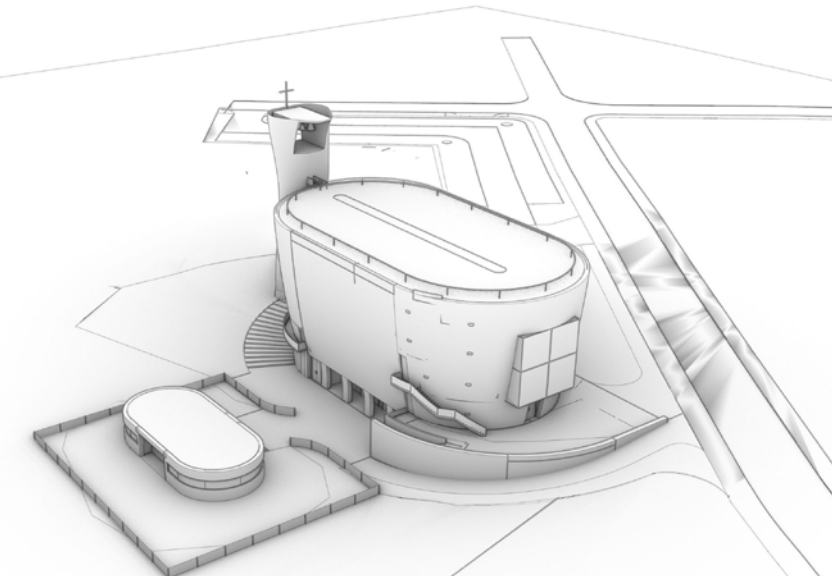
TISKOVÉ POZICE

1. krok tisku										
tisková pozice 01	8,1	0,1	22,2	0,9	3,7	2,8	82,3	2,0	0,1	
tisková pozice 02	26,4	0,4	36,3	1,5	6,1	4,5		8,1	0,3	
2. krok tisku										
tisková pozice 03	11,9	0,2	23,8	1,0	4,0	3,0	20,6	2,9	0,1	
tisková pozice 04	7,0	0,1	24,7	1,0	4,1	3,1		2,4	0,1	
tisková pozice 05	23,2	0,4	55,4	2,3	9,2	6,9		7,9	0,3	
3. krok tisku										
tisková pozice 06	7,9	0,1	35,3	1,5	5,9	4,4	73,6	2,1	0,1	
tisková pozice 07	17,0	0,3	31,1	1,3	5,2	3,9		6,6	0,3	
4. krok tisku										
tisková pozice 08	9,2	0,2	26,8	1,1	4,5	3,4	59,5	3,0	0,1	
tisková pozice 09	7,3	0,1	9,1	0,4	1,5	1,1		3,1	0,1	
tisková pozice 10	8,8	0,1	30,0	1,2	5,0	3,7		3,0	0,1	
tisková pozice 11	9,4	0,2	23,4	1,0	3,9	2,9		3,6	0,2	
5. krok tisku										
tisková pozice 12	9,9	0,2	42,7	1,8	7,1	5,3	66,6	2,1	0,1	
tisková pozice 13	7,6	0,1	18,3	0,8	3,0	2,3		4,0	0,2	
tisková pozice 14	7,9	0,1	11,4	0,5	1,9	1,4		1,8	0,1	
6. krok tisku										
tisková pozice 15	15,8	0,3	33,9	1,4	5,7	4,2	107,6	5,1	0,2	
tisková pozice 16	10,8	0,2	7,0	0,3	1,2	0,9		2,4	0,1	
7. krok tisku										
tisková pozice 17	18,0	0,3	31,6	1,3	5,3	3,9	123,7	3,5	0,1	
8. krok tisku										
tisková pozice 18	18,0	0,3	5,4	0,2	0,9	0,7	161,1	0,0	0,0	
9. krok tisku										
MONTÁŽ (TP 19)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	163,8	4,2	0,2	

Předpokládaný časový průběh tisku a navazující montáže prefabrikátů
Estimated time course of printing and subsequent assembly of prefabricated parts

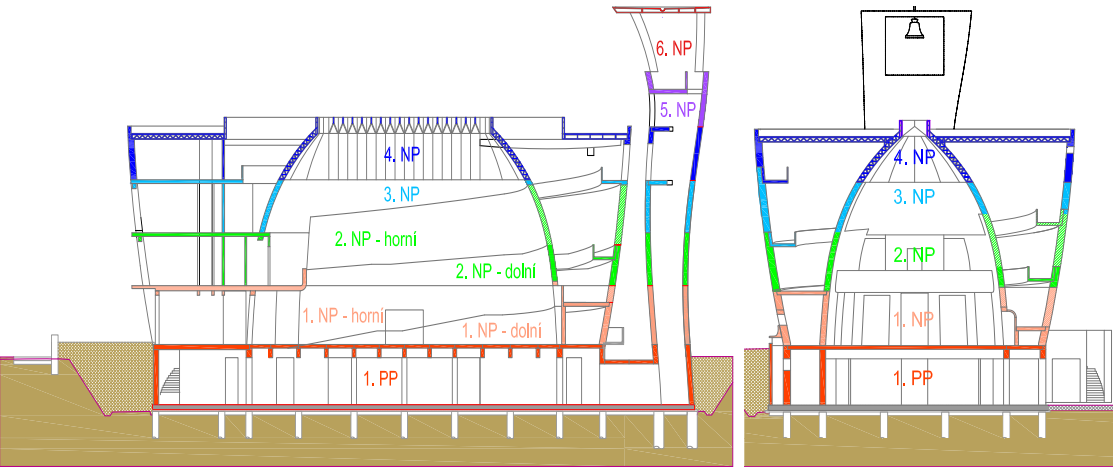
HYPOTETICKÝ TISK KOSTELA V NERATOVICÍCH
HYPOTHETICAL PRINTING OF THE NERATOVICE CHURCH

