



Vysoké učení technické v Brně
Fakulta strojního inženýrství
Ústav konstruování

Brno University of Technology
Faculty of Mechanical Engineering
Institute of Machine and Industrial Design

VELKOROZMĚROVÝ ROBOTICKÝ 3D TISK DÍLŮ Z CEMENTOVÝCH SMĚSÍ

Arnošt Vespalec, Ing.

Pojednání ke státní doktorské zkoušce
Discourse on the dissertation thesis

Brno 2020



Vysoké učení technické v Brně
Fakulta strojního inženýrství
Ústav konstruování

Brno University of Technology
Faculty of Mechanical Engineering
Institute of Machine and Industrial Design

VELKOROZMĚROVÝ ROBOTICKÝ 3D TISK DÍLŮ Z CEMENTOVÝCH SMĚSÍ

LARGE DIMENSIONAL ROBOTIC 3D PRINTING OF PARTS FROM
CEMENT MIXTURES

Ing. Arnošt Vespalec

Autor práce
Author

doc. Ing. David Paloušek, Ph.D.

Vedoucí práce
Supervisor
Pojednání ke státní závěrečné zkoušce
Distortion on the Dissertation Thesis

OBSAH

1	ÚVOD	8
2	VYMEZENÍ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY A PŘEDBĚŽNÉHO CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	10
3	SHRnutí SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	12
3.1	Studie zaměřené na parametry materiálu a procesní parametry 3D tisku	13
3.1.1	Vyztužení cementové směsi armaturou	21
3.1.2	Vyztužení cementové směsi vlákny	22
3.1.3	Vyztužení cementové směsi ocelovou konstrukcí	24
3.2	Studie zaměřené na strategie a metody tisku komplexní geometrie	27
4	ANALÝZA, INTERPRETACE A ZHODNOCENÍ POZNATKŮ	37
4.1	Zhodnocení poznatků ze studií	37
4.1.1	Zhodnocení poznatků ze studií věnujících se parametrům materiálu a parametrům 3D tisku	37
4.1.2	Zhodnocení poznatků ze studií věnujících se podobě geometrie tisknutých těles	42
4.2	Stěžejní poznatky plynoucí z rešerše	43
5	VYMEZENÍ CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE A NÁVRH ZPŮSOBU JEJÍHO ŘEŠENÍ	45
5.1	Podstata disertační práce	45
5.2	Cíl disertační práce	45
5.3	Vědecké otázky	46
5.4	Návrh způsobu řešení a použitých metod	49
5.4.1	Fáze I	51
5.4.2	Fáze II	52
5.4.3	Fáze III	54
5.5	Plán publikací	56
6	SOUČASNÝ STAV	59
6.1	Publikační činnost	59
6.2	Experimentální činnost	59
7	ZÁVĚR	61
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	62

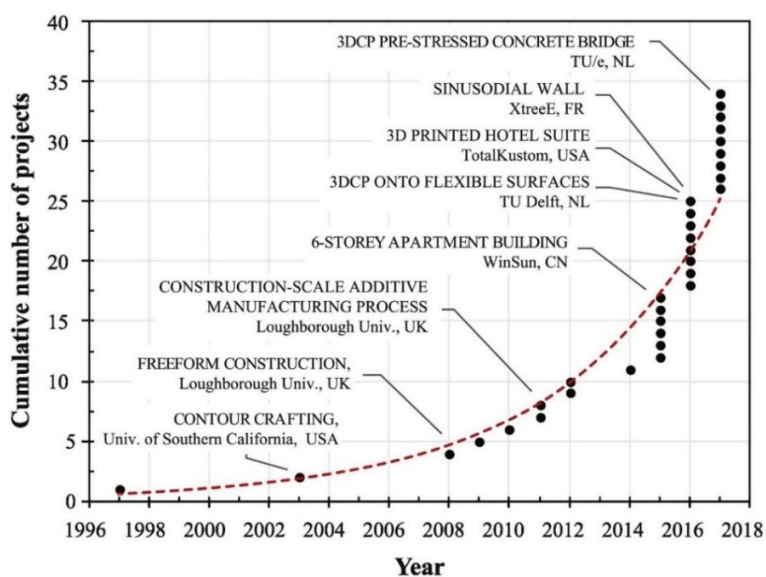
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	69
9.1	Použité zkratky	69
9.2	Použité fyzikální veličiny	70
10	SEZNAM OBRÁZKŮ	72
11	SEZNAM TABULEK	75
12	SEZNAM PŘÍLOH	77

1 ÚVOD

Aktuálně dochází k rychlému rozvoji stavebního průmyslu vedoucímu k nadměrnému využívání omezených přírodních zdrojů a enormní produkci skleníkových plynů [1]. Podle IEA (International Energy Agency) se stavební průmysl podílí 39 % na globální produkci CO₂ za rok 2019, kde vývoj situace má bohužel vzestupnou tendenci [2]. V budoucnosti budeme čelit nevyhnutelným klimatickým změnám, které již dnes ohrožují životní prostředí z globálního hlediska. Díky těmto skutečnostem bude kladen vyšší důraz na snižování produkce emisí skleníkových plynů a udržitelný ekonomický rozvoj související s cirkulární ekonomikou a efektivním využitím stavebních hmot. Logická je proto reakce soukromého a akademického sektoru ve stavebnictví, kde byl od 90. let 20. století zaznamenán exponenciální růst (obr. 1-1) počtu výzkumných nebo vývojových prací s cílem hledat řešení pro udržitelný způsob výroby a návrhu staveb [3]. Jedním z řešení je použití technologie aditivní výroby ve formě 3D tisku.

V blízké budoucnosti tedy můžeme očekávat transformaci tradiční podoby stavebnictví využívající možnosti 3D tisku volných tvarů a komplexních struktur, které prakticky nelze vyrobit konvenčními metodami [4]. Tato technologie však přináší nové výzvy, příležitosti a problémy, které je nutné identifikovat a řešit [5]. V současnosti technologie aditivní výroby v architektuře a ve stavebnictví využívá drahých, ekonomicky nevýhodných a k životnímu prostředí nepřítelišlivých cementových směsí s jemnou frakcí kameniva [6][7].

Ve spojitosti se zmíněnými skutečnostmi se pojednání ke státní závěrečné zkoušce zabývá studiem procesních parametrů velkorozměrového 3D tisku cementových materiálů o velké frakci kameniva se zaměřením na aplikaci a technologický posun.



Obr. 1-1 Vývoj aditivní výroby ve stavebnictví [8].

2 VYMEZENÍ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY A PŘEDBĚŽNÉHO CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Již od roku 1930 se můžeme setkat s primitivní formou aditivní výroby, jejíž podstata byla pouze v transportu stavebního materiálu formou pumpování a extruze na obtížně dostupných místech na staveništi [9]. Důležitý byl transport cementového materiálu, jehož hlavní vlastností pro tuto aplikaci byla pouze snadná zpracovatelnost a pumpovatelnost, tyto vlastnosti je možné ovlivnit reologickými vlastnostmi cementového materiálu [9].

Technologie extruze ve formě 3D tisku těchto materiálů, dnes označovaná technologií c3Dp/3DCPM (construction 3D print, 3D Construction Print – dále jen 3DCP), je známa od roku 2003 [10]. Tato technologie je založená na kontinuálním vrstvení extrudovaného stavebního materiálu metodou PEM (Paste Extrusion Method – dále jen PEM) [6], avšak stěžejní se stala metoda CC (Contour Crafting – dále jen CC). Metoda CC je technologie aditivní výroby poprvé představená v roce 1995 profesorem Khoeshnevisem, která využívá technologie povrchového tváření ve formě tzv. „stěrkování“ za účelem vytvoření hladké, relativně přesné okrajové plochy nebo volné plochy geometrie z extrudovaných materiálů. Metoda CC tedy oproti metodě PEM nabízí kratší časovou náročnost na výrobu s větší přesností geometrie tvaru výtisků [11].

Tyto tiskové metody se prvotně vyvíjely souběžně s materiálem a tiskovou aparaturou. Postupem času byly kladeny vyšší požadavky na tiskovou geometrii jak v čerstvé, tak ve vytvrzené podobě. V procesu aditivní výroby cementového materiálu je důležitým parametrem jeho snadné čerpání a stabilita extruze [7]. Tyto vlastnosti jsou v přímé závislosti na složení tiskové směsi, její distribuci a podobě nanášecího zařízení. Obecně se specifikace čerstvého materiálu dělí na pumpovatelnost, čerpatelnost, tisknutelnost, vystavitelnost a čas výnosu, kde jsou nejdůležitější právě časové intervaly spojené s výrobou a vrstvením [4][12]. Klíčové procesní parametry závislé na tiskové geometrii v sobě zahrnují délku tiskové stopy a časové okno depozice. Tyto faktory pak ovlivňují celkový čas výroby geometrie a kvalitu spojení vrstev. Nesprávné načasování může vést k tzv. studeným spojům, čímž je narušena integrita výtisku při přenášení zatížení ve vytvrzeném stavu [13][14].

Tyto skutečnosti vedly ke změně koncepce doposud používaných strojů umožňujících 3D tisk cementových hmot a začala se používat robotická ramena, která disponují až desetinásobnou rychlostí pohybu a šesti stupni volnosti oproti strojům portálové konstrukce [13].

Robotická ramena jsou vhodná pro rychlou výrobu tenkostěnných dílů a komplexně prostorově řešených geometrií. Milníkem se stala sub-aditivní výroba při použití tzv. metody CORBELLING (vytvoření zakřivení). Tato metoda byla vyvinuta v závislosti na tisku topologicky optimalizované geometrie, kdy při výrobě geometrie byla použita nejdříve subtraktivní (založena na odebrání materiálu) a poté aditivní technologie výroby [15][16].

V současné inženýrské praxi, stále však v experimentální rovině, se lze setkat s velkorozměrovým 3DCP používajícím zejména metody CC a PEM. Většina subjektů používá k realizaci 3D tisku obecně stejnou koncepci konstrukce a míru automatizace stroje, jako je tomu u tříosých obráběcích center rámové konstrukce. Tato konvence omezuje celý potenciál 3D tisku pro tisk složitých a rozměrných struktur v prostoru. Opakem této konvence jsou robotická ramena, která umožňují plnohodnotnou práci v prostoru díky šesti, a v některých případech i sedmi osám.

Stanovení předběžného cíle práce

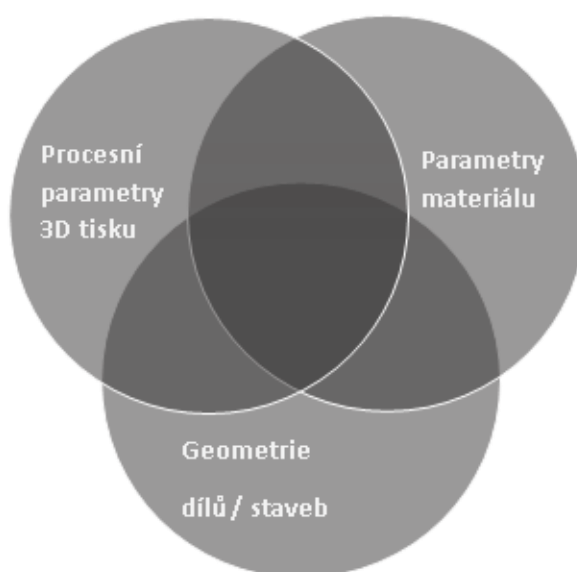
I přes širokou základnu experimentálních studií zabývajících se problematikou 3D tisku stavebních hmot skrývá tato oblast spoustu nezodpovězených otázek. Publikované studie se věnují převážně vlastnostem stavební hmoty, jejímu chování při procesu 3D tisku, tuhnutí a mechanickým vlastnostem vytvrzeného výtisku. Většina studií se však soustředí na použití tiskáren rámové konstrukce pracujících pouze ve 3 osách a toho lze dosáhnout jak metodou PEM, tak CC výrobou méně komplexních dílů. Tyto díly by však bylo možné vyrobit jednodušeji pomocí metody FW (Form Work - dále jen FW) využívající bednicí konstrukce [17]. Robotická ramena jsou pak spíše uplatňována pro svou versatilitu a mobilitu než pro možnosti využití pokročilých strategií 3D tisku komplikovaných geometrií. Pro 3D tisk komplikovaných tvarů je tedy nutné zvládnutí konjunkce tří odvětví, a to odvětví procesních parametrů 3D tisku, parametrů materiálu a geometrie tisknutých dílů.

Na základě úvah lze stanovit předběžný cíl disertační práce:

Předběžným cílem práce je proto aplikovaný výzkum se zaměřením na technologii 3D tisku komplexní geometrie o velkém rozměru s robotickým ramenem.

3 SHRnutí SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Jak již bylo zmíněno v úvodní části pojednání, současný stav poznání se globálně věnuje technologii 3DCP. Tato oblast má tři podoblasti (obr. 3-1), které jsou nutné pro upřesnění hlavního cíle práce a definování vědeckých otázek a hypotéz. Současný stav poznání se zabývá studii věnujícími se procesu výroby pomocí technologie 3DCP při použití robotického ramene a konvenčních strojů. Dále se věnuje parametrům tiskového materiálu a chováním tisknuté a okrajově také vytvrzené geometrie. Cílem je zmapování získaných poznatků o vlastnostech stavebního materiálu při procesu 3D tisku a velkorozměrových vytištěných strukturovaných dílů.



Obr. 3-1 Základní oblasti 3DCP [12] - upraveno autorem.

3.1 Studie zaměřené na parametry materiálu a procesní parametry 3D tisku

- [18] PANDA, Biranchi, Jian Hui LIM a Ming Jen TAN. Mechanical properties and deformation behaviour of early age concrete in the context of digital construction. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2019, **165**, 563–571 [vid. 2019-06-04]. ISSN 1359-8368. Dostupné z: doi:10.1016/J.COMPOSITESB.2019.02.040

Zaměření studie:

Autoři studie se zaměřují na mechanické vlastnosti a deformační charakteristiky čerstvé cementové směsi vhodné pro technologii 3D tisku, přičemž porovnávají údaje z optického skeneru s údaji z reometru. Hlavním cílem studie bylo pochopit princip vystavitelnosti 3D tisknuté směsi a vylepšit ji pro tisk dílů o velkém rozměru bez použití chemických přísad.

Výsledky:

Pro určení meze kluzu čerstvého cementového materiálu byla využita zkouška prostým tahem jako v předchozí studii. Ke zkouškám byla použita zkušební tělesa (dále jen ZT) v podobě válce o průměru 70 mm a výšce 140 mm. Velikost ZT byla volena s ohledem na maximální velikost kameniva tak, aby došlo k diagonálnímu smyku. Pět zkušebních těles bylo vystaveno bezprostředně po odlití vibracím a byla testována v rozmezí časových intervalů dle Obr. 3-2 (b) [18].

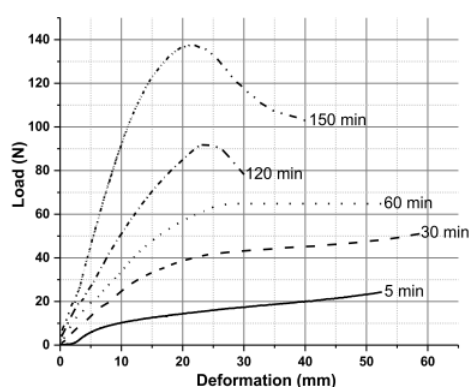
Zkušební tělesa byla podrobena tlakové zkoušce (Obr. 3-2 (a)), při níž bylo provedeno dynamické měření deformace ve vertikálním a horizontálním směru. Pro bezkontaktní měření byl použit upravený optický skenovací přístroj Kinect, kde se naskenované mračno bodů v čase filtrovalo metodou „Pass-through“. Z filtrace byla získána oblast bodů, která byla signifikantní pro deformaci v čase [18].

Normálu povrchu tvořeného vyfiltrovaným mračnem bodů odhadli pomocí metody KEM (K-neighbour estimation method) [18].

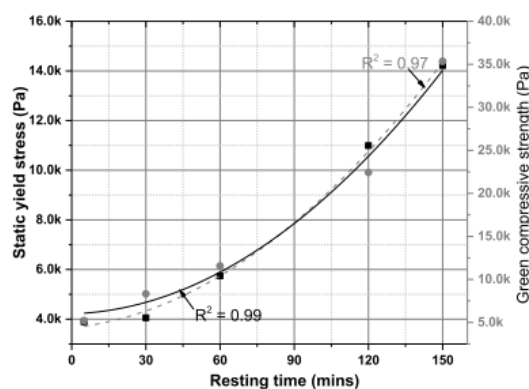
Poté byl aplikován tzv. algoritmus růstu regionu segmentace na mračno bodů. Výstupem byl seznam klastru bodů, které popisovaly oblasti nespojitosti s homogenními vlastnostmi. Tento model poskytl výsledný shluk bodů, které odpovídaly chování zkušebního tělesa během testu. Model byl pak převeden do grafické podoby pro vizuální účely a číselné údaje zahrnující deformaci (výška, průměr, umístění těžiště) čerstvého betonu v čase byly uloženy do tabulkového formátu [18].

Oba typy dat byly korelovány s údaji získanými z testu. Reologické chování cementových směsí není konstantní v čase. Statická mez kluzu směsi byla vypočítána při rozdílných časových intervalech (5, 30, 60, 90 a 150 min) ponecháním směsi v klidové fázi. Při konstantní smykové rychlosti ($0,1.s^{-1}$) po dobu 60 s byla horní mez smykového napětí definována jako statická mez kluzu. Byl použit reometr MCR 102 s čtvercovou sondou. Neznámá v podobě meze tlakové síly u čerstvého betonu byla definována jako výskyt maximálního napětí na ploše, než dojde ke kolapsu výtisku. Tento princip aplikovali až po korekci plochy. Tyto výsledky byly následně porovnány s mezí kluzu odečtenou z reometru [18].

V časovém intervalu 0–150 min jsou vidět signifikantní hodnoty pro pevnost čerstvé cementové hmoty a statické meze kluzu (Obr. 3-2). Autoři předpokládali lineární chování meze kluzu v intervalu 30–40 min. Následný exponenciální nárůst vysvětlovali podle Rousselova lineárního modelu [18].



(a)



(b)

Obr. 3-2 Čerstvá cementová směs: (a) Závislost deformace na zatížení (b) Závislost statické meze kluzu na času [18].

Dále byl zkoumán vliv příměsi NC (Nano-Clay) na vystavitelnost, tedy elastickou a plastickou deformaci působící na výtisk. Příměs NC snížila velmi významně elastickou deformaci materiálu při extruzi, což v důsledku zvýšilo i výšku vystavitelnosti vrstev, než došlo ke kolapsu vlivem plastické deformace. Tyto poznatky potom byly aplikovány ve vývoji numerické predikce tisku dílů o různých rozměrech pro danou směs [18].

Výsledky a závěry:

Ve studii bylo zkoumáno několik přístupů ke zjištění chování směsi v čerstvém stavu. Prvotně bylo prostřednictvím softwaru ověřeno rozhraní deformací a kolaps zkušebních těles válcové geometrie při zkoušce v tlaku. Výsledkem byla potvrzena korelace mezi optickým měřením a měřením pomocí laboratorního reometru.

