

Fakulta strojního inženýrství
Ústav konstruování /
Odbor Reverzního Inženýrství a Aditivních technologií

Faculty of Mechanical Engineering
Institute of Machine and Industrial Design /
Department of Revers engineering and additive technologies

Procesní parametry velkorozměrového robotického 3D tisku kompozitní cementové směsi plněné odpadním betonovým recyklátem

[Projekt disertační práce]
[Dissertation work project]

Autor práce: **Ing. Arnošt Vespalec**
Author

NÁZEV V ČEŠTINĚ A ANGLIČTINĚ

Název

Procesní parametry velkorozměrového robotického 3D tisku kompozitní cementové směsi plněné odpadním betonovým recyklátem

Title

Process parameters of large-scale robotic 3D printing of composite cement mixture with addition of waste concrete.

SLOVA V ANGLIČTINĚ A ČEŠTINĚ

Klíčová slova

Robotický 3D tisk, Velkorozměrová výroba, Stabilita tvaru, Příměsi, Cementové směsi, Fuller-Thompsonová teorie

Keywords

Robotic 3D print, Large scale manufacturing, Shape stability, Additive materials, Cementitious mixtures, Fuller-Thompson theory

ANOTACE

Tato dizertační práce se zabývá velkorozměrovým 3D tiskem dílů z kompozitního cementového materiálu za použití robotického ramene KUKA KR60. Jedná se o aplikovaný výzkum, ve kterém bude vyvinuta strategie výroby a unikátní tisknoucí hlava pro vyztužovaný cementový materiál. Cementový materiál vychází z materiálu vyvinutém ve spolupráci s Fakultou stavební ČVUT v Praze v projektu TAČR Epsilon. Na základě teoretických výpočtů a rešerše bude definované konečné složení směsi, poměry příměsí, mísící poměry a její vlastnosti v případě vhodnosti využití pro technologii 3DCMP. Tento materiál bude obohacen o výztuž zlepšující jeho mechanické vlastnosti a bude podroben mechanickým zkouškám, které jsou typické pro zkoušení stavebních hmot.

OBSAH

NÁZEV V ČEŠTINĚ A ANGLIČTINĚ	3
Název	3
Title	3
SLOVA V ANGLIČTINĚ A ČEŠTINĚ	5
Klíčová slova	5
Keywords	5
ANOTACE	7
OBSAH	9
4 ÚVOD	11
5 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ	13
5.1 3D tisk betonu ve stavebnictví	13
5.2 Materiál a procesní parametry	21
5.3 Výztuže	28
6 ANALÝZA A ZHODNOCENÍ POZNATKŮ	36
6.1 Obecná analýza poznatků vycházející ze současného stavu poznání	36
7 PODSTATA, CÍLE A PŘÍNOS DP	39
7.1 Podstata disertační práce	39
7.2 Hlavní cíl disertační práce	39
7.3 Přínos disertační práce	40
8 VĚDECKÁ OTÁZKA A PDRACOVNÍ HYPOTÉZY	41
8.1 Vědecké hypotézy a otázky	41
<i>Pracovní hypotéza 1</i>	41
9 ZPŮSOB ŘEŠENÍ A POUŽITÉ VĚDECKÉ METODY zkoumání	43
9.1 Materiál, zařízení a software	44
9.2 Postup	46
9.2.3 Vývoj a studium procesních parametrů pro 3DCMP	48
9.2.4 Výztuž	48
10 ROZVRH ŘEŠENÍ DP	50
11 ODŮVODNĚNÍ NUTNOSTI	51
12 SPOLUPRÁCE S INSTITUCEMI	52
13 NÁKLADY A ZDROJE	53
13.1 Předpokládané náklady	53
13.2 Financování výzkumu	53
14 CHARAKTERISTIKA PŘEDPOKLÁDANÉHO VÝSLEDKU	54
14.1 Předpokládaný výstup řešení DP	54
14.2 Seznam vhodných periodik pro publikaci výsledků	54
15 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	55
16 VĚDECKÝ ŽIVOTOPIS	58

4 ÚVOD

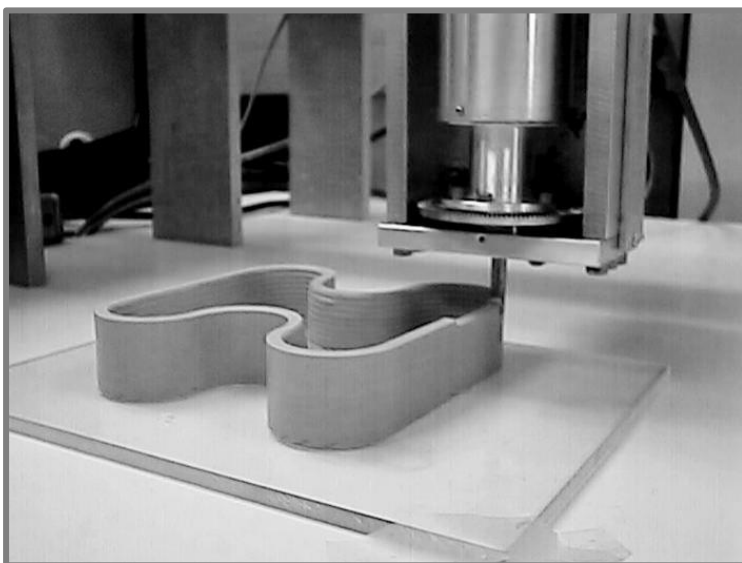
Primitivní metoda aditivní výroby 3DCMP (z anglického 3D Cementitious Material Print, dále jen 3DCMP) formou kontinuálního vrstvení stavebního materiálu metodou FDM (FDM – Fused Deposit Metod, dále jen FDM), se ve stavebnictví využívá již posledních 20 let [1]. Touto cestou však docházelo pouze k transportu stavebního materiálu na obtížně dostupná místa, k prefabrikaci jednoduše tvarovaných stavebních dílců nebo k tisku primitivních stavebních útvarů jako jsou stěny.

V současné době se v oblasti 3D tisku velkorozměrových dílců z betonu nejvíce využívá metody technologie aditivní výroby, známou pod anglickým názvem, Contour Crafting (CC). CC je v podstatě metoda, která umožňuje výrazné zjednodušení a urychlení výroby prefabrikovaných dílců nebo staveb oproti klasické technologii FDM (Fused Deposit Method). Využití metody výroby však závisí na komplexnosti výroby velkorozměrových dílců. [2]

Je tedy klade celkově vyšší tlak na estetiku, funkci, ekonomickou udržitelnost staveb, ekologický dopad na životní prostředí a samotnou časovou náročnost při realizaci stavby. Logická je proto reakce soukromého ale i akademického sektoru v podobě probíhajících a ukončených výzkumných nebo vývojových prací se zaměřením na efektivní využití aditivní výroby v architektuře a ve stavebnictví.

Většina subjektů používá k realizaci 3D tisku obecně stejnou koncepci konstrukce a míru automatizace stroje, jak je tomu u 3-osých obráběcích center, kde základem je tuhá rámová konstrukce. Tato konvence omezuje celý potenciál 3D tisku pro tisk složitých a rozměrných struktur do 2,5D prostoru, zachovává však vyšší přesnost. Opakem této konvence jsou robotická ramena. Ty umožňují plnohodnotnou práci ve 3D prostoru, (tzv. Spatial 3D print = prostorový 3D tisk, Robotic fabrication = Robotická výroba), díky 6-ti, a některá robotická ramena disponující pojezdem i v 7-mi osách, se zachováním relativní přesnosti. Přesnost robotických ramen je však řádově nižší oproti konvenčním strojům.

Motivací disertační práce je výroba složitých dílů o velkém rozměru aditivní výrobou 3DCMP za použití dostupné technologie robotické výroby, tak aby byl výsledný produkt vhodný pro praktickou aplikaci.



Obr. 4.1 CC 2,5D dílu [9]

5 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

Ve světě se používá několik metodických postupů digitální výroby pro aditivní výrobu 3DCMP. Tato kapitola je přehledem informací získaných z primárních a sekundárních zdrojů a výsledků vědeckých týmů z celého světa věnující se 3DCMP. Kapitola se soustředí na relevantní druh technologií a metod pro výrobu velkorozměrových dílců z cementových materiálů. Zpravidla však platí precedent, kde konstrukce tisknouceho aparátu, procesní parametry a možnosti výroby jsou přímo závislé na druhu extrudovaného materiálu.

5.1 3D tisk betonu ve stavebnictví

Metody aditivní výroby (z anglického AM = additive manufacturing, dále jen AM) byly obecně vyvinuté za účelem vyrobení komplexních struktur, nemožné vyrobit konvenčními metodami, se zachováním požadovaného rozlišení. Pro AM jsou klíčové faktory jako je rychlost výroby (Rapid Prototyping), schopnost výtisku velkých dílců, redukce defektů vznikajících při 3D tisku a zlepšení mechanických vlastností.[3]

Pro 3DCMP se využívá zpravidla pouze metod výroby FDM, CC a 3DP. Důvodem je charakteristika chování cementových materiálů (zpracovatelnost, výstavba, nosnost).

Portálová konstrukce

K 3D tisku dílů technologií FDM o velkém rozměru z cementových materiálů se v současné době také využívá strojů s portálovou koncepcí. Jedná se o finančně dostupné řešení, které nabízí přesnost, rychlost a spolehlivost výroby. U těchto strojů se využívá metody CC[4]



Obr. 5.1 Portálová konstrukce velkorozměrové 3D tiskárny [4]

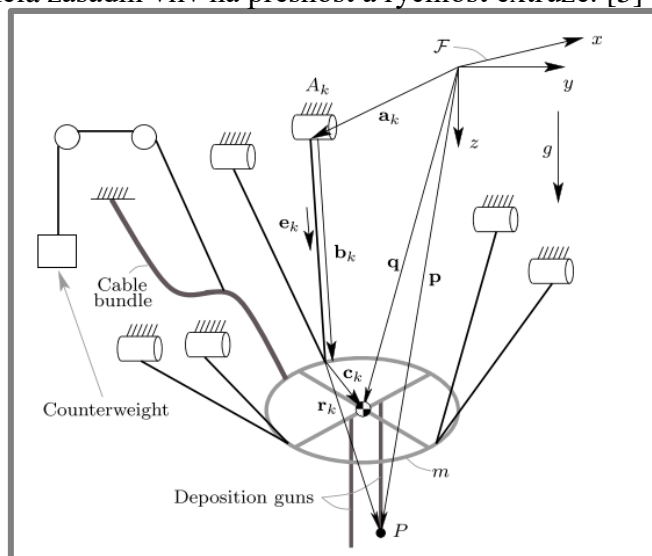
PKM – se zavěšením na laněch

Dalším přístupem pro 3D tisk těchto materiálů je využití robotických strojů založených na principu paralelní kinematiky. Druh tohoto stroje využil Izard a Jean-Baptiste ve studii *Large-scale 3D printing with cable-driven parallel robots*. Zaměřovali se na schopnosti 3D tisku závěsné platformy s tiskovou hlavou. Platforma byla zavěšená na ocelových laněch v prostoru, předmětem zkoumání bylo využití navržené koncepce stroje z hlediska adaptability velikosti tisknouceho prostoru, univerzality a přesnosti 3D tisku metodou FDM. Tyto technické parametry byly testované za cílem určení přesnosti výtisku a procesních parametrů extruze z jílové hmoty. [13]



Obr. 5.2 Závěsný systém PKM [13]

Na tuto studii navázali autoři Barnett a Clément studií *Large-scale 3D printing with a cable-suspended robot*, kde využili koncepci zavěšené tisknouce hlavy pro extruzi expanzní pěny. Cílem bylo zjištění kvality výtisku při vyšších rychlostech, kde přidáním počtu horizontálních (stabilizačních) a závěsných (nosných) lan zajistili nižší pnutí a vibrace v laněch. Tato modifikace výrazně zvýšila tuhost předepjaté konstrukce a měla zásadní vliv na přesnost a rychlost extruze. [5]



Obr. 5.3 Schéma principu závěsného PKM [13]

Robotická ramena

Využívání robotických ramen a robotů podle normy ISO 8373 je zejména v automobilovém průmyslu běžným standardem od roku 1994, ale úvahy o použití robotických ramen ve stavebnictví a architektuře začínají už dříve a to v 90. letech minulého století. Za historicky prvním použitím robotického ramene pro aplikaci v jiném, než strojírenském průmyslu stála německá univerzita ETH Zurich architektonickým projektem Gantenbein Vineyard Facade. Tento projekt vznikl v roce 2006 pod taktovkou Fabia Gramazia a Matthiase Kohlera.[6]

Během tohoto projektu došlo k praktické ukázce potenciálu robotických ramen použitých v architektuře. Zejména však k potvrzení hypotézy, že robotická ramena mohou být využívána k utváření různých výrobních strategií, které není možné aplikovat u konvenčního způsobu výroby, nebo lidské pracovní síly. [6]

Tímto historickým okamžikem vzniklo označení **Robotic fabrication**. [6] Od té doby vzniklo a stále vzniká velké množství koncepcí strategií výroby a možnosti využití robotických ramen právě ve stavebnictví a architektuře. Jedná se především o 3DCMP a jiných hmot jako jsou druhy plastických hmot (PLA, ABS), pryskyřice, aj....