Na příkladu kostela v Neratovicích byly zkoumány některé okolnosti, související s možností realizace středně velké stavby metodou postupného tisku s využitím robotu, vyvíjeného v projektu 3D STAR. Jako podklad byla použita architektonická studie kostela, poskytnutá k tomuto účelu ateliérem Fránek Architects. Budova kostela navržená profesorem Zdeňkem Fránkem byla vybrána pro své architektonické řešení, obsahující řadu tvarově komplikovaných nerovinných prvků a konstrukcí, náročných na provádění 3D tiskem. Je charakteristická unikátním hmotovým a prostorovým uspořádáním, které na organizaci tisku a užití mobilního tiskového robotu klade vyšší nároky.



Kostel v Neratovicích – celkový pohled
Neratovice church – general view

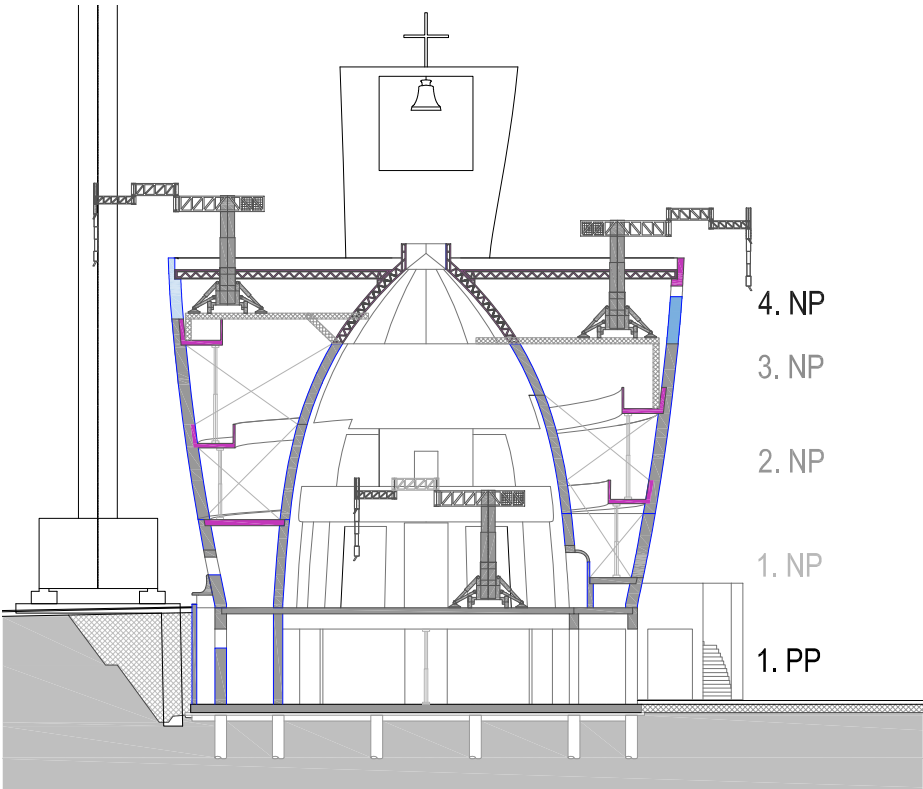
Simulační studie tisku kostela neřešila detailní provedení tištěných konstrukcí a jejich pravděpodobné úpravy, vyvolané užitou technologií. Stavební řešení kostela bylo převzato v rozměrech navržených v architektonické studii. Konstrukce kostela byly členěny na tištěné části, jejichž velikost odpovídala možnostem tisku a následné manipulace s tištěnými prefabrikáty. Pro tisk staveništních prefabrikátů bylo uvažováno využití prostoru hlavní chrámové lodi, který se ukázal být dostatečný i pro potřebné rozměrné díly. Výškově byl postup tisku členěn podle podlaží budovy.