Dále byla potvrzena vzestupná tendence výskytu elastické a plastické deformace výnosu při použití příměsi NC. Autoři doporučují do čerstvé cementové směsi přidávat chemické akcelerátory tuhnutí pro zlepšení mechanických vlastností a zvýšení intervalu vystavitelnosti a minimalizovat tak pravděpodobnost výskytu plastických deformací způsobujících kolaps výtisku.

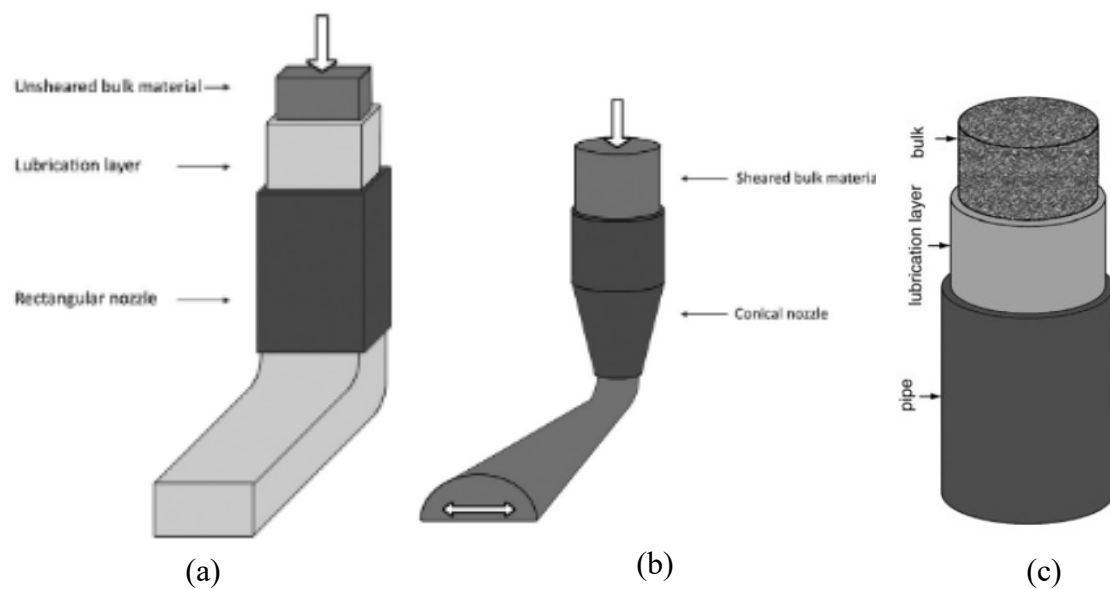
-
- [20] ROUSSEL, Nicolas. Rheological requirements for printable concretes. *Cement and Concrete Research* [online]. 2018, **112**, 76–85 [vid. 2019-02-14]. ISSN 0008-8846. Dostupné z: doi:10.1016/J.CEMCONRES.2018.04.005
- [21] DENIS KAPLAN AND THIERRY SEDRAN, Francois de Larrard. Design of Concrete Pumping Circuit. *Materials Journal* [online]. nedatováno, **102**(2). Dostupné z: doi:10.14359/14304
- [22] CHOI, Myoungsung, Nicolas ROUSSEL, Youngjin KIM a Jinkeun KIM. Lubrication layer properties during concrete pumping. *Cement and Concrete Research* [online]. 2013, **45**, 69–78 [vid. 2019-06-27]. ISSN 0008-8846. Dostupné z: doi:10.1016/J.CEMCONRES.2012.11.001
- [23] SHAKOR, Pshtiwan, Shami NEJADI a Gavin PAUL. A study into the effect of different nozzles shapes and fibre-reinforcement in 3D printed mortar. *Materials* [online]. 2019, 12(10). ISSN 19961944. Dostupné z: doi:10.3390/MA12101708
- [24] MARTINIE, L a N ROUSSEL. Simple tools for fiber orientation prediction in industrial practice. *Cement and Concrete Research* [online]. 2011, **41**(10), 993–1000. ISSN 0008-8846. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.05.008
- [25] FATAEI, Shirin, Egor SECRIERU a Viktor MECHTCHERINE. Experimental insights into concrete flow-regimes subject to shear-induced particle migration (SIPM) during pumping. *Materials* [online]. 2020, **13**(5). ISSN 19961944. Dostupné z: doi:10.3390/ma13051233
- [27] SECRIERU, Egor. *Pumping behaviour of modern concretes – Characterisation and prediction*. 2018. ISBN 9783867805629.

Zaměření studie:

Publikace se zabývaly reologickými parametry cementové směsi vhodné pro výrobu technologií 3DCP z pohledu proudění betonu, meze kluzu, viskozity, modulu pružnosti, kritické deformace, rychlosti růstu struktury a migrace částic [20]. Autoři výše zmíněných studií se shodují, že materiál musí být čerpán ze zásobníku pomocí hadice až k trysce. Touto skutečností jsou dané požadavky na počáteční tekutost (čerpateľnost) [21].

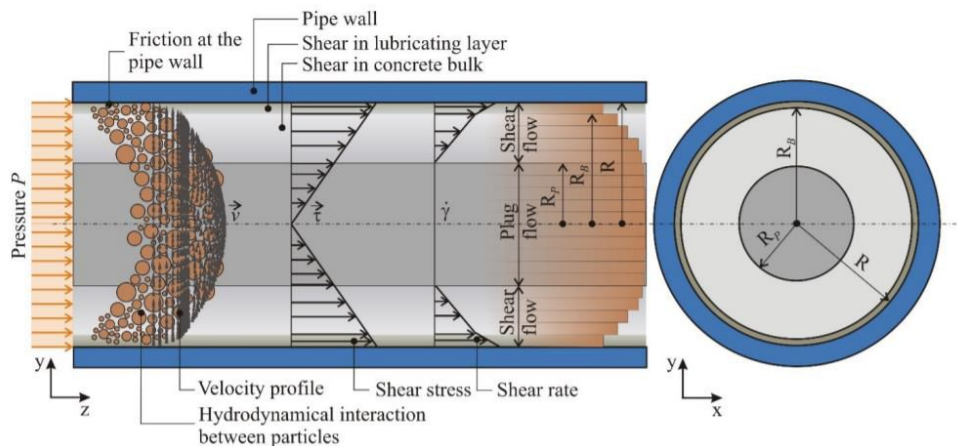
Z pohledu pumpovatelnosti směsi musí být mez kluzu a viskozita materiálu co nejnižší. Cementové materiály se chovají jako binghamské kapaliny s tixotropním chováním a začínají tak téct, pokud na ně působí napětí vyšší než mez toku [24]. Proudění těchto kapalin doprovází charakteristické děje, mezi které patří migrace větších částic směrem ke středové ose potrubí a migrace menších částí společně s vodou ke stěnám, kde utvoří tzv. lubrikační vrstvu.

Důležitá je také geometrie čerpacího ústrojí (trubka, hadice, přechody, tryska...), vlivem různorodé geometrie mohou vznikat specifické typologie proudění, ke kluzu materiálu dochází v úzkém pásmu na rozhraní s trubkou, hadicí nebo tryskou, zatímco objem materiálu se nesmýká a tvoří tzv. zátkový tok (Plug-Zone, Obr. 3 -5) [25].



Obr. 3-3 Deformace tisku podle průřezu trysky: (a) obdélníkový průřez, (b) kruhový průřez, (c) kruhový průřez [20].

V mazací vrstvě se smýkají pouze jemné částice a voda. Uvádí se, že schopnost čerpat nebo vytlačovat daný materiál závisí více na jeho schopnosti vytvářet lubrikační vrstvu než na její skutečné objemové reologii [21][22].



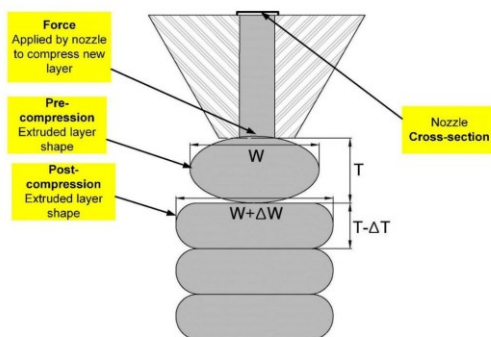
Obr. 3-4 Charakteristika proudění cementové směsi [26].

Nicméně, jak mez kluzu a viskozita, tak i schopnost vytvářet nízko viskózní lubrikační vrstvu se drasticky mění s obsahem vody ve směsi. Směsi s nízkým obsahem vody proto vykazují vysokou mez kluzu a vysokou plastickou viskozitu. Rovněž vykazují nízkou schopnost vytvářet mazací vrstvu. I když tomu tak je, může být lokální viskozita v této vrstvě extrémně vysoká a může vést k vysokým čerpacím tlakům.

Pokud je však tryska vybavena šnekovou pumpou nebo mísícím šnekem v trysce, laminární podmínky pro smyk nejsou splněny.

V obdélníkové trysce (Obr. 3-4 (a), Obr. 3-5) se smykové napětí koncentruje na rozhraní a dochází tak čistě k procesu extruze, při kterém se nahromaděný materiál na tiskovou podložku nebo další vrstvu nesmýká. Extruze materiálu je v podobě tuhé a homogenní stopy a není významně deformována [26].

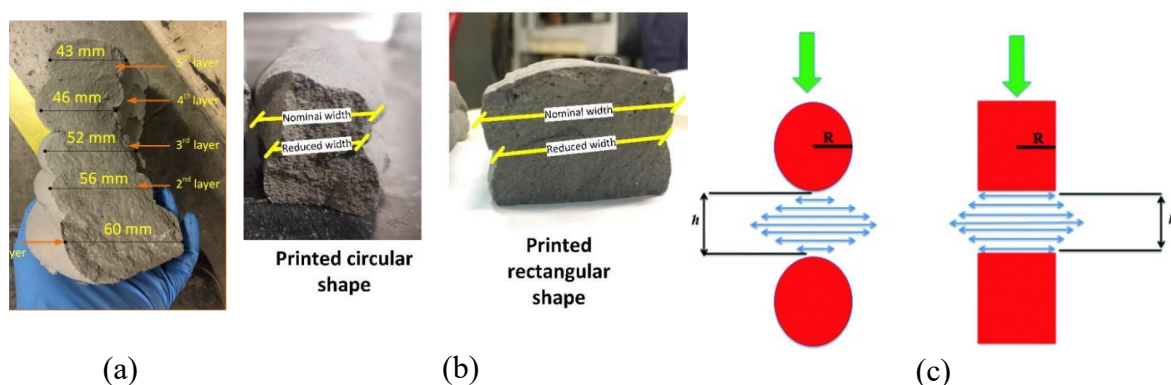
Naproti tomu u trysky kruhového průřezu (Obr. 3-4 (b) a (c), Obr. 3-7) dochází ke smyku materiálu před depozicí a k přenosu smykových sil na předchozí vrstvu nebo tiskovou podložku. Jak dochází ke zpomalení toku a hromadění materiálu, dochází k překročení meze kluzu. To má za následek plastickou deformaci, dokud nedojde k ustálení tvaru [27].



Obr. 3-5 Deformace/ sesedání (změna výšky a šířky) tisknutých vrstev [23]

Shakor a kolektiv vycházeli z poznatků předešlých studií, kde se autoři shodují na závislosti geometrie výstupní trysky a míře sesedání vrstev. Příčinou sesedání je působení hmotnosti materiálu a působení tlaku extruze nanášené vrstvy. Charakteristika extruze materiálu se odvíjí od geometrie trysky (Obr. 3-6) [23]. U trysek obdélníkového průřezu jsou tlakové síly rovnoměrně rozloženy po celé dotykové ploše vrstev. U kruhových trysek je tato dotyková plocha menší, důsledkem čehož je větší deformace do doby, než dojde k ustálení mezi šířkou a výškou výnosu. Rychlost sesednutí vrstvy u obdélníkového průřezu má lineární charakter, kdežto u trysky s kruhovým průřezem ne. To může zapříčinit rychlejší překročení Mohr-Coulombova kritéria a dochází ke kolapsu výtisku. Rozdíl šířky u trysek pravoúhlých tvarů byla o 1,15 až 2,28 mm větší než redukovaná šířka, která přibližně odpovídá šířce trysky, a tedy požadované šířce tisknuté stopy.

U trysek s kruhovým průřezem byl tento rozdíl 2,35 až 3,85 mm. Pro tisk více vrstev je tedy vhodnější použít trysku se čtvercovým nebo obdélníkovým tvarem kvůli menší deformaci a změně rozměrů vytištěných vrstev [23].

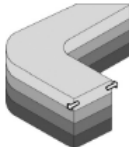
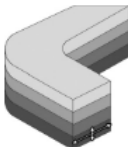
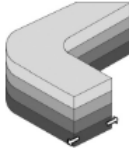
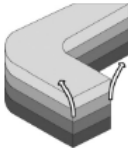
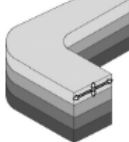
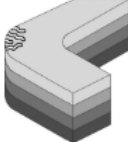


Obr. 3-6 Deformace extrudovaného materiálu: (a) Vliv sesedání, (b),(c) Deformace v závislosti na průřezu trysky [23].

Perrot a kolektiv publikovali studii, kde zkušební tělesa vytisknutá pravoúhlo tryskou vykazovala řádově nižší výskyt dutin a trhlin v důsledku menší deformace stopy při výnosu. Dochází tak ke vzniku větších dotykových ploch mezi vrstvami v horizontálním a vertikálním směru se zachováním laminárního zátkového toku cementové směsi a k lepší celkové stabilitě tisknuté stopy. Dále vytvrzená tělesa vykazují vyšší pevnost v tlaku [28].

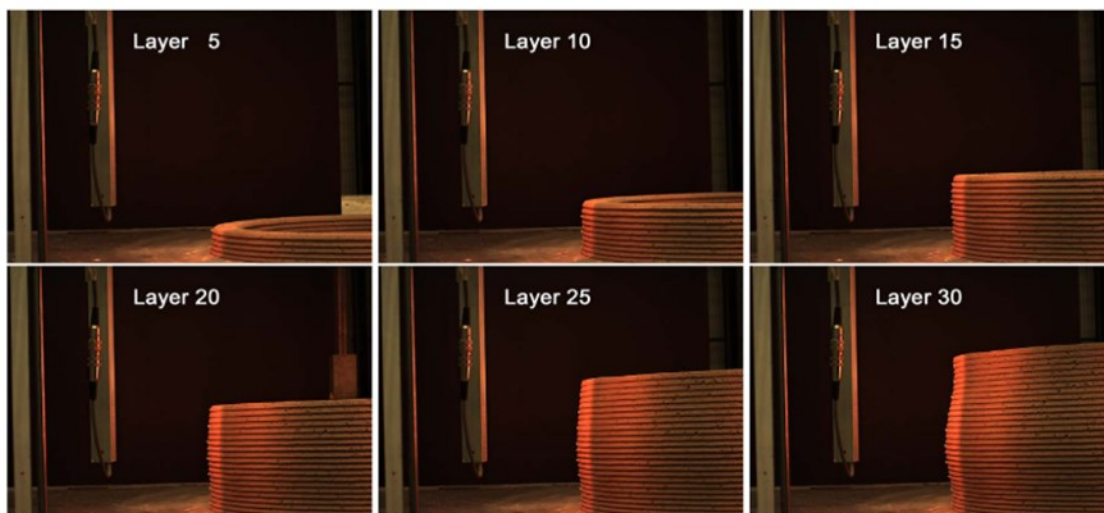
Výsledky a závěry plynoucí z článku:

- Stabilita extruze je ovlivněná tvarem výstupní trysky, přičemž pro tisk stabilní struktury bez nežádoucích deformací je vhodná tryska obdélníkového průřezu.
- Průřez trysky je závislý na maximální velikosti přísady kameniva.
- Optimální průřez trysky se udává v poměru 1/3 nebo 2/3, v závislosti na největší frakci kameniva použitého ve směsi.
- Reologická kritéria na tisknutou geometrii vycházející z Mohr-Coulombova kritéria (Obr. 3-7).

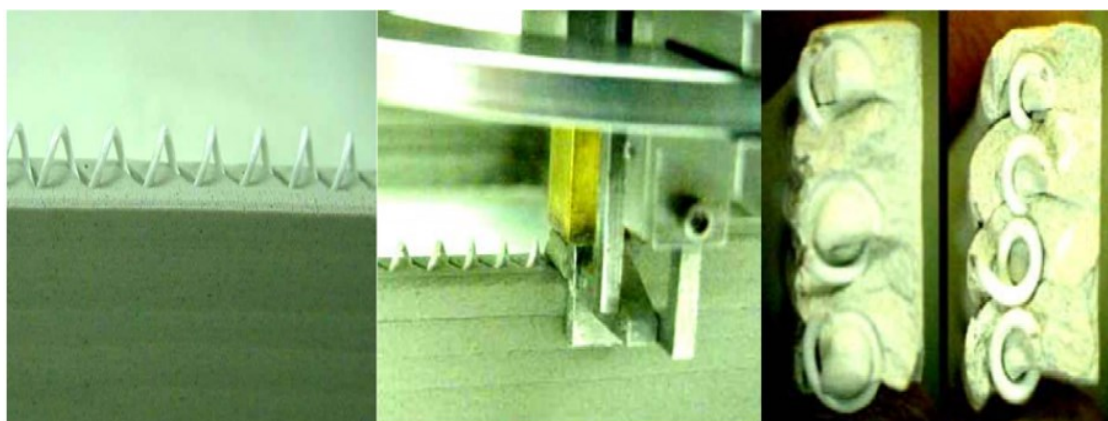
Printing requirement	Illustration	Input printing process parameters	Rheological requirement				
Individual strength-based layer stability		Layer thickness h_0	Initial yield stress higher than ρgh_0 (Cf. Fig. 3)	Collective geometry control		Total height H	See Section 5.1
Collective strength-based layer stability		Total height H	Yield stress in the bottom layer must stay higher than $> \rho g H / \sqrt{3}$ (Cf. Fig. 3)	Collective buckling failure		Total height H layer width δ	Young elastic modulus must stay higher than $3\rho g H^2 / 2\delta^2$
Individual layer geometry control		Layer thickness h_0	Initial shear elastic modulus higher than $\rho gh_0 / \gamma_{tol}$ where γ_{tol} is the tolerable deformation of the layer	Plastic cracking		Radius of curvature and layer width	See Section 5.3

Obr. 3-7 Požadavky na reologické vlastnosti čerstvého cementového materiálu [20].

Při procesu 3D tisku cementových materiálů bez výztuže vždy dochází k nežádoucím jevům v podobě deformace vytištěné geometrie a jejímu následnému kolapsu (Obr 3-8). Tento jev je způsoben vlastní tíhou nánosu materiálu a jeho reologickými vlastnostmi. K vyztužení čerstvé cementové směsi během 3D tisku existuje několik přístupů [29]. Jednotlivé přístupy jsou rozebrány v následujících podkapitolách.



Obr. 3-9 Stabilita nevyztuženého cementového materiálu [29].



