

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

K133 - Katedra betonových a zděných konstrukcí



**Prototyp 3D tiskárny betonu
a vývin betonové směsi pro 3D tisk**

**Prototyping of 3D Concrete Printer and
Development of Concrete Mix for 3D Printing**

Diplomová práce

Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb
Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Štemberk, Ph.D.

Bc. Lukáš Černosta

Praha 2016


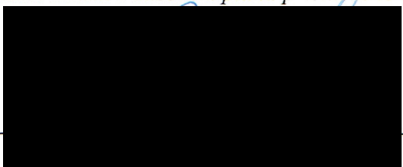


ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

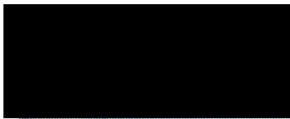
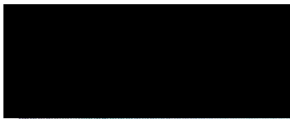
| | | |
|--|--------------|----------------------|
| Příjmení: Černosta | Jméno: Lukáš | Osobní číslo: 395720 |
| Zadávací katedra: K133 - Katedra betonových a zděných konstrukcí | | |
| Studijní program: Stavební inženýrství | | |
| Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb | | |

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

| | |
|---|--|
| Název diplomové práce: Prototyp 3D tiskárny betonu a vývin betonové směsi pro 3D tisk | |
| Název diplomové práce anglicky: Prototyping of 3D Concrete Printer and Development of Concrete Mix for 3D Printing | |
| Pokyny pro vypracování: <ul style="list-style-type: none">- zhotovení prototypu tiskárny- vývin betonové směsi | |
| Seznam doporučené literatury: | |
| Jméno vedoucího diplomové práce: doc. Ing. Petr Štemberk , Ph.D. | |
| Datum zadání diplomové práce: 3.10.2016 | Termín odevzdání diplomové práce: 8.1.2017 |
|  | <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>  |
| Podpis vedoucího práce | |

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

| | |
|--|--|
|  | |
| 3. 10. 2016 |  |
| Datum převzetí zadání | Podpis studenta(ky) |



Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou práci vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Petra Štemberka, Ph.D., s použitím uvedené literatury a podkladů.

V Praze dne 20. prosince 2017

Bc. Lukáš Černosta



Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu práce doc. Ing. Petru Štemberkovi, Ph.D. za vedení mé diplomové práce, za jeho podporu, rady, nápady, připomínky a čas strávený konzultacemi.

Dále bych rád poděkoval Ing. Martinu Petříkovi, Ph.D. za vytištění 3D součástek pro prototyp.

Také bych rád poděkoval mému otci, který mě podporoval nejen při psaní této práce, ale i při celém studiu.



Abstrakt

Tato diplomová práce se věnuje vývoji a výrobě prototypu 3D tiskárny betonu a vývinu betonové směsi pro 3D tisk. Součástí práce bylo provádění experimentů při zkoušení prototypu a zkoušení jednotlivých navrhovaných betonových směsí. Dále se práce věnuje obecně 3D tisku betonu a možnostem zlepšení technologie 3D tisku betonu. V neposlední řadě práce pojednává o možnostech aplikace 3D tisku.

Klíčová slova

Beton, 3D tisk betonu, návrh prototypu 3D tiskárny, vývoj betonové směsi.

Abstract

This diploma thesis is devoted to the development and prototyping a 3D concrete printer and defining a concrete mix suitable for 3D printing. Within the scope of this thesis, experiments for testing the prototype and testing of each proposed concrete mixtures were conducted. The thesis then provided a critical review of general 3D printing capabilities and suggests improvement in the 3D concrete printing technology. Finally, the thesis also discusses the possibilities of 3D printing applications.

Keywords

Concrete, 3D concrete printing, prototype of 3D printer, development of concrete mix



Obsah

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Úvod | 1 |
| 2 | Proces 3D tisku betonové směsi | 2 |
| 2.1 | Betonová směs pro 3D tisk..... | 2 |
| 2.2 | Nutné parametry betonové směsi..... | 2 |
| 3 | Prototyp stroje na 3D tisk betonu | 3 |
| 3.1 | Hlavní konstrukce prototypu stroje | 3 |
| 3.2 | Pohyblivost prototypu..... | 4 |
| 3.3 | Zařízení pro dávkování a dopravu betonové směsi prototypem..... | 6 |
| 3.4 | Dávkování směsi do dopravníku | 7 |
| 3.5 | Přechod mezi dopravníkem a hadicemi | 9 |
| 3.6 | Hadice pro dopravu betonové směsi..... | 12 |
| 3.7 | Cena prototypu..... | 13 |
| 3.8 | Ovládání a používání prototypu..... | 14 |
| 4 | Postup návrhu betonové směsi pro 3D tisk | 17 |
| 4.1 | Zkušební směs č. 1 | 18 |
| 4.2 | Zkušební směs č. 2..... | 20 |
| 4.3 | Zkušební směs č. 3..... | 22 |
| 4.4 | Zkušební směs č. 4..... | 24 |
| 4.5 | Zkušební směs č. 5..... | 26 |
| 4.6 | Zkušební směs č. 6..... | 28 |
| 4.7 | Zkušební směs č. 7 | 30 |
| 4.8 | Porovnání složení jednotlivých zkušebních směsí..... | 31 |
| 4.9 | Porovnání množství přísad v betonových směsích..... | 33 |
| 5 | Vzájemné ovlivňování přísad v betonové směsi | 35 |
| 6 | Popis vlivů jednotlivých parametrů a jejich dopad na 3D tisk | 38 |
| 6.1 | Vliv parametrů prototypu..... | 38 |
| 6.2 | Vliv parametrů betonové směsi | 38 |
| 6.3 | Vliv způsobu provádění 3D tisku | 38 |
| 7 | Možnosti aplikace 3D tisku | 40 |



| | | |
|-----------|--|-----------|
| 8 | Budoucí výzkum | 41 |
| 8.1 | Vývoj stroje | 41 |
| 8.2 | Vývoj technologie provádění 3D tisku | 41 |
| 9 | Závěr | 43 |
| 10 | Seznam použité literatury | 44 |



1 Úvod

Mezi nejpoužívanější materiály pro stavbu nejen budov v dnešní době patří bezesporu beton. Jeho výroba je poměrně jednoduchá a relativně levná což jsou dva z nepřeberného množství důvodů, proč je používání betonu tolik oblíbené.

Beton mají velice rádi také architekti, protože je v podstatě možné ho vyhotovit do jakýchkoliv představitelných tvarů. Rozmanitost vyhotovených tvarů je omezena pouze tím, jaké dokážeme zhotovit bednění pro samotný beton. Výroba takového bednění je ovšem velmi složitá a nákladná, proto je vhodné hledat možnosti, jak proces výroby betonových výrobků zjednodušit, zefektivnit, zrychlit a pokud možno také zlevnit.