Kostel v Neratovicích – úrovně tisku
Neratovice church – print levels

SPECIFICKÉ PREFABRIKÁTY
SPECIFIC PREFABRICATED PARTS

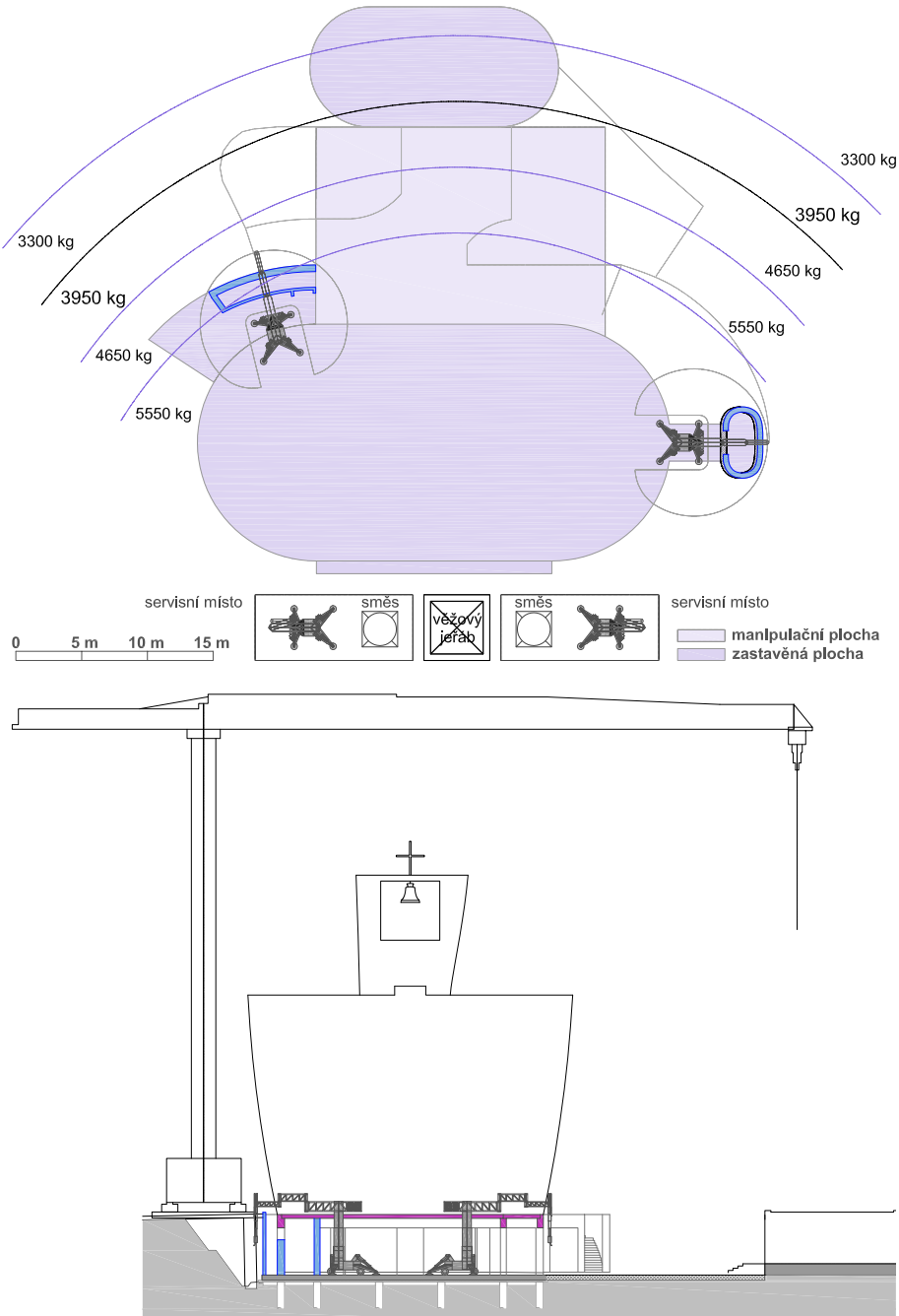
Na rozdíl od běžných stavebních objektů, například pro bydlení, u nichž je potřeba prefabrikovat zejména vodorovné stropní konstrukce a překlady nad otvory, se v případě neratovického kostela objevují i jiné typy konstrukcí, které není dost dobře možné provádět běžným tiskem. Jsou to zejména spirálové rampy podél nosných stěn a vrcholová část silně skloněných stěn v závěru chrámové lodi. V návrhu byly tyto konstrukce uvažovány rovněž ze staveništních prefabrikátů.



Kostel v Neratovicích – prefabrikáty ramp a závěru chrámové lodi
Neratovice church – prefabricated ramps and temple nave structures

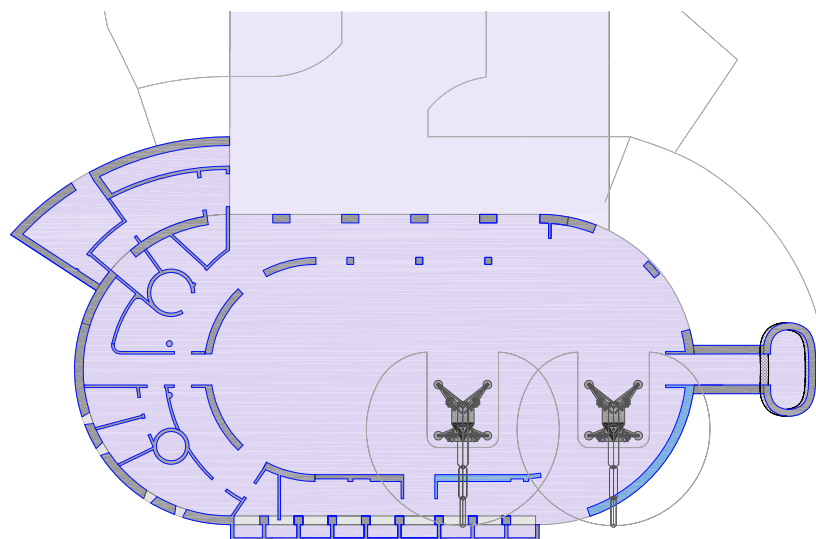
KOORDINOVANÝ TISK DVĚMA ROBOTY
COORDINATED PRINTING BY TWO ROBOTS

Rozměry kostela umožňují současné nasazení více než jednoho tiskového zařízení. V simulační studii tisku bylo proto uvažováno s užitím dvou robotů, což se ukázalo být úměrné. V některých fázích tisku by sice bylo možno tisknout i více roboty, jejich využití by ale bylo jen dočasné. Pro každý robot bylo uvažováno se servisním místem vně kostela, na straně přilehlé k příjezdové komunikaci. Tam byl také umístěn věžový jeřáb s ramenem, jehož vyložení dokázalo pokrýt celý půdorys kostela i manipulační plochu na jeho druhé straně. Obě servisní místa zahrnovala vlastní zásobník tiskové směsi a vlastní míchací čerpadlo směsi.