Obr. 3-8 obr. 3-9 Stabilita nevyztuženého cementového materiálu [30].

3.1.1 Vyztužení cementové směsi armaturou

- [30] 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
- [31] 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
- [32] 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

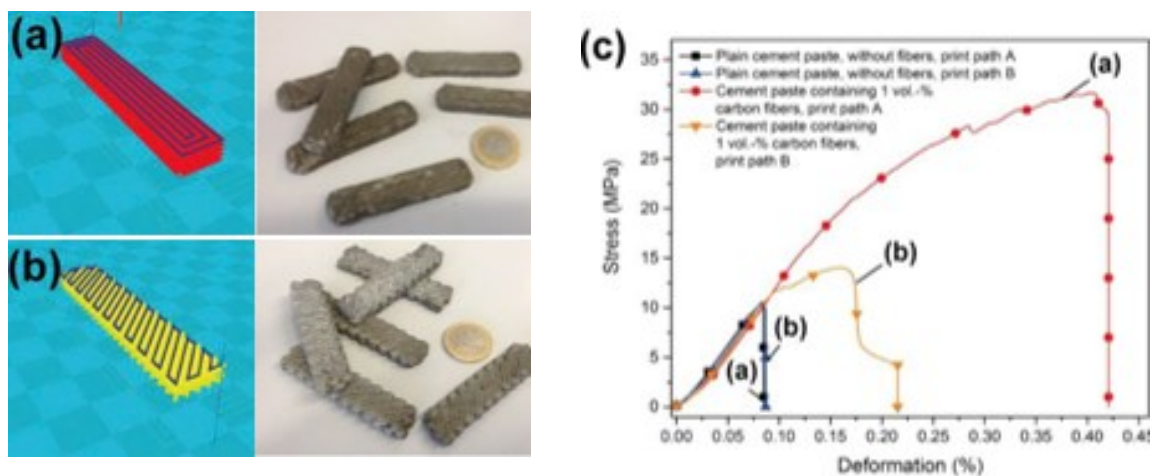
Proces vyztužování probíhá během 3D tisku, kdy se jednotlivé vrstvy provazují vinutým drátem po celém obvodu (Obr. 3-9). Tento přístup krátce zmiňuje Khoshnevis [30].

Podle studie Daniela G. Soltana 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 [31][32]. Svoji studií *A self-reinforced cementitious composite for building-scale 3D printing* upozorňuje na důležitost výzkumu materiálových charakteristik. 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 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 [31].

3.1.2 Vyztužení cementové směsi vlákny

- [33] 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. Dostupnéz: doi:10.1016/j.cemconcomp.2017.02.001

Manuel Hambach a Dirk Volkmer ve studii *Properties of 3D-printed fiber-reinforced Portland cement paste* doporučují nutnost vyztužovat beton během procesu 3D tisku. Důvodem je zlepšení stability tisku a mechanických vlastností ve vytvrzené podobě. Výzkum autorů je zaměřen na vyztužování pomocí různých druhů vláken během 3D tisku cementové kaše. Byla použita cementová směs s vlákny z různých materiálů (skelné, čedičové a uhlíkové vlákno). Výsledkem studie je poznatek o vlivu orientace depozice a směru vlákna, kde tyto vlastnosti mají velký vliv na ohybovou pevnost kompozitu. Bylo zjištěno, že pevnost v ohybu se správnou konfigurací a orientací uhlíkových vláken dosahuje při 1% objemu vláken ve hmotě až třikrát vyšší pevnosti a čtyřikrát menší deformace (Obr. 3-10) [33].

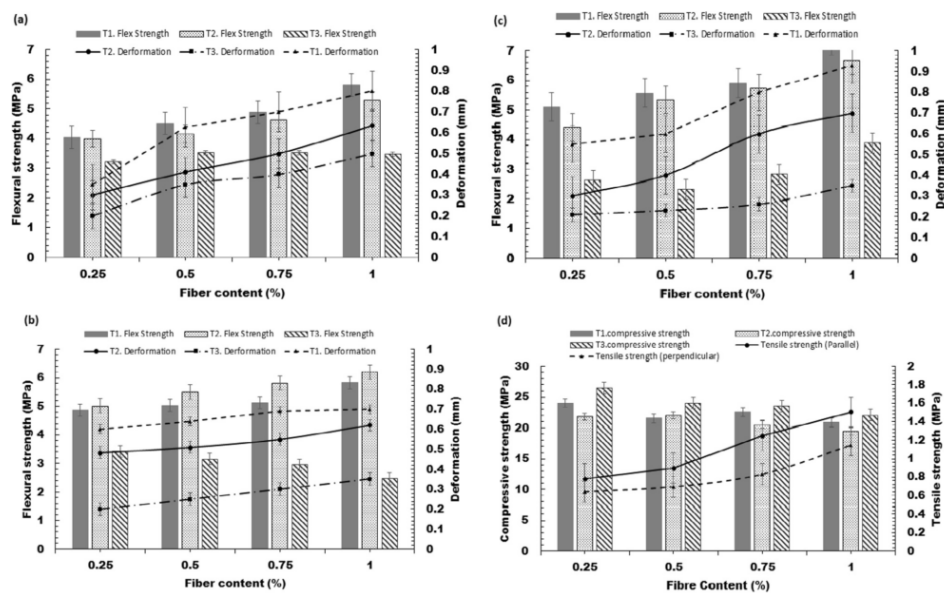


Obr. 3-10 (a) Koncentrické vyztužení, (b) Diagonální vyztuha v jednom směru, (c) Diagram zatížení/deformace u jednotlivých geometrií vyztuží [33].

[34] PANDA, Biranchi, Suvash CHANDRA PAUL a Ming JEN TAN. Anisotropic mechanical performance of 3D printed fiber reinforced sustainable construction material. *Materials Letters* [online]. 2017, **209**, 146–149 [vid. 2017-11-27]. ISSN 18734979. Dostupné z: doi:10.1016/j.matlet.2017.07.123

Panda a kolektiv se zabývali experimentálním výzkumem vyztužování cementové směsi skelnými vlákny o velikosti 3, 6 a 8 mm a o objemovém zastoupení vláken v tisknoucí hmotě v intervalu 0,25-1 %, jako udržitelného materiálu pro aplikaci v procesu výroby 3D tisku [34].

Dále zkoumá mechanické vlastnosti tohoto materiálu. Z experimentů plyne, že takový materiál nezlepšuje jeho reologické vlastnosti pro 3DCMP, ale zlepšuje jeho mechanické vlastnosti. Pevnost v tahu a ohybu při 1% obsahu těchto vláken ve směsi se rapidně zvýšila (Obr. 3-11).



Obr. 3-11: (a),(b),(c) Diagramy pevnosti ohyb/deformace, (d) Diagram pevnosti tlak/tah [34].

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

Kazemian a kolektiv se zaměřili na validaci laboratorního testování cementových směsí pro technologii velkorozměrového 3D tisku následujícími způsoby.

- 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 zkouška sednutí kuželu.
- Experimenty se čtyřmi různými směsmi. Experimenty odhalily skutečnost, že přidaná vyztužovací aditiva (oxid křemičitý a Nano-Clay) výrazně zvyšují stabilitu tvaru.

3.1.3 Vyztužení cementové směsi ocelovou konstrukcí

[35] 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

Zaměření studie

V této studii se autoři věnují 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. Autor Domenico 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 pomocí ocelových výztuh. Cílem této koncepce je usnadnit výrobu 3D tisku strukturálně optimalizovaných železobetonových elementů s hlavním úkolem ušetřit množství použitého materiálu a současně umožnit výrobu lehčích konstrukcí (Obr. 3-12). [35]

Ze začátku došlo k určení limitů 3D tisku betonové hmoty:

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

Tyto parametry byly klíčové pro tok cementové směsi. Správný poměr cementu s vodou byl stanoven na 1:0,39 (jeden díl cementu na 0,39 dílu vody) s maximální velikostí plniva ve formě kameniva 4 mm. Další příměsí byl polypropylen o 0,5% hmotnosti směsi, ve formě krátkých vláken pro prevenci 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 [35].

Během nanášení betonu dochází k roztečení hmoty, tento jev je označován za pokles. Pokles se klasifikuje do tříd podle normy 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 determinačně stanovena na 53,5 MPa. Průměrná pevnost v tahu dosahuje 83 % pevnosti v tlaku, tedy 44,4 MPa. [35]

Po empirickém vyhodnocení těchto zkoušek 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 byl vytištěn z deseti vrstev [35].

Následně došlo k vytištění jednotlivých buněk typu A a B. Každá buňka byla 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 [35]. Ocelové výztuhy plnily následující funkce:

- Vrchní pruty sloužily ke snížení kompresních sil vyvolaných ohybem.
- Spodní prut sloužil ke snížení tlakového napětí působícího shora a ke snížení tahového napětí.
- Diagonální kompresní vzpěry na obou stranách buňky zabraňovaly smykovému namáhání.



Obr. 3-12 Vnější systém výztuh [35].

Výsledky:

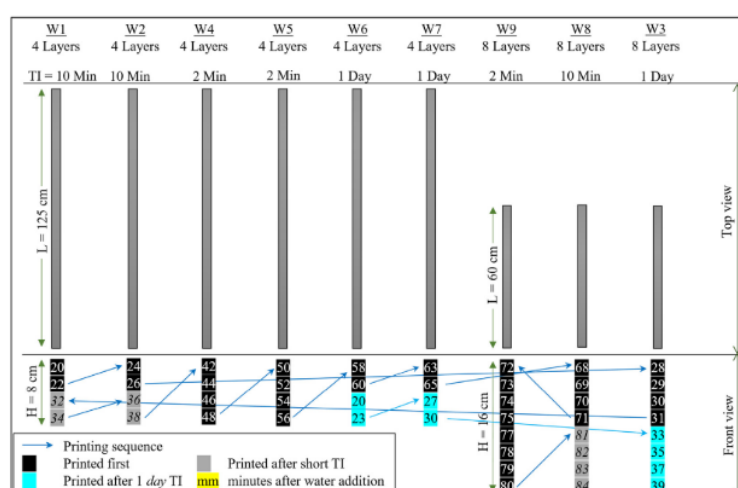
- Počáteční pevnost v ohybu vytištěného vyztuženého nosníku byla srovnatelná s pevností v ohybu plného vytištěného nosníku.
- Nelineární chování nosníku pod zátěží bylo ovlivněno výskytem lokálních prasklin, působením smykového napětí na rozhraní stykových ploch sousedních buněk a kotvením ocelových prutů do konstrukce
- Při zatížení nebyly u externí ocelové výztuže pozorovány známky překročení meze kluzu.
- V praxi byla potvrzena metoda FEM, která vyhodnotila jako nejslabší místa konstrukce při zatížení v ohybu přechody mezi vytištěnými buňkami a kotevními body.

3.2 Studie zaměřené na strategie a metody tisku komplexní geometrie

- [36] NERELLA, Venkatesh Naidu, Simone HEMPEL a Viktor MECHTCHERINE. Effects of layer-interface properties on mechanical performance of concrete elements produced by extrusion-based 3D-printing. *Construction and Building Materials* [online]. 2019, **205**, 586–601 [vid. 2019-02-15]. ISSN 0950-0618. Dostupné z: doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.01.235

Zaměření studie:

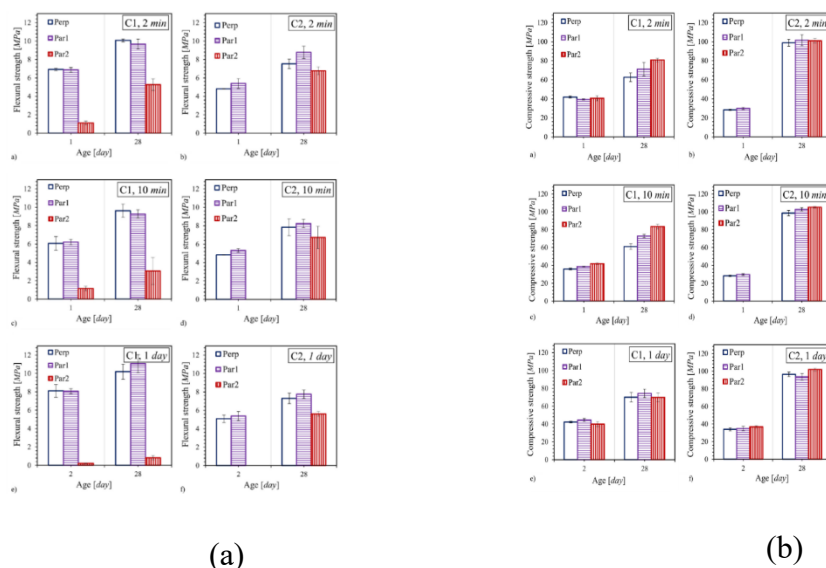
Autoři této studie se věnovali chování spojení vytištěných vrstev vzhledem k mechanickým vlastnostem u dvou materiálů. Materiál s označením C1 obsahoval pouze jedno pojivo, a to portlandský cement. Pojivo materiálu C2 obsahovalo 2 složky - pucolán a popílek. Vrstvení probíhalo ve třech časových rozestupech: 2 min, 10 min a 1 den. První doba vymezovala nejkratší čas výnosu směsi, druhý čas demonstroval standardní dobu extruze vrstvy při tisku dílů o velkém rozměru a poslední časový údaj reprezentoval přerušení tisku. Obě směsi byly z jemnozrnného betonu, kde maximální velikost kameniva byla v podobě říčního písku: 2 mm (více o směsi ve studii). Velikost trysky byla (30×18,72) mm, přičemž rozměry extruze byly v rozmezí 30–31 mm na výšku a 19–20 mm na šířku a rychlost tisku byla 75 mm/s. Ke zjištění pevnosti výtisku použili metodu destruktivních zkoušek v tlaku a třibodovém ohybu. Zkoušky byly provedeny na tělesech, kde vrstvení probíhalo v různých časových intervalech (Obr. 3-13). Cílem bylo zjištění závislosti pevnosti vrstev na času depozice cementové směsi [36].



Obr. 3-13 Strategie času vrstvení v závislosti na zpracovatelnosti směsi [36].

Výsledky a závěry:

Směs C2 vykazovala relativně mírné snížení pevnosti v ohybu o 9,9 %, 14,1 % a 23,1 % pro vzorky vyrobené v časech 2 min, 10 min. a 1 den (Obr. 3-14). Vzorky byly podrobeny testu na prostý tah. Výsledkem bylo potvrzeno, že prostý tah nemůže adekvátně kvantifikovat mezivrstevní pevnost. Může však sloužit jako indikátor stabilní anizotropie vzorků, pokud jsou testy prováděny v různých směrech



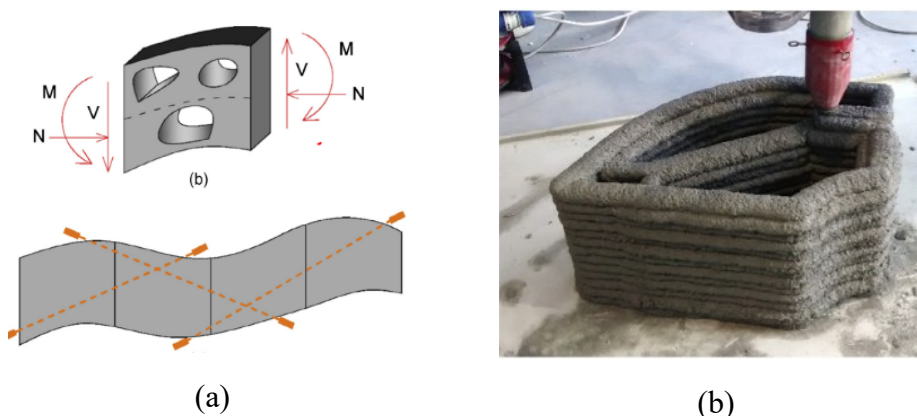
Obr. 3-14 Pevnostní charakteristiky vytisknutých zkušebních těles v různých orientacích: (a) pevnost v ohybu, (b) pevnost v tlaku [36].

- [35] 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
- [37] PODROUŽEK, Jan, Marco MARCON, Krešimir NINČEVIĆ a Roman WAN-WENDNER. Bio-Inspired 3D Infill Patterns for Additive Manufacturing and Structural Applications. *Materials* [online]. 2019, **12**(3), 499. Dostupné z: doi:10.3390/ma12030499
- [38] PODROUŽEK, Jan, Marco MARCON, Krešimir NINČEVIĆ a Roman WAN-WENDNER. Bio-Inspired 3D Infill Patterns for Additive Manufacturing and Structural Applications. *Materials* [online]. 2019, **12**(3), 499. Dostupné z: doi:10.3390/ma12030499

Zaměření studií:

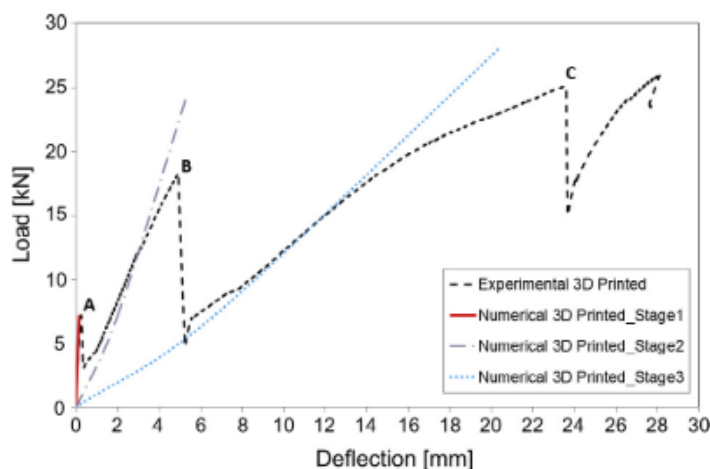
Studie se zaměřují na struktury používané v aditivní výrobě nejen ve stavebnictví.

Autor se zabýval vyztužováním, ale také strukturou jednotlivých elementů konstrukce (Obr. 3-15). Jako výhody jsou uvedeny úspora času při výstavbě, nižší náklady, vyšší bezpečnost pracovníků, lepší kvalita a spolehlivost, úspora materiálů a tím i udržitelnost. S ohledem na úsporu materiálů nedávné studie ukázaly, že digitální zpracování je schopno poskytnout přínosy pro životní prostředí, pokud je aplikováno na složité struktury, u kterých lze eliminovat výrobu druhotných konstrukcí, jako je bednění [38][37][6].