Jednou z možností by mohl být 3D tisk betonu, při kterém bednění není potřeba. Jedná se o poměrně novou a ne příliš známou oblast. Po vzoru malých 3D tiskáren umělé hmoty ovšem nabízí obrovské možnosti variability a uplatnění v reálném provozu. Věřím, že se výzkumu 3D tisku betonu bude v blízké době věnovat stále větší množství lidí a v budoucnu bude naprosto běžné, že se budou tisknout nejen drobné výrobky z betonu, ale také rovnou celé budovy. Jednalo by se o významný posun v oblasti stavebnictví.

Ve své diplomové práci jsem se zabýval návrhem prototypu pro 3D tisk betonu, jeho reálnou výrobou a také návrhem betonové směsi pro 3D tisk.



2 Proces 3D tisku betonové směsi

Proces 3D tisku je značně odlišný a mnohem jednodušší než běžný proces ukládání betonové směsi ať už jde o výrobu velmi jednoduchého výrobku nebo o složitý projekt. Při běžně používaném postupu je nutné nejprve navrhnout vhodnou betonovou směs s ohledem na požadované výsledné vlastnosti výrobku a projektovou dokumentaci. Dále je nutné připravit místo pro ukládání směsi, zhotovit bednění a následně směs za pomoci lidské síly a případně techniky uložit. Po uložení směsi, je nutné vyčkat určitou dobu a opět pomocí lidské síly provést odbednění.

Při 3D tisku je tento proces výrazně zjednodušen a snižuje množství používané lidské síly. Samotný proces se sestává z odborného návrhu betonové směsi a přípravy místa pro její uložení. Už ovšem není nutné vytvářet žádné bednění a tím pádem odpadá značná část lidské síly, dochází tedy ke zrychlení a zjednodušení celého procesu. Zbytek procesu 3D tisku je prováděn za pomoci stroje, který směs ukládá na předem připravené místo dle zhotovené projektové dokumentace.

Možnostem aplikace 3D tisku je blíže věnována kapitola č. 7.

2.1 Betonová směs pro 3D tisk

Betonová směs pro 3D tisk musí být navržena tak, aby splňovala určitá kritéria, která jsou důležitá a mají přímý vztah s metodikou tisku betonu. Zároveň je důležité navrhnout betonovou směs tak, aby bylo zajištěno fungování směsi pro daný stroj, kterým je směs tisknuta. Pro každý stroj je nutné navrhnout vlastní betonovou směs. Základní a nutné parametry betonové směsi, které jsou obecně platné jsou popsány v podkapitole 2.2.

2.2 Nutné parametry betonové směsi

Pro všechny směsi navrhované na 3D tisk je několik parametrů, které jsou naprosto zásadní, aby daná směs pro 3D tisk byla funkční. Konkrétně se jedná o:

- Maximalizaci pevnosti v tlaku
- Maximalizaci zpracovatelnosti směsi
- Maximalizaci tekutosti v systému stroje pro 3D tisk
- Maximalizaci rychlosti tuhnutí betonu
- Přizpůsobení složení směsi danému stroji 3D tisk
- Přizpůsobení směsi pro prostředí, ve kterém je tisknuta



3 Prototyp stroje na 3D tisk betonu

Stroje, které se zabývají 3D tiskem obecně, ať už se jedná o jakýkoliv materiál (beton, plast apod.) jsou velmi složitá a sofistikovaná zařízení. Myšlenkou tedy bylo sestrojit jednoduchý, ale funkční prototyp stroje, který by byl schopný svými vlastnostmi a dovednostmi nahradit složitá strojní zařízení. Pro zjednodušení byl vyroben prototyp, který umožňuje tisk pouze ve dvou dimenzích, konkrétně v přímé vodorovné linii a svislé linii. Je zaveden předpoklad, že pokud bude zvládnuto tisknutí ve svislém a přímém vodorovném směru, nebude velkým problémem dodat zbývající třetí rozměr tisku. Úvodní představa stroje, který by toto umožňoval, je vyobrazena na Obrázek č. 1.

Obrázek č. 1 – Představa prototypu stroje na 3D tisk betonu

3.1 Hlavní konstrukce prototypu stroje

Hlavní nosná konstrukce prototypu stroje je dřevěná. Jedná se malý vozík na kolečkách, který je sestaven ze dřevěných hranolků, které jsou spojovány kovovými profily. Za pomoci kovových profilů jsou na prototypu uchyceny také tři závitové tyče, na kterých je upevněna dřevěná deska, ta následně nese hadici pro výsledný 3D tisk. Výsledná hlavní konstrukce prototypu na 3D tisk betonu je vyobrazena na Obrázek č. 2. Celá konstrukce byla postupem času neustále vylepšována a měněna s ohledem na nabírané zkušenosti.



Obrázek č. 2 – Hlavní konstrukce prototypu na 3D tisk betonu

3.2 Pohyblivost prototypu

Při výrobě hlavní konstrukce prototypu bylo nutné zajistit pohyb stroje ve dvou osách. Pohyb po vodorovné ose byl nejprve zajištěn za pomoci čtyř koleček, která pojížděla po podkladu. V pozdější fázi experimentování v rámci vylepšování prototypu byly zhotoveny hliníkové kolejnice, které zabezpečily přesný a rovný pohyb prototypu po vodorovné ose bez zadrhávání a počet koleček byl upraven na osm, aby bylo zajištěno přesné vedení po kolejnících. Vodorovné vedení je znázorněno na Obrázek č. 3 pomocí modré obousměrné šipky. Tento vodorovný pohyb prototypu byl realizován manuálně pouhým tlačáním / taháním celého prototypu.

Ve svislém směru byl pohyb zajištěn za pomoci závitových tyčí. Na prototypu jsou umístěny tři závitové tyče, z nichž dvě krajní jsou vodící a prostřední závitová tyč je uzpůsobena pro ovládání výšky vyústění hadice nad povrchem. Při jejím otáčení, které je znázorněno na Obrázek č. 3 žlutými šipkami lze plynule a s přesností na milimetry ovládat výšku tiskové trubice nad povrchem. Svislý pohyb vyústění hadice nad povrchem je na



Obrázek č. 3 zobrazen zelenou obousměrnou šipkou. Aby bylo možné přesně sledovat, jak se mění výška vyústění trubice nad povrchem, bylo umístěno přesné měření, které zajišťuje, že všechny tisknuté vrstvy výrobku budou mít požadovanou tloušťku. Detail měření výšky tiskové hlavy nad povrchem je vyobrazen na Obrázek č. 4.