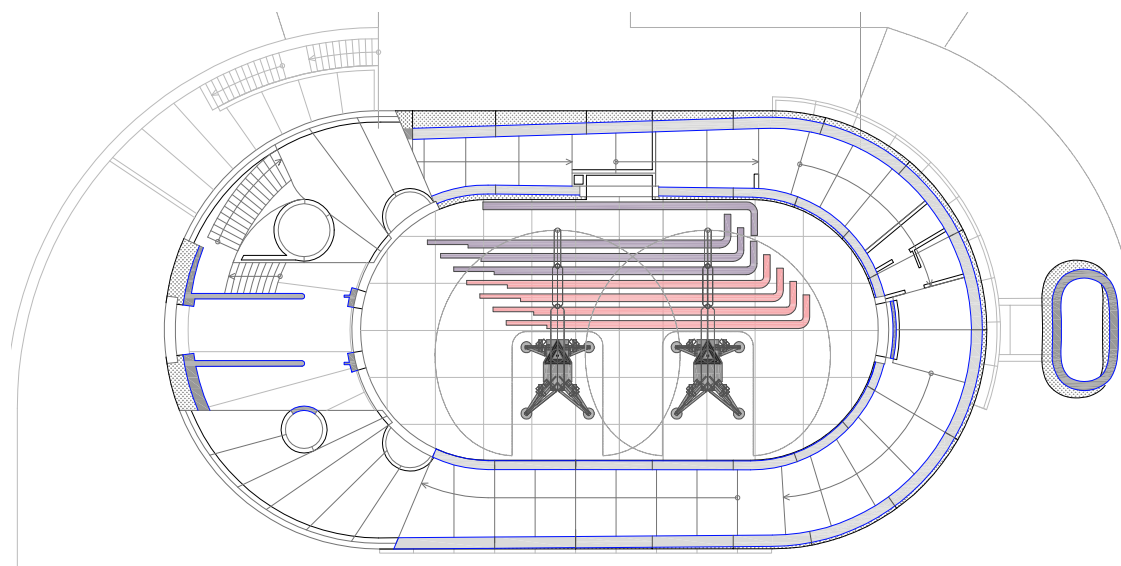
Pro daný případ bylo předpokládáno využití vhodného věžového jeřábu, například Liebherr 150 EC-B 8 Litronic, jehož parametry vyhovují manipulaci s roboty (odhadovaná hmotnost cca 3000 kg) i s tlustými staveništními prefabrikáty (hmotnost do cca 4000 kg) při vyložení cca 40 m. Velikost tištěných prefabrikátů byla těmito podmínkami přizpůsobena.

Simulace průběhu tisku byla zachycena na 189 půdorysech a 16 řezech stavby. Kromě situací, kdy oba roboty mohou pracovat nekoordinovaně, protože se jejich pracovní prostory nepřekrývají, jsou zachyceny i další možnosti. První je stav, kdy se pracovní prostory překrývají, ale roboty tisknou oddělené části stavby, nutné je jen vyloučení vzájemné kolize.



Kostel Neratovice – koordinovaný nezávislý tisk dvěma roboty
Neratovice church – coordinated independent printing by two robots

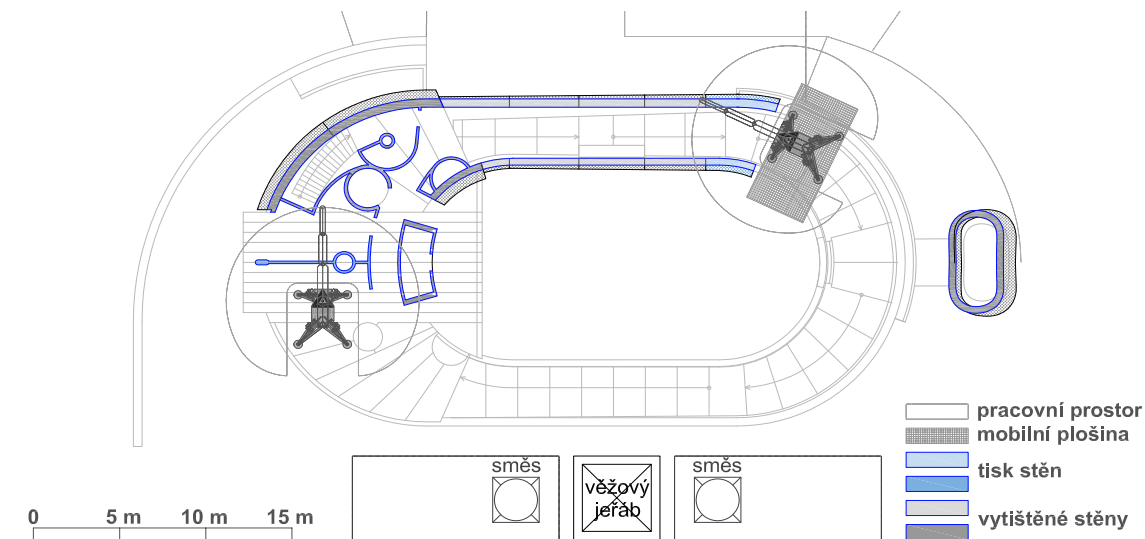
Druhou možností je součinnost obou robotů při tisku jednoho dílu. Ta by byla charakteristická nejen překryvem pracovních prostorů, ale i částečným přesahem tištěných vrstev. Tímto způsobem je možno tisknout díly, jejichž půdorysné rozměry přesahují velikost pracovního prostoru jednoho robotu.