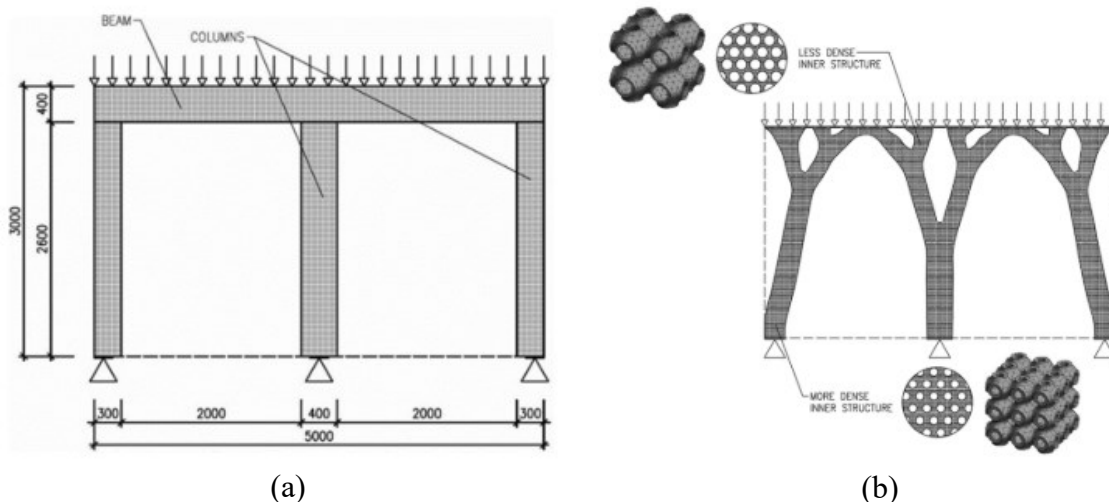
Obr. 3-15 Elementy z betonu: (a) Schéma silového působení, (b) 3D tisk elementů [35]

Domenico Asprone navrhl pro svůj experiment hybridní konstrukci sestávající z hlavní vyztužovací struktury (kapitola 3.2.3) a podpůrné struktury ve formě topologicky optimalizovaných buněk (Obr. 3-15). Topologická optimalizace byla založená na FEM analýze (Finite element method), kde bylo simulováno vnější působení sil na konstrukci nosníku (Obr 3-16) [35].



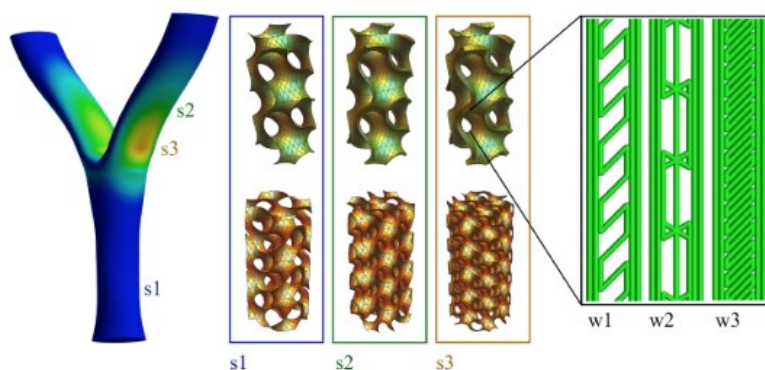
Obr. 3-16 Závislost deformace na silovém působení – porovnání experimentu s teoretickou hodnotou [35].

Podroužek se v první části své studie zabýval současnými přístupy a metodami pro modelování strukturovaných betonových sloupů. Ve druhé fázi popisuje přechod mezi tradičními uniformními tvary a organickými strukturami s příkladem reálné struktury. V práci se také zabývá návrhem a hodnocením konstrukčních členů organických forem včetně návrhu vlastní struktury konstrukčního prvku. [38]



Obr. 3-17 Topologická optimalizace: a) Vstupní geometrie nosníku se silovým působením; (b) topologicky optimalizovaný nosník [38]

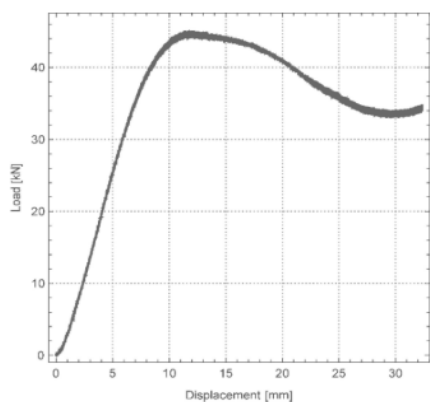
Pro topologickou optimalizaci byl použit nosník zatížený liniovým působením sil. Tento nosník byl topologicky optimalizován v programu IDEA StatiCa. Optimalizace byla provedena na třech úrovních, a to na strukturální úrovni, na vnitřní prostorové struktuře, kde autor navrhuje využití ploch s minimálním povrchem, a na tištěném materiálu (Obr. 3-17; 3-18). Pro návrh těchto struktur bylo využito pravidel aditivní výroby pro 3D tisk metodou FDM, kde všechny stěny musí být pod maximálním úhlem 45° , tak aby se vytiskly bez podpor.



Obr. 3-18 Princip víceúrovňové optimalizace [37].

Pro rozsáhlé aplikace ve stavebnictví je možné použít beton jako tiskový materiál. Zároveň však autor upozorňuje na omezení plynoucí z podstaty cementového materiálu jako

takového. Dále je poukázáno na to, že pro menší konstrukce je možné použít nevyztužený cementový materiál, avšak pro velké konstrukce je nutné vyztužování například ocelovými nebo polymerními vlákny. Pro ověření vlastností ploch s minimálním povrchem bylo vytvořeno několik zkušebních těles v podobě válců vyplněných strukturami s minimálním povrchem (Obr. 3-19). Tato zkušební tělesa pak byla podrobena destruktivní zkoušce v tlaku, kde byla sledována závislost deformace na zatížení optickou metodou DIC (Digital Image Corelation).



(a)



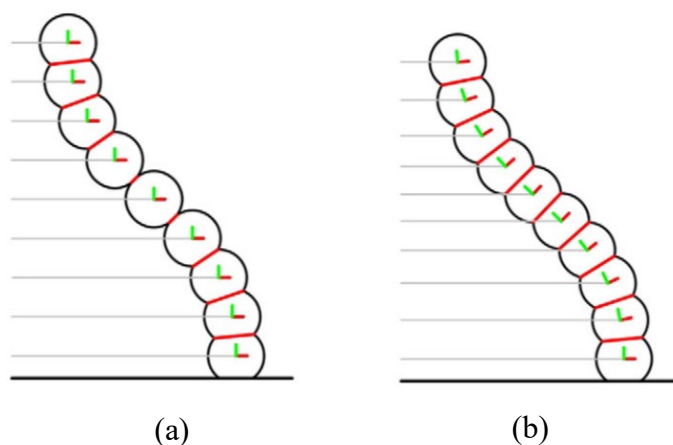
(b)

Obr. 3-19 Výplň strukturou: (a) Závislost sil. působení a deformace, (b) Otevřená gyroidní struktura [37]

- [39] GOSSELIN, C., R. DUBALLET, Ph ROUX, N. GAUDILLIÈRE, J. DIRRENBARGER 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

Zaměření studie:

Studie se zaměřovala na tiskové strategie pro velkorozměrový 3D tisk v architektuře, kde autoři podrobně pojednávají o rozdílech použití tzv. metody tangenciální kontinuity vrstvení (TCM). Tato metoda je vhodná pro AM ve stavebnictví pro tisk rozměrných dílů. Tiskové trajektorie jsou ve skutečnosti trojrozměrné. Principem je tedy nerovinný tisk vrstev s lokálně se měnícími tloušťkami. Tato strategie dokáže lépe využívat geometrických možností a potenciálu, který nabízí 3D tisk. Hlavní výhodou je udržování kontaktu povrchů v konstantní vzdálenosti. Tento přístup umožňuje vyhnout se vzniku mezer mezi vrstvami v důsledku metody FDM, jejímž ekvivalentem ve stavebnictví je metoda PEM [39].



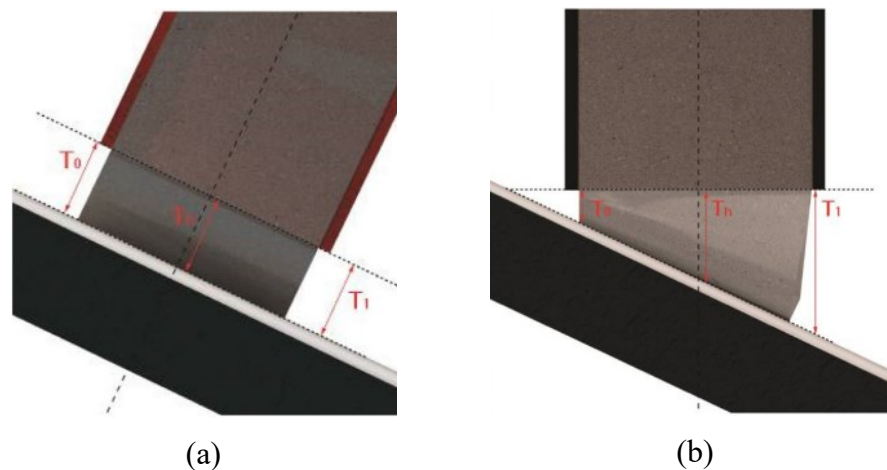
Obr. 3-20 Strategie tisku betonu: (a) metoda FDM/ ekv. ve stavebnictví PEM; (b) TCM – metoda tangentiální kontinuity tisku [39].

Výsledky:

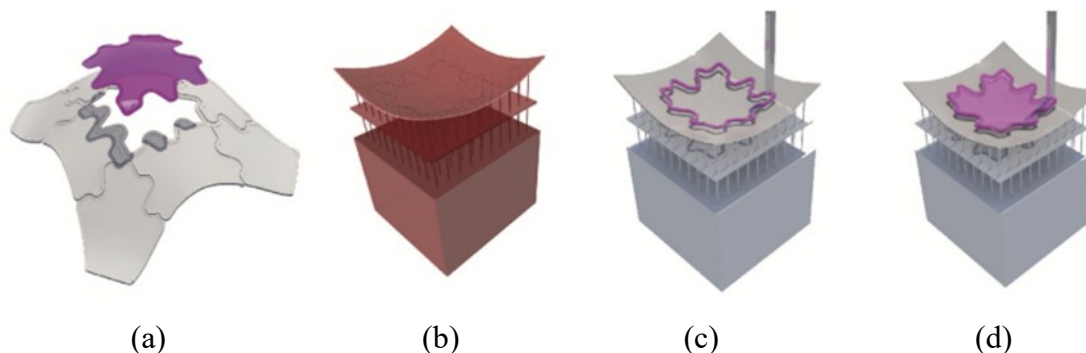
Vrstvy získané pomocí metody TCM (Obr. 3-20 (b)) lze tedy mechanicky zatížit stejně jako klasické zděné klenby, tj. v tlaku, kolmo na rovinu rozhraní vrstvy. Metoda FDM (Obr. 3-20 (a)) zachovává výšku vrstev, ale plocha kontaktu vrstev se mění (označeno červeně), zatímco TCM zachovává plochu kontaktu vrstev a mění výšku vrstev. Ze strukturálního hlediska přináší TCM efektivnější distribuci působení sil.

- [40] BORG COSTANZI, C., Z.Y. AHMED, H.R. SCHIPPER, F.P. BOS, U. KNAACK a R.J.M. WOLFS. 3D Printing Concrete on temporary surfaces: The design and fabrication of a concrete shell structure. *Automation in Construction* [online]. 2018, **94**, 395–404 [vid. 2019-08-15]. ISSN 0926-5805. Dostupné z: doi:10.1016/J.AUTCON.2018.06.01

Borg Costanzi a kolektiv navázali na použití tiskových metod FDM (ve stavebnictví ekvivalentní k metodě PEM) a TCM, kde se především věnovali hybridní výrobě zakřivených ploch metodou PEM kombinovanou s odléváním zakřivených ploch (Obr. 3-21). Nejdříve zkoumali minimální poloměr geometrie, kterou jim povolí technologie 3DCM s metodou CC. Zkoumali tedy procesní parametry tiskové hlavy v závislosti na výnosu materiálu. Signifikantní byl maximální náklon tiskové hlavy (Obr. 3-21) a křivost tiskové trajektorie omezené minimálním rádiusem v závislosti na stabilitě tisknuté stopy. Ke generování geometrie a přípravě tiskových trajektorií bylo využito SW prostředí Rhinoceros s pluginem Grasshopper [40].



Obr. 3-21 Použité metody: (a) TCM – metoda tangentsní kontinuity tisku na šikmé podložce; (b) metoda FDM - ekv ve stavebnictví PEM na šikmé podložce [40].



Obr. 3-22 Zjednodušený proces produkce: (a) Digitální model v prostředí programu Rhinoceros, Grasshopper, (b) Orientace geometrie v prostředí Grasshopper, (c) Výroba kontur – generování trajektorií pro robotické rameno, (d) Lití betonu do vzniklé formy [40].

Výsledky:

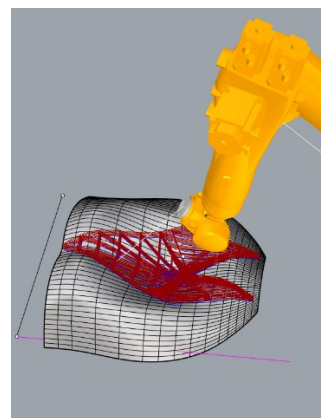
- Zachování mechanických vlastností optimalizované konstrukce i při nižší hmotnosti.
- Mechanické vlastnosti se odvíjí od optimalizace na třech úrovních: strukturální, vnitřní prostorové struktury a na úrovni materiálu.
- Možnost aplikace technologie 3DCP pro výrobu topologicky optimalizovaných dílů na základě okolních podmínek (mez pevnosti, směr působení sil, teplota, proudění vzduchu, umístění inženýrských sítí).
- Začíná se objevovat tendence tisku struktur a strukturovaných dílů, autoři doporučují komparaci normovaných zkušebních těles s tělesy s vnitřní strukturou.

[15] BATTAGLIA, Christopher A, Martin Fields MILLER a Sasa ZIVKOVIC. Sub-Additive 3D Printing of Optimized Double Curved Concrete Lattice Structures. In: Jan WILLMANN, Philippe BLOCK, Marco HUTTER, Kendra BYRNE a Tim SCHORK, ed. *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2018*. Cham: Springer International Publishing, 2019, s. 242–255. ISBN 978-3-319-92294-2.

Autoři studií se zabývali kombinovanou formou výroby, kde využívali nejdříve substraktivní a následně aditivní výrobu [15]. Autoři navázali na metodiku z předchozí studie Borga a kolektivu. Pro substraktivní výrobu používali jako podklad granulovaný recyklovaný beton vysypaný kamenivem. Tento podklad následně rozhrnuli tak, aby vytvořil formu pro strukturu, která se má tisknout (Obr. 3-23 (a)). Pro 3DCP struktury, bylo použito metody PEM, kde tisknutý materiál byl ve formě cementové pasty s plastickými vlákny. Autoři využívali SW vybavení v podobě programu Rhinoceros a pluginu Grasshopper (Obr. 3-23 (b)).



(a)



(b)

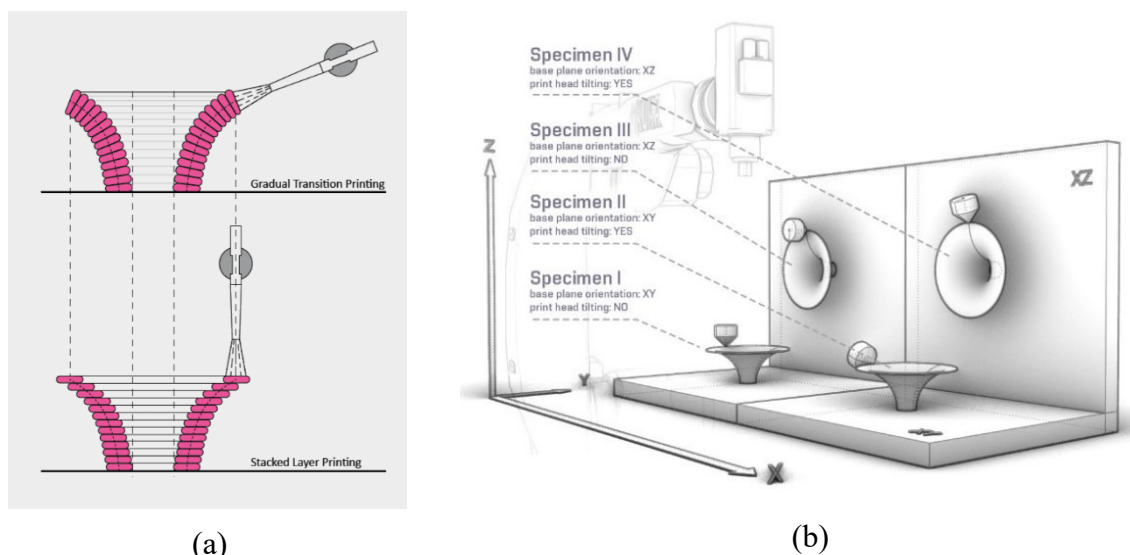
Obr. 3-23 (a) Vytiskovaná struktura (autor): (b) Digitální model v prostředí programu Rhinoceros [15].

Výsledky:

Kombinace použití subtraktivní a aditivní výroby je efektivní pro výrobu složitě tvarovaných struktur s velmi malou kvalitou a přesností tisku v závislosti na typu podkladu.

-
- [41] KREJCIRIK, Petr, David SKAROUPKA a David PALOUSEK. Free directional robotic deposition - Influence on overhang printability. *MM Science Journal* [online]. 2018, **2018**(December), 2715–2721. ISSN 18050476. Dostupné z: doi:10.17973/MMSJ.2018_12_2018119
- [42] LINDEMANN Hendrik, Harald Kloft and Norman Hack. Gradual Transition Shotcrete 3D Printing. *poster* [online]. 2018. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Norman_Hack/publication/326735829_Gradual_Transition_Shotcrete_3D_Printing/links/5b6189970f7e9bc79a731ea6/Gradual-Transition-Shotcrete-3D-Printing.pdf

Tyto studie se zabývaly aditivními pravidly pro 3D tisk metodami FDM, TCM a technologií sprejování betonu pomocí robotického ramene. Studie se liší použitým materiálem, v případě studie Petra Krejčířika a kol. se jednalo o tisk termoplastů, kde byly provedeny čtyři experimentální tisky pomocí robotického ramene. Se vzorky I a II na horizontální rovině XY a se vzorky III a IV na vertikální rovině XZ (Obr 3-36 (b)). Na obou rovinách se tisk testoval s a bez naklápění tiskové hlavy. Oba vzorky vytištěné bez naklonění se nepodařilo vytisknout s přesahem 40° a oba nakloněné vzorky byly vytištěny úspěšně. Můžeme dojít k závěru, že naklonění tiskové hlavy ve směru tečné stěny zvyšuje tisknutelnost větších přesahů materiálu bez podpory [41]. Stejný metodický přístup je uveden ve studii Lindemanna a kolektivu, kde představuje první experimenty probíhajícího výzkumu ve kterém je zkoumána možnost postupně měnit tiskovou rovinu umožňující plynulý přechod ze svislé do vodorovné plochy, a tím zpřístupnit novou technologii pro tisk komplexních geometrií z cementových směsí [42].



Obr. 3-24 Použité metody: (a) Tisk těles metodou SC3DP– technologie kinetického nanášení betonu [42]; (b) Tisk těles metodou FDM/ ekv. ve stavebnictví PEM z plastu [41].