Tento způsob použití robotických ramen otevírá nové možnosti v plánování výroby a nabízí nový pohled na schopnosti výroby struktur nebo dílů, které dříve nebylo možné jednoduše vyrobit. K zajištění správné strategie výroby a optimalizace vyráběných dílů se využívá zejména metod generativních algoritmů, založených na matematických principech. [7]



Obr. 5.4 Robotické rameno KUKA [13]

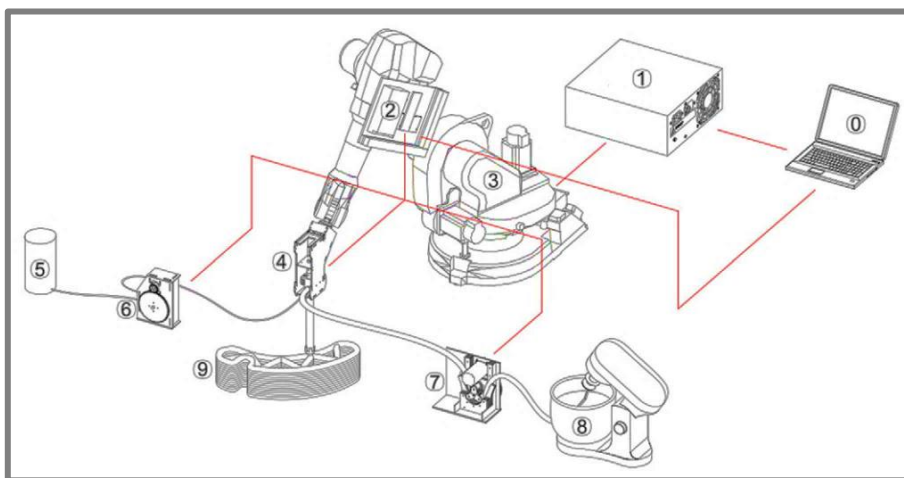


Obr. 5.5 Hybridní robotické rameno [13]

Keating a Oxman se ve své studii, *Compound fabrication: A multi-functional robotic platform for digital design and fabrication*, věnovali úvahám o budoucnosti multifunkční robotické výroby v kontextu s experimenty řízení robotů při procesu výroby 3D tisku domů. Při evaluaci jednotlivých koncepcí uvedených v této studii, přezkoumávali relevantnost jednotlivých systémů a průkaznost využití v praxi. [8]

R. Duballet se zabýval problematikou klasifikace komplexity výroby 3D tisku velkorozměrových betonových dílů, kde zohledňuje klíčové parametry při užití různých konfigurací robotického ramene, odlišných strategií výroby betonových dílců a velkorozměrových prefabrikátů.[1] Podle R.Dubaletta je největší výzvou vytvořit nové komplexně řešené stavební elementy v podobě cihel, které budou součástí většího elementu stavby. Jedná se tedy o definování strategie sestavení [2][9].

Velkorozměrový tisk zkoumal C. Gosselin a kolektiv ve studii *Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete - a new processing route for architects and builders*, kde používal tisknoucí aparaturu v podobě robotického ramene (viz. Obr. níže) [10]



Obr. 5.6 Koncepce tisknoucí aparatury dle Gosselin.C.[10]

0. Zpracování dat, 1. Řídicí jednotka robotického ramene, 2. Řízení 3D tisk, 3. Robotické rameno KUKA, 4. Tisková hlava, 5. Urychlovač tvrdnutí, 6. Peristaltické čerpadlo pro urychlovač tvrdnutí, 7. Peristaltické čerpadlo pro předmíchávač směsi, 8. Předmíchávač směsi, 9. Vytisknutý objekt

5. SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

Studie prozkoumala limitaci existující aditivní výroby materiálů na bázi cementu a v rámci této studie byla navržena nová koncepce výroby. Studie zpracovává nový postup zpracování aditivní výroby pro Ultra-pevnostní beton. Jmenovitě se studie zabývala:

- Možností výroby rozsáhlých vytištěných struktur bez dočasných podpor.
- Pomocí metody tangenciální kontinuity pro nařezání dílu dosáhli tisku struktury o různé tloušťce stěny.
- Studie potvrdila, předpokládané schopnosti robotického ramene. Umožňuje 3D tisk geometricky složitějších dílů a komplexněji kontrolované procesní operace.
- Pro experimenty bylo využito materiálu Premix o složení: Portlandského cementu CEM I 52.5 n (30 – 40% w), krystalického křemene (40 – 50% w), oxidu křemičitého (10% w) a výplně vápence (10% w). Jednou smíchán s vodou ve velmi malém poměru (voda/(cement + písek) hmotnostní podíl, tj. $w/(c+s) = 0,1$), materiál obsahuje ultra – vysoce pevnostní samonivelační maltu s aditivem ve formě urychlovací pryskyřici na bázi polymeru. Toto aditivum zvyšuje míru provázanosti struktury mezi jednotlivými vrstvami.
- Ve studii potvrzují následující výzkum, který bude navazovat na zjištěné poznatky tisku geometricky náročných dílců s nadstavbou v podobě použití více druhů materiálů během tisku najednou.



Obr. 5.7 Robotické rameno na staveništi [13]

Dalším přístupem pro 3DCMP je 3D tisk metodou 3PDT. Principem této metody je vytvoření provázané struktury mezi vrstvami stavební hmoty ve formě prášku prostřednictvím pojidla adhezivního charakteru. Touto metodikou se zabýval Gionnavi Cesaretti ve studii *Building components for an outpost on the Lunar soil by means of a novel 3D*, kde předmětem jeho výzkumu byl: [11]

- Tisk do prášku cementové hmoty za pomoci pojiva ve formě adhezivního lepidla
- Proces vypařování a funkce adhezivního lepidla při rozdílných tlacích
- Difuze lepidla za specifických atmosférických podmínek vakua z hlediska utvoření provázané struktury mezi jednotlivými přísadami ve směsi.

Obr. 5.8 Vstup, výroba, a výstup metody 3PDT [11]



Dalším přístupem pro 3DCMP je CC (Z anglického Contour Crafting, dále jen CC). Jedná se o metodu, která byla původně vyvinutá pro konstrukci staveb na měsíčním povrchu. Výhodou této metody v porovnání s ostatními je produkce kvalitnějšího povrchu díky zakončení trysky a jejím tvaru. Na vyústění trysky jsou zpravidla stěrky, které usměřňují tok materiálu a rychlost výroby.[3][4]

Jednou ze studií, která se zabývá automatizací ve stavebnictví využitím metody CC je studie Behorkha Khoeshnevisa: *Automated construction by contour crafting - Related robotics and information technologies*. V této studii Khoeshnevis zkoumá celkové schopnosti a možnosti metody CC u robotických ramen, která se nesoustředí pouze na 3D tisk, ale také na možnosti skládání prefabrikátů, vyztužování během tisku. Zabývá se také možností uplatnění této metody při budování habitatů na jiných planetách naší sluneční soustavy, například Marsu nebo Měsíci.[9]

5.2 Materiál a procesní parametry

Z primárních zdrojů od vědeckých týmů po celém světě plynou informace o použitých metodách, procesních parametrech, udržitelnosti a efektech digitální výroby různých materiálů stavebního charakteru. Hlavním problémem 3DCMP je samotný materiál.

Cementový materiál (beton) je dle ČSN EN 206-1 kompozitní stavební materiál ze směsi cementu, hrubé a drobné frakce kameniva, vody, s přísadami a příměsami nebo bez nich. Beton vzniká při procesu hydratace, při které získává své mechanické vlastnosti. [xz]

Podle knihy *Properties of Concrete* od A.M. Neville je pevnost betonu ovlivněná poměrem množství vody k množství cementového materiálu dále pak poměrem kameniva vůči cementu a velikosti, tvaru a třídy agregátu a vazbou mezi pojivem a agregátem. Agregátem se rozumí písek, drcený kámen, vysokopecní struska, recyklovaný beton aj....

Hydratace je složitý chemicko-fyzikálním proces. Dochází při něm ke spojení základních a doplňkových složek (pojiva, plniva, vody, přísad a příměsí). Ve stavebnictví se používá široké spektrum betonů s různým druhem přísad, příměsí a agregátů v různém poměru. Pro technologii 3DCMP nejsou však vhodné všechny cementové materiály. [xz]

Vhodným materiálem pro 3DCMP se zabývá široká základna studií. Jedním z nich je studie od autorů Biranchi Panda a Ming Jen Tana, kde upozorňují na potřebu snížení obsahu cementu ve směsi a částečné, nebo úplné nahrazení cementu pojivy s nízkým obsahem CO₂, nebo geopolymery. Důvodem je náročnost cementu na výrobu, při které se uvolňuje enormní množství emisí CO₂. Geopolymerní cementy mají vynikající mechanické vlastnosti a jsou odolné. Mezi ně patří zejména metakaolin objevený v roce 1970 Davidovitsem. Metakaolín je výsledkem kinetické geopolymerizace: hydroxylace a polykondenzace tepelně aktivovaného kaolinu v alkalickém roztoku. [12]

Další snahou o snížení emisí CO₂ se zabývá studie Soon Poh Yap a kolektivu. Kde deklaruje, že využití recyklovaných hrubých frakcí betonového recyklátu(RCA) ze stavebních a demoličních odpadů k výrobě betonu, šetrného k životnímu prostředí, je dlouhodobě udržitelné řešení. Provedenými experimenty potvrzuje, že nahrazením normálního kameniva hrubou frakcí betonového recyklátu (RCA), došlo ke snížení emisí CO₂ vynaložených při výrobě o 24%. ale zároveň ke snížení pevnosti v tahu a ohybu.[13]

Podle studie Sanjayan J. a kolektivu je slabým místem jakékoli vytištěné struktury z betonu malá pevnost mezi vytištěnými vrstvami. Mezi extrudovanými vrstvami mohou vzniknout vady, které působí jako koncentrátoři napětí. Mezi vrstvami betonů při odlévání závisí pevnost spojů jednotlivých dávek betonů na vlhkosti stýkajících betonových povrchů. U 3DCMP jsou vrstvy stále v čerstvém stavu na rozdíl od odlévání betonu do formy. Je tedy nutné zkoumat styk mezi těmito vrstvami. Pevnost mezi vrstvami je ovlivněna adhezí materiálů mezi extrudovanými vrstvami. Jedná se tedy o funkci časového intervalu mezi kladení vrstvy na vrstvu. Tento interval je označován jako doba zpoždění.[14]

Yiwei Weng a kolektiv se ve své studii zaměřoval na návrh cementových materiálů vhodných pro použití ve výrobě technologií 3D tisku. Soustředil se na speciální požadavky na reologické vlastnosti cementových materiálů, které jsou klíčové při 3DCP. Tyto vlastnosti jsou ovlivněny širokým spektrem faktorů, zejména však poměru zastoupení velikosti zrn kameniva ve směsi.

Pro optimalizaci parametrů cementových směsí použil Fuller-Thompsonovu teorii model ke snížení obsahu cementu a optimální reologii, Binghamův model pro určení závislosti mezi smykovým napětím a smykovou rychlostí, a Marson-Percyho model pro určení optimální velikosti zrn písku a koeficientu zaplnění.[15]

Všechny směsi byly složeny z Portlandský cement (OPC, ASTM typ I, Zrnitost 42,5), oxidu křemičitého (SF, nedělený, Zrnitost 940, společnost Elkem), křemičitý písek, popílek, přírodní říční písek, voda a superplastifikátor. Každá směs byla smíchána ve stejném poměrovém zastoupení přísad a příměsí, ale při rozdílné zrnitosti v závislosti na použité metodě [4]

Pro vyhodnocení charakteristických reologických vlastností použitých cementových směsí byl použit reometr Viskomat XL. Na základě získaných údajů z reometru byly vypočteny hodnoty statické a dynamické meze kluzu a plastické viskozity vztahem podle studie Chhabra a kol.:

$$\Gamma = \frac{4\pi R_1^2 R_2^2 L \eta}{R_1^2 - R_2^2} \omega_2 - \frac{4\pi R_1^2 R_2^2 L \tau_0}{R_1^2 - R_2^2} \ln \frac{R_1}{R_2} \quad (5.1)$$

Kde Γ (Nm) je točivý moment, ω_2 (rad/s) je obvodová rychlost venkovní nádoby, l (m) a R_1 (m) je délka a poloměr lopatkové sondy, a R_2 (m) je poloměr venkovní nádoby

Pro posouzení zpracovatelnosti směsí technologií 3DCP byly zjištěny jednoduchým testem sednutím, kde se vyhodnocovala výška sednutí a průměry pomyslných koncentrických kružnic, označující hranice dvou pomyslných materiálových hmot [4].