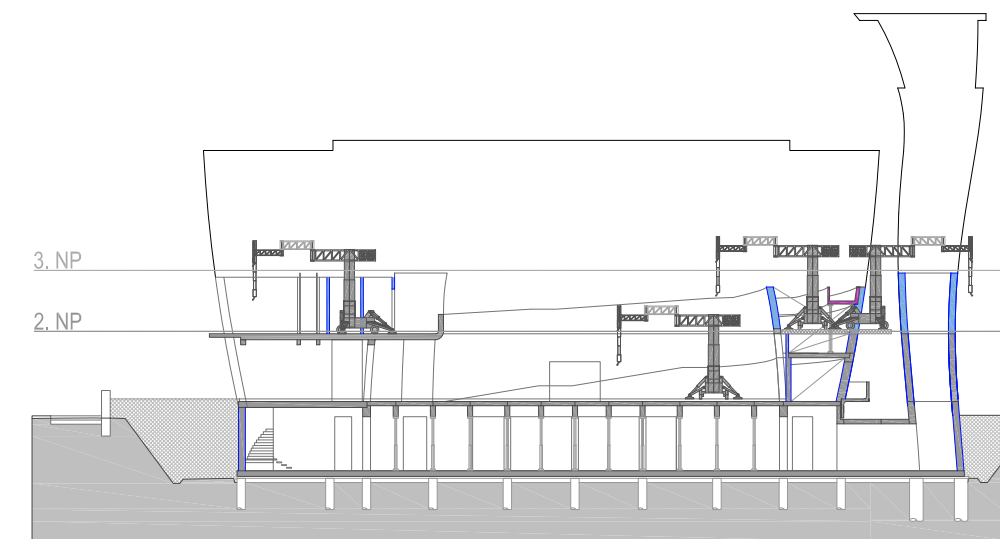
Kostel Neratovice – koordinovaný společný tisk dvěma roboty
Neratovice church – coordinated joint printing by two robots

POMOCNÉ PRVKY PRO TISK **AUXILIARY ELEMENTS FOR PRINTING**

Při tisku obvodových a vnitřních stěn, vymežujících chrámovou loď a meziprostor pro rampy, nebyly k dispozici potřebně rozsáhlé, vodorovné stropní konstrukce pro osazení tiskových robotů. Namísto nich bylo proto uvažováno užití podpůrné mobilní kovové plošiny, přemísťované postupně, zároveň s robotem a pokládáné na již vytištěné konstrukce.



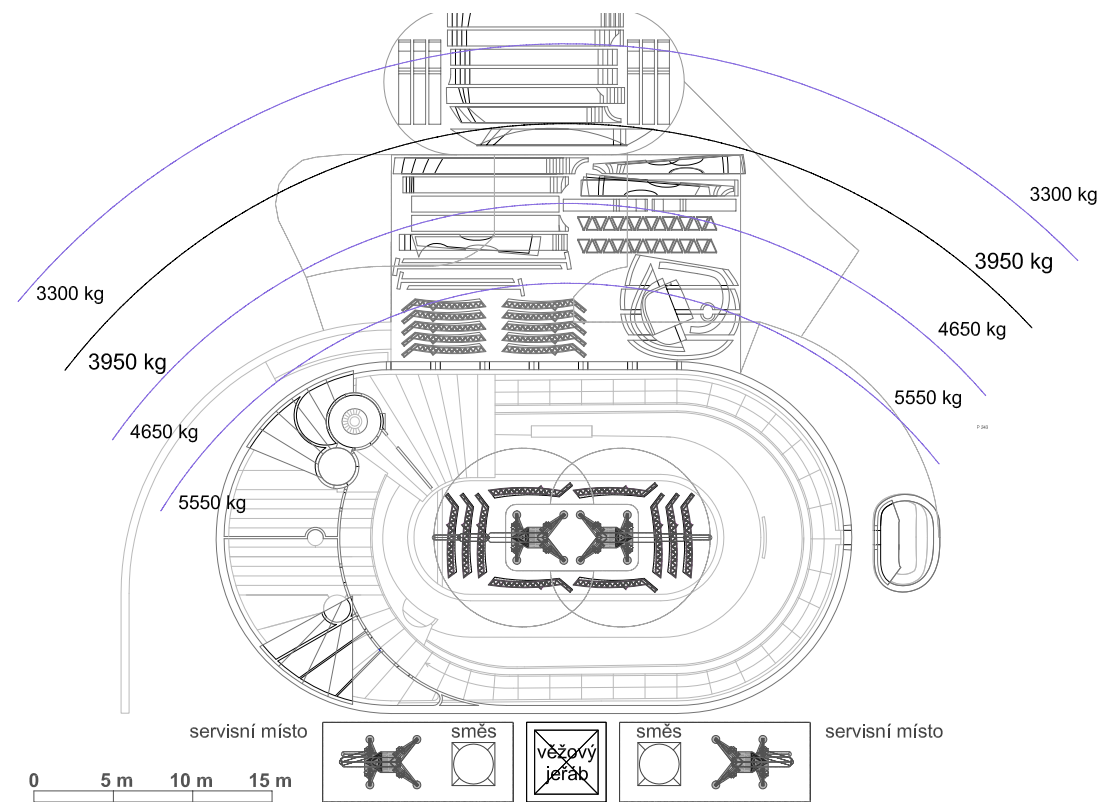
Kostel Neratovice – užití pomocné podpůrné mobilní plošiny pro tisk – půdorys 2.NP
Neratovice church – auxiliary support mobile platform for printing - 2nd floorplan



Kostel Neratovice – užití pomocné podpůrné mobilní plošiny pro tisk – řez 2.NP
Neratovice church – auxiliary support mobile platform for printing - 2nd floor section

MANIPULACE SE STAVENIŠTNÍMI PREFABRIKÁTY **HANDLING OF PREFABRICATED STRUCTURAL PARTS**

Tvar a konstrukce kostela vyžadovala tisk většího počtu staveništních prefabrikátů. Pro manipulaci s nimi je navržena plocha za budovou kostela, tvořená z části základovou deskou fary a zejména upravenou plochou dvora mezi kostelem a farou. Sem jsou, v návrhu podle potřeby, po vytvrnutí odkládány staveništní prefabrikáty, vytištěné uvnitř kostela. Zde jsou také tyto díly překlápěny do transportní polohy pro zavěšení na věžový jeřáb. Při extrémním zaplnění plochy může být pro manipulaci podle potřeby využit i pomocný autojeřáb.