Obrázek č. 3 – Popis pohybů prototypu



Obrázek č. 4 – Detail měření výšky tiskové hlavy nad povrchem

3.3 Zařízení pro dávkování a dopravu betonové směsi prototypem

V reálných podmínkách je betonová směs nejčastěji dopravována a dávkována čerpáním pomocí vysokotlakých čerpadel hadicemi až na požadované místo. Při výrobě prototypu byl kladen důraz na jeho minimální celkovou cenu a maximální jednoduchost. Použití čerpadla tedy nepřipadalo v úvahu a bylo nutné vymyslet jiný způsob. Byl zvolen způsob dopravy betonové směsi za pomoci šnekového dopravníku v kombinaci s hadicí malého průměru. Jako dopravník byl přitom vybrán klasický mlýnek na maso, který svou konstrukcí nejvíce šnekový dopravník připomíná. Na Obrázek č. 5 je vyobrazena vnitřní konstrukce mlýnku na maso, která se v případě prototypu změnila na šnekový dopravník betonové směsi.



Obrázek č. 5 – Vnitřní konstrukce šnekového dopravníku pro prototyp

Mlýnek byl připevněn tak, aby jej bylo možné použít obdobným způsobem, jako při plnění jeho standardní funkce viz Obrázek č. 6. Betonová směs je dopravována a postupně dávkována díky točení klikou mlýnku. Rychlost dávkování je závislá na rychlosti otáčení klikou a také na použité betonové směsi.

Obrázek č. 6 – Připevnění šnekového dopravníku

3.4 Dávkování směsi do dopravníku

Kromě dávkování směsi dopravníkem do hadice se později ukázalo, že je nutné vyřešit také dávkování směsi do samotného prototypu pro možné zajištění kontinuálního tisku směsi.



Proto byl zhotoven zásobník na čerstvou betonovou směs, který se upevnil na konstrukci prototypu. Sestával se z PVC trubek, které po zasunutí do sebe vytvořily velký trychtýř s dostatečným objemem, aby bylo možné zajistit kontinuální tisk. U tohoto zásobníku bylo předpokládáno, že tlak, který vyvine samotná betonová směs díky své tíze, bude dostatečný pro její dávkování do samotného prototypu. Tento předpoklad se ovšem nepotvrdil a směs bylo vždy nutné do prototypu ještě dále tlačit, aby ji prototyp mohl dále dopravovat.

Obrázek č. 7 – Zásobník na čerstvou betonovou směs

Jako další velký problém zásobníku na čerstvou betonovou směs se ukázala segregace vody z čerstvé betonové směsi, pokud se čerstvá směs po jejím naplnění do zásobníku dále nepromíchávala, docházelo k segregaci vody ze směsi. Proto bylo vždy nutné při tisku betonovou směs v zásobníku dále promíchávat, aby k segregaci nedocházelo. Segregace totiž měnila parametry betonové směsi a tím pádem docházelo ke znehodnocování směsi.

Aby byla segregace vody z betonové směsi co nejvíce omezena, byla vždy samozřejmě směs navrhována tak, aby bylo použito co možná nejmenší množství plastifikátoru a nejmenší možný vodní součinitel. Současně s omezováním množství plastifikátoru a snižováním vodního součinitele ovšem klesala zpracovatelnost směsi a tím pádem možnost jejího tisknutí.



V pozdějších fázích experimentu, kdy byl používán i urychlovač tuhnutí se navíc objevila souvislost mezi množstvím použitého plastifikátoru a urychlovače. Tyto dvě přísady se navzájem ovlivňovaly. Blíže se tomuto tématu věnuji v kapitole č. 5.

Obrázek č. 8 – Segregace čerstvé betonové směsi

3.5 Přejít mezi dopravníkem a hadicemi

Nejkritičtější místem prototypu se nakonec stalo místo přechodu z dopravníku betonové směsi na hadici, kterou dále betonová směs putuje až k samotnému tisku. Při experimentování docházelo ke značným problémům s prostupem tohoto přechodového kusu betonovou směsí. Betonová směs neproudila tímto kusem plynule a docházelo k jejímu zasekávání a ucpávání celého prototypu, což ovlivňovalo celkový chod prototypu.

Bylo nutné přechod ze šnekového dopravníku na hadici vyřešit jiným způsobem tak, aby betonová směs z dopravníku plynule přešla do hadice, která má menší průměr než samotný dopravník a zároveň nedocházelo k ucpávání šnekového dopravníku. Postupem času bylo při experimentování navrženo několik přechodových kusů, díky kterým byly zjišťovány další poznatky.

Jako první byl pro přechodový kus použit upravený trychtýř (Obrázek č. 9), který ústil do velmi malého průměru cca 10 mm. Tento přechodový kus byl hned při prvním pokusném tisku



vyhodnocen jako nevhodný a byla navržena jeho úprava, kdy díky většímu seříznutí bylo vyústění zvětšeno na cca 12 mm, ale ani tato úprava nebyla dostatečná a byl navržen další přechodový kus.

Obrázek č. 9 – První verze přechodového kusu

Druhou verzí přechodového kusu byl opět upravený trychtýř, ovšem s pozvolnějším zužováním od dopravníku do hadice. I přes fakt, že tento přechodový kus byl používán společně s hadicí, která měla větší vnitřní průměr, nebylo dosaženo plynulého průchodu směsi z dávkovače do hadice a docházelo k jejímu zasekávání v přechodovém kusu.

Obrázek č. 10 – Druhá verze přechodového kusu

Třetí verze přechodového kusu byla navržena s využitím všech získaných zkušeností ze dvou předchozích verzí. Na 3D tiskárně umělé hmoty byl vytištěn plastový přechodový dílec, který měl velmi pozvolné zmenšování průměru a navíc byl navržen tak, aby dopravovaná směs, byla dopravována stále po vodorovné přímce. Problémem třetí verze



bylo, že směs na konci tohoto přechodového kusu ústila do velmi malého průměru o rozměru cca 9 mm, který byl navržen, aby bylo možné navléknout hadici přes přechodový kus. Betonová směs ovšem měla značné problémy procházet takto malým průměrem.

Obrázek č. 11 – Třetí verze přechodového kusu

Čtvrtá a finální verze přechodového kusu sestávala z vylepšení verze předchozí, kdy byl vytištěn nový dílec, s širším vyústěním. U tohoto dílce se již hadice nasazovala do vyústění (nikoliv, aby se nasazovala přes vyústění, tak jako u předchozích verzí) a přechod mezi dílcem a hadicí byl naprosto plynulý.

Obrázek č. 12 – Finální přechodový kus z dopravníku na hadici

Bohužel ani tento přechodový dílec nebyl zcela bezchybný a i u tohoto dílce docházelo k zasekávání betonové směsi, tak jak je vidět na Obrázek č. 13. Na obrázku je vyobrazena vnitřní konstrukce šnekového dopravníku betonu. Proudění směsi je zleva doprava a v pravé části je umístěn přechodový kus. Z obrázku je patrné, že dochází k ucpávání přechodového kusu, směs neproudí dále do hadice, ze směsi se vytlačuje voda, která odchází netěsnostmi



ve šroubovaných spojích prototypu a není tedy možné dále pokračovat v tisku, protože dojde k ucpaní přechodového dílce. Dále je možné, že tento jev ovlivňuje i změna stoupání závitů šnekového dopravníku, jak je možné vidět na Obrázek č. 5, dochází ke zmenšování vzdálenosti mezi jednotlivými závitů, což má za následek zvýšení tření na ploše dopravníku a může to dále negativně ovlivňovat tlak potřebný pro dopravu směsi.