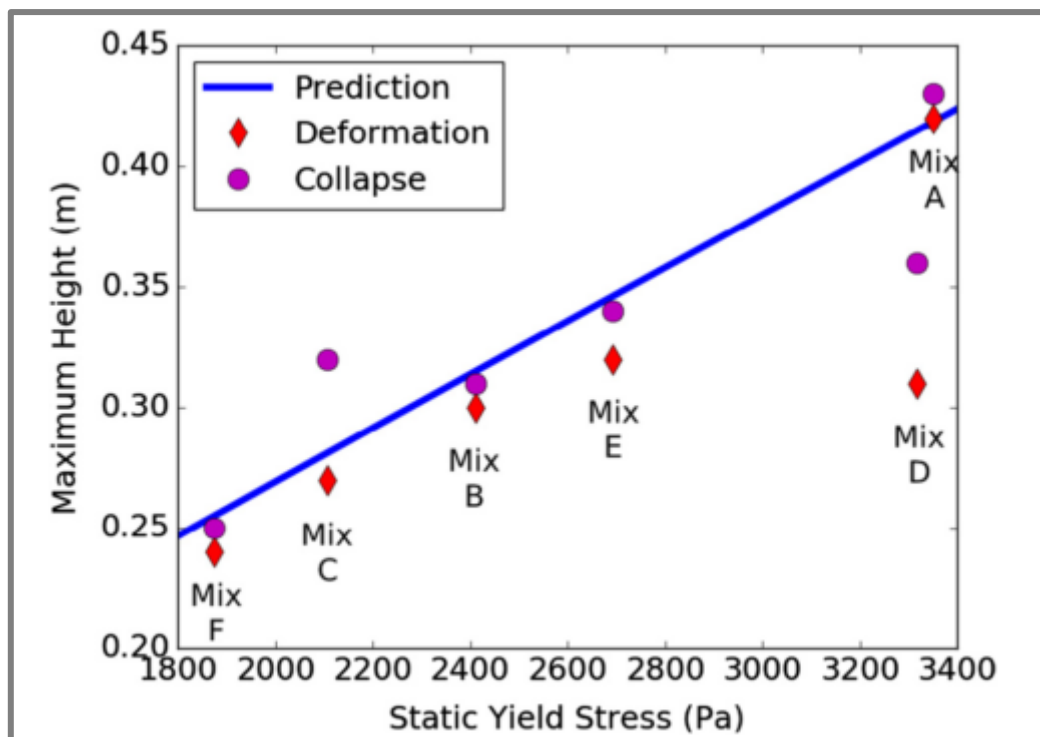
Pro teoretické ověření zpracovatelnosti a předpokladech mechanických vlastností, bylo v závislosti na počtu směsí (6), vytištěno několik etalonů v podobě válce o vnitřním průměru 110 mm a výšce 50 vrstev. Každá vrstva byla vysoká 10 mm a široká 20 mm. Kde procesní parametry tisku jsou popsány v tabulce:

Tryska	30x15	mm
Rychlost tisku	4000	mm/min
Rychlost výnosu	1,8	l/min
Odsazení trysky při tisku	15	mm

Obr. 5.9 Tabulka parametrů [4]

V závislosti na výsledcích prvního testu 3D tisku jednotlivých směsí, a geometrickém faktoru α bylo empiricky vyhodnoceno, která směs je vhodná pro technologii 3DCP a které ne.

$$\alpha = (R_2^2 - R_1^2)^{-1} \left(\frac{1}{2} + \frac{C_\alpha}{R_2^2} \right)^{-1} \sqrt{\frac{3}{4} + \frac{C_\alpha^2}{R_2^4}} \cdot \left\{ \frac{4}{H} \left[\frac{(R_2^3 - R_1^3)}{6} + C_\alpha(R_2 - R_1) \right] \right. \\ \left. + 2C_\alpha \left(\sqrt{\frac{3R_2^4}{4C_\alpha^2} + 1} - \sqrt{\frac{3R_1^4}{4C_\alpha^2} + 1} \right) - 2C_\alpha \left[\operatorname{arcsinh} \left(\frac{2C_\alpha}{\sqrt{3}R_2^2} \right) - \operatorname{arcsinh} \left(\frac{2C_\alpha}{\sqrt{3}R_1^2} \right) \right] \right. \\ \left. - 2R_1^2 \left(\frac{3}{4} + \frac{C_\alpha^2}{R_1^4} \right)^{-1/2} \left(\frac{1}{4} - \frac{C_\alpha^2}{R_1^4} \right) - 2R_2^2 \left(\frac{3}{4} + \frac{C_\alpha^2}{R_2^4} \right)^{-1/2} \left(\frac{1}{4} - \frac{C_\alpha^2}{R_2^4} \right) \right\} \quad (5.2)$$

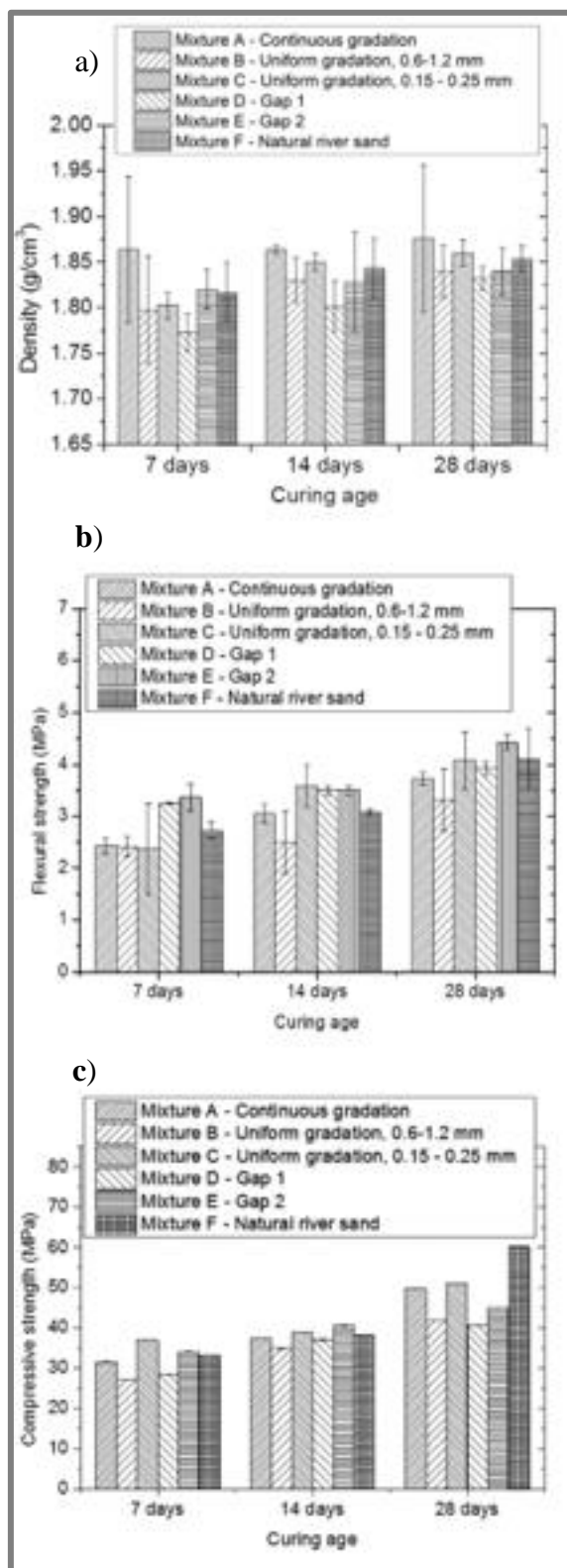


Obr. 5.9 Závislost meze kluzu na výšce výstavby [4]

Pro technologii 3DCP byla vhodní směs A se zrnitostí písku podle Fuller-Thompsonovy teorie:

- 39,23% zrn písku menších než 0,15 mm
- 10,14% zrn písku o velikosti v rozmezí 0,15-0,25 mm
- 23,84% zrn písku o velikosti v rozmezí 0,25-0,6 mm
- 26,8% zrn písku o velikosti v rozmezí 0,6-1,2 mm

Tuto směs použil Yiwei Weng a kolektiv k tisku velkorozměrného dílu, který byl vytištěn podle predikovaných parametrů. Přičemž Fuller-Thompsonova teorie a Marson-Percyho model lze použít jako konstrukční postup pro přizpůsobení materiálů tak, aby získaly vhodné reologické a mechanické vlastnosti [4]



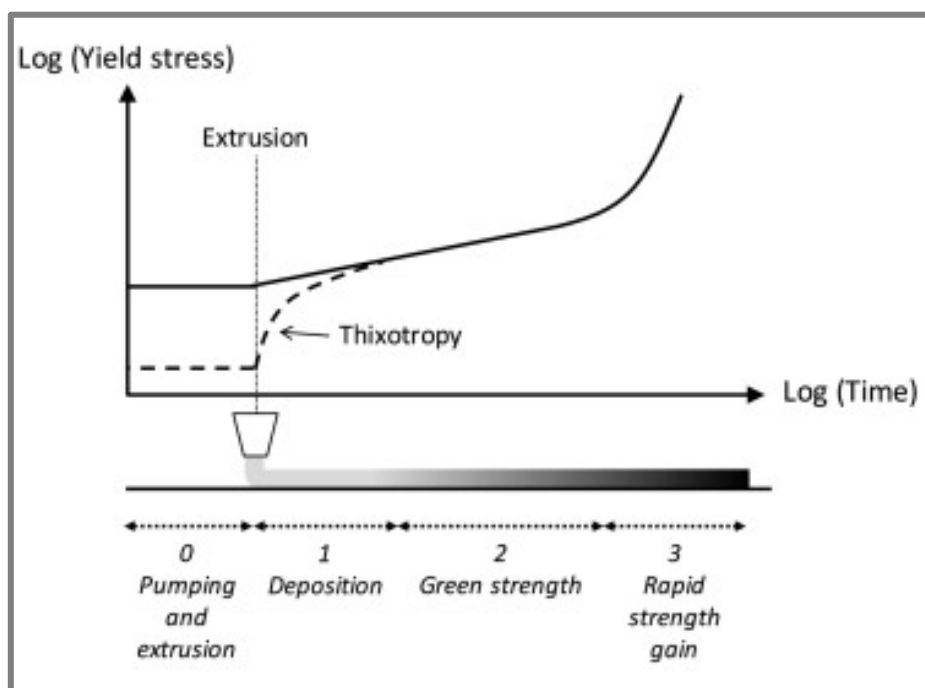
Obr. 5.10 Vlastnosti cementového materiálu vyztuženého skelnými vlákny v závislosti na době tvrdnutí: [4]

a) Hustota, b) Pevnost v ohybu, c) Pevnost v tlaku

5. SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

Reologické vlastnosti jsou obecně ovlivněna návrhem směsi, včetně objemového podílu pojiva s jeho složením (například přítomnosti doplňkových cementových materiálů) a vlastnostmi agregátů (distribuce a tvar velikosti částic). Přísady mohou být použity jako účinný nástroj upravující reologické vlastnosti směsi. Superplastifikátory ve směsi působí jako disperganční činidla a snižují mez smykového napětí (mez kluzu), a činidla modifikující viskozitu ke zvýšení plastické viskozity. Tyto aditiva se v čerstvých cementových směsích běžně používají k regulaci jejich dobré zpracovatelnosti. Jílové hmoty lze také použít jako tixotropní modifikátory. Pro úspěšnost aditivní výroby v podobě 3DCMP je klíčem kontrola reologie směsi pomocí vhodné kombinace příměsí. Většina aditiv je považována za chemicky inertní látky, jelikož mění fyzikální vlastnosti reologických vlastností. Tyto aditiva mohou vyvolat stejně silné fyzikálně-chemické vedlejší účinky, jako superplastifikátory, které ovlivňují proces hydratace cementu.[16][17]

Hlavní etapy reologického stavu betonů užívaných pro digitální výrobu popisuje článek od Delphine Marchona, kde se soustředí výhradně na extruzi tisku. Potřebné vlastnosti betonu autor popisuje tabulkou a grafem. V grafu ve sloupci log-log můžeme sledovat evoluci statické meze pevnosti ve vztahu k vlastnostem vytisknutelných betonů. Směr pokládání betonu reprezentuje schematicky cesta zprava doleva, kde čerstvý beton je ve světle šedé barvě a vytvrzený v černé. Fáze 0 reprezentuje časový rámec, kde je vyvíjen vysoký tlak na čerstvý beton při procesu míchání, čerpání, vytlačování a extruze. Ve fázi 1 beton vykazuje vnitřní klidovou strukturu. Přerušovaná čára vykazuje strukturální nárůst v přítomnosti **tixotropních činidel**. [16][17]



Obr. 5.11 Závislost meze kluzu materiálu na času 3D tisku [16]

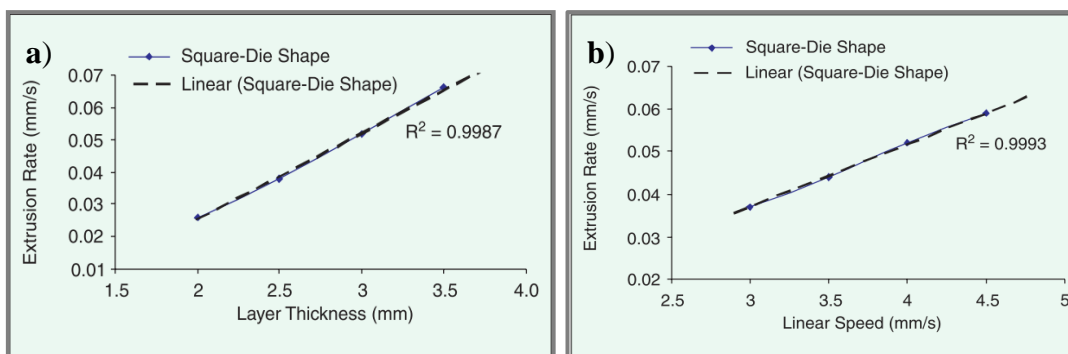
V tabulce jsou popsány požadavky v jednotlivých fázích a potenciální příměsy, které dovolují dosažení požadovaných vlastností směsi.