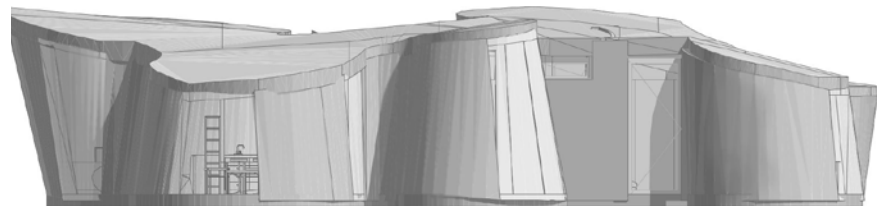


Kostel Neratovice – maximální rozsah využití manipulační plochy
Neratovice church – maximum extent of use of the handling area

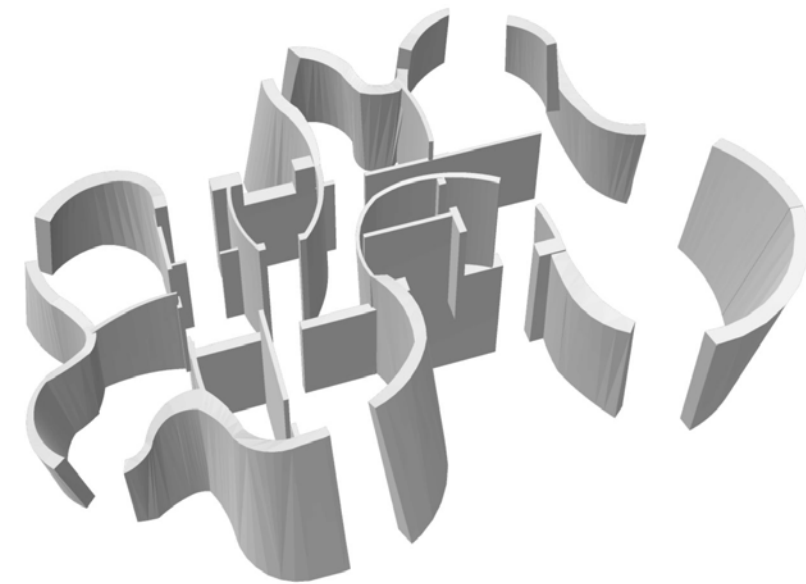
STUDENTSKÉ NÁVRHY STUDENT PROPOSALS

ANASTASIA POLISHCHUK – RODINNÝ DŮM ANASTASIA POLISHCHUK – FAMILY HOUSE

Architektonická studie přízemního rodinného domu, navrženého pro ověření možnosti využití tenkostěnných tištěných konstrukcí, jejichž stabilita je podpořena prohnutím ve vodorovném směru. Návrh pracuje s kombinací prohnutých stěn, zejména v exteriéru budovy a rovinných stěn v jejím interiéru. Prohnutí hlavních tištěných stěn zlepšuje jejich stabilitu a oživuje hmotové a prostorové působení budovy. Rovné stěny umožňují snadnější využití interiéru pro přistavení nábytku.



Tištěný dům – pohled
Printed house – elevation



Tištěný dům – schéma stěn
Printed house – wall diagram



Tištěný dům – kombinace prohnutých a rovinných stěn
Printed house – a combination of curved and flat walls