Vzhledem k získaným zkušenostem by řešením tohoto problému mohlo být zajištění promíchávání směsi i v přechodovém kusu mezi dopravníkem a hadicí, kde dochází k razantním změnám průměru, ve kterém je směs dopravována.

Obrázek č. 13 – Zaseknutá betonová směs ve vnitřní konstrukci dopravníku

3.6 Hadice pro dopravu betonové směsi

Pro dopravu betonové směsi od šnekového dopravníku až na místo, kde dochází k jejímu tisku z prototypu, byla zvolena gumová hadice. Pro tuto hadici jsou nejdůležitější její dva základní parametry, kterými jsou její délka a vnitřní průměr. Obecně platí, že čím kratší je hadice a čím větší má hadice průměr, tím lépe jde směs skrz prototyp dopravovat. Zároveň s vnitřním průměrem hadice souvisí i schopnost dodávat betonovou směs v dostatečném množství, aby vyplnila celý průřez hadice. Znamená to, že v případě větších vnitřních průměrů hadice nemá zvolený dopravník dostatečnou kapacitu, aby dokázal využít celý průměr hadice, což není pro plynulý tisk vhodné.

Na počátku experimentu byla používána zelená gumová hadice o vnitřním průměru 10 mm a délce cca 80 cm. Při jejím používání vznikl problém s její vysokou tvárností. Hadice nedržela svůj kruhový tvar na průřezu, což způsobovalo problémy s jejím přesným vedením skrz prototyp. Později byla zelená hadice nahrazena za hadici průhlednou, která měla stejný



vnitřní průměr 10 mm, ale tlustší stěnu samotné hadice, lépe držela tvar a byla tedy pro prototyp vhodnější. Během postupu experimentu bylo zjištěno, že počáteční navržený průměr hadice (10 mm) byl nedostatečný a tak bylo nutné jej zvětšit. Hadice byla nahrazena novou opět průhlednou hadicí s dostatečnou tloušťkou stěny a vnitřním průměrem 17 mm. Tento vnitřní průměr se stal konečným.

Společně s vnitřním průměrem bylo nutné upravovat také délku hadice. Bylo snahou získat hadici s co nejmenší délkou, protože při průchodu směsí skrz hadici dochází ke tření směsi o vnitřní stěnu hadice, které je nutné překonávat tlakem, kterým je dopravována betonová směs. Samotný prototyp byl dále upravován a byla navržena nová trasa hadice, která umožnila používat hadici o délce cca 50 cm se zachováním vnitřního průměru 17 mm. Hadice s těmito parametry se ukázala jako nevhodnější pro prototyp v jeho výsledné konfiguraci a průchod betonové směsí hadicí probíhá bez větších problémů.

Vyústění hadice tvoří samotnou tiskovou hlavu prototypu. Na jejím konci je hadice přikotvena do výškově pohyblivé dřevěné desky, čímž je zajištěno, že tisková hlava se může velmi snadno pohybovat i ve vertikálním směru, jak již bylo popisováno v podkapitole č. 3.2. Díky tomuto vertikálnímu pohybu je možné tisknout vícevrstvé výrobky.

3.7 Cena prototypu

Celý projekt byl pojat jako nízkonákladový a tak byl prototyp vyráběn z materiálů a dílů velmi jednoduše dostupných a levných. Konstrukce prototypu není nikterak složitá a jeho zkonstruování nevyžadovalo použití žádného speciálního nářadí. Hlavním použitým materiálem pro konstrukci je dřevo, které bylo spojováno volně dostupnými spojovacími profily a samořeznými šrouby do dřeva.

Jak již bylo vzpomenuto, jako dopravník betonové směsi byl použit mlýnek na maso v jeho tradičním litinovém provedení. Jako přechodový kus byly používány zprvu upravené trychtýře, později speciálně vytištěné 3D komponenty. Dále byly používány obyčejné gumové hadice různých průměru, nábytková kolečka a hliníkové L profily jako kolejnice.

Veškeré zmíněné věci byly velmi snadno dostupné v hobby-marketech a pořizovány za ceny v řádech desetikorun, maximálně stokorun. Největší položku tvořil samotný strojek, jehož cena byla cca 250 Kč. 3D tisk plastových přechodových kusů zajistil Ing. Martin Petřík, Ph.D..

Celkem byly do prototypu investovány cca 3 000 Kč a desítky hodin práce při jeho stavbě, zkoušení a vylepšování.



3.8 Ovládání a používání prototypu

Ovládání a používání prototypu je navrženo jako zcela manuální a sestává se z několika činností, které je nutné provádět současně. Částečně již bylo ovládání prototypu vysvětleno v podkapitole č. 3.2, ovšem v této podkapitole jej probereme podrobněji včetně samotného procesu tisknutí. Před začátkem samotného tisku je samozřejmě nejprve nutné prototyp zcela sestavit a připravit k tisku, což se sestává ze smontování samotného dopravníku, připojení přechodového kusu, hadice a usazení zásobníku na čerstvou betonovou směs. Na Obrázek č. 14 je vyobrazen prototyp stroje před jeho konečným sestavením a započítím tisku. Následně je stroj připraven na tisk a po jeho uvedení do výchozí polohy je možné zásobník naplnit čerstvou betonovou směsí.

Obrázek č. 14 – Prototyp stroje



Po naplnění zásobníku je možné spustit samotný chod stroje. Pro uvedení prototypu do chodu je nutné točit klikkou šnekového dopravníku, který zabezpečuje pohyb betonové směsi skrz celý prototyp díky vnitřní šnekové konstrukci. Samotná směs poté proudí ze zásobníku přes tělo šnekového dopravníku skrz přechodový dílec až do samotné hadice, odkud je již tisknuta na předem určenou podložku. Tento proces je dále doplňován občasným nutným promícháním čerstvé betonové směsi v zásobníku, jelikož v něm jinak u mnohých směsí dochází k segregaci vody (této problematice je podrobněji věnována část podkapitoly č. 3.4). Před samotným tiskem je rovněž nutné na stroji nastavit přesnou výšku hadice nad povrchem, na který je tisknuto, což ovlivňuje tloušťku tisknutého proužku betonové směsi.