Výsledky:

Autoři se v obou studiích shodují, že metoda tisku TCM v kombinaci s náklonem tiskové hlavy poskytuje možnost tisku s větším převisem. V obou případech se povedlo vytisknout geometrie v úhlu 60° od svislé osy s využitím odlišných materiálů. Ve studii zaměřující se na beton (Lindemann) byla za pouhých 15 minut vytištěna struktura až do výšky 1 m, při stejné orientaci trysky 60° odchýlené od svislé osy a vedoucí k horizontálnímu převisu ve vzdálenosti 0,4 m. V tomto bodě se dvě části konstrukce oddělily od vnějšího okraje a experiment byl zastaven. Je nutné zdůraznit, že šlo o technologii 3DCP s nanášením betonu pomocí trysky a stlačeného vzduchu. Autoři uvádějí, že tato technologie je schopná odbourat studené spoje vrstev, avšak je tu pravděpodobnost vyšší porozity.

4 ANALÝZA, INTERPRETACE A ZHODNOCENÍ POZNATKŮ

Rešerše současného stavu poznání se zaměřila na podstatné informace o tiskové směsi s ohledem na zpracování, procesní parametry tisku, strategie a geometrie tisknutých těles. Zjištěné informace z analýzy bude nutné aplikovat do procesu 3DCP tak, aby při použití stavební hmoty s větší frakcí kameniva bylo možné dosáhnout výstupu v podobě tisku velkoformátových strukturovaných dílů.

Na základě současného stavu poznání byla identifikována dvě bílá místa, která skýtají výzkumný potenciál v tomto odvětví:

- Použití směsí obsahujících větší frakci kameniva
- Tisk komplexních a strukturovaných dílů s převislými stěnami

4.1 Zhodnocení poznatků ze studií

Tato kapitola shrnuje stěžejní poznatky o chování materiálu jako takovém a chování materiálu během procesu 3D tisku. Cílem rozboru je hlubší pochopení dopadu materiálových vlastností na proces 3D tisku.

4.1.1 Zhodnocení poznatků ze studií věnujících se parametrům materiálu a parametrům 3D tisku

Vycházíme-li z limitů 3D tisku cementových hmot, deklarovaných studií Domenica Asporneho a R. J. M. Wolfa, je obecně nutné upravit jakoukoli cementovou směs tak, aby měla co nejlepší reologické a mechanické vlastnosti bez přidání aditiv a vyztužovacích prvků [29][35]. Lze tedy vycházet také ze studie Yiwei Wenga [43], 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, reologické vlastnosti 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 ke 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 nenewtonské kapaliny [43].

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. Pro 3D tisk cementových hmot je tedy obecně nutná nízká plastická viskozita směsi k dosažení nižšího pracovního tlaku, kvalitní pumpovatelnosti a extrudovatelnosti.

Díky takto upravené směsi lze velmi dobře určit výšku vytištěné struktury, kdy nedojde ještě ke kolapsu pomocí Mohr Coulombovy teorie. Toto kritérium v aplikaci technologie 3DCP je původně určeno pro tělesa v podobě jednoduchých sloupců. Úpravou geometrického faktoru však lze určit výšku, kdy dojde ke kolapsu pro jakékoli vytištěné těleso.

Pumpovatelnost/ Tisknutelnost

Pumpovatelnost (čerpatelnost) popisuje jak „snadno“ je čerstvý cementový kompozit přepraven od čerpadla prostřednictvím hadice do vytlačovací trysky [32].

Dalším problémem je tzv. segregace částic v hadici, která může vést k ucpání hadice nebo tiskové aparatury. Segregace částic je způsobená samotným složením směsi, jejím stářím a nedostatečným mícháním bezprostředně před čerpáním [27]. Proces 3DCP je citlivý na pauzy v kladení vrstev, které se musí spojit, aby vytvořily homogenní strukturu. Je obecně větší potenciál pro vytvoření studených spojů mezi vrstvami, než u běžných metod jako je odlévání betonu. Objemová čerpadla jsou využívána pro 3DCP a vhodné malty zahrnují dostatečný obsah pasty, aby se vytvořila mazací vrstva na vnitřní straně přívodní trubky. Lee a kolektiv experimentálně ověřili hodnotu meze kluzu, která je optimální z hlediska menší pravděpodobnosti ucpání při čerpání a extruzi tiskovým aparátem bez defektu stopy v rozmezí 0,3–0,9 kPa [27][44]. Thrane a kolektiv ve své publikaci tuto skutečnost potvrdili [45]. Byly tedy potvrzeny směsi s plastickou viskozitou a mezí kluzu rovnou příslušným hodnotám (viz. níže), které jsou vhodné pro čerpání a vytlačování.

- $(38,7 \pm 4,5)$ Pa.s a $(0,59 \pm 0,08)$ kPa (platí pro směsi s CEM I, portlandský cement a popílek)
- $(21,1 \pm 2,4)$ Pa.s a $(0,27 \pm 0,03)$ kPa (platí pro směsi s náplní CEM I a vápence)

Zpracovatelnost

Problematická jsou také časová okna jednotlivých chemických procesů mezi fázemi spojení (adheze), tvrdnutí a vytvrzení. Tato časová okna musí být zohledněna při vrstvení materiálu na sebe. Přizpůsobení časových oken je možné přidáním přísad (urychlovače nebo zpomalovače) do směsi. Při těchto procesech dochází i v případě optimalizované tisknoucí směsi k deformaci vlivem vrstvení a gravitace [46].

Časová okna souvisejí se zpracovatelností. Je to v podstatě interval doby, kdy dochází k iniciaci tuhnutí cementového kompozitu a kdy proces tuhnutí končí.

- Ke stanovení času zpracovatelnosti čerstvé cementové směsi se používá Vicatův přístroj.
- Pro globální provázání vrstev a vytvoření homogenního spojení je nutné určit interval času výnosu a zúžit jej tak, aby došlo ke spojení vrstev. Důsledkem toho je téměř neznatelná mezera na rozhraní vrstev.

Vystavitelnost

Proces depozice vrstev musí počítat s určitou řízenou deformací vrstev, která napomáhá ke spojení s předchozí vrstvou. Relativně nízká mez kluzu potřebná pro čerpání počítá s požadavky na extruzi tak, aby byla geometrie stabilní. Při zvýšení výšky stavby se zvyšuje i hydrostatický tlak a vrstvy se stlačují pod vlastní hmotností. Běžnou praxí je udržovat konstantní výšku vrstvy během 3D tisku. V důsledku toho se zvětšuje vzdálenost mezi tryskou a pracovní plochou, což způsobuje změnu tvaru extruze, která může ovlivnit adhezi vrstvy. Tento stav se zhoršuje s každou další vrstvou, což vede k nehomogennímu vyššímu nánosu hmoty a nakonec ke kolapsu vytištěné struktury [32][18][19]. K předcházení tohoto jevu se vyvinuly dvě koncepce: Dynamické nastavení výšky trysky tisku v závislosti na sesedání

Nonplanární strategie tisku. Metoda 3D tisku TCM, tedy udržování konstantní vzdálenosti od předchozí tisknuté vrstvy.

Adheze vrstev

Slabým místem jakékoli vytištěné struktury z betonu je malá pevnost mezi vytištěnými vrstvami. Mezi extrudovanými vrstvami mohou vzniknout vady, které působí jako koncentrátoři napětí. Pevnost spojů mezi jednotlivými vrstvami betonu při odlévání závisí na vlhkosti stýkající se betonové směsi. U 3DCP jsou vrstvy stále v čerstvém stavu, na rozdíl od odlévání betonu do formy. Je tedy nutné zkoumat chování kontaktu mezi vrstvami. Pevnost mezi vrstvami je ovlivněna adhezí materiálů mezi extrudovanými plochami, jedná se tedy o časově závislý interval při kladení jednotlivých vrstev. Tento interval je označován jako doba zpracovatelnosti [47]. Doba zpracovatelnosti se určuje pomocí Vicatovy zkoušky. Technologií výroby 3DCP mohou v důsledku nesprávně zvoleného časového intervalu vrstvení vzniknout tzv. *studené spoje* [48].

Z prací uvedených v rešerši je patrné, že pokud nedochází ke studeným spojům během vrstvení, pak při destruktivních zkouškách (tříbodový ohyb, prostý tah) zatížení vytištěných vzorků podle smyslu orientace vykazují vrstvy podobný trend hodnot i při použití jiné směsi [36].

- Ke zjištění adheze vrstev se ve studiích používá zkouška prostého tahu. Je důležité zmínit, že tato zkouška je však náchylná na přesné zarovnání vzorku. Při nesprávném zarovnání může dojít k tzv. „interlockingu“.
- Adheze vrstev je závislá na správnosti určení času zpracovatelnosti čerstvé cementové směsi pomocí Vicatovy zkoušky.
- Podstatný vliv na adhezi vrstev má tzv. fenomén vlhkosti v souvislosti s tvorbou pórů, jejich velikostí a migrací ve vrstvách a celém objemu tisknutého tělesa.

Strategie vyztužování cementového materiálu při 3DCP

Výše vyvozené skutečnosti vedou k řešení problému cementové směsi, nikoli však ke zlepšení jejích mechanických vlastností a geometrické stálosti během procesu 3D tisku. Jednou z nevýhod 3DCP je charakteristika chování čerstvé směsi, která ve většině studií znemožňuje tisk prostorově a tvarově náročnějších struktur nebo dílů. Je žádoucí tuto směs zpevnit vhodnou formou výztuže v podobě vláken nebo aditivních příměsí a přísad [18]. Selektce vhodné výztuže je závislá na povaze tištěného dílu, ale pro malé struktury je vhodné volit aditiva v podobě příměsí a přísad. Pro velké konstrukce, které jsou namáhané na ohyb, je vhodné volit geometrické výztuže z oceli nebo vláken (skelná, kovová, z plastických hmot) [38][33].

- Z hlediska pumpovatelnosti je lepší volit minerální příměsí, které zlepšují viskozitu čerstvého cementového materiálu.
- Pro malé konstrukce volit aditiva přísad a příměsí.
- Pro větší konstrukce volit geometrické prvky v podobě ocelových tyčí.
- Pro 3DCP i z hlediska tvorby trhlin při tvrdnutí minerální aditiva a vlákna.

Strategie a metody:

Strategie 3D tisku se obecně odvíjí od geometrie a generování tiskových trajektorií v programu, který zpracovává vstup v podobě vymodelované geometrie. Generování tiskových trajektorií vychází z použitých metod strategií tisku, kde pro technologii 3DCP pomocí robotického ramene metodou CC s obdélníkovou tryskou je výhodné využití metody strategie tisku TCM [39][30][42].

Generování trajektorií závisí na použití tiskového aparátu. Jak bylo zmíněno výše, aktivní tisková hlava pro zpracování vyšší frakce kameniva obsahuje šnekový extruder, který disponuje funkcí retrakce. Tato funkce je nezbytná pro tisk složitějších dílů/struktur bez nutnosti generování kontinuální trajektorie. Je tedy možné tisknout komplikované struktury s různým časovým plánem extruze vrstev v objemu tělesa [40][36].

4.1.2 Zhodnocení poznatků ze studií věnujících se podobě geometrie tisknutých těles

Je zjevné, že aditivní výroba umožňuje výrobu dříve nemyslitelných dílů. Ke slovu se tak dostávají generativní algoritmy v podobě topologické optimalizace vycházející z běžných konstrukcí. Autoři studií zabývajících se technologií 3DCP poukazují na jasné výhody vyplývající z principu technologie výroby 3D tisku [38][37]. Ve stavebnictví se začínají objevovat tištěné struktury, které ale ve většině případů slouží pouze k demonstrativním účelům, nicméně tento stav je způsoben zatím krátkým vývojem tohoto tématu [5].

Zachování mechanických vlastností tiskové geometrie i při nižší hmotnosti.

- Ta je závislá na podobě geometrie, kde je možné v závislosti na experimentální tiskové aparatuře tisknout složité struktury vycházející z topologicky optimalizované geometrie.

Účelový návrh struktury pro různé okolní podmínky.

- V závislosti na okrajových podmínkách (mez pevnosti, směr působení sil, teplota, proudění vzduchu, umístění inženýrských sítí) je možné prakticky navrhnout jakoukoli geometrii tisknuté struktury.

Velký potenciál je ve zkoumání vytištěných struktur z hlediska mechanických vlastností, tedy komparace normovaných zkušebních těles s tělesy s vnitřní strukturou z ploch o minimálním povrchu s různými hodnotami reprezentativního objemového prvku (RVE).

4.2 Stěžejní poznatky plynoucí z rešerše

Pumpovatelnost/ Tisknutelnost

Je ovlivněna typem čerpadla a mechaniky tisknoucí hlavy, kde se obecně autoři shodují, že z hlediska pumpování neneutonské, binghamské tekutiny o tixotropním chování je vhodné použití šnekové pumpy. Při použití šnekové pumpy obecně nezáleží na reologických vlastnostech, ale pouze na viskozitě materiálu. Autoři se shodují na tisknuté směsi s parametry pro plastickou viskozitu a mezi kluzu rovnou příslušným hodnotám.

Ke stanovení hodnot směsi se využívá rotačních reometrů.

- $(38,7 \pm 4,5)$ Pa.s a $(0,59 \pm 0,08)$ kPa (pro směsi s CEM I, portlandský cement a popílek)
- $(21,1 \pm 2,4)$ Pa.s a $(0,27 \pm 0,03)$ kPa (pro směsi s náplní CEM I, portlandský cement a vápenec)

Zpracovatelnost

Ke zjištění těchto časově závislých veličin lze využít Vicatovy zkoušky, kde je nutné časový interval zpřesnit zkouškami nánosu, které zkoumají odchylky rozměru tisknuté stopy od rozměru průřezu trysky.

Vystavitelnost

Je ovlivněna časem zpracovatelnosti a pevnosti čerstvé cementové směsi v závislosti na čase vrstvení. Tuto závislost lze jednoduše spočítat aplikací tzv. Mohr-Coulombova kritéria, které popisuje, že ke kolapsu dochází v případě překročení kombinace meze pevnosti a meze kluzu materiálu.

Dále pak je ovlivněna tvarem trysky, kdy objektivně pro reologické principy extruze je vhodnější tryska o obdélníkovém průřezu v závislosti na velikosti kameniva a čase zpracovatelnosti tiskové směsi.

Pro technologii 3DCP je z hlediska adaptability během procesu vrstvení výhodnější použít robotické rameno, kdy stupně volnosti ramene umožňují přesnější depozici materiálu.

Při vhodné strategii tisku dokáže robotické rameno eliminovat nežádoucí působení smykových sil během extruze. Dále je pak možné při tisku komplexních geometrických tvarů používat sofistikovanou tiskovou hlavu, která disponuje funkcí natáčení trysky, změnou průřezu trysky a optickou kontrolou výnosu tiskové stopy v reálném čase.

Chování vytvrzeného cementového kompozitu vyrobeného technologií 3DCP je oblast poměrně nová a nedostatečně probádaná.

Vytištěné díly, které jsou podobné těm odlitým, se zkoumají z hlediska mechanických vlastností pomocí destruktivních zkoušek (prostý tah, 3 bodový ohyb, 4 bodový ohyb). Chybí však pozorování chování dílů topologicky optimalizovaných s vnitřní strukturou, zejména chování struktur o malém povrchu používaných ve strojírenství. Tyto struktury mohou ve stavebnictví významně přispívat ke zdokonalení tepelných, zvukových a izolačních vlastností. Tiskem těchto struktur ze stavebních hmot se zabývají vědecké týmy po celém světě a je zde stále velký prostor pro vývoj tiskových strategií.

5 VYMEZENÍ CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE A NÁVRH ZPŮSOBU JEJÍHO ŘEŠENÍ

5.1 Podstata disertační práce

Podstatou disertační práce je adaptace technologie 3DCP pro cementové směsi s frakcí kameniva o velikosti 8 mm. Jedná se o aplikovaný výzkum vycházející z poznatků řešerše projektu TAČR, řešeného s průmyslovým partnerem VIA ALTA a.s. a Fakultou stavební ČVUT. Předpokládanou aplikací je aditivní výroba velkorozměrových komplexních těles o velikosti jednotek metrů.

5.2 Cíl disertační práce

Cílem disertační práce je aplikovaný výzkum se zaměřením na technologii 3D tisku komplexních dílů o velkém rozměru z cementových materiálů o velké frakci kameniva pomocí metod PME/CC a rozšíření znalostí v oblasti metodiky a strategie výroby těchto materiálů pro stavební a architektonické účely.

Dílčí cíle:

- Výzkum procesních parametrů 3D tisku cementové směsi s větší frakcí kameniva.
- Experimentální výzkum limitů cementové směsi s ohledem na pumpovatelnost, tisknutelnost a vystavitelnost.
- Vývoj tiskové hlavy pro tisk strukturovaných dílů ze směsi s větší frakcí kameniva.
- Výzkum limitů navrženého procesu výroby, strategie a metodiky 3D tisku cementové směsi s větší frakcí kameniva.

Přínos disertační práce:

- Rozšíření znalostí v oblasti technologie 3D tisku cementových materiálů o charakteristiku směsí s větší frakcí kameniva.

Aplikační potenciál:

- Odbourání potřeby bednění
- Snížení spotřeby stavebního materiálu
- Tisk komplexních struktur s převislými stěnami

5.3 Vědecké otázky

Vědecká otázka č. 1

Jaký vliv má velikost frakce kameniva směsi, čerstvosti směsi a čas depozice na adhezi vrstev?

Pracovní hypotéza č. 1

Větší frakce kameniva v cementovém kompozitu má obecně za následek vyšší pevnost v tlaku jak ve vytvrzené, tak čerstvé podobě. Velikost kameniva má významnou roli pro geometrickou stabilitu tvaru tiskové stopy a únosnost vrstev během procesu 3D tisku.

Velikost kameniva v kombinaci s porézností a čerstvostí tištěné směsi jsou klíčové parametry, které mohou ovlivnit provázanost vrstev v důsledku procesu 3DCP.

Odůvodnění pracovní hypotézy č. 1

Vliv časového intervalu depozice vrstev a povrchové vlhkosti tisknutého materiálu na adhezi byl již potvrzen několika studiemi, avšak vliv nerovnosti povrchu způsobené velikostí kameniva a čerstvostí směsi na adhezi vrstev nebyl dosud zkoumán.

Základem pevnosti betonu je proces hydratace, při kterém probíhá růst krystalů na hranicích zrn. Na proces hydratace nemá vliv velikost kameniva, nicméně při použití většího kameniva vlivem procesu depozice a vlivem sednutí dojde k penetraci kameniva a změně jeho orientace do vrstvy předchozí. Důsledkem je vytvoření kvazi-homogenního spojení vrstev, avšak vlivem procesu 3D tisku může dojít k nárůstu poréznosti hmoty.

Vědecká otázka č. 2

Jaký vliv má použití trysky o obdélníkovém průřezu (poměr stran 2:4) u cementové směsi s větší frakcí kameniva (8 mm) na stabilitu tisku jednoduché geometrie?

Pracovní hypotéza č. 2

Stabilitu tisku ovlivňuje víc faktorů, a to charakteristika tisknutého materiálu, chování materiálu během extruze, rychlost pojezdu, tvar tisknuté geometrie a použitá strategie tisku v horizontálním a svislém směru.