Stage	Concrete properties	Admixtures		
		Type	Targeted requirements	
0	Pumping and extrusion	High fluidity	SPs (PCEs)	Dispersion
		Mix stability	VMAs	Water retention
1	Deposition	Rapid structural build-up to retain its own shape and weight	VMAs	Flocculation of particles
			(Nano-) clays	Flowability during extrusion, "House of cards" effect at rest
			Polymeric fibers	Shear thinning during extrusion, 3D structure at rest
2	Green strength	Controlled open time	Entrained air	Shear thinning during extrusion, 3D structure at rest
			PCEs	Hydration retardation
3	Rapid gain strength	Setting through hydration reactions	Sugar derivatives	Duration of open time
			Portlandite	Inhibition of retarders action by either sucrose or PCEs uptake
			Clays	Enhanced chemical reactions
			Inorganic salts	Promoted formation of hydrates and development of new surfaces
			PCEs	
			C-S-H seeds	
3	Curing	Concrete hardening	Shotcrete accelerator	
			Saturated lightweight aggregates	Reduction of early water loss
			Expansive and shrinkage-reducing admixtures	Minimization of plastic shrinkage cracking

Obr. 5.12 Popis fází 3DCMP s vlastnostmi příměsí [16]

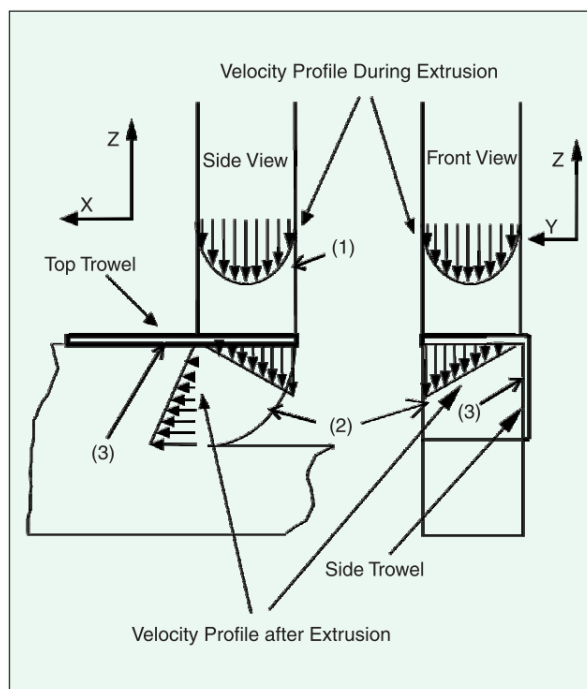
5. SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

Profesor Khoshnevis dále zkoumal procesní parametry metody CC a fyzikální chování 3D tisku keramického materiálu. Během optimalizace tisku keramického materiálu mu šlo prioritně o vysokou geometrickou přesnost extruze. Kde jako primární parametry ovlivňující rychlost fabrikace a tlak vynášené vrstvy byla lineární rychlost materiálu a jeho množství. Geometrie tisknuté stopy byla významně ovlivněna tlakem v místě nanášení.[9]



Obr. 5.13 Chování keramiky při tisku: a) Závislost rychlosti extruze na tloušťce stopy, b) Závislost extruze na rychlosti [9]

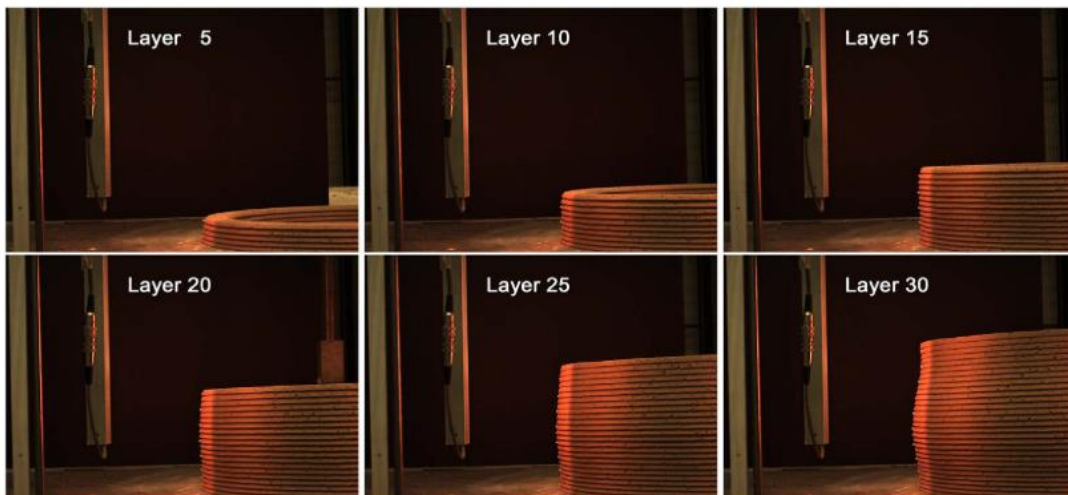
Keramika svými fyzikálními vlastnostmi spadá do ne-Newtonovských kapalin, konkrétně se jedná o Binghamskou kapalinu s plastickou složkou deformace, kde k toku dochází pouze při překročení určitého prahu smykového napětí a její tok tedy není lineární. Nicméně v tomto experimentu profesor Khoshnevis používal keramický materiál obsahující aditivum ve formě deflokulantů. Důsledkem přidání tohoto aditiva bylo Newtonovské chování keramiky při procesu extruze, tedy vytlačovaný materiál se svým chováním přiblížil chování lineární reologické kapaliny.[9]



Obr. 5.14 Schéma chování toku keramiky při extruzi [9]

5.3 Výztuže

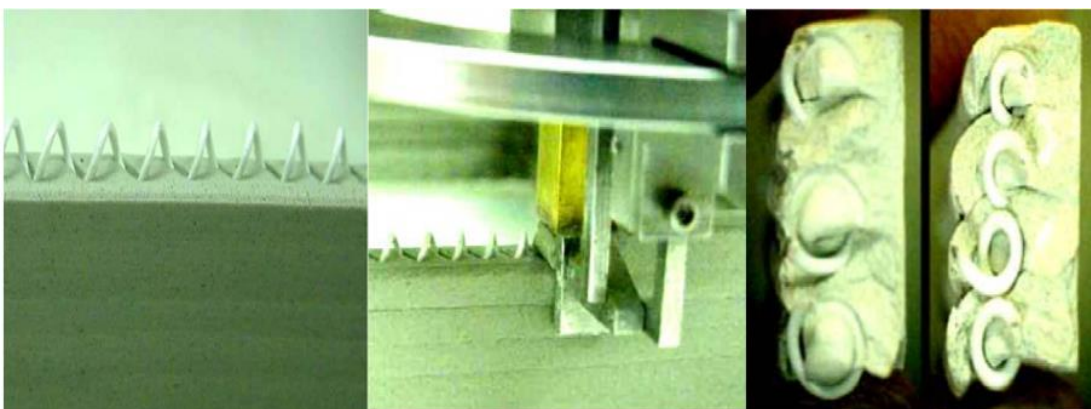
Při procesu 3D tisku cementových materiálů bez výztuže vždy dochází k nežádoucím jevům v podobě deformace vytištěné geometrie a jejímu následnému kolapsu. Tento jev je způsoben vlastní tíhou nánosů materiálu a jeho reologickými vlastnostmi. K vyztužení čerstvé cementové směsi technologií 3D tisku, existuje několik přístupů. [4]



Obr. 5.14 Stabilita nevyztuženého cementového materiálu [4]

Vyztužení cementové směsi armaturou

Tento proces vyztužování probíhá během 3D tisku, kdy se jednotlivé vrstvy provazují vinutým drátem po celém obvodu. Tento přístup krátce zmiňuje Khoesnievic ve studii Automated construction by contour crafting - Related robotics and information technologies. [9]



Obr. 5.15 Provázání vrstev pomocí výztuže [9]

Podle studie Daniel G. Soltan a kolektivu je v současnosti 3D tisk betonu velmi diskutovaným tématem, nicméně v důsledku popularizace se těžiště vědeckého zájmu soustředilo pouze na strojní část a tedy zlepšení procesu 3D tisku. Menší pozornost se věnovala samotnému materiálu.[18] [19][20]

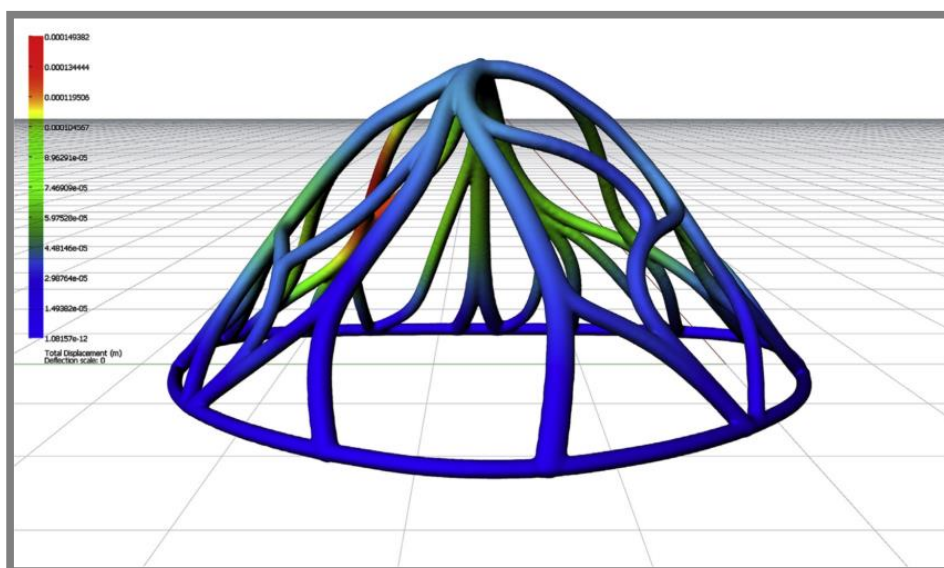
Svojí studií *A self-reinforced cementitious composite for building-scale 3D printing*, upozorňuje na důležitost zkoumat materiálové charakteristiky.

Tradiční beton je křehký a slabý při jakémkoli zatížení. Je náchylný při mechanickém namáhání ohybovým momentem nebo smykovými silami. Je tedy nezbytně nutné tuto hmotu vyztužit, nebo jinak upravit. Přínosem studie je samonosný tisknutelný cementový kompozit, který je navržen tak, aby omezil nebo zcela eliminoval přítomnost výztuže v podobě ocelové výztuže. Ocelová výztuž je náchylná ke korozi jejímž důsledkem může dojít k přenosu tahové síly na povrch betonu. Následkem tohoto jevu je rychlejší poškození betonových konstrukcí.[18]

V experimentech Elifa Erdina a Alexandrose Kallegiase [21] nedochází v žádné fázi stavby k využití technologie 3D tisku. Zabývá se integraci systémů forem, struktur a kompozitních materiálů za pomoci výpočetních nástrojů. Kdy první případová studie se zabývá hned dvěma aspekty. A to procesem navrhování a technikami výroby. Kde hlavní cíl bylo objevení formulace inovativní strategie procesu navrhování a konstrukce prostorově propletené struktury.

Jako první krok při porcesu navrhování funkční architektonické stavby si určili teoretickou množinu návrhu, vycházející z biologických systémů známé pod názvem Biomimikry = řešení inspirované přírodou (růst kolonií bakterií, hnízda ptáků, kolonie mravenců...). Výpočetní paradigma založené na ABM (Agent Based Model) bylo použito k vytvoření decentralizovaného a sebe-organizovaného chování. Těmito výpočetními algoritmy dosáhli simulace lokální interakce jednotlivých částí s celým systémem. Cílem bylo vyhodnotit komplexní chování celého systému a vyvodit příslušné závěry.[21]

Během tohoto výzkumu sebe-organizace kvituje FF (Free-Form) metodu zaměřenou na optimalizaci z hlediska maximální únosnosti struktury během procesu, kde se množství materiálu v systému snižuje zároveň však je zachována možnost lokálních úprav podle preferovaných architektonických vlastností.[21]

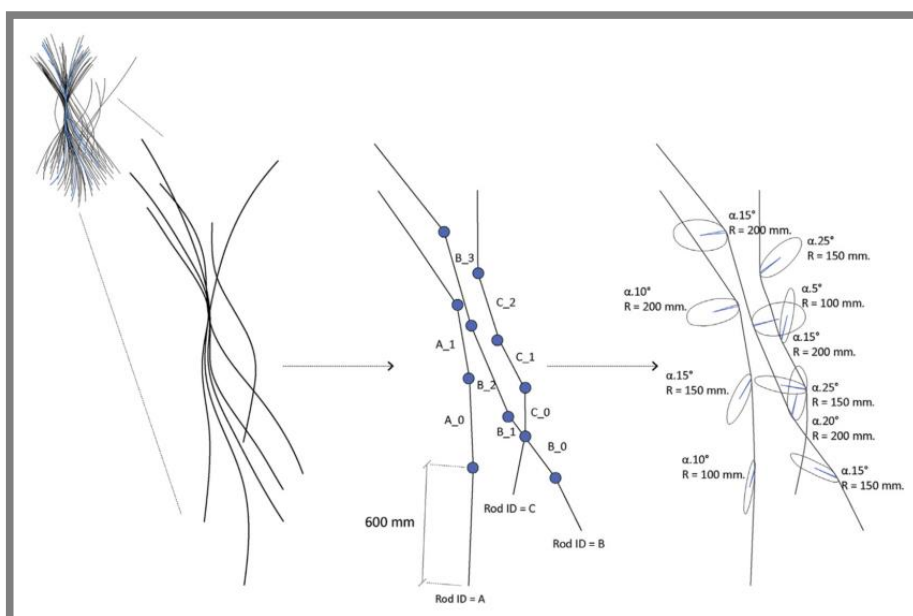


Obr. 5.17 Finální výstup strukturální analýzy MKP [21]