Jakmile je směs protlačena skrz celou délku hadice, začíná být vytlačována na podložku, kde dochází k jejímu postupnému ukládání na požadované místo. Aby bylo možné směs tisknout ve více rozměrech, je nutné ještě během tisknutí, točení klikkou a dopravy směsi pohybovat celým strojem po speciálně navržených kolejnicích, díky kterým se stroj pohybuje v přímé vodorovné ose bez jakýchkoliv zádrhelů a směs může být bez problémů tisknuta. Při tisku je dále nutné upravovat výšku vyústění hadice nad povrchem, díky čemuž je možné proužky tisknout v požadované tloušťce a dále vrstvit v určeném počtu.

Obrázek č. 15 – Probíhající 3D tisk



Jak je jistě patrné z předchozích odstavců, používání zhotoveného prototypu je poměrně složité a organizačně náročné pro jednoho člověka, jelikož je nutné hlídat a ovládat několik procesů v jeden okamžik. Pro další postup v experimentech by bylo vhodné některé procesy zmotorizovat, aby nebylo nutné jejich chod zabezpečovat manuálně. Zejména se jedná o pohyb směsi skrz celý stroj, kdy místo kličky by mohl být umístěn motor, který by zajišťoval otáčení vnitřního šnekového dopravníku. Ideálním případem by bylo, pokud by tento motor měl možnost nastavení proměnlivých otáček, aby bylo možné směs postupně dávkovat.

Dále by bylo vhodné zmotorizovat i pohyb celého stroje po kolejnicích, aby byl tento jeho pohyb co možná nejvíce plynulý a korespondoval s rychlostí dávkování betonové směsi. Jen v případě správné synchronizace těchto dvou procesů je možné vytisknout kvalitní výrobek.



4 Postup návrhu betonové směsi pro 3D tisk

Při snaze najít optimální betonovou směs pro 3D tisk na zhotoveném prototypu bylo vyzkoušeno velké množství jednotlivých směsí, jejichž parametry byly postupně upravovány, aby bylo dosaženo optimálního výsledku při samotném 3D tisku výsledné betonové směsi. V následujících podkapitolách budou popsány některé směsi, z nichž každá hrála při vývoji konečné směsi svůj zásadní význam. Díky každé směsi byly zjištěny nové poznatky, které byly zohledňovány při dalších úpravách prototypu i návrzích dalších zkušebních směsí. Zbylé zkoušené směsi popisovány nebudou, protože jejich přínos pro další vývoj nebyl natolik významný.

Jednou z hlavních myšlenek při začátku experimentování a jednotlivém zkoušení betonových směsí bylo, že bude výsledná směs obsahovat naprosto minimální množství přísad do betonu. I přes desítky zkušebních směsí, kdy bylo zkoušeno velké množství různých kombinací poměrů a přísad do betonu se nepodařilo nalézt betonovou směs, která by byla vhodná pro 3D tisk betonu a neobsahovala žádné přísady. V podkapitole č. 4.9 je tato problematika popisována podrobněji. V kapitole č. 5 je popisován prováděný experiment vzájemného ovlivňování jednotlivých používaných přísad do betonu, což úzce souvisí s jejich množstvím ve zkoušených betonových směsích.

Byly používány naprosto standartní komponenty do betonových směsí. Cement byl zastoupen v podobě portlandského cementu skupiny CEM I 42,5 R od výrobce Českomoravský cement, a.s. – Závod Mokrý. Tento cement vyniká rychlým nárůstem pevností a vysokou počáteční i konečnou pevností. Jako kamenivo bylo používáno kamenivo frakce 0 - 4 z pískovny Dobříň. Jemné a velmi jemné frakce kameniva byly dodávány od firmy Sklopísek Střeleč, a.s. v produktech a frakcích uvedených v Tabulka č. 1.

Tabulka č. 1 – Používaná kameniva

V pozdějších fázích experimentu byla jako filler využívána také velmi jemně mletá křemičitá moučka rovněž od firmy Sklopísek Střeleč, a.s..



Nezbytnou součástí při experimentech se rovněž staly přísady do betonu, ačkoliv byl kladen důraz na minimalizaci jejich množství. Byl používán tekutý superplastifikátor betonových směsí GLENIUM ACE 442 a tekutý urychlovač tuhnutí betonových směsí POZZUTEC 10M.

4.1 Zkušební směs č. 1

Při úplně prvním zkušebním 3D tisku byla použita betonová směs, která se více blížila cementové pastě, než betonové směsi. Podíl kameniva byl totiž téměř poloviční než podíl cementu. Přesné složení první zkušební směsi je popsáno v tabulce č. 2.

Tabulka č. 2 – Zkušební směs č. 1

Tato zkušební směs byla zkoušena na prototypu v jeho velmi rané fázi vývoje. Jeho podoba je vyobrazena na Obrázek č. 16. Pro tisk byla použita gumová hadice o vnitřním průměru cca 10 mm. Dále byl jako přechodový kus mezi dávkovačem betonové směsi a hadicí použit upravený trychtýř, který se ukázal jako nevhodná varianta a byl později dále nahrazován.



Obrázek č. 16 – Podoba prototypu při prvním zkušebním tisku

Z prvního pokusného 3D tisku bylo zjištěno hned několik nedostatků prototypu, které bylo nutné vyřešit.

- 1) Zajistit lepší průchodnost směsi skrz přechodový kus od dávkovače směsi do hadice, aby nedocházelo k jejímu zasekávání. Toto vylepšení je podrobněji popsáno v podkapitole č. 3.5.
- 2) Utěsnit zadní část dávkovače směsi, kdy docházelo k vytékání směsi v prostoru mezi klikou dávkovače a dávkovačem. Tento problém byl vyřešen obalením zadní části vnitřní konstrukce šnekového dopravníku (zobrazen na Obrázek č. 5) izolační páskou, která vyplnila vzniklý prostor, a k vytékání u dalších pokusů nedocházelo.



- 3) Zkrácení hadice na co možná nejkratší možnou délku, aby bylo tření směsi o stěny hadice co nejvíce eliminováno. Problematika používaných hadic je blíže popisována v podkapitole č. 3.6.
- 4) Nutnost zajištění lepšího dávkování směsi do dopravníku, které při prvním tisku bylo prováděno pouhým doplňováním směsi do malé nálevky na dávkovači betonové směsi. Při tomto dávkování bylo rovněž nutné vyvíjet poměrně velký tlak na dávkovanou směs za pomoci rukou, aby směs byla dále dopravována dávkovačem. Problematika dávkování směsi je podrobněji popisována v podkapitole č. 3.4.
- 5) Při tisku byl pohyb prototypu po jeho kolečkách značně trhaný a bylo vhodné zhotovit kolejnice, díky kterým by pohyb prototypu ve vodorovné byl co možná nejplynulejší. Pohyb prototypu je podrobněji popisován v podkapitole č. 3.2.

Veškeré změny se týkaly především prototypu samotného. Vzhledem ke složení první zkušební směsi bylo jasné, že další posun při vývoji směsi musí být takový, že bude přidáno kamenivo.