Během vrstvení čerstvého cementového kompozitu dochází k působení tlakových sil, jejichž hodnota roste se zvyšujícím se počtem nanesených vrstev v celém průřezu tisknuté geometrie, zatímco se zvyšuje mez kluzu materiálu v důsledku tuhnutí. Na tisknuté těleso působí smykové a tlakové síly, kdy při překročení určité meze těchto sil dochází ke kolapsu tiskové geometrie. Pro předpovězení tohoto stavu slouží tzv. Mohr-Coulombovo kritérium.

Odůvodněné pracovní hypotézy č. 2

Z hlediska výstavby jednoduchých dílů pomocí technologie robotického 3DCP metodou nánosu materiálu CC, při použití metody tisku PEM, je nutné určit limity tisku, kdy dojde ke kolapsu tisku při porušení určitých podmínek.

Většina studií zkoumala tiskové parametry pro trysky o kruhovém a obdélníkovém průřezu. Použití kruhové trysky se ukázalo jako krajně nevhodné. U kruhové trysky dochází ke smyku materiálu a deformaci stopy během depozice, což v důsledku přenáší smykové a tlakové síly na předchozí vrstvy. Jak dochází ke zpomalení extruze, dojde k mezi kluzu extrudovaného materiálu. To má za následek nežádoucí tvarovou deformaci, dokud nedojde k ustálení tvaru. Naproti tomu u obdélníkové trysky je tento fenomén minimální a je předpoklad vyšší míry vystavitelnosti vrstev. Většina autorů tento fenomén sledovala při použití cementových past, nikoli při použití směsi s větší frakcí kameniva, která může lépe odolávat působení tlakových a smykových sil, což povede k vyšší míře vystavitelnosti vrstev. V neposlední řadě pak dojde k úspoře použitého stavebního materiálu a materiálu na výrobu bednění.

Vědecká otázka č. 3

Jaký vliv má použití trysky o obdélníkovém průřezu (poměr stran 2:4) u cementové směsi vyztužené vlákny s větší frakcí kameniva (8 mm) na stabilitu tisku geometrických těles s převisy?

Pracovní hypotéza č. 3

Tisková směs s větší frakcí kameniva sama o sobě nemá moc dobrou stabilitu v čerstvém stavu. Při použití materiálu pro technologii 3DCM je nutná dobrá stabilita geometrie tisknuté stopy v průběhu procesu vrstvení, aby se co nejvíce snížilo riziko překročení podmínek vycházející z Mohr-Coulombova kritéria. Při použití vhodného vyztužovacího materiálu (plastová vlákna) o příslušných délkách a objemu dojde ke stabilizaci tvaru tiskové stopy natolik, že při použití metody tisku TCM se zvýší maximální úhel převisu, kdy ještě nedojde ke kolapsu tisku.

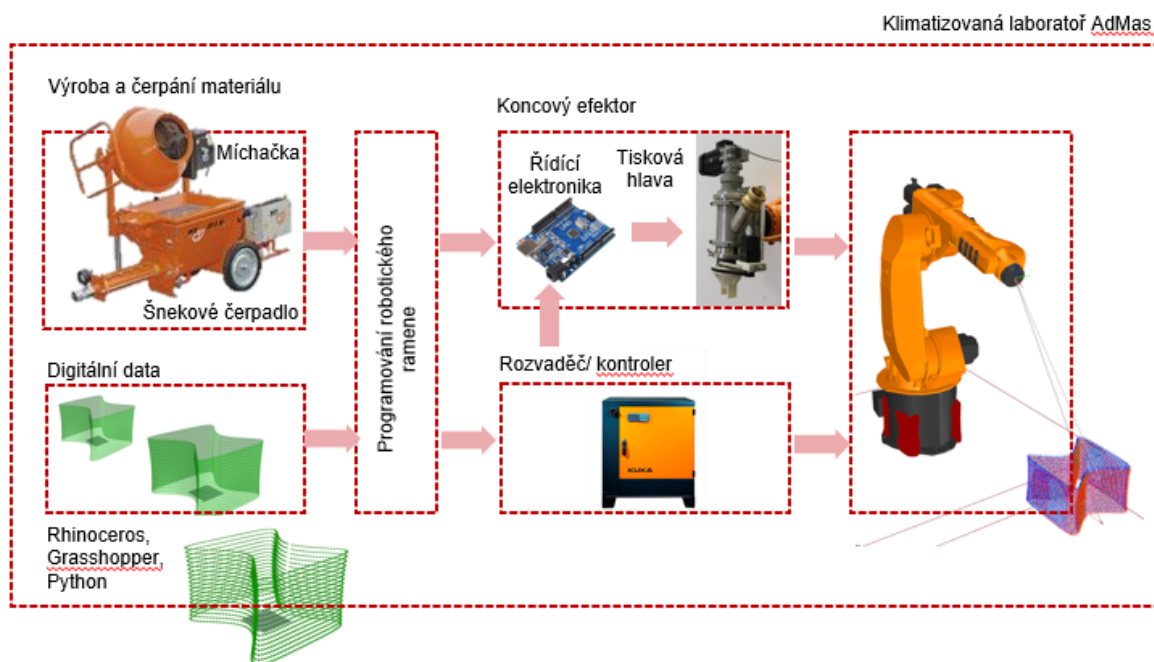
Odůvodnění pracovní hypotézy č. 3

Z hlediska výstavby složitějších strukturovaných dílů pomocí technologie robotického 3DCP metodou nánosu materiálu CC, při použití metod tisku PEM a TCM, je nutné tisknout vrstvy s převisem, kde zákonitě dojde ke kolapsu při porušení určitých podmínek. Jestliže bude směs s větší frakcí kameniva patřičně vyztužená, lze očekávat naplnění podstaty práce, a to tisk konvenčně nevyrobitelných dílů.

Ve stavebnictví se v poslední době objevuje tendence výroby složitých dílů nebo struktur, které mohou mít teoreticky stejné nebo lepší mechanické, zvukově a tepelně izolační vlastnosti než klasické konvenčně vyráběné konstrukce. Pro technologii 3DCP těchto konstrukcí je nutné vyřešit vhodné vyztužování směsi ke stabilizaci tvaru s ohledem na depozici vrstev pod úhlem.

5.4 Návrh způsobu řešení a použitých metod

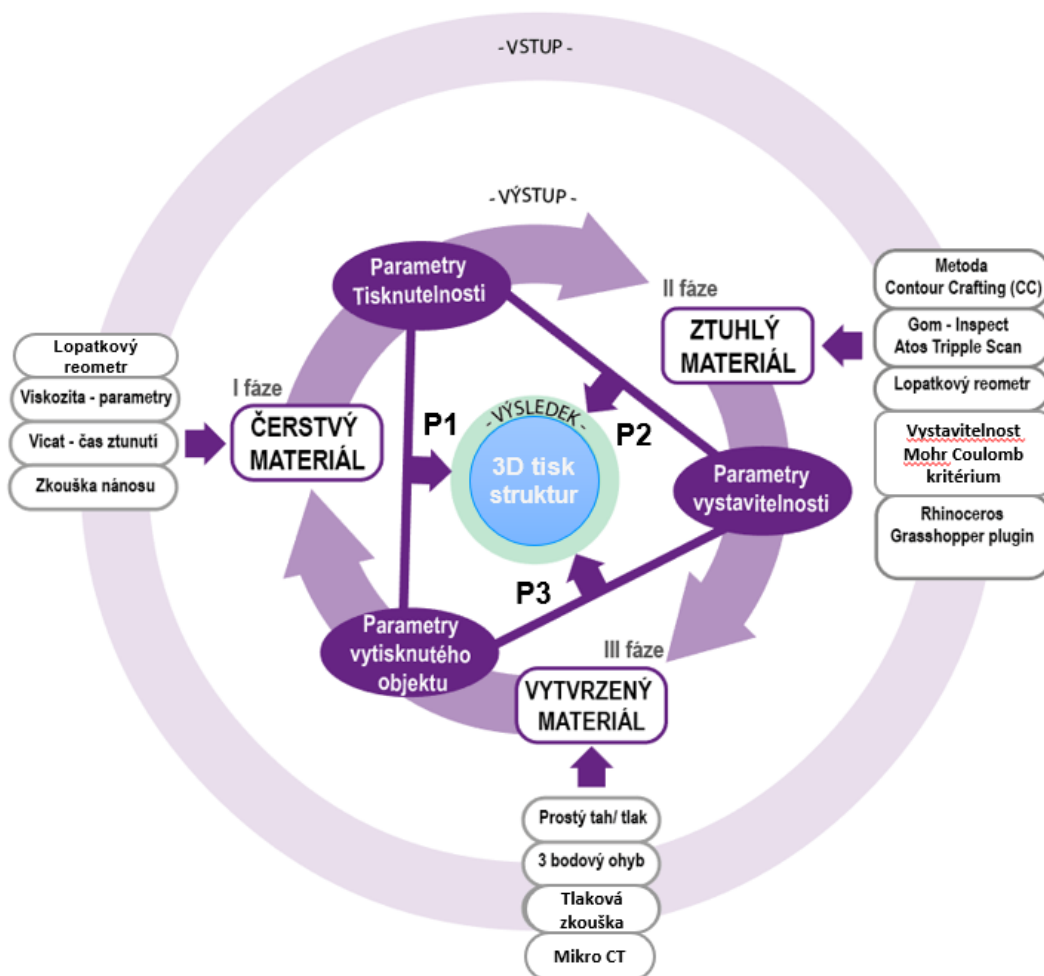
K realizaci práce bude sloužit experimentální soustava umístěná v klimatizovaném prostředí laboratoře AdMaS fakulty stavební VUT v Brně. Experimentální soustava se skládá ze základních prvků, a to míchačky, šnekového čerpadla, elektroniky, tiskové hlavy a robotického ramene s periferiemi. Pro tisk experimentů budou nejdříve zpracována digitální data v prostředí programu Rhinoceros a programovacích jazycích Grasshopper a Python, které jsou standardem v této oblasti (Obr. 5-1).



Obr. 5-1 Schéma experimentální soustavy [autor]

Tato experimentální soustava společně s laboratorní aparaturou umožní realizovat výzkum, který je zachycen ve vývojovém diagramu postupu práce (obr. 5-2). Pro ověření technologie tisku je nutné se zabývat materiálem v čerstvém, ztuhlém a vytvrzeném stavu. Pro získání relevantních procesních parametrů 3DCP, které povedou k tisku velkoformátových strukturovaných dílů z cementového kompozitu s větší frakcí kameniva, bude potřeba projít několika stěžejními fázemi.

První fáze práce se bude zabývat základními parametry tisknutelnosti směsi a prvotními testy nánosů. Na těchto testech bude sledován vliv doby zpracovatelnosti směsi a její vliv na kontinuitu a geometrickou stálost tisknuté stopy. Na těchto testech budou popsány základní tiskové parametry směsi a meze zpracovatelnosti pro tisknutý materiál. Zároveň bude pomocí nánosů dvou vrstev definována časová závislost provázanosti vrstev tisku. Následně bude práce pokračovat druhou fází. Ta vychází z předešlých poznatků základních parametrů tisknutelnosti a rozšiřuje je o poznatky vystavitelnosti směsi. Pomocí testu v podobě 3D tisku souboru jednoduchých těles (válec, stěna s převisem a válcová tělesa s převisem), za použití metody tisku TCM a metody nanášení CC s využitím obdélníkového průřezu trysky, bude definován vztah mezi zpracovatelností a vystavitelností směsi. Výsledky testů budou sloužit jako limitní parametry tisku směsi a tiskového aparátu. Ty budou použity jako výchozí informace pro tisk složitějších dílů s komplikovanou strategií tisku. Poslední část v podobě třetí fáze se bude zabývat základními vlastnostmi vytištěných těles. Bude provedena série mechanických zkoušek pro jednoduché popsání chování vytvrzených výtisků.



Obr. 5-2 Diagram postupu práce [autor]

5.4.1 Fáze I

Materiály použité v disertační práci odpovídají poznatkům z kritické rešerše, kde technologie 3DCP vyžaduje, aby měl materiál nízkou hodnotu plastické viskozity a vysokou hodnotu pro mez kluzu pro splnění požadavků na pumpovatelnost a stavitelnost [43]. K experimentům bude tedy použito tiskové směsi na bázi cementu o hodnotách plastické viskozity ($\eta = 21,1 \pm 2,4 \text{ Pa}\cdot\text{s}$) a mezi kluzu ($\sigma = 0,27 \pm 0,03 \text{ kPa}$). Pro získání těchto hodnot je nutné tiskovou směs analyzovat na rotačním reometru. Výše uvedené hodnoty jsou vhodné pro čerpání a extruzi v případě použití šnekového čerpadla [27][44].

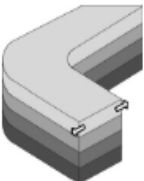
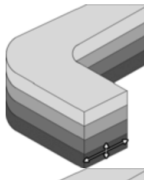
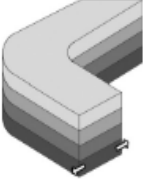
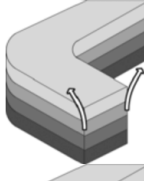
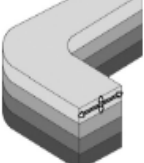
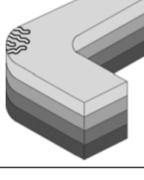
V první fázi dochází ke zjištění základních vlastností směsi, které budou sloužit jako výchozí tiskové parametry. Pomocí lopatkového reometru bude ověřena viskozita materiálu (pumpovatelnost) [43]. Pro určení časového okna tisknuté směsi je nutné určit dobu, po kterou bude možné se směsí pracovat. Doba zpracovatelnosti se určuje pomocí Vicatovy zkoušky podle evropského standardu o metodách zkoušení cementu (EN 196-3:2016) [49], kdy se do vzorku materiálu, v podobě cementové kaše obsahující všechny složky směsi kromě kameniva, použije jehla nebo válec. Tato zkouška určí čas iniciace tuhnutí a konec tuhnutí směsi pomocí hloubky penetrace jehly do zkušebního prstence s cementovou kaší [36][50]. Jak již bylo uvedeno v předchozích kapitolách, časový interval zpracovatelnosti je nutné zpřesnit zkouškou nánosů metodou PME, kdy je v čerstvém stavu kontrolován rozdíl geometrie tiskové stopy s průřezem trysky a tvorba plastických trhlin [51]. Těmito testy dojde ke zpřesnění časového intervalu, kdy je tisková stopa stabilní a kdy ne [36]. Pro konečné určení časového okna zpracovatelnosti a vystavitelnosti je nutné zjistit kvalitu spojení vrstev v kontrolovaném prostředí. K tomu slouží metoda FW, kdy extruder vrství materiál do forem v časových intervalech získaných z předchozích zkoušek. Dojde k vyrobení zkušebních těles, která se po vytvrzení podrobí CT analýze a destruktivní zkoušce přímého tahu [52]. Distribuce a umístění vzduchových pórů ve vzorku bude analyzováno pomocí CT. Předpokládá se korelace získanými pevnostmi materiálu z destruktivní zkoušky [47]. Tabulka (Tab. 5-1) obsahuje grafické znázornění metod použitých ke zjištění zkoumaných parametrů.

Tab. 5-1 Metodika pro 1. fázi výzkumné části [autor].

Vo	Zkoumané parametry	Tělesa	Laboratorní Aparatura	Tisková Aparatura
1.	<ul style="list-style-type: none"> Adheze vrstev Doba zpracovatelnosti směsi Viskozita (Pumpovatelnost/extrudovatelnost) 		 <p>Vicat Lopatkový Reometr Zwick Z2020 Mikro CT</p>	 <p>FW Extruze Pasivní Konstantní obdélníkový průřez trysky Forma</p>

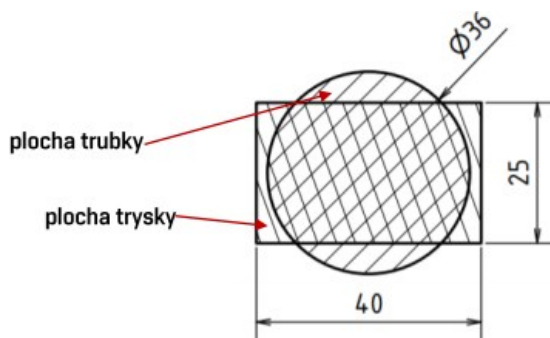
5.4.2 Fáze II

Druhá fáze je přechodná a věnuje se chování tisku a výtisku geometrie v čerstvé a ztuhlé podobě a základním faktorům, které ovlivňují stabilitu výtisku. Budou tedy zkoumány technologické možnosti vystavitelnosti, kde pro validaci parametrů dojde k tisku zkušebních těles. Jejich podoba a tvar je omezen pouze průřezem trysky [53][54]. Zkušební tělesa budou v podobě jednoduché geometrie, ve formě zdi a válce, kde pro určení maximální výšky tisku bude použito Mohr-Coulombova kritéria ze vztahů podle studie Roussel N a kol. (Obr. 5-3). Tyto vztahy obsahují podmínky, při jejichž porušení dojde ke zhroutilí výtisku [20].

Printing requirement	Illustration	Input printing process parameters	Rheological requirement	Collective geometry control	Illustration	Total height H	See Section 5.1
Individual strength-based layer stability		Layer thickness h_0	Initial yield stress higher than $\rho g h_0$ (Cf. Fig. 3)	Collective geometry control		Total height H	See Section 5.1
Collective strength-based layer stability		Total height H	Yield stress in the bottom layer must stay higher than $> \rho g H / \sqrt{3}$ (Cf. Fig. 3)	Collective buckling failure		Total height H layer width	Young elastic modulus must stay higher than $3 g H^2 / 2^2$
Individual layer geometry control		Layer thickness h_0	Initial shear elastic modulus higher than $\rho g h_0 / \gamma_{tol}$ where γ_{tol} is the tolerable deformation of the layer	Plastic cracking		Radius of curvature and layer width	See Section 5.3

Obr. 5-3 Vztahy podle studie Roussel N. [20]


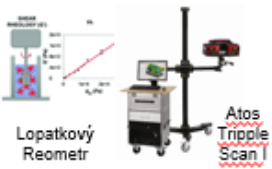

Minimální rozměry těles jsou závislé na průřezu trysky [20]. Minimální průřez trysky se odvíjí od maximální velikosti frakce kameniva, kde poměr stran použité trysky odpovídá maximální velikosti kameniva 8 mm (Obr. 5-4). V této fázi práce bude využito experimentální aparatury (Obr. 5.1) s aktivní tiskovou hlavou obsahující hladítka a natáčecí mechanismus (Obr. 5.5).