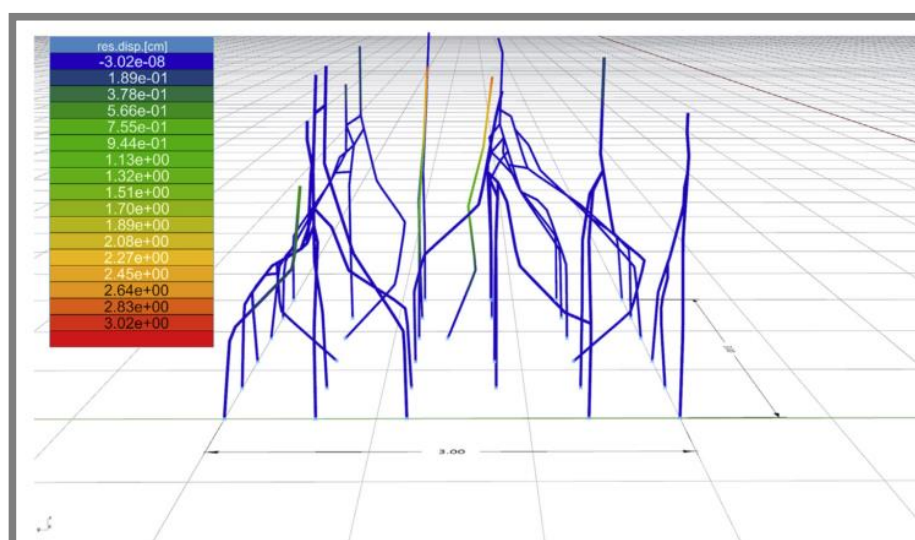
Simulace prošla iteračním cyklem, který vyhodnotil několik možných řešení s ohledem na zátěžnou sílu, gravitaci, množství materiálu. Po zvolení architektonicky vhodné struktury z ní extrahovali přirozený systém v podobě základních element zaznamenaný jako mračno bodů. Tyto body nesli informaci o koordinantech průběhu křivek. Na základě těchto dat došlo ke strukturální analýze metodou MKP (FEA) v softwaru Rhinoceros, pro vysoce zátěžový beton (C90/105).[21]

5. SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

Během procesu výroby použili jako vstupní data MKP analýzu. Na základě této analýzy a výstupní geometrie došlo k vypočtení výztuh. Výroba výztuh byla ryze za použití robotického ramene. Kde při algoritmizaci byly pečlivě zohledněny materiálové vlastnosti zahrnující tolerance, a hodnoty vratnosti ohýbaného drátu spojené s pohybem robotického ramene. Tento výzkum tedy zahrnuje i metodiku integrace generativních nástrojů navrhování, geometrickou optimalizaci, možnosti materiálu s jeho limity, a výrobní omezení pro robotickou výrobu ohýbaných ocelových drátů. Autoři tedy provedli i prutovou analýzu drátů z oceli S235. Předcházející hodnoty posunutí získané z MKP použili jako vstupy pro zjištění hodnoty posunutí vnitřních výztuh. [21]



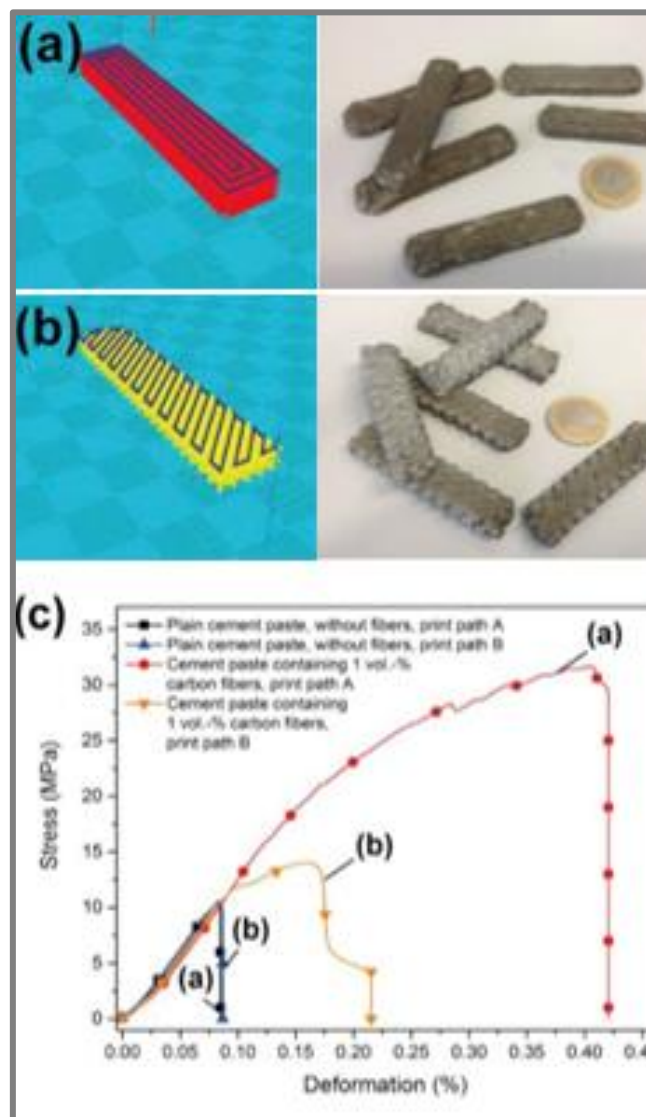
Obr. 5.18 Geometrická racionalizace průběhu vnitřní prutové konstrukce výztuží [21]



Obr. 5.19 Výstupní hodnoty posunutí MKP analýzy [21]

Vyztužení cementové směsi vlákny

Manuel Hambach a Dirk Volkmer, ve studii *Properties of 3D-printed fiber-reinforced Portland cement paste*, v podstatě kvituje nutnost vyztužit beton při tisku z důvodu zlepšení mechanických vlastností. Normální beton má pevnost v tlaku... Zaměření Hambachova výzkumu je na vláknové vyztužování portlandského cementu při procesu 3D tisku. Tato skutečnost vedla na nové složení cementové směsi se skelným, čedičovým nebo uhlíkovým vláknem. Během výzkumu došlo ke zjištění, že orientace vláken a jejich účinnému zarovnání má velký vliv na ohybovou pevnost kompozitu. Bylo zjištěno, že pevnost v ohybu se správnou orientací uhlíkových vláken dosahuje, při 1% objemu vláken, hodnoty 30 MPa [22]

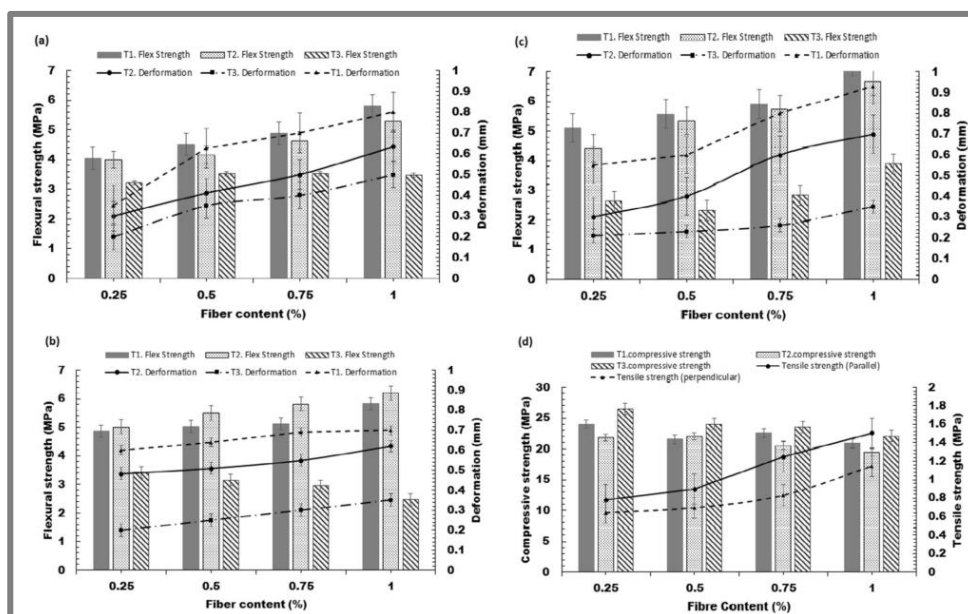


Obr. 5.20 Vyztužení cementové směsi karbonovými vlákny: a) Koncentrické vyztužení, b) Diagonální vyztužení v jednom směru, c) Průběh deformace vůči zatížení u jednotlivých geometrií vyztuží [22]

5. SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

Studie *Anisotropic mechanical performance of 3D printed fiber reinforced sustainable construction material* se zabývá:

- Experimentálním výzkumem vyztužování surové cementové směsi (nevytvrzený beton) skelnými vlákny o délce 6; 3 a 8mm a jeho procentuálním zastoupení v tisknoucí hmotě v intervalu $<0,25\% - 1\%>$, jako udržitelný materiál pro aplikace v procesu výroby 3D tisku. [23]
- Dále zkoumá mechanické vlastnosti tohoto materiálu. Z experimentů plyne, že takový materiál nezlepšuje jeho reologické vlastnosti pro 3DCMP, ale zlepšuje jeho mechanický vlastnosti. Pevnost v tahu a ohybu, při obsahu 1% těchto vláken ve směsi, se rapidně zvýšila. [23]



Obr. 5.21 Závislost pevnosti v tahu a tlaku - cementová směs vyztužená různými velikostmi a % zastoupením skelných vláken [23]

Studie *Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture* se zabývá:

- Validací pro laboratorní testování cementových směsí pro 3D tisk.
- Studium funkčnosti čerstvé tiskové směsi, z hlediska kvality tisku, tvarové stálosti a vhodnosti pro 3D tisk.
- Kvalitou tisku, která byla posuzována podle měření kvality povrchu a rozměrů tištěných vrstev.
- Klasifikací jednotlivých vrstev z hlediska tvarové stability. Byly použity dvě zkoušky, a to zkouška Roztékavosti, a Sednutí kužele.
- Experimenty se čtyřmi různými směsmi. Experimenty odhalily skutečnost, že přidaná vyztužovací aditiva (oxid křemičitý a Nano-Clay) výrazně zvyšují stabilitu tvaru. [20]

Vyztužení cementové směsi ocelovou konstrukcí

Výzkum Domenico Asprone a jeho týmu se věnuje 3D tisku vyztužených elementů (buněk) z betonu. Jedná se tedy o nový přístup k výrobě železobetonových konstrukčních prvků založených na technologii 3D tisku betonu metodou FDM. Asprone zaujímá odlišný přístup k výrobě velkorozměrných dílů z betonu. Principem je rozdělení geometrie velkého dílce na menší segmenty, které jsou po vytištění opětovně spojené do jednoho celku spolu se systémem ocelových výztuh. Cílem této koncepce je usnadnit výrobu 3D tisku strukturálně optimalizovaných železobetonových element s hlavním úkolem ušetřit množství použitého materiálu a současně umožnit výrobu lehčích konstrukcí. [24]

Ze začátku došlo k určení limitů 3D tisku betonové hmoty

- Pro tisk betonu je klíčovým parametrem jeho optimální viskozita.
- Vyšší nárok na pevnost směsi k vyrovnání případného oslabení spojovacích uzlů.
- Maximální průřez kameniva musí být menší, než je otvor tisknoucí hlavy (průměr 25 mm)

Tyto parametry byly klíčové pro tok cementové směsi. Poměr cementu s vodou byl stanoven na poměr 1:0,39 (jeden díl cementu na 0,39 dílu vody) s maximální velikostí plniva ve formě kameniva 4 mm. Další příměsí byl polypropylen, cca 0,5% hmotnosti směsi, ve formě krátkých vláken z důvodu prevence před vznikem plastických trhlin z důvodu smršťování. Tato směs ale měla špatnou viskozitu. Pro její zlepšení přidali do směsi polykarboxylátový superplastifikátor k dosažení optimálních reologických vlastností z hlediska proudění kapaliny. [24]

Během nanášení betonu dochází ke quazi roztečení hmoty, tento jev je označován za pokles. Pokles se klasifikuje do tříd podle procedury EN 12350-2: 2009, pro tento experiment směs spadala do třídy S1, kde 14 ± 2 mm odpovídá průměrnému průtoku. Průměrná pevnost v tlaku betonu po 28 dnech vytvrzování byla čtyřmi pokusy determinálně stanovena na 53,5 MPa. Průměrná pevnost v tahu dosahuje 83% pevnosti v tlaku, tedy 44,4Mpa. [24]

Po empirickém vyvození těchto zkušeností, došlo k experimentálnímu ověření vlastností vytištěné směsi. Jako měřicí etalony byly vytištěny duté válce o průměru 200 mm, výšce 200 mm a tloušťce stěny 29 mm. Válec se sestával z deseti vrstev. [24]

Následně došlo k vytištění jednotlivých buněk typu A a B. každá buňka byly vytištěna z 10 vrstev tryskou o průměru 25 mm, přičemž tloušťka stěny byla 60 mm. Následně byly sesazeny do sebe a vyztuženy systémem externích ocelových výztuh. [24]

Ocelové výztuhy plnili funkce:

- Vrchní pruty sloužily ke snížení kompresních sil vyvolaných ohybem

5. SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

- Spodní prut sloužil ke snížení tlakového napětí působícího zvrchu a ke snížení tahového napětí.
- Diagonální kompresní vzpěry na obou stranách buňky zabraňovaly smykovému namáhání



Obr. 5.22 Vnější systém výztuh [24]

6 ANALÝZA A ZHODNOCENÍ POZNATKŮ

Úkolem rešerše bylo zjistit stav poznání v oblasti 3D tisku cementových směsí, procesních parametrů při zpracování, vlastností těchto materiálů pro technologii výroby 3DCMP. Díky tomuto poznání zjistit možnosti vylepšení procesních parametrů při 3DCMP specifického materiálu vyvinutého fakultou stavební ČVUT.