I přes všechny popsány nedostatky a problémy se ovšem již při prvním zkušebním tisku podařilo vytisknout první vytisknutý vzorek, který je zobrazen na Obrázek č. 17.

Obrázek č. 17 – První vytisknutý vzorek

4.2 Zkušební směs č. 2

Po zapracování všech navržených změn a získaných zkušeností byla navržena druhá zkušební směs, která reflektovala velmi nízký podíl kameniva v první zkušební směsi. Druhá zkušební směs již obsahovala větší podíl kameniva a to v poměru cca 1:1 s cementem, které



bylo dodáno ve frakcích 0 - 1 a 1 - 2. Přesné složení druhé zkušební směsi je popsáno v Tabulka č. 3.

Tabulka č. 3 – Zkušební směs č. 2

Při druhém zkušebním tisku byl prototyp vybaven dávkováním směsi do prototypu, které je blíže popsáno v podkapitole č. 3.4. Dále byl prototyp také vybaven pojezdovými kolejkami, které jsou blíže popsány v podkapitole č. 3.2. Byla také použita druhá verze přechodového dílce, popsána blíže v podkapitole č. 3.5. Přechodový dílec byl použit zároveň s hadicí většího průměru, než při prvním zkušebním tisku. I přes veškerá vylepšení a úpravu betonové směsi se při tisku druhé zkušební směsi nepodařilo vytisknout žádný vzorek.

Docházelo totiž k ucpávání přechodového dílce mezi dopravníkem a hadicí. Betonovou směs se podařilo dopravit pouze přibližně do poloviny hadice a následně došlo k úplnému ucpání prototypu. K ucpávání docházelo i přesto, že oproti prvnímu zkušebnímu tisku byla celková délka hadice zkrácena z 80 cm na cca 50 cm. Tato změna je blíže popisována v podkapitole č. 3.6.

Vzhledem k poměrně velkému vodnímu součiniteli betonové směsi a přítomnosti plastifikátoru také docházelo k segregaci vody z betonové směsi v zásobníku na čerstvou betonovou směs. Problém segregace vody v zásobníku na čerstvou betonovou směs byl také jedním z problémů téměř při každém zkušebním 3D tisku. Blíže je toto téma zpracováno v podkapitole č. 3.4.



Obrázek č. 18 – Tisk zkušební směsi č. 2

4.3 Zkušební směs č. 3

Po odzkoušení druhé zkušební směsi a několika dalších, které ovšem vykazovaly podobné problémy jako druhá zkušební směs (proto zde nejsou uváděny) byla navržena směs další, ve které byl i nadále zvyšován poměr kameniva vůči cementu. Přesné složení třetí zkušební směsi je popsáno v Tabulka č. 4.

Tabulka č. 4 – Zkušební směs č. 3



Se zvyšováním poměru kameniva v betonové směsi byla zohledňována také křivka zrnitosti kameniva. Snahou bylo co možná největší přiblížení se k ideální křivce podle Bolomeye. Na Graf č. 1 je zobrazena ideální křivka zrnitosti (modrá čárkovaná čára) a křivka zrnitosti používaného kameniva do betonové směsi (oranžová plná čára).

Graf č. 1 – Křivka zrnitosti – zkušební směs č. 3

Při třetí zkušební směsi byla rovněž používána třetí verze přechodového kusu mezi dopravníkem a hadicí, blíže popisována v podkapitole č. 3.5. Tak jak je ve zmíněné podkapitole popisováno, problém třetí verze přechodového kusu byl v jeho velmi malé průchodnosti a velmi malém průměru na jeho konci. Docházelo tedy opět k ucpávání přechodového kusu a bylo nutné navrhnout nový přechodový kus. Samozřejmě bylo i nadále nezbytné vyvíjet betonovou směs.

Díky použití nižšího vodního součinitele oproti předchozím zkušebním směsím a menšímu množství plastifikátoru byla segregace vody z čerstvé betonové směsi omezena na minimum, ale stále nebylo dosahováno optimálního stavu, bez nutnosti občasného promíchání čerstvé betonové směsi v jejím zásobníku.



Obrázek č. 19 – Nízká průchodnost třetí verze přechodového kusu

4.4 Zkušební směs č. 4

S ohledem na neustálé problémy s průchodností přechodového kusu byl před dalšími pokusy nejprve navrhnout a vyroben přechodový kus v jeho čtvrté a prozatím finální verzi. Přechodovému kusu se blíže věnuje podkapitola č. 3.5. Samozřejmě i zkušební směs byla dále upravována. Přesné složení čtvrté zkušební směsi je popsáno v Tabulka č. 5.

Tabulka č. 5 – Zkušební směs č. 4



Jak je patrné z tabulky, bylo použito i kamenivo velmi jemné frakce 0 - 0,0625, které ve výsledné betonové směsi plní funkci filleru. Největší prioritou při návrhu této směsi bylo zlepšení průběhu křivky zrnitosti, aby se poměr a složení jednotlivých frakcí kameniva použitých do zkušební betonové směsi blížilo ideální křivce zrnitosti. Křivka zrnitosti kameniva použitého do čtvrté zkušební směsi je zobrazena na Graf č. 2.

Graf č. 2 – Křivka zrnitosti – zkušební směs č. 4

Díky upravenému přechodovému kusu při tisknutí čtvrté zkušební směsi již nedocházelo v takové míře k ucpávání přechodového kusu a bylo možné směs poměrně snadno protlačovat do hadice.

Pro vytlačení betonové směsi z hadice bylo stále potřeba poměrně velké množství tlaku a v hadici docházelo k poměrně velkému tření, bylo proto jasné, že betonovou směs bude nutné ještě dále upravit.



4.5 Zkušební směs č. 5

Návrh zkušební směsi č. 5 zohledňoval hlavní problémy předchozí zkušební směsi, aby nedocházelo k tak velkému tření v hadici, bylo do směsi použito větší množství velmi jemného kameniva. Dále bylo sníženo množství cementu a vody, společně se zmenšením vodního součinitele. Aby si výsledná směs zachovala dobrou zpracovatelnost, bylo zvýšeno množství plastifikátoru. Díky všem těmto změnám se podařilo navrhnout velmi dobrou betonovou směs, jejíž zpracovatelnost byla v podstatě ideální pro používaný prototyp. Přesné složení zkušební směsi č. 5 je uvedeno v Tabulka č. 6.

Tabulka č. 6 – Zkušební směs č. 5

U zkušební směsi č. 5 bylo zásadní změnou hlavně navýšení poměru velmi jemného kameniva, díky kterému se směs stala velmi dobře zpracovatelnou. Na Graf č. 3 je zobrazena křivka zrnitosti zkušební směsi č. 5 a je patrné, že v oblasti velmi jemného kameniva se křivka zkušební směsi téměř překrývá s ideální křivkou zrnitosti kameniva.