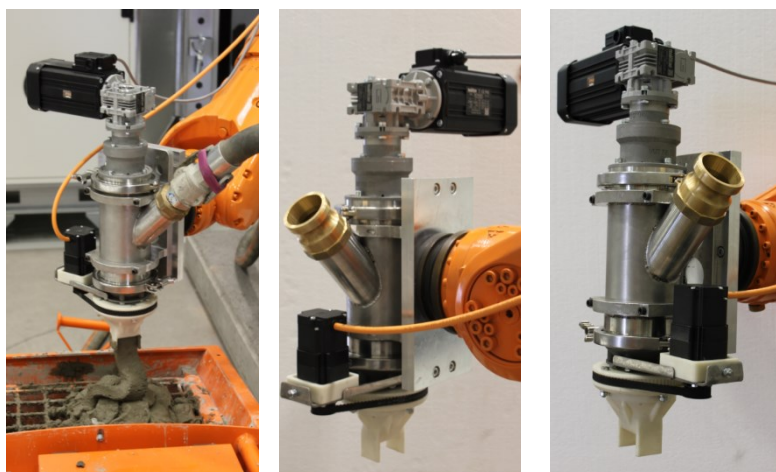


Obr. 5-4 Průřez trysky [55].

Dále bude zkoumáno chování směsi v podobě deformací během tisku [56]. Tyto deformace budou zachyceny v reálném čase pomocí optické skenovací metody technologií ATOS Tripple Scan I, pak budou porovnány s literaturou věnující se tisku materiálů bez velké frakce kameniva [57]. Pro řízení robotického ramene a extruderu jsou použity programové standardy využívané v tomto odvětví. Bude použit software Kuka PRC, plug-in Grasshopper pro CAD software Rhinoceros. Tabulka (Tab. 5-2) obsahuje grafické znázornění použitých metod ke zjištění zkoumaných parametrů.

Tab. 5-2 Metodika pro 2. fázi výzkumné části [autor].

Vo	Zkoumané parametry	Tělesa	Laboratorní Aparatura	Tisková Aparatura
2.	<ul style="list-style-type: none"> Vystavitelnost Mohr-Coloumbovo kritérium charakteristika tisknutého materiálu Tvarová stálost extruze Minimální rádius 			 <p>Konstantní obdélníkový průřez trysky s aktivní rotací</p>



Obr. 5-5 Šneková hlava s otáčecím mechanismem (autor)

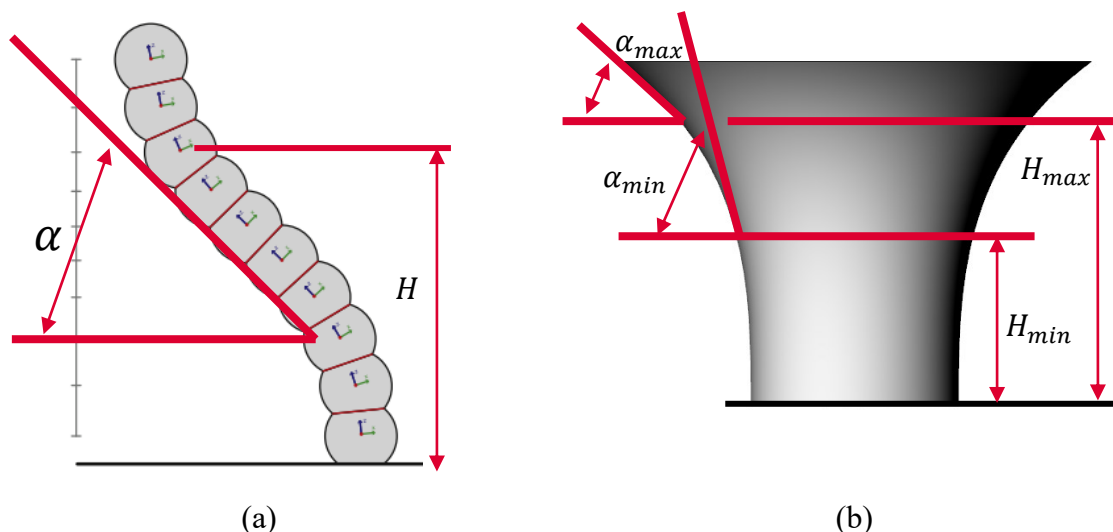
5.4.3 Fáze III

Třetí a poslední fáze bude zkoumat limity aditivní výroby ve stavebnictví pro cementovou směs s větší frakcí kameniva. Pro strategii tisku bude použito metody TCM, která má vyšší stabilitu tisknuté směsi oproti metodě PEM v důsledku stejně velké kontaktní plochy vrstev. Bude tak docházet k menšímu vlivu skluzu materiálu v důsledku geometrie depozice [40].

Tisková tělesa v podobě jednodílného rotačního hyperboloidu (Obr. 5-6 (b)) vycházejí z aplikace pravidel pro aditivní výrobu, kde je předmětem zkoumání maximální tisknutelný úhel a kvalita tisku [41].

Tato strategie dokáže lépe využívat geometrických možností a potenciálu, který nabízí 3D tisk robotickou paží. Hlavní výhodou této strategie je udržování kontaktu povrchů v konstantní vzdálenosti. Tento přístup umožňuje vyhnout se vzniku mezer mezi vrstvami v důsledku metody FDM, jejímž ekvivalentem ve stavebnictví je metoda PEM. Z podstaty této metody však vyvstávají další problémy tisku, kdy konečný tvar nutně nemusí odpovídat tisknuté geometrii. Výsledný tvar může být deformovaný na základě křivosti tiskových trajektorií [40].

Z analýzy geometrie výtisku pomocí optické metody budou definovány základní parametry chování směsi s větší frakcí kameniva při použití metody TCM. Dostaneme tak limity strategie, které nám dají odpověď na úroveň složitosti geometrie s převisem, kterou lze s daným materiálem v daném čase tisknout (Obr. 5-6) [37][39].

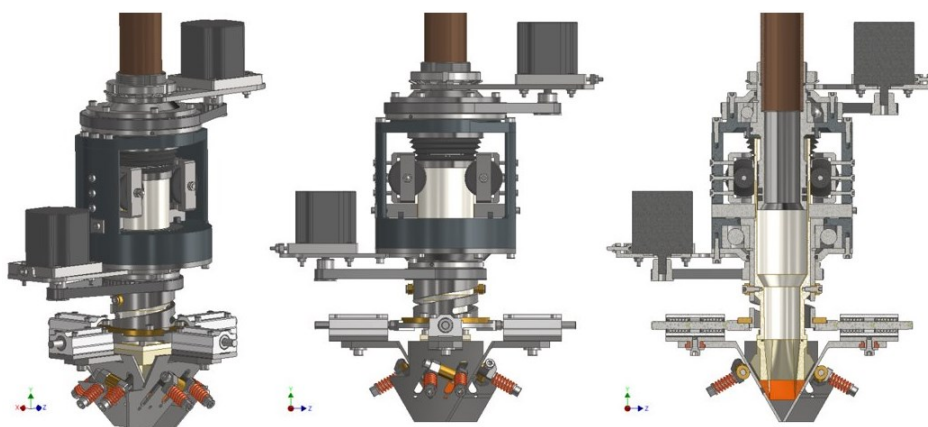


Obr. 5-6 Geometrie zkušebních těles: (a) metoda TCM u stěny [39] - upraveno autorem; (b) metoda TCM u rotačního tělesa [autor].

Tab. 5-3 Metodika pro 3. fázi výzkumné části [autor].

Vo	Zkoumané parametry	Tělesa	Laboratorní Aparatura	Tisková Aparatura
3.	<ul style="list-style-type: none"> Stabilizace tvaru tisku – tisk převisů a složitějších těles Výztuha vláknny 	$h; \alpha; \sigma$ 	 <p>Atos Triple Scan I Trhací stand Zwick Z2020</p>	<p>Metoda CC Aktivní</p>  <p>Konstantní obdélníkový průřez trysky s aktivní rotací</p>

Pro tisk složitějších těles je ve vývoji pasivní tisková hlava s otáčecím mechanismem a mechanismem změny průřezu trysky (Obr. 5-7). Návrh této tiskové hlavy vznikl ve formě bakalářské práce pod mým vedením na základě zpřesňujících informací vycházejících z publikací o chování cementového materiálu, proudění binghamské kapaliny s tixotropním chováním a dat získaných ze zkušební tiskové hlavy [55]. Hlavní výhodou této tiskové hlavy oproti hlavě se šnekovým extrudérem je mechanismus dynamické změny průřezu trysky se zachováním konstantní výšky. Tato modifikace umožní přesnější tisk komplikovaných tvarů metodou TCM s proměnlivou výškou a šířkou tiskové stopy. Z tohoto návrhu bude tedy přejatý modifikovaný mechanismus změny průřezu trysky, který je předmětem průmyslové ochrany a bude integrován do existující tiskové hlavy s extruderem, jež disponuje i funkcí retrakce materiálu (Obr. 5-5). Ta umožňuje přerušování toku materiálu, a tedy ukončení tisku v jedné pozici tiskové plochy a navázání tisku v jiné pozici ve stejné úrovni osy Z. Díky tomu je možné tisknout komplikovanější tvary bez nutnosti generování trajektorií s kontinuální návazností.



Obr. 5-7 Pasivní tisková hlava s otáčecím mechanismem a mechanismem změny průřezu trysky [55]

5.5 Plán publikací

První publikace:

Interface Tensile Strength of a Concrete Mixture for Additive Manufacturing

Periodikum:

60th International Conference of Machine Design Departmens (příspěvek ve sborníku)

Reference:

Vespalec, A.; Novák, J.; Kohoutková, A.; Vosynek, P.; Podroužek, J.; Škaroupka, D.; Zikmund, T.; Kaiser, J.; Paloušek, D. Interface Tensile Strength of a Concrete Mixture for Additive Manufacturing. *60th International Conference of Machine Design Departmens*, 2019, 249 (September), 237–243.

Druhá publikace:

Interface Behavior and Interface Tensile Strength of a Hardened Concrete Mixture with a Coarse Aggregate for Additive Manufacturing

Periodikum:

Materials (Special issue - Construction and Building Materials, Concrete 3D Printing and Digitally-Aided Fabrication).



materials

an Open Access Journal by MDPI



Reference:

Vespalec, A.; Novák, J.; Kohoutková, A.; Vosynek, P.; Podroužek, J.; Škaroupka, D.; Zikmund, T.; Kaiser, J.; Paloušek, D. Interface Behavior and Interface Tensile Strength of a Hardened Concrete Mixture with a Coarse Aggregate for Additive Manufacturing. *Materials* **2020**, *13*, 5147.

Cíl publikace:

Cílem publikace bylo odpovědět na vědeckou otázku č.1. Na tuto otázku se povedlo odpovědět pouze částečně. V publikaci je zodpovězen vliv zpracovatelnosti směsi a času depozice na adhezi vrstev, kdy ideální časové okno bylo stanoveno v rozmezí 5–15 minut.

Pro odpověď na první otázku byl stanoven čas zpracovatelnosti cementové kaše Vicatovou zkouškou, která nebyla původně vyvinuta pro technologii 3D tisku, proto byl proveden test výnosů pro geometrickou kontrolu tiskové stopy. Těmito testy bylo zúženo časové okno zpracovatelnosti směsi vhodné pro 3D tisk. Následně pro sledování samotného spoje mezi vrstvami byla vytvořena metoda výroby zkušebních těles, která simuluje 3D tisk v dokonalém prostředí. Vyrobena tělesa byla podrobena destruktivní zkoušce prostého tahu, kde byla zjištěna mez pevnosti vzorků vytištěných s příslušnou časovou závislostí. Pro vysvětlení chování vzorků během destruktivní zkoušky byla předem vyhotovena CT analýza vzorků, kde je díky fenoménu objemové výměny vlhkosti je dobře patrná rozdílná porozita vrstev a hranice jejich spojení.

Třetí publikace – pracovní název:

Behavior of 3D printing of reinforced walls at an angle with a concrete mixture including coarse aggregate with a maximum nominal size up to 8mm.

Periodikum:

- *Automation in Construction, IF=5,6 (Pro rok 2019)*
- *Materials, IF-3 (2019)*

Cíl publikace:

Cílem publikace je odpovědět na vědeckou otázku č.2 a zbylou část otázky č.1 (jaký vliv má kamenivo směsi na adhezi vrstev). Publikace bude tedy navazovat na předchozí poznatky o tisku směsi s velikostí frakce kameniva 8 mm a bude se zabývat vrstvením cementového materiálu. Bude zkoumán vliv průřezu trysky na vystavitelnost zkušebních těles.

Čtvrtá publikace – pracovní název:

3D printed complex geometries with a concrete mixture including coarse aggregate with a maximum nominal size up to 8mm.

Periodikum:

- *Automation in Construction*, $IF = 5,6$ (Pro rok 2019)
- *Materials*, $IF=3$ (2019)

Cíl publikace:

Cílem publikace je odpovědět na vědeckou otázku č.3 a zhodnotit doposud získaná data. Bude tak spojovat již dosažené poznatky o používání metody TCM pro tisk strukturovaných dílů s převislými stěnami.

6 SOUČASNÝ STAV

6.1 Publikační činnost

Byly publikovány dva články, u kterých jsem uveden jako hlavní autor:

Článek ve sborníku:

Vespalec, A.; Novák, J.; Kohoutková, A.; Vosynek, P.; Podroužek, J.; Škaroupka, D.; Zikmund, T.; Kaiser, J.; Paloušek, D. Interface Tensile Strength of a Concrete Mixture for Additive Manufacturing. *60th International Conference of Machine Design Departmens*, 2019, 249 (September), 237–243.

Článek v impaktovaném periodiku:

Vespalec, A.; Novák, J.; Kohoutková, A.; Vosynek, P.; Podroužek, J.; Škaroupka, D.; Zikmund, T.; Kaiser, J.; Paloušek, D. Interface Behavior and Interface Tensile Strength of a Hardened Concrete Mixture with a Coarse Aggregate for Additive Manufacturing. *Materials* 2020, 13, 5147.

6.2 Experimentální činnost

Součástí práce je experimentální činnost, která má za cíl odpovědět na položené otázky a přinést nové poznatky v oblasti technologie 3DCP. Během této činnosti byla ověřena funkce zařízení pro pumpování, extruzi a tisk cementové směsi obsahující maximální velikost kameniva 8 mm. Dále byla ve spolupráci s Fakultou stavební VUT v Brně, zřízena laboratoř ve výzkumném centru AdMaS zabývající se pokročilými materiály. Dalším postupem je studium vystavitelnosti cementové směsi na základních tělesech vycházející z reologických vlastností [42][57], kde bude možné predikovat parametry pro efektivní výstavbu složitějších strukturovaných dílů tak, aby nedocházelo k významným deformacím a kolapsu stěn (Obr. 6-13). Tyto experimenty budou součástí dalších publikací, které jsou v přípravě a budou odpovídat na vědeckou otázku č. 2 a č. 3.

V rámci příprav na experimenty vznikla tato zařízení (seřazeno chronologicky):

- 2017 Primitivní pístová hlava.
- 2018 Aktivní tisková hlava se šnekovým extruderem verze I.
- 2018–2019 Zkušební stand využívající tiskovou hlavu verze I.
- 2019–2020 Aktivní tisková hlava se šnekovým extruderem a s mechanismem natáčení trysky (průmyslový vzor)
- 2020 Pasivní tisková hlava, autor.
- 2019–2020 Pasivní tisková hlava s mechanismem otáčení a mechanismem změny průřezu trysky (průmyslový vzor)



(a)



(b)



(c)



(d)

Obr. 6-1 Experiment vystavitelnosti: (a) Kolaps výtisku v důsledku porušení vzpěrné stability překročením modulu pružnosti čerstvého materiálu ve vrstvě 9, (b) 3DCP těles metodou CC, (c) Minimální pře-extrudování stopy tisku - 6 vrstev, (d) Nevhodná synchronizace čerpadla stopy tisku - 6 vrstev [autor].

7 ZÁVĚR

Pojednání ke státní doktorské zkoušce se věnuje rozboru vybraných vědeckých prací zabývajících se technologií 3DCP z pohledu tří základních oblastí. Pozornost je věnována publikacím, které se věnují procesním parametrům 3D tisku, parametrům materiálu a tisknuté geometrii. Práce tak uceluje pohled do těchto tří oblastí, identifikuje jejich hranice a navrhuje způsob, jak je rozšířit o poznání v oblasti 3D tisku stavebních hmot s vyšší frakcí kameniva. Úvod práce jasně popisuje motivaci a přínos, proč tisknout právě směsi s větší frakcí kameniva. Na základě identifikace přínosu tématu byl vymezen směr výzkumu disertační práce a její předběžný cíl. Díky tomu bylo možné lépe zacílit rešerši, která podrobněji rozebírá technologii 3D tisku cementových směsí, strategie a metody. Rešerše zaznamenává fenomény, které se objevují, a sleduje metody a postupy používané při 3DCP. Dále pak vysvětluje vlivy strategií tisku na tisknutou geometrii, jež jsou dány do souvislosti s tisknutým materiálem.

Cíl disertační práce, vědecké otázky a pracovní hypotézy jsou zformulovány na základě poznatků vyplývajících z analýzy kritické rešerše.