6.1 Obecná analýza poznatků vycházející ze současného stavu poznání

Rešerše rozebírá vývoj digitální výroby v podobě technologie 3DCMP, od prvních zmínek na počátku 20.století, přes rozvoj v 80. letech až po prudký nárůst zájmu v 21. století.

Jak bylo zmíněno v první části 5. kapitoly, nejvyužívanější technologií 3DCMP pro velkorozměrové díly jsou konvenční stroje, které pracují ve 3 nebo 4 osách. Ty disponují dostatečnou tuhostí konstrukce, ale principiálně omezují potenciál 3D tisku svojí konstrukcí. Robotická ramena, jsou proto výhodnější z hlediska tisknutí složitějších a větších dílců nebo struktur. [23]

Výlučnou metodou používanou pro tisk cementových směsí je FDM a CC. Tyto metody jako jediné zatím umožňují zpracovat cementovou směs technologií 3DCMP.[3]

Jedním z problémů je obsah pojidla ve formě cementu v betonu z hlediska dopadu na životní prostředí, kde při jeho výrobě dochází k enormní emisi skleníkového plynu CO₂. Řešením tohoto problému je snížení obsahu pojidla cementu ve směsi, nebo úplné nahrazení geopolymérem. [12]

Vycházím-li z limitů 3D tisku cementových hmot, deklarované studii Domenica Asporneho a R.J.M. Wolfa, je obecně nutné upravit jakoukoli cementovou směs, tak aby měla co nejlepší reologické a mechanické vlastnosti sama o sobě bez přidání aditiv a vyztužovacích prvků [4] [24]. Lze tedy vycházet ze studie Yiwei Wenga [15], která cílí na dobrou zpracovatelnost a únosnost cementových hmot určených k 3D tisku. Studie obecně řeší parametry čerstvé cementové směsi, které významně ovlivňují 3D tisk. Důležitá je zejména vystavitelnost, reologie a tisknutelnost.

Vystavitelnost 3DCMP má podle Perrota a kolektivu spojitost se statickou mezí kluzu, kde jednotlivé veličiny korespondují s Binghamovým modelem plasticity. Binghamův model plasticity popisuje reologické vlastnosti cementových materiálů. [25]

Reologii směsi významně ovlivňuje velikost zrn písku. Zrnitost písku lze optimalizovat pomocí Fuller-Thompsonovy teorie. Aplikací této teorie lze docílit vhodného poměrového zastoupení velikosti zrn písku ve směsi, kde dojde k vzájemné interakci kontaktních ploch jednotlivých zrn. Jinými slovy správným poměrem velikosti zrn dojde k maximálnímu zaplnění nevyužitého prostoru mezi zrny. Tuto skutečnost vyjadřuje Koeficient stěsnání. Výsledkem úpravy je zhutnění celé směsi, která lépe přenáší smykové napětí. Při překročení určitého prahového smykového napětí (energetický rozdíl mezi statickým a dynamickým smykovým napětím) = mez

toku a jeho prodlužující se době působení, dojde k poklesu zdánlivé viskozity, a tedy k toku neneutonské kapaliny. [15]

Závislost mezi koeficientem stěsnání, gradientem rychlosti (rychlost smyku, rychlost deformace) a smykovou viskozitou (zdánlivá viskozita) vyjadřuje Marson-Percyho model.

Tisknutelnost materiálu reflektuje pracovní tlak během procesu pumpování, který je úzce spojen s parametry Binghamova plastického modelu. Je tedy nutná nízká plastická viskozita směsi k dosažení nižšího pracovního tlaku a větší bezpečnosti.

Díky takto upravené směsi lze velmi dobře určit výšku vytištěné struktury, kdy nedojde ještě ke kolapsu pomocí Roussel a Lanosova vztahu. Tento vztah je původně určen pro tělesa v podobě jednoduchých sloupců, úpravou geometrického faktoru však lze predikovat teoreticky jakékoli vytištěné těleso.

Výše vyvozené skutečnosti vedou k řešení problému cementové směsi, nikoli však ke zlepšení jejich mechanických vlastností. Jednou z nevýhod 3DCMP je charakteristika čerstvé směsi, která ve většině studií znemožňuje tisk prostorově tvarově náročnějších struktur, nebo dílů. Je žádoucí tuto směs vyztužit vhodnou formou výztuže v podobě drátů nebo aditivních příměsí. [18]

Problematická jsou také časová okna jednotlivých chemických procesů mezi fázemi spojení (adheze), tvrdnutí a vytvrzování, které musejí být zohledněné při času vrstvení materiálu na sebe. Tyto časová okna se modifikují přidáním zpoždovačů a urychlovačů tvrdnutí do směsi. Při těchto procesech dochází i v případě optimalizované tisknouce směsi k deformaci, vlivem vrstvení a gravitace. [20]

Během tvrdnutí dochází ke smrštění a hmotnostním úbytkům výnosu v důsledku vypařování vody a aditiva, to vede k vnitřnímu pnutí a následnému rozpraskání vytištěných vrstev a struktury mezi jednotlivými vrstvami. [20]

6.2 Definování obecných problémů 3DCMP

Vlastnosti materiálu

- Zpracovatelnost směsi
 - Mísicí poměr složek směsi
 - Doba míchání
- Reologické vlastnosti
 - Tisknutelnost
 - Vystavitelnost – Souvisí s přítomností tixotropních činidel
- Proces tvrdnutí
 - Tvoření provázané struktury – Souvisí s adhezí vrstev

Aparatura

- Tisková hlava
 - Průměr trysky
 - Mechanismus vyztužování (v případě tvarového prvku)
- Přípravný okruh
 - Mísení směsi
 - Míchání směsi
- Čerpací okruh
 - Čerpání směsi

Procesní parametry

- Časování operací
 - Homogenní promísení cementové směsi
 - Množství dávkování chemických aditiv (urychlovačů/ zpomalovačů) vzhledem k velikosti tisknouceho dílce.
 - Rychlost extruze
 - Přidávání výztuže
- Strategie výroby
 - Trajektorie robotického ramene
 - Zpětnovazební smyčka

7 PODSTATA, CÍLE A PŘÍNOS DP

7.1 Podstata disertační práce

Podstatou disertační práce je adaptace technologie 3DCMP pro cementové směsi s nízkým podílem chemických aditiv a strojové kladení ocelových výztuží v průběhu aditivní výroby. Jedná se o aplikovaný výzkum prováděný ve spolupráci s průmyslovým partnerem VIA ALTA a.s. a Fakultou stavební ČVUT. Předpokládanou aplikací je aditivní výroba velkorozměrových dílů pro stavební a architektonické účely.

7.2 Hlavní cíl disertační práce

Cílem disertační práce je při použití soudobé technologie výroby 3DCMP vyvinout strategii a proces 3D tisku komplexních dílů o velkém rozměru z vyztužované kompozitní cementové směsi, a obohatit tak znalosti v oblasti metodiky a strategie výroby této substance pro stavební a architektonické účely.

Dílčí cíle disertační práce:

- Výzkum procesních parametrů 3D tisku cementové směsi s optimalizovaným podílem složek směsi a chemických aditiv šetrných k životnímu prostředí.
- Experimentální zjištění reologických vlastností a limitů cementové směsi vyvinuté Fakultou stavební ČVUT s ohledem na tisknutelnost. Jedná se o experimentální úpravu poměru příměsí stávající směsi z hlediska vhodnosti pro 3DCMP.
- Vliv kompozitního materiálu v podobě vláken, nebo tvarové výztuže na únosnost a tvarovou stabilitu čerstvé cementové směsi pro kontrolovatelný 3DCMP s ohledem na vystavitelnost.
- Konstrukce tiskové hlavy
- Návrh a vývoj procesu výroby a strategie 3DCMP, tak aby nedocházelo k nežádoucím defektům v průběhu procesu stavění a došlo ke stabilnímu provázání vrstev i u složitěji strukturovaných dílů. Jedná se o zkoumání limitů navrženého procesu výroby a použité strategie pro 3DCMP.
- Definování metodického postupu hodnocení kvality tisku podle souboru kritérií (tvar, geometrie, kvalita, mechanické vlastnosti = materiálové zkoušky) [Vyhodnocení tisku metodami RI, výbrusy = zjištění sedimentace plniva...]

7.3 Přínos disertační práce

Hlavní přínosy DP:

- Snížení CO₂ stopy materiálu používaného v technologii 3DCMP
- Ověření strategií a technologických limitů 3D tisku cementové směsi s optimalizovaným podílem chemických aditiv šetrných k životnímu prostředí pro průmyslovou praxi.
- Podpora snížení odpadu vzniklého při výrobě stavebních dílů o velkém rozměru konvenčními metodami. Typickým příkladem je bednění a opěrné konstrukce.
- Snížení spotřeby materiálu potřebného pro výrobu dílů o stejných mechanických vlastnostech.

8 VĚDECKÁ OTÁZKA A PDRACOVNÍ HYPOTÉZY

8.1 Vědecké hypotézy a otázky

Pracovní hypotéza 1

Reologické vlastnosti čerstvé cementové směsi vhodné pro technologii 3DCMP, jsou ovlivněny jednotlivými složkami směsi. Zejména však distribucí částic písku v cementové směsi.

Vědecká otázka 1

Jakým způsobem ovlivní změna poměrů složek směsi a distribuce zrn písku podle Fuller-Thompsonovi teorie reologické vlastnosti směsi pro 3DCMP?

Pracovní hypotéza 2

V případě vrstvení čerstvé cementové hmoty na sebe, se záměrem výstavby stěny pod úhlem, dochází vlivem tíhy ke smykovému napětí mezi vrstvami, které při překročení únosné meze vede ke kolapsu stěny.

Vědecká otázka 2

Jak velký dopad bude mít smykové napětí mezi nanesenými vrstvami na stabilitu výstavby jednoduché stěny pod úhlem z čerstvé cementové směsi?

Pracovní hypotéza 3

Beton sám o sobě nemá dobré mechanické vlastnosti, proto při aplikaci ve stavebnictví musí být vyztužen. Při použití vhodného podpůrného materiálu (ocelový drát, ocelová síť, tkaninová síť, vysoce-plněný termoplast, skelné vlákno, Aramid, [pavoučí vlákno]), dojde ke stabilizaci materiálu a zlepšení mechanických vlastností, na jejichž základě bude dobře predikované chování v průběhu procesu tisku i komplexnějších struktur.

Vědecká otázka 3

Jakým vhodným materiálem vyztuže vhodným pro 3DCMP lze zlepšit mechanické vlastnosti surové betonové hmoty tak, aby došlo ke stabilizaci tvaru extrudované hmoty, a umožnilo tak 3D tisk komplexnějších struktur?

Pracovní hypotéza 4

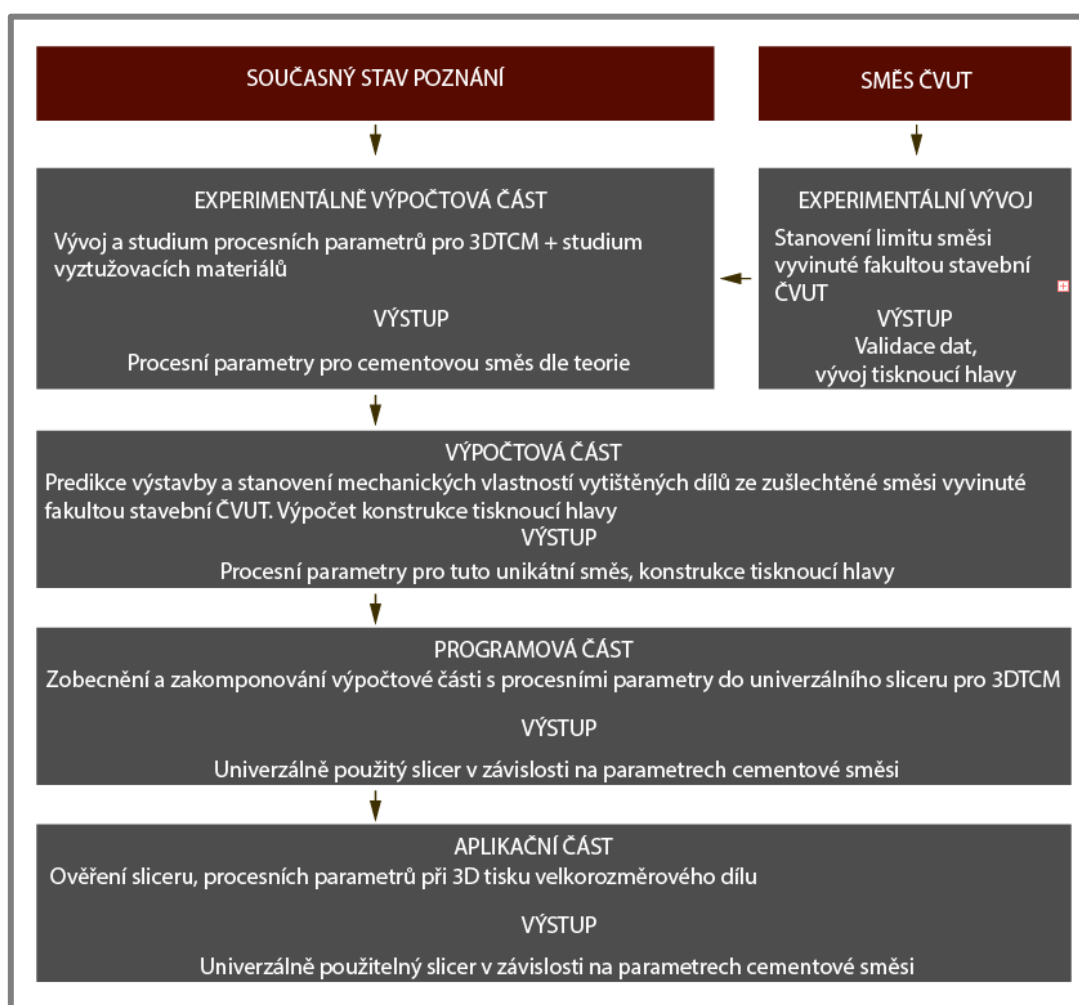
V odvětví stavebnictví se tisknou díly různé tvarové složitosti o velkém rozměru. Mechanické vlastnosti jsou ovlivněny procentuálním zastoupením příměsí (poměr vody, velikost zrna plniva, obsah cementu, obsah zpoždovače a urychlovače tuhnutí, obsah polykarboxylátových plastifikátorů, a obsah jiných zpevňujících aditiv), dobou mezi povrchovým ztvrdnutím - možnou strukturální provázaností vrstev a vytvrdnutím a technologií výroby. Úspěšnost tisku takových dílců tedy závisí na strategii výroby 3DCMP, která zohledňuje tisknutou geometrii, procesní parametry a složení směsi.