08

NĚKOLIK VĚT ZÁVĚREM

A FEW FINAL SENTENCES

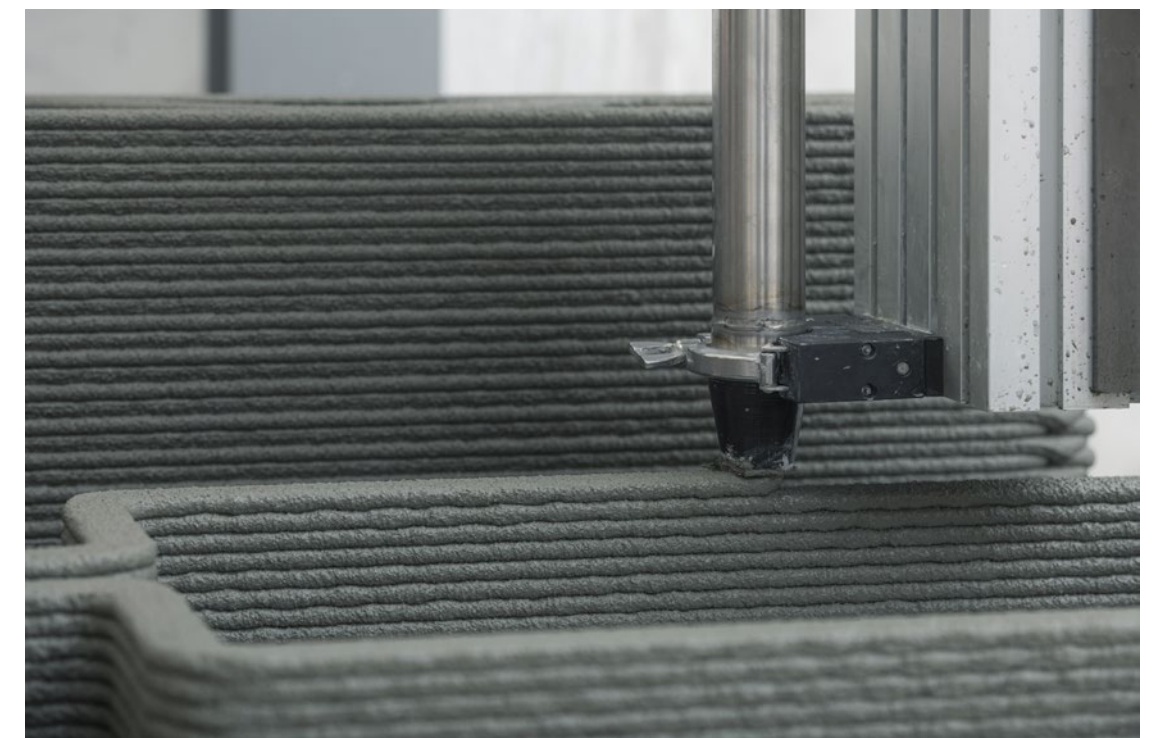
Jiří Suchomel, Petr Zelený

KAM JSME DOŠLI

Ačkoliv projekt 3D STAR skončí až po uzávěrci této publikace, je možno konstatovat, že přinesl zřetelné výsledky a zároveň otevřel řadu otázek a témat pro další práci v oblasti stavebního 3D tisku. Jeho nesporným kladem byla komplexnost přístupu k řešené problematice, zahrnující široké spektrum paralelně probíhajících a vzájemně se doplňujících a ovlivňujících výzkumných a vývojových činností v řadě oborů. K jeho jednoznačným úspěchům patří vývoj modifikovatelného tiskového materiálu, vývoj a realizace specifických robotických tiskových zařízení včetně unikátního softwaru i tisk vzorků tenkostěnných konstrukcí a měření jejich mechanických vlastností, potvrzujících smysluplnost nastoupené cesty.

HOW FAR WE HAVE COME

Although the 3D STAR project will end after the deadline of this publication, it can be stated that it has brought clear results and at the same time opened up a number of questions and topics for further work in the field of 3D printing in construction. Its indisputable advantage was the complexity of approach to the problem, consisting of a wide spectrum of parallel and mutually complementary and mutually influencing activities in research and development in a number of fields. Its unequivocal achievements include the development of modifiable printing material, the development and implementation of specific robotic printing devices, including unique software, and also the printing of samples of thin-walled constructions and the measurement of their mechanical properties, confirming the meaningfulness of the path taken.