Pojednání mimo jiné obsahuje také dílčí cíle, popis experimentální aparatury, metodiky a popis experimentů, jakými má být dosaženo hlavního cíle disertační práce. Závěrečná část pak popisuje získané výsledky, kterými se podařilo doposud splnit část navržených dílčích cílů.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] 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
- [2] UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. *Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector. 2019 Global Status report* [online]. 2019. ISBN 9789280736861. Dostupné z: [https://www.worldgbc.org/sites/default/files/UNEP_188_GABC_en\(web\).pdf](https://www.worldgbc.org/sites/default/files/UNEP_188_GABC_en(web).pdf)
- [3] BUSWELL, R.A., W.R. LEAL DE SILVA, S.Z. JONES a J. DIRRENBERGER. 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. *Cement and Concrete Research* [online]. 2018, **112**, 37–49 [vid. 2019-06-13]. ISSN 0008-8846. Dostupné z: doi:10.1016/J.CEMCONRES.2018.05.006
- [4] LIM, S., R.A. BUSWELL, T.T. LE, S.A. AUSTIN, A.G.F. GIBB a T. THORPE. Developments in construction-scale additive manufacturing processes. *Automation in Construction* [online]. 2012, **21**, 262–268 [vid. 2019-06-17]. ISSN 0926-5805. Dostupné z: doi:10.1016/J.AUTCON.2011.06.010
- [5] DE SCHUTTER, Geert, Karel LESAGE, Viktor MECHTCHERINE, Venkatesh Naidu NERELLA, Guillaume HABERT a Isolda AGUSTI-JUAN. Vision of 3D printing with concrete — Technical, economic and environmental potentials. *Cement and Concrete Research* [online]. 2018, **112**(June), 25–36. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2018.06.001
- [6] 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
- [7] GABRIEL FERNANDES, Gabriel Fernandes. Impact of Contour Crafting on Civil Engineering. *International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT)* [online]. 2015, **4**(8), 628–632. Dostupné z: www.ijert.org
- [8] BUSWELL, R. A., W. R. LEAL DE SILVA, S. Z. JONES a J. DIRRENBERGER. 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. *Cement and Concrete Research* [online]. 2018, **112**(May), 37–49. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2018.05.006
- [9] KWON, S, Kyong JANG, Jae Hong KIM a Surendra SHAH. State of the Art on Prediction of Concrete Pumping. *International Journal of Concrete Structures and Materials* [online]. 2016, **10**. Dostupné z: doi:10.1007/s40069-016-0150-y
- [10] LU, Bing, Yiwei WENG, Mingyang LI, Ye QIAN, Kah Fai LEONG, Ming Jen TAN a Shunzhi QIAN. A systematical review of 3D printable cementitious materials. *Construction and Building Materials* [online]. 2019, **207**, 477–490 [vid. 2019-06-17]. ISSN 0950-0618. Dostupné z: doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.02.144

- [11] KHOSHNEVIS, B., R. RUSSELL, H. KWON a S. BUKKAPATNAM. Crafting large prototypes. *IEEE Robotics and Automation Magazine* [online]. 2001. ISSN 10709932. Dostupné z: doi:10.1109/100.956812
- [12] BAJPAYEE, Aayushi, Mehdi FARAHBAKHS, Umme ZAKIRA, Aditi PANDEY, Lena Abu ENNAB, Zofia RYBKOWSKI, Manish Kumar DIXIT, Paul Arthur SCHWAB, Negar KALANTAR, Bjorn BIRGISSON a Sarbajit BANERJEE. In situ Resource Utilization and Reconfiguration of Soils Into Construction Materials for the Additive Manufacturing of Buildings. *Frontiers in Materials* [online]. 2020, 7(March), 1–12. ISSN 22968016. Dostupné z: doi:10.3389/fmats.2020.00052
- [13] BUSWELL, R.A., W.R. LEAL DE SILVA, S.Z. JONES a J. DIRRENBERGER. 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. *Cement and Concrete Research* [online]. 2018, **112**, 37–49 [vid. 2018-11-07]. ISSN 0008-8846. Dostupné z: doi:10.1016/J.CEMCONRES.2018.05.006
- [14] WANGLER, T, E LLORET, L REITER, N HACK, F GRAMAZIO, M KOHLER, M BERNHARD, B DILLENBURGER, J BUCHLI, N ROUSSEL a R FLATT. Digital Concrete: Opportunities and Challenges. *RILEM Tech. Lett.* 2016, **1**, 67–75.
- [15] BATTAGLIA, Christopher A, Martin Fields MILLER a Sasa ZIVKOVIC. Sub-Additive 3D Printing of Optimized Double Curved Concrete Lattice Structures. In: Jan WILLMANN, Philippe BLOCK, Marco HUTTER, Kendra BYRNE a Tim SCHORK, ed. *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2018*. Cham: Springer International Publishing, 2019, s. 242–255. ISBN 978-3-319-92294-2.
- [16] MOSTAFAVI, Sina, Benjamin N KEMPER a Daniel L FISCHER. Multimode Robotic Materialization. In: Jan WILLMANN, Philippe BLOCK, Marco HUTTER, Kendra BYRNE a Tim SCHORK, ed. *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2018*. Cham: Springer International Publishing, 2019, s. 349–362. ISBN 978-3-319-92294-2.
- [17] POUILLAIN, Philippe, Elodie PAQUET, Sébastien GARNIER a Benoît FURET. On site deployment of 3D printing for the building construction - The case of YhnovaTM. *MATEC Web of Conferences* [online]. 2018, **163**, 1–10. ISSN 2261236X. Dostupné z: doi:10.1051/mateconf/201816301001
- [18] PANDA, Biranchi, Jian Hui LIM a Ming Jen TAN. Mechanical properties and deformation behaviour of early age concrete in the context of digital construction. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2019, **165**, 563–571 [vid. 2019-06-04]. ISSN 1359-8368. Dostupné z: doi:10.1016/J.COMPOSITESB.2019.02.040
- [19] 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. 2019-02-15]. ISSN 0008-8846. Dostupné z: doi:10.1016/J.CEMCONRES.2018.02.001
- [20] ROUSSEL, Nicolas. Rheological requirements for printable concretes. *Cement and Concrete Research* [online]. 2018, **112**, 76–85 [vid. 2019-02-14]. ISSN 0008-8846. Dostupné z: doi:10.1016/J.CEMCONRES.2018.04.005
- [21] DENIS KAPLAN AND THIERRY SEDRAN, Francois de Larrard. Design of Concrete Pumping Circuit. *Materials Journal* [online]. nedatováno, **102**(2). Dostupné z: doi:10.14359/14304

- [22] CHOI, Myoungsung, Nicolas ROUSSEL, Youngjin KIM a Jinkeun KIM. Lubrication layer properties during concrete pumping. *Cement and Concrete Research* [online]. 2013, **45**, 69–78 [vid. 2019-06-27]. ISSN 0008-8846. Dostupné z: doi:10.1016/J.CEMCONRES.2012.11.001
- [23] SHAKOR, Pshtiwan, Shami NEJADI a Gavin PAUL. A study into the effect of different nozzles shapes and fibre-reinforcement in 3D printed mortar. *Materials* [online]. 2019, **12**(10). ISSN 19961944. Dostupné z: doi:10.3390/MA12101708
- [24] MARTINIE, L a N ROUSSEL. Simple tools for fiber orientation prediction in industrial practice. *Cement and Concrete Research* [online]. 2011, **41**(10), 993–1000. ISSN 0008-8846. Dostupné z: doi:https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.05.008
- [25] FATAEI, Shirin, Egor SECRIERU a Viktor MECHTCHERINE. Experimental insights into concrete flow-regimes subject to shear-induced particle migration (SIPM) during pumping. *Materials* [online]. 2020, **13**(5). ISSN 19961944. Dostupné z: doi:10.3390/ma13051233
- [26] SECRIERU, Egor. *Pumping behaviour of modern concretes – Characterisation and prediction*. 2018. ISBN 9783867805629.
- [27] ROUSSEL, Nicolas. Rheological requirements for printable concretes. *Cement and Concrete Research* [online]. 2018 [vid. 2018-07-01]. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2018.04.005
- [28] PERROT, A., D. RANGEARD a E. COURTEILLE. 3D printing of earth-based materials: Processing aspects. *Construction and Building Materials* [online]. 2018, **172**, 670–676 [vid. 2018-05-30]. ISSN 0950-0618. Dostupné z: doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.04.017
- [29] 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
- [30] 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
- [31] 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
- [32] 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
- [33] 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

- [34] PANDA, Biranchi, Suvash CHANDRA PAUL a Ming JEN TAN. Anisotropic mechanical performance of 3D printed fiber reinforced sustainable construction material. *Materials Letters* [online]. 2017, **209**, 146–149 [vid. 2017-11-27]. ISSN 18734979. Dostupné z: doi:10.1016/j.matlet.2017.07.123
- [35] 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
- [36] NERELLA, Venkatesh Naidu, Simone HEMPEL a Viktor MECHTCHERINE. Effects of layer-interface properties on mechanical performance of concrete elements produced by extrusion-based 3D-printing. *Construction and Building Materials* [online]. 2019, **205**, 586–601 [vid. 2019-02-15]. ISSN 0950-0618. Dostupné z: doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.01.235
- [37] PODROUŽEK, Jan, Marco MARCON, Krešimir NINČEVIĆ a Roman WAN-WENDNER. Bio-Inspired 3D Infill Patterns for Additive Manufacturing and Structural Applications. *Materials* [online]. 2019, **12**(3), 499. Dostupné z: doi:10.3390/ma12030499
- [38] KRČ, R., J. PODROUŽEK a R. WAN-WENDNER. From slender columns to branching structures. *Computational Modelling of Concrete Structures – Meschke, Pichler & Rots (Eds)* [online]. 2018, 165–172. Dostupné z: doi:10.1201/9781315182964-20
- [39] GOSSELIN, C., R. DUBALLET, Ph ROUX, N. GAUDILLIÈRE, J. DIRRENBARGER 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
- [40] BORG COSTANZI, C., Z.Y. AHMED, H.R. SCHIPPER, F.P. BOS, U. KNAACK a R.J.M. WOLFS. 3D Printing Concrete on temporary surfaces: The design and fabrication of a concrete shell structure. *Automation in Construction* [online]. 2018, **94**, 395–404 [vid. 2019-08-15]. ISSN 0926-5805. Dostupné z: doi:10.1016/J.AUTCON.2018.06.013
- [41] KREJCIRIK, Petr, David SKAROUPKA a David PALOUSEK. Free directional robotic deposition - Influence on overhang printability. *MM Science Journal* [online]. 2018, **2018**(December), 2715–2721. ISSN 18050476. Dostupné z: doi:10.17973/MMSJ.2018_12_2018119
- [42] HENDRIK LINDEMANN, Harald Kloft and Norman Hack. Gradual Transition Shotcrete 3D Printing. *poster* [online]. 2018. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Norman_Hack/publication/326735829_Gradual_Transition_Shotcrete_3D_Printing/links/5b6189970f7e9bc79a731ea6/Gradual-Transition-Shotcrete-3D-Printing.pdf
- [43] 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

- [44] REITER, Lex a Nicolas ROUSSEL. The role of early age structural build-up in digital fabrication with concrete. *Cement and Concrete Research* [online]. 2018, **112**, 86–95 [vid. 2019-06-27]. ISSN 0008-8846. Dostupné z: doi:10.1016/J.CEMCONRES.2018.05.011
- [45] THRANE, Lars N., Claus PADE, Claus V. NIELSEN, Ara A. JEKNAVORIAN, John J. SCHEMMELE a S. W. DEAN. Determination of Rheology of Self-Consolidating Concrete Using the 4C-Rheometer and How to Make Use of the Results. *Journal of ASTM International* [online]. 2009, **7**(1), 102003. ISSN 1546962X. Dostupné z: doi:10.1520/jai102003
- [46] 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
- [47] 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. 2019-01-30]. ISSN 0950-0618. Dostupné z: doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.03.232
- [48] PANDA, Biranchi, Suvash Chandra PAUL, Nisar Ahamed Noor MOHAMED, Yi Wei Daniel TAY a Ming Jen TAN. Measurement of tensile bond strength of 3D printed geopolymers mortar. *Measurement* [online]. 2018, **113**, 108–116 [vid. 2019-06-26]. ISSN 0263-2241. Dostupné z: doi:10.1016/J.MEASUREMENT.2017.08.051
- [49] Methods of testing cement. Determination of setting times and soundness. In: [online]. B.m.: BSI, 2016, s. 18. ISBN 978 0 580 93547 3. Dostupné z: <https://shop.bsigroup.com/ProductDetail?pid=000000000030338529>
- [50] JAYATHILAKAGE, R., P. RAJEEV a J. SANJAYAN. Yield stress criteria to assess the buildability of 3D concrete printing. *Construction and Building Materials* [online]. 2020, **240**, 117989. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117989
- [51] XU, Jie, Lieyun DING, Lixiong CAI, Lichao ZHANG, Hanbin LUO a Wenbo QIN. Volume-forming 3D concrete printing using a variable-size square nozzle. *Automation in Construction* [online]. 2019, **104**, 95–106 [vid. 2019-10-25]. ISSN 0926-5805. Dostupné z: doi:10.1016/J.AUTCON.2019.03.008
- [52] ZAREIYAN, Babak a Behrokh KHOSHNEVIS. Interlayer adhesion and strength of structures in Contour Crafting - Effects of aggregate size, extrusion rate, and layer thickness. *Automation in Construction* [online]. 2017, **81**, 112–121 [vid. 2019-05-10]. ISSN 0926-5805. Dostupné z: doi:10.1016/J.AUTCON.2017.06.013
- [53] REINOLD, Janis, Venkatesh NAIDU a Viktor MECHTCHERINE. Extrusion process simulation and layer shape prediction during 3D-concrete-printing using the Particle Finite Element Method [online]. 2020, (July), 1–25. Dostupné z: doi:10.20944/preprints202007.0715.v1

- [54] KRUGER, Jacques, Stephan ZERANKA a Gideon VAN ZIJL. 3D concrete printing: A lower bound analytical model for buildability performance quantification. *Automation in Construction* [online]. 2019, **106**(February), 102904. ISSN 09265805. Dostupné z: doi:10.1016/j.autcon.2019.102904
- [55] DIAKOV, Jakub. *Modification of printhead for 3D print of concrete* [online]. B.m., 2020. Brno university of technology. Dostupné z: http://www.ustavkonstruovani.cz/FileDownload/getFile/1708/BP_Diakov_Jakub_200788.pdf/
- [56] SUIKER, A. S.J., R. J.M. WOLFS, S. M. LUCAS a T. A.M. SALET. Elastic buckling and plastic collapse during 3D concrete printing. *Cement and Concrete Research* [online]. 2020, **135**(February), 106016. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2020.106016
- [57] PALOUSEK, David, Milan OMASTA, Daniel KOUTNY, Josef BEDNAR, Tomas KOUTECKY a Filip DOKOUPIL. Effect of matte coating on 3D optical measurement accuracy. *Optical Materials* [online]. 2015, **40**, 1–9 [vid. 2019-07-14]. ISSN 0925-3467. Dostupné z: doi:10.1016/J.OPTMAT.2014.11.020
- [58] ZHANG, Zihua, Xiaogang SONG, Yan LIU, Di WU a Chongmin SONG. Three-dimensional mesoscale modelling of concrete composites by using random walking algorithm. *Composites Science and Technology* [online]. 2017, **149**, 235–245 [vid. 2018-05-11]. ISSN 02663538. Dostupné z: doi:10.1016/j.compscitech.2017.06.015

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

9.1 Použité zkratky

3DCP	3D construction print
C3Dp	3D construction print
CC	Contour crafting
FW	Form work
FDM	Folder deposition moulding
PEM	Paste extrusion method
TCM	Tangent continuos method
NC	Nano clay
ZT	Zkušební tělesa
DIC	Digital image correlation
KEM	K-neighborhood method
IEA	International agency
FEM	Finite element method
RVE	Representative volume element
AdMaS	Advanced materials, structures and technologies

9.2 Použité fyzikální veličiny

h_0	tloušťka vrstvy
$H_{min/max}$	výška výtisku
ρ	měrná hmotnost
g_n	normální tíhové zrychlení
v	rychlost tisku
G_{trysky}	geometrie trysky
G_{stopy}	geometrie tiskové stopy
R_t	poloměr tisku
$\alpha_{min/max}$	úhel převisu
σ	normálové zatížení
t	čas
η	plastická viskozita

10 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1-1 Vývoj aditivní výroby ve stavebnictví [8].	8
Obr. 3-1 Základní oblasti 3DCP	12
Obr. 3-2 Čerstvá cementová směs: (a) Závislost deformace na zatížení (b) Závislost statické meze kluzu na času [17].	14
Obr. 3-3 Deformace tisku podle průřezu trysky: (a) obdélníkový průřez, (b) kruhový průřez, (c) kruhový průřez [19].	16
Obr. 3-4 Charakteristika proudění cementové směsi [25].	17
Obr. 3-5 Deformace/ Sesedání (změna výšky a šířky) tisknutých vrstev [22].	17
Obr. 3-6 Deformace extrudovaného materiálu: (a) Vliv sesedání, (b),(c) Deformace v závislosti na průřezu trysky [22].	18
Obr. 3-7 Požadavky na reologické vlastnosti čerstvého cementového materiálu [19].	19
Obr. 3-8 Stabilita nevyztuženého cementového materiálu [28].	20
Obr. 3-9 obr. 3-9 Stabilita nevyztuženého cementového materiálu [29].	20
Obr. 3-10 (a) Koncetrické vyztužení, (b) Diagonální výztuha v jednom směru, (c) Diagram zatížení/deformace u jednotlivých geometrií výztuží [32].	22
Obr. 3-11: (a),(b),(c) Diagramy pevnosti ohyb/deformace, (d) Diagram pevnosti tlak/tah [33].	23
Obr. 3-12 Vnější systém výztuh [34].	26
Obr. 3-13 Strategie času vrstvení v závislosti na zpracovatelnosti směsi [35].	27
Obr. 3-14 Pevnostní charakteristiky vytisknutých zkušebních těles v různých orientacích: (a) pevnost v ohybu, (b) pevnost v tlaku [35].	28
Obr. 3-15 Elementy z betonu: (a) Schéma silového působení, (b) 3D tisk elementů [34]	29
Obr. 3-16 Závislost deformace na silovém působení – porovnání experimentu s teoretickou hodnotou [34].	29
Obr. 3-17 Topologická optimalizace: a) Vstupní geometrie nosníku se silovým působením; (b) topologicky optimalizovaný nosník [37]	30
Obr. 3-18 Princip víceúrovňové optimalizace [36].	30
Obr. 3-19 Výplň strukturou: (a) Diagram zatížení/vychýlka, (b) Otevřená Gyroidní struktura [36].	31

Obr. 3-20 Strategie tisku beotnu: (a) metoda FDM/ ekv. ve stavebnictví PEM; (b) TCM – metoda tangentsní kontinuity tisku [38].	32
Obr. 3-21 Použité metody: (a) TCM – metoda tangentsní kontinuity tisku na šikmé podložce; (b) metoda FDM/ ekv. ve stavebnictví PEM na šikmé podložce [39]....	33
Obr. 3-22 Zjednodušené proces produkce: (a) Digitální model v prostředí programu Rhinoceros, Grasshopper, (b) Orientace geometrie v prostředí Grasshopper, (c) Výroba kontur - Geerování trajektorií pro robotické rameno, (d) Lití betonu do vzniklé formy [39].	34
Obr. 3-23 Zjednodušené proces produkce: (a) Digitální model v prostředí programu Rhinoceros, Grasshopper, (b) Orientace geometrie v prostředí Grasshopper (Autor); (c) Výroba kontur - Geerování trajektorií pro robotické rameno, (d) Lití betonu do vzniklé formy [39].	35
Obr. 3-24 Použité metody: (a) Tisk těles metodou SC3DP– technologie kinetického nanášení betonu [41]; (b) Tisk těles metodou FDM/ ekv. ve stavebnictví PEM z plastu [40].	36
Obr. 5-1 Schéma experimentální soustavy	49
Obr. 5-2 Diagram postupu práce	50
Obr. 5-3 Vztahy podle studie Roussel N. [19].	52
Obr. 5-4 Průřez trysky [56].	53
Obr. 5-5 Šneková hlava s otáčecím mechanismem (autor).....	53
Obr. 5-6 Geometrie zkušebních těles: (a) metoda TCM u stěny [38] - upraveno autorem; (b) metoda TCM u rotačního tělesa [autor].	54
Obr. 5-7 Pasivní tisková hlava s otáčecím mechanismem a mechanismem změny průřezu trysky [56].	55
Obr. 6-1 Experiment vystavitelnosti: (a) Kolaps výtisku v důsledku porušení vzpěrné stability překročením modulu pružnosti čerstvého materiálu ve vrstvě 9, (b) 3DCP těles metodou CC, (c) Minimální pře-extrudování stopy tisku - 6 vrstev, (d) Nevhodná synchronizace čerpadla stopy tisku - 6 vrstev [autor].	60

11 SEZNAM TABULEK

Tab. 5-1 Metodika pro 1. fázi výzkumné části [autor].	51
Tab. 5-2 Metodika pro 2. fázi výzkumné části [autor].	53
Tab. 5-3 Metodika pro 3. fázi výzkumné části [autor].	55

12 SEZNAM PŘÍLOH

Publikace:

Interface Behavior and Interface Tensile Strength of a Hardened Concrete Mixture with a Coarse Aggregate for Additive Manufacturing.