***Vědecká otázka 4** Jakou strategii výroby pro robotický 3DCMP lze tisknout komplexní díly o rozměru do 12m³ z vyztužované cementové směsi plněné betonovým recyklátem, aniž by nedocházelo ke kolapsu, a jaké jsou klíčové parametry pro tuto strategii?*

9 ZPŮSOB ŘEŠENÍ A POUŽITÉ VĚDECKÉ METODY ZKOUMÁNÍ

Dizertační práce je v jádru aplikovaný výzkum a má 4 hlavní části v podobě jednotlivých fází.

- Analýza současného stavu poznání
- Experimentální a výpočtová část
- Programovací část
- Aplikační část



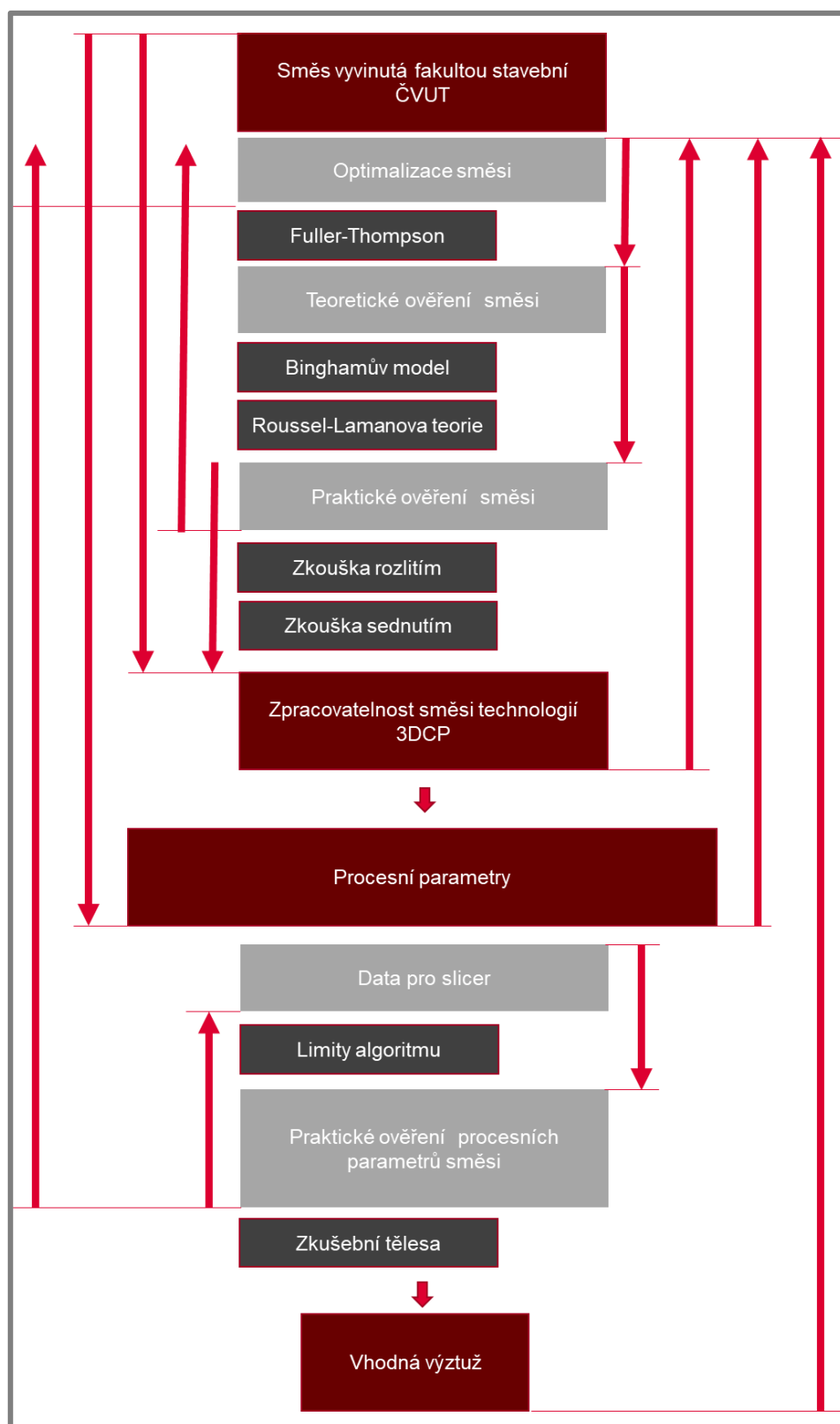
Obr. 9.1 Blokové schéma projektu disertační práce [autor]

9.1 Materiál, zařízení a software

Materiály použité v první a druhé fázi vývoje budou cementové směsi vycházející ze směsi vzniklé díky projektu TACR Epsilon ve spolupráci s fakultou stavební ČVUT v Praze a společností VIA ALTA. Tento materiál bude sloužit jako fundament pro nový materiál. Příměsi v podobě velkých frakcí kameniva budou nahrazeny betonovým recyklátem ze staveb. Takto upravený materiál bude optimalizován pro technologii 3DCMP z hlediska zastoupení jednotlivých frakcí písku na základě Fuller-Thompsonovi teorie, kde reologické vlastnosti budou ověřeny dle Binghamova modelu viskozity a kde geometrická stability bude ověřena dle Roussel-Lanosovi teorie. Teoretické ověření bude vyvráceno nebo potvrzeno experimenty.

Digitální výroba ve formě aditivní výroby bude probíhat pomocí robotického ramene KUKA KR60 a víceúčelové tisknoucí hlavy, která bude chráněná patentovým úřadem. Pro kontrolu tisknoucí hlavy a tisknoucí stopy bude využito elektronické platformy Arduino, se senzorikou na mechanické a elektromagnetické bázi.

Pro řízení robotického ramene a extruderu bude použito softwaru Kuka PRC a pluginu Grasshopper pro CAD software Rhinoceros pracující na bázi plošných modelovacích systémů. Součástí softwarového řešení bude i vlastní „slicer“ pro technologii 3DCM tohoto materiálu.



Obr. 9.2 Schéma způsobu řešení [autor]

9.2 Postup

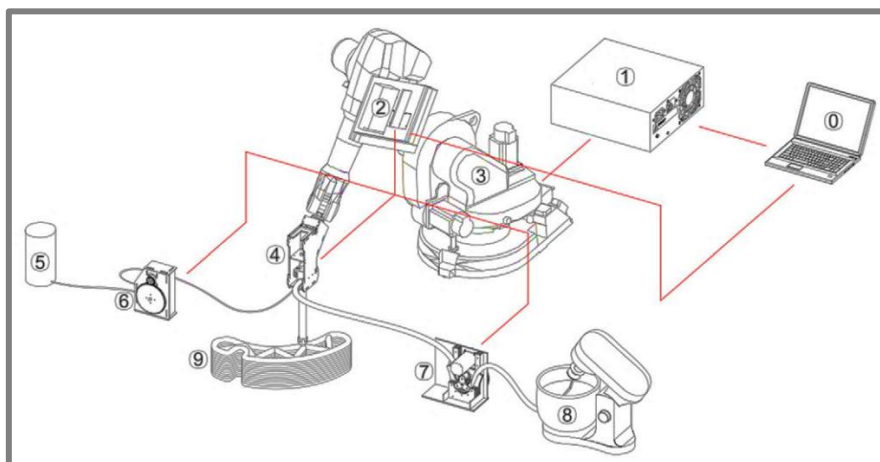
9.2.1 Tisková aparatura a vývoj extruderu

V první fázi bude zkonstruována jednoduchá tisková hlava s montáží na robotické rameno KUKA KR60. Z hlediska pracovních podmínek budou použity komponenty odolné vůči erozi a korozi. Tisková hlava bude obsahovat jednoduchý píst, který pod zatížením závažím bude za pomoci gravitace extrudovat namíchanou cementovou směs na pracovní desku. Primitivní pístová tisknoucí aparatura se skládá celkem ze čtyř základních komponent (Platforma sloužící k montáži aparatury na robotické rameno, pístnice s vodícím víkem, píst s vodící tyčí, tryska s uzávěrem).



Obr. 9.3 Pístová tisková hlava: a) Prvočinitele hlavy, b) Pracovní pozice hlavy [autor]

V této fázi proběhne test fyzikálních vlastností směsi vyvinuté fakultou stavební ČVUT a testování jejich parametrů v procesu 3D tisku. Následně budou tyto parametry evaluovány a na základě výsledků dojde ke stanovení závěru, který bude sloužit pro konstrukci pokročilé tisknoucí hlavy a čerpacího okruhu pro cementovou směs, podobné koncepce jako navrhl ve své studii C. Gosselin. Toto řešení dovolí zkoumání procesních parametrů a strategie tisku cementové homoty. [10]



Obr. 9.4 Koncepce tisknoucí aparatury dle Gosselin.C.

0. Zpracování dat, 1. Řídící jednotka robotického ramene, 2. Řízení 3D tisk, 3. Robotické rameno KUKA, 4. Tisková hlava, 5. Urychlovač tvrdnutí, 6. Peristaltické čerpadlo pro urychlovač tvrdnutí, 7. Peristaltické čerpadlo pro předmíchávač směsi, 8. Předmíchávač směsi, 9. Vytisklý objekt [10]

9.2.2 Materiál a jeho úprava

Smyslem je nejprve zjistit chování a stav cementové směsi, navržené fakultou stavební ČVUT, praktickými zkouškami určenými pro čerstvé cementové směsi dle evropské normy v ČR značené ČSN EN 12350 – 2, 5.

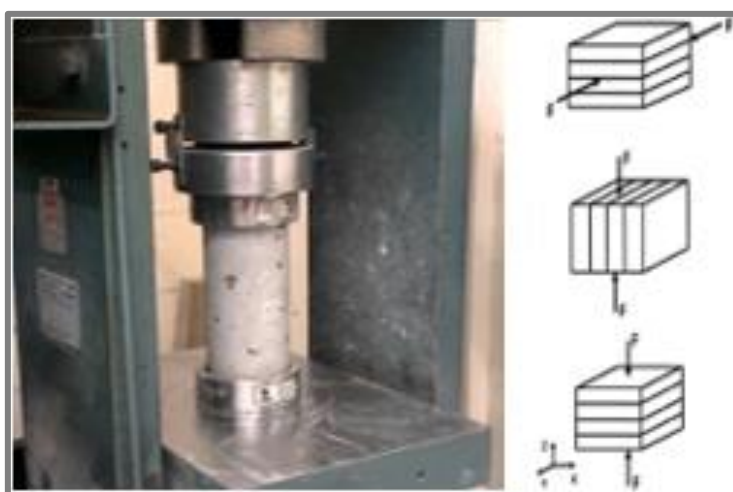
Experimentálně ověřit, mísíci poměry jednotlivých složek směsi doporučených kolegiem z ČVUT vhodné pro 3DCMP. Dojde tedy k zjištění zpracovatelnosti směsi a její vhodnosti pro 3D tisk. Jmenovitě bude provedeno měření tokových a viskózních charakteristik směsi pomocí reometru ICAR. [26]



Obr. 9.5 Reometr ICAR [26]

Na základě zjištěných údajů dojde k optimalizaci pro technologii 3DCMP z hlediska zastoupení jednotlivých frakcí písku na základě Fuller-Thomsonovi teorie, kde budou ověřeny reologické vlastnosti dle Binghamova modelu viskozity a kde geometrická stabilita bude ověřena dle Roussel-Lanosovi teorie. Taktéž bude směs podrobena testu zpracovatelnosti a únosnosti materiálu v podobě jednoduchého liniového testu, kde dojde k odladění základních procesních parametrů.