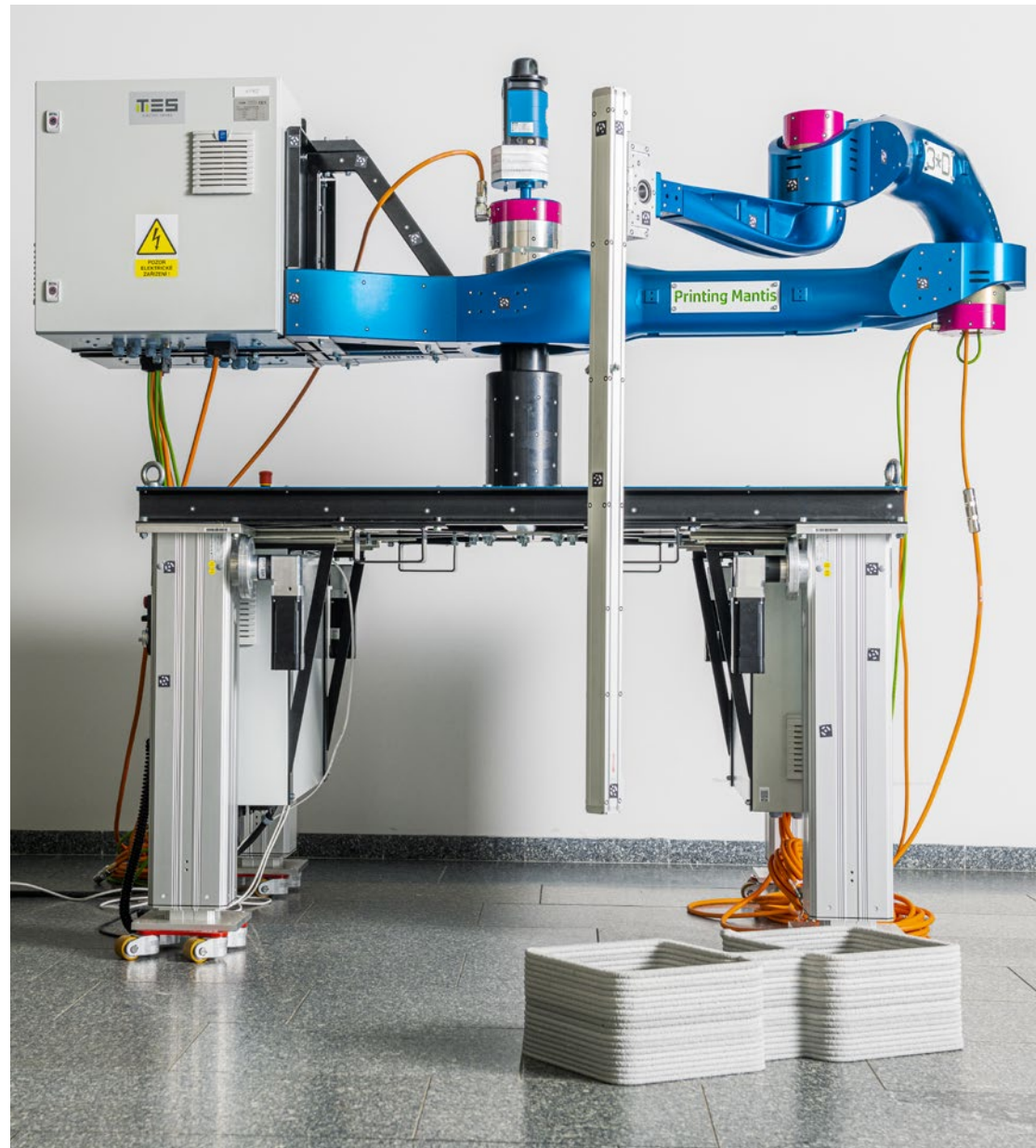


CO JEŠTĚ CHCEME STIHNOUT

Vlivem řady okolností, zejména covidové pandemie a dlouhotrvající celosvětové krize v dodávkách elektrických komponentů, se práce na projektu v jeho druhé polovině zpomalila. To postihlo zejména kompletaci a oživení funkčního zmenšeného modelu robotického ramene Printing Mantis. Doufáme ale, že se nám v posledních měsících roku 2022 podaří tento skluz alespoň částečně dohnat. Naším cílem je využít zbývající čas také k dalšímu tisku a testování vzorků konstrukcí a k vybudování libereckého tiskového pracoviště.

WHAT WE ALSO WANT TO ACCOMPLISH

Due to a number of circumstances, especially the covid pandemic and the long-lasting global crisis in the supply of electrical components, work on the project slowed down in its second half. This affected particularly the completion and activation of a functional scale model of the Printing Mantis robotic arm. However, we hope that in the last months of 2022 we will be able to at least partially catch up with this slippage. Our goal is to use the remaining time to do more printing, test sample structures and establish a 3D concrete printing laboratory in Liberec.



JAK V BUDOUCNU DÁL

V době udržitelnosti projektu chceme pokračovat v tisku na TestBedu v Kloknerově ústavu, oživit model ramene Printing Mantis v Liberci a pokusit se ho doplnit, včetně systému navigace na stavebníšti tak, aby bylo použitelné k tisku. Hlavním úkolem ale zůstává hledání partnerů z průmyslového prostředí pro další spolupráci. Ta by měla mít dva hlavní cíle – stavbu prototypu úplného tiskového robota a praktický tisk stavebních konstrukcí a objektů.

HOW TO PROCEED IN THE FUTURE

While the project is still sustainable we want to continue printing on the Testbed at the Klokner Institute, revive the Printing Mantis arm model in Liberec and try to supplement it with new features, including a navigation system for the construction site so that the arm can be used for printing. The main task that remains is to search in the industrial sphere for partners for further cooperation. This should have two main goals – building a prototype of a complete printing robot and practical printing of load bearing structures and objects.





3D STAR

EDITOR – EDITOR : Jindřich Ráftl

RECENZENT – REVIEWED BY : doc. Ing. arch. Miloš Florián, Ph.D ; doc. Ing. Marcel Horák, Ph.D.

TEXTY – TEXTS : Vladimír Balda, Květoslav Belda, Leoš Beran, Vladislav Bureš, Eva Burgetová, Josef Břoušek, David Čítek, Martin Diblík, Michael Gabriel, Lukáš Hubka, Karel Hurtig, Aleš Hvízdal, Libor Jendele, Daniel Kajzr, Petr Keller, Milan Kolář, Jiří Kolísko, Jan Koprnický, Jiří Kubín, Oto Melter, Radomír Mendřický, Tomáš Myslivec, Ondřej Novák, Tomáš Petr, Jiří Suchomel, Robert Voženílek, Václav Záda, Petr Zelený

FOTOGRAFIE – PHOTOGRAPHY : Kolektiv výzkumných pracovníků TUL, ČVUT; Radek Petrášek,

ČESKÁ JAZYKOVÁ REDAKCE – CZECH LANGUAGE REVISION : Ivana Scholze

PŘEKLAD - TRANSLATION : Kolektiv výzkumných pracovníků TUL, ČVUT

REVIZE ANGLICKÉHO TEXTU – ENGLISH LANGUAGE REVISION : Anna Světlíková

GRAFICKÁ ÚPRAVA – GRAPHIC DESIGN : Jindřich Ráftl

Vydala – Published by : Technická univerzita v Liberci, Studentská 1402/2, Liberec

ISBN 978-80-7494-643-1

Schváleno Rektorátem TUL

Dne dne 31.1.2023, čj. RE5/23

Vyšlo v prosinci 2022

Číslo publikace : 55-005-23

Tato publikace neprošla redakční ani jazykovou úpravou.

Vydání první. 142 stran.

Web : <http://3dstar.tul.cz/>

Výzkum prezentovaný v této publikaci a vydání této publikace byli podpořeny Evropskými strukturálními a investičními fondy Operačního programu Výzkum, vývoj a vzdělávání v rámci projektu „3D tisk ve stavebnictví a architektuře - 3D STAR“ reg. číslo CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_025/0007424.

The research presented in this publication and the issue were supported by the European Structural and Investment Funds of the Operational Programme Research, Development and Education within the project "3D Print in civil engineering and architecture - 3D STAR" reg. number CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_025/0007424.

TUL



**KLOKNERŮV
ÚSTAV
ČVUT V PRAZE**



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



9 788074 946431