Graf č. 3 – Křivka zrnitosti – zkušební směs č. 5

Při tisku zkušební směsi č. 5 bylo dosaženo nejlepších výsledků ze všech předchozích zkušebních tisků. Na Obrázek č. 20 je zobrazen průběh tisku zkušební směsi č. 5. Problémem při tomto tisku bylo, že výsledný vytištěný výrobek byl velmi náchylný na jakékoliv vibrace a při jakýchkoliv drobných otřesech se choval jako vibrovaná betonová směs, tedy rozléval se do stran. Vytištěný výrobek tím tedy ztrácel svůj původní tvar. Přesto oproti předchozím vytištěným výrobkům se jednalo o velký pokrok.



Obrázek č. 20 – 3D tisk – zkušební směs č. 5

4.6 Zkušební směs č. 6

Při návrhu šesté zkušební směsi bylo nutné zohlednit problém, který nastal při tisku předchozí zkušební směsi. I přes myšlenku minimálního množství přísad při vývoji betonové směsi bylo nutné použít urychlovač tuhnutí betonu.

Složení betonové směsi se tedy změnilo poměrně razantním způsobem. Bylo sníženo množství plastifikátoru téměř na polovinu, byl ještě více zvýšen poměr velmi jemného kameniva a pro zachování dobré zpracovatelnosti směsi byl zvýšen vodní součinitel směsi. Největší změnou ve složení směsi bylo ovšem použití urychlovače tuhnutí betonu. Přesné složení betonové směsi je popsáno v Tabulka č. 7. Křivka zrnitosti směsi je zobrazena na Graf č. 4.



Tabulka č. 7 – Zkušební směs č. 6

Graf č. 4 – Křivka zrnitosti – zkušební směs č. 6

Společné použití plastifikátoru a urychlovače v této betonové směsi mělo velmi razantní vliv na zpracovatelnost této betonové směsi. Konzistence směsi byla opravdu velmi tekutá a její tisk byl v podstatě nemožný, protože po jejím nalití do zásobníku čerstvé směsi a následnému pokusu o její tisk došlo k průchodu směsi skrz prototyp takovou rychlostí, že



nebylo možné směs jakkoliv dávkovat. Po průchodu směsi až na podložku docházelo k jejímu rozlévání do stran a ani přítomnost urychlovače toto rozlévání zpočátku nijak neovlivňovala.

Po určitém časovém úseku se aktivovalo působení urychlovače a během několika okamžiků se z tekuté směsi, kterou zprvu nebylo možné postupně dávkovat, a tisknout stala směs, jejíž konzistence byla velmi tuhá a rovněž ji nebylo možné tisknout, protože docházelo k ucpávání stroje díky její velmi špatné zpracovatelnosti.

Při tisku šesté zkušební směsi bylo zjištěno, že dochází ke vzájemnému ovlivňování přísad, které jsou používány do betonové směsi, a bude nutné upravit jejich vzájemný poměr. Byl proto proveden další experiment, kterému je věnována kapitola č. 5. Tento experiment se věnoval vzájemnému poměru plastifikátoru a urychlovače v navrhované betonové směsi.

4.7 Zkušební směs č. 7

Novou zkušenost, která byla získána díky předchozí zkušební směsi a experimentu, který je popisován v kapitole č. 5, bylo nutné aplikovat do návrhu sedmé zkušební směsi. S ohledem na prováděný experiment byl upraven poměr množství přísad v betonové směsi, kdy množství plastifikátoru bylo sníženo na jeho minimální možnou hranici a naopak množství urychlovače bylo zvýšeno na jeho horní možnou hranici pro dávkování.

Množství velmi jemného kameniva bylo zachováno v podstatě shodné s předchozí zkušební směsí, ale bylo upraveno množství kameniva frakce 0,5 – 2, kdy došlo ke snížení jeho množství téměř o polovinu. Vodní součinitel byl jen nepatrně zvýšen oproti předchozí zkušební směsi. Složení sedmé zkušební směsi je popsáno v Tabulka č. 8.

Tabulka č. 8 – Zkušební směs č. 7



Pro úplnost je na Graf č. 5 zobrazena křivka zrnitosti sedmé zkušební směsi.

Graf č. 5 – Křivka zrnitosti – zkušební směs č. 7

Sedmá zkušební směs vykazovala nejlepší vlastnosti pro výsledný 3D tisk na zhotoveném prototypu. Je ovšem nutné proces tisku betonové směsi provádět s ohledem na její složení a přítomnost urychlovače. Zprvu se betonová směs jeví jako velmi dobře zpracovatelná, ale po uplynutí určitého časového úseku v závislosti na okolní teplotě a použitém množství urychlovače v betonové směsi začne betonová směs tuhnout a její tisk se stává nemožným.

4.8 Porovnání složení jednotlivých zkušebních směsí

Pro lepší možnost porovnání složení všech zkušebních betonových směsí jsou v Tabulka č. 9 uvedena složení všech zkušebních směsí. Zároveň v Graf č. 6 jsou zobrazeny křivky zrnitosti, které byly uváděny u jednotlivých betonových směsí rovněž pro lepší možnost jejich porovnání.



Tabulka č. 9 – Porovnání množství komponent ve zkušebních směsích

Graf č. 6 – Křivky zrnitosti zkušebních směsí



4.9 Porovnání množství přísad v betonových směsích

Na počátku kapitoly č. 4 bylo nastíněno, že jedna z původních myšlenek při vývoji směsi pro 3D tisknutí betonu se sestávala z minimalizace množství přísad do betonu ve výsledné betonové směsi pro 3D tisk betonu.

Během provádění experimentů bylo odzkoušeno několik desítek betonových směsí, z nichž ani jedna nebyla vhodná pro 3D tisk betonu bez obsahu alespoň jedné přísady. Při experimentu byly přísady omezovány na minimum, a proto byl používán pouze plastifikátor a v pozdější fázi vývoje také urychlovač tuhnutí a tvrdnutí betonu.

V Tabulka č. 10 jsou uvedeny hodnoty jednotlivých množství přísad do betonu a vodního součinitele jednotlivých zkušebních směsí. Pro lepší porovnání skutečných množství jsou hodnoty vyneseny také do Graf č. 7. Množství plastifikátoru a urychlovače je uváděno v gramech, vodní součinitel je bezrozměrný.

Tabulka č. 10 – Množství přísad ve zkušebních betonových směsích

Jednotlivé parametry zkušebních směsí byly vždy upravovány tak, aby bylo dosaženo co možná nejlepší zpracovatelnosti výsledné zkušební betonové směsi. Je důležité zohlednit, že mezi jednotlivými uváděnými zkušebními směsmi byly zkoušeny i další betonové směsi, které zde nejsou uváděny, což je blíže popisováno na začátku kapitoly č. 4.