Dalším krokem dojde k vytištění zkušebních těles a k mechanickým zkouškám ztvrdl dle evropské normy v ČR značené ČSN EN 12390 -3 / 7. [23]



Obr. 9.6 Mechanické zkoušky betonu: a) Zařízení pro testování základních těles, b) Orientace vytištěných těles pro testy [23]

9.2.3 Vývoj a studium procesních parametrů pro 3DCMP

Tato fáze se skládá ze dvou částí. Smyslem první části této fáze bude zkoumat procesní parametry cementové směsi během robotické výroby při různých poměrových zastoupení jednotlivých příměsí, frakcí a tixotropních činidel. Pak dojde k vyhodnocení směsi při různých poměrových zastoupení jednotlivých složek. Tyto data budou vyhodnoceny a dojde k vytvoření dat ve formě tabulky, které bude směrodatná pro technologii výroby robotického 3DCMP.

Na základě výpočtů a dat z experimentů dojde k optimalizaci výstupních dat v podobě trajektorií a rychlostí robotického ramene tak, aby odpovídali skutečnosti. Výstupem budou data v podobě strategie a přístupu k robotickému tisku 3DCMP, která se později dají využít při programování univerzálního programu pro přípravu tiskových drah, tedy sliceru.

9.2.4 Výztuž

V této části dojde k vyzkoušení jednotlivých typů výztuže cementové směsi na základě přístupů uvedených v kritické rešerši. Nejdříve bude zkoumána cementová směs obohacená o chemické vyztužování v podobě polykarboxylátových plastifikátorů. Následně dojde k vyhodnocení mechanických vlastností takto obohacené směsi.

Dalším krokem bude kontinuální kladení výztuh v podobě drátu, struny, sítěky nebo jiného tvarového prvku z kovového nebo jiného materiálu do celého rozsahu výtisku pomocí univerzální tisknoucí hlavy.

Další etapou bude zkoumání mechanických parametrů po vytvrzení a evaluace naměřených hodnot. Tyto data budou sloužit k vyhodnocení jednoznačně určující životaschopnost druhu výztuží z hlediska mechanických vlastností a procesních parametrů.

10 ROZVRH ŘEŠENÍ DP

Rok 1

- Konstrukce jednoduché vytlačovací hlavy (píst) – **HOTOVO**
- Konstrukce jednoduché vytlačovací hlavy (šnek) - **PROBÍHÁ**
- Liniové testy ke zjištění materiálových vlastností tisknuté směsi
- Experimentální ověření materiálu, metody a strategie
- Odzkoušení materiálu ve spolupráci se společností VIA ALTA s.r.o.
- Článek v impaktovaném časopisu

Rok 2

- Optimalizace množství vhodného vyztužovacího aditiva vzhledem ke zjištěným vlastnostem
- Konstrukce experimentální vytlačovací hlavy
- Experimentální ověření materiálu, metody a strategie
- Materiálové zkoušky

Rok 3

- Ověřování metod na experimentech
- Materiálové zkoušky
- Článek v impaktovaném časopise

Rok 4

- Demonstrace výzkumu reálným výtiskem stavebního dílu

11 ODŮVODNĚNÍ NUTNOSTI

- Efektivní distribuce působení sil v dílech vyrobených 3DCMP
- Prozkoumání možnosti výroby ultralehkých dílců z kompozitních cementových směsí
- Úspora a recyklace stavebního materiálu
- Eliminace komplexních systémů využívající formy = náročnost výroby
- Snížení logistických nároků

12 SPOLUPRÁCE S INSTITUCEMI

Na základě participace v projektu Epsilon, spolupráce s komerčním subjektem Via Alta Třebíč, se státním subjektem fakultou stavební ČVUT.

13 NÁKLADY A ZDROJE

13.1 Předpokládané náklady

• Konstrukce prototypu základní pístové tisknouce hlavy	5 000 Kč
• Konstrukce základní šnekové hlavy	10 000 Kč
• Konstrukce experimentální hlavy	15 000 Kč
• Úprava tiskového aparátu	5 000 Kč
• Náklady na likvidaci odpadu	20 000 Kč
• Náklady spojené na účasti na konferencích	180 000 Kč
• Osobní ohodnocení studenta	900 000 Kč
• Celkem	1 135 000 Kč

13.2 Financování výzkumu

- Finanční podpora v rámci projektu TAČR, TJ01000354, Vývoj procesních parametrů aditivní výroby vysoce plněných odpadních termoplastů.
- Finanční podpora z univerzitního Fondu vědy, vzniklého pro podporu výuky

14 CHARAKTERISTIKA PŘEDPOKLÁDANÉHO VÝSLEDKU

14.1 Předpokládaný výstup řešení DP

V souladu s definicí výsledku pro aplikovaný výzkum v souladu s platnou metodikou hodnocení výsledků výzkumu a vývoje. Podle požadavku kladeného na ústavu konstruování výstupem budou tři publikované články v impaktovaných časopisech, popřípadě i podání patentu.

14.2 Seznam vhodných periodik pro publikaci výsledků

Na základě kritické rešerše práce, byly stanovené potenciálně vhodné periodika pro publikaci dílčích cílů DP. Výběr periodik byl volen s ohledem na téma práce a publikace autorů zabývající se stejnou tematikou.

Construction and Building Materials,	IF = 3,169
Automation in Construction,	IF = 2,919
Composites Part B: Engineering	IF = 4,727

15 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] DUBALLET, R., O. BAVEREL a J. DIRRENBERGER. Classification of building systems for concrete 3D printing. *Automation in Construction* [online]. 2017, **83**, 247–258. ISSN 09265805. Dostupné z: doi:10.1016/j.autcon.2017.08.018
- [2] KHOSHNEVIS, B., R. RUSSELL, H. KWON a S. BUKKAPATNAM. Crafting large prototypes. *IEEE Robotics and Automation Magazine* [online]. 2001, **8**(3), 33–42. ISSN 10709932. Dostupné z: doi:10.1109/100.956812
- [3] NGO, Tuan D., Alireza KASHANI, Gabriele IMBALZANO, Kate T.Q. NGUYEN a David HUI. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2018 [vid. 2018-02-19]. ISSN 13598368. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesb.2018.02.012
- [4] WOLFS, R.J.M., F.P. BOS a T.A.M. SALET. Early age mechanical behaviour of 3D printed concrete: Numerical modelling and experimental testing. *Cement and Concrete Research* [online]. 2018, **106**, 103–116 [vid. 2018-06-10]. ISSN 0008-8846. Dostupné z: doi:10.1016/J.CEMCONRES.2018.02.001
- [5] BARNETT, Eric a Clément GOSSELIN. Large-scale 3D printing with a cable-suspended robot. *Additive Manufacturing* [online]. 2015, **7**, 27–44 [vid. 2017-11-28]. ISSN 22148604. Dostupné z: doi:10.1016/j.addma.2015.05.001
- [6] MCGEE, WES, PONCE DE LEON, Monica (Eds.). *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2014* [online]. Cham: Springer International Publishing, 2014. ISBN 978-3-319-04662-4. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-319-04663-1
- [7] ARTURO TEDESCHI. *AAD Algorithms-Aided Design*. B.m.: IGI Global, 2014. ISBN 9788895315300.
- [8] KEATING, Steven a Neri OXMAN. Compound fabrication: A multi-functional robotic platform for digital design and fabrication. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* [online]. 2013, **29**(6), 439–448 [vid. 2017-11-29]. ISSN 07365845. Dostupné z: doi:10.1016/j.rcim.2013.05.001
- [9] KHOSHNEVIS, Behrokh. Automated construction by contour crafting - Related robotics and information technologies. *Automation in Construction* [online]. 2004, **13**(1), 5–19. ISSN 09265805. Dostupné z: doi:10.1016/j.autcon.2003.08.012
- [10] GOSSELIN, C., R. DUBALLET, Ph ROUX, N. GAUDILLIÈRE, J. DIRRENBERGER a Ph MOREL. Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete - a new processing route for architects and builders. *Materials and Design* [online]. 2016, **100**, 102–109 [vid. 2017-11-27]. ISSN 18734197. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2016.03.097
- [11] CESARETTI, Giovanni, Enrico DINI, Xavier DE KESTELIER, Valentina COLLA a Laurent PAMBAGUIAN. Building components for an outpost on the Lunar soil by means of a novel 3D printing technology. *Acta Astronautica* [online]. 2014, **93**, 430–450. ISSN 00945765. Dostupné z: doi:10.1016/j.actaastro.2013.07.034
- [12] PANDA, Biranchi a Ming Jen TAN. Experimental study on mix proportion and

- fresh properties of fly ash based geopolymer for 3D concrete printing. *Ceramics International* [online]. 2018, **44**(9), 10258–10265 [vid. 2018-06-30]. ISSN 0272-8842. Dostupné z: doi:10.1016/J.CERAMINT.2018.03.031
- [13] YAP, Soon Poh, Paul Zhao Chiat CHEN, Yingxin GOH, Hussein Adebayo IBRAHIM, Kim Hung MO a Choon Wah YUEN. Characterization of pervious concrete with blended natural aggregate and recycled concrete aggregates. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2018, **181**, 155–165 [vid. 2018-06-30]. ISSN 0959-6526. Dostupné z: doi:10.1016/J.JCLEPRO.2018.01.205
- [14] SANJAYAN, Jay G., Behzad NEMATOLLAHI, Ming XIA a Taylor MARCHMENT. Effect of surface moisture on inter-layer strength of 3D printed concrete. *Construction and Building Materials* [online]. 2018, **172**, 468–475 [vid. 2018-06-18]. ISSN 0950-0618. Dostupné z: doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.03.232
- [15] WENG, Yiwei, Mingyang LI, Ming Jen TAN a Shunzhi QIAN. Design 3D printing cementitious materials via Fuller Thompson theory and Marson-Percy model. *Construction and Building Materials* [online]. 2018, **163**, 600–610 [vid. 2018-04-17]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.12.112
- [16] MARCHON, Delphine, Shiho KAWASHIMA, Hela BESSAIES-BEY, Sara MANTELLATO a Serina NG. Hydration and rheology control of concrete for digital fabrication: Potential admixtures and cement chemistry. *Cement and Concrete Research* [online]. 2018 [vid. 2018-06-12]. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2018.05.014
- [17] *Reologie a reometrie kapalin.*
- [18] SOLTAN, Daniel G. a Victor C. LI. A self-reinforced cementitious composite for building-scale 3D printing. *Cement and Concrete Composites* [online]. 2018, **90**, 1–13 [vid. 2018-05-11]. ISSN 09589465. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconcomp.2018.03.017
- [19] LE, T T, S A AUSTIN, S LIM, R A BUSWELL, A G F GIBB a T THORPE. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Materials and Structures* [online]. 2012, **45**(8), 1221–1232. ISSN 1871-6873. Dostupné z: doi:10.1617/s11527-012-9828-z
- [20] KAZEMIAN, Ali, Xiao YUAN, Evan COCHRAN a Behrokh KHOSHNEVIS. Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture. *Construction and Building Materials* [online]. 2017, **145**, 639–647 [vid. 2017-11-28]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.04.015
- [21] ERDINE, Elif a Alexandros KALLEGIAS. Interwoven reinforced concrete structures: Integration of design and fabrication drivers through parametric design processes. *Design Studies* [online]. 2017, **52**, 198–220 [vid. 2017-11-27]. ISSN 0142694X. Dostupné z: doi:10.1016/j.destud.2017.06.002
- [22] HAMBACH, Manuel a Dirk VOLKMER. Properties of 3D-printed fiber-reinforced Portland cement paste. *Cement and Concrete Composites* [online]. 2017, **79**, 62–70 [vid. 2018-05-11]. ISSN 09589465. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconcomp.2017.02.001

- [23] AGUSTÍ-JUAN, Isolda, Florian MÜLLER, Norman HACK, Timothy WANGLER a Guillaume HABERT. Potential benefits of digital fabrication for complex structures: Environmental assessment of a robotically fabricated concrete wall. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2017, **154**, 330–340 [vid. 2017-11-29]. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2017.04.002
- [24] ASPRONE, Domenico, Ferdinando AURICCHIO, Costantino MENNA a Valentina MERCURI. 3D printing of reinforced concrete elements: Technology and design approach. *Construction and Building Materials* [online]. 2018, **165**, 218–231 [vid. 2018-02-19]. ISSN 0950-0618. Dostupné z: doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.01.018
- [25] PERROT, A., D. RANGEARD a A. PIERRE. Structural built-up of cement-based materials used for 3D-printing extrusion techniques. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions* [online]. 2016, **49**(4), 1213–1220. ISSN 13595997. Dostupné z: doi:10.1617/s11527-015-0571-0
- [26] *German Industries: ICAR Rheometer* [online], [cit. 2018-07-04]. Dostupné z: <http://germann.org/products-by-application/rheology-of-concrete/icar-rheometer>

16 VĚDECKÝ ŽIVOTOPIS

Ing. Arnošt Vespalec

8.6.1991, Znojmo

Zaměstnání:

- 9.1.2017 - současnost
(vědecký pracovník, Ph.D. Student)

Vzdělání:

- 2017, Master of applied science (Ing.), FSI, VUT, studijní program: Průmyslový design ve strojírenství
- 2015, Bachelor degree programme (Bc.), FSI, VUT, studijní program: Průmyslový design ve strojírenství

Oblast zaměření

- Aditivní výroba
- Robotický 3D tisk a robotické obrábění
- Parametrický a generativní Design

Výuková činnost:

- 2K - Konstruování, cvičení s poč. podporou
- 4KC - Konstruování a CAD, cvičení s poč. podporou
- ZM1 - Parametrické modelování – Inventor, Catia, Rhinoceros, cvičení s poč. podporou
- ZPP - Plastové prototypy, laboratoře a ateliéry
- YPA – Počítačové modelování – Alias Design, cvičení s poč. podporou
- 1K – Základy konstruování, cvičení s poč. podporou