Z grafu i tabulky je vidět, že na počátku experimentu, při prvních dvou zkušebních směsích bylo množství plastifikátoru největší a postupně bylo jeho množství snižováno společně s nárůstem vodního součinitele. Při třetí zkušební betonové směsi byl vodní součinitel snižován a snižoval se i podíl plastifikátoru. Čtvrtá a pátá zkušební směs naopak byla navržena se zvyšujícím se množstvím plastifikátoru a snižujícím se vodním součinitelem.



Graf č. 7 – Porovnání množství přísad a vodního součinitele ve zkušebních směsích

Při zkoušení šesté zkušební směsi byl poprvé použit urychlovač tuhnutí a tvrdnutí betonu. Při tisknutí předchozích zkušebních směsí bylo zjištěno, že vytisknutý vzorek má problémy se svou tuhostí a již při mírných otřesech se chová jako vibrovaná betonová směs a díky tixotropním vlastnostem betonových směsí se stává v podstatě tekutým a mění svůj vytištěný tvar. Zároveň bylo zjištěno, že jednotlivé přísady do betonu se navzájem ovlivňují a je nutné dostatečně zohlednit jejich vzájemný poměr. Pro zjištění ideálního poměru plastifikátoru a urychlovače byl prováděn experiment, který je podrobněji popisován v kapitole č. 5. Po získání zkušeností z experimentu popsaného v kapitole č. 5 byla navržena sedmá betonová zkušební směs, která obsahovala největší množství urychlovače, nejmenší množství plastifikátoru a velikost vodního součinitele se pohybovala okolo celkové průměrné hodnoty vodního součinitele pro všechny zkoušené betonové směsi.



5 Vzájemné ovlivňování přísad v betonové směsi

Jak již bylo zmíněno v podkapitole č. 4.7, pro zjištění optimálního poměru přísad přidávaných do zkoušených betonových směsí byl proveden experiment, který se zabýval vzájemným ovlivňováním přísad ve zkoušených betonových směsích.

Používané přísady byly:

- GLENIMUM ACE 442
 - Plastifikátor betonových směsí
 - Doporučené dávkování: 0,6 – 1% dávky cementu
- POZZUTEX 10M
 - Urychlovač tuhnutí a tvrdnutí betonové směsi
 - Doporučené dávkování: 1 – 5 % dávky cementu

Při prvním užití urychlovače a tisku zkušební směsi č. 6 bylo zjištěno, že se tyto dvě přísady do betonových směsí navzájem velmi výrazně ovlivňují a jejich vzájemný poměr má zásadní vliv na celkovou zpracovatelnost betonové směsi v čase.

Betonová směs pro tento experiment byla vytvořena s použitím cementu CEM I 42,5 R, který byl zároveň používán pro zkušební betonové směsi a vodního součinitele 0,4. Při tomto experimentu nebylo používáno žádné kamenivo.

Bylo vyrobeno šest zkušebních směsí, ve kterých byly použity různé poměry plastifikátoru a urychlovače, aby bylo možné sledovat, jakým způsobem se tyto dvě přísady do betonu ovlivňují. Procentuální zastoupení jednotlivých přísad v betonových směsích je uvedeno v Tabulka č. 11.

Tabulka č. 11 – Zkušební betonové směsi – ovlivňování přísad v betonu



Vyhodnocování experimentu bylo velmi subjektivní a zakládalo se na zkušenostech, které byly získány používáním zhotoveného prototypu. Byl hledán takový poměr urychlovače a plastifikátoru, při kterém by betonová směs byla dobře zpracovatelná, ale zároveň při jejím vytisknutí dokázala držet požadovaný tvar a nedocházelo k jejímu rozlévání po povrchu, na který je tisknuta.

Obrázek č. 21 – Experiment pro zjištění vzájemného ovlivňování přísad do betonu

Bylo zjištěno, že jakmile se používají obě přísady současně, dochází k výraznému ovlivňování jejich účinku. Při použití stejného množství plastifikátoru do betonové směsi, do které je následně přidán také urychlovač tuhnutí dojde ve směsi nejprve k razantnímu podpoření plastifikátoru a směs se stane mnohem více tekutější. Urychlovač tuhnutí tedy zprvu podpoří funkčnost plastifikátoru. Bylo rovněž zjištěno, že pokud se použije pouze urychlovač tuhnutí, zprvu i on sám působí také jako plastifikátor a pomáhá zlepšovat prvotní zpracovatelnost směsi.



Po určité době samozřejmě přechází prvotní působení urychlovače jako plastifikátoru do jeho hlavního účelu a zpracovatelnost směsi se začíná snižovat. Bylo tedy nutné najít co nejlepší poměr mezi plastifikátorem a urychlovačem. Jako nejlepší poměr se nakonec ukázalo použití minimálního množství plastifikátoru a maximálního množství urychlovače. Tento poměr byl rovněž vyzkoušen do zkušební směsi č. 7 a jevil se jako ideální poměr pro zhotovený prototyp. Betonová směs je dostatečně dlouhou dobu snadno zpracovatelná a je možné ji snadno tisknout, po určité době, ale účinnost plastifikátoru klesá a nastupuje urychlovač, který zajišťuje dostatečnou tuhost vytištěného výrobku, který drží výsledný vytištěný tvar.



6 Popis vlivů jednotlivých parametrů a jejich dopad na 3D tisk

Problematika 3D tisku je velmi komplexní a celkově velmi provázaná, protože jakmile je ovlivněn byť jen jeden zdánlivě nepodstatný parametr celého procesu 3D tisku, dojde v podstatě vždy k ovlivnění celého procesu a nutnosti na tuto změnu dále reagovat.

V následujících podkapitolách budou popsány jednotlivé parametry prototypu společně s tím, jak působily na výsledný 3D tisk. Dále budou popsány parametry betonové směsi a jejich ovlivňování 3D tisku a také vliv způsobu 3D tisku na výsledný produkt.

6.1 Vliv parametrů prototypu

Nejdůležitější parametry, které ovlivňují 3D tisk betonu vychází ze samotného stroje pro 3D tisk. V případě používaného prototypu se jednalo o co možná nejjednodušší zařízení, které mělo řadu svých funkčních omezení.

V první řadě byl 3D tisk ovlivňován velmi nízkým tlakem, který byl vyvíjen pro dopravu betonové směsi skrz celý prototyp. Díky nízkému tlaku nebylo možné směs protlačovat v požadované konzistenci a bylo velmi složité najít směs, která by byla vhodná pro dopravu velmi nízkým tlakem a zároveň byla použitelná pro 3D tisk.

Dalším výrazně ovlivňujícím parametrem byl fakt, že zhotovený prototyp byl ovládán celý výhradně manuálně bez používání jakékoliv automatizace. Díky této skutečnosti bylo velmi obtížné prototyp ovládat a zajišťovat jeho celkový a bezproblémový chod.

6.2 Vliv parametrů betonové směsi

Při návrhu betonové směsi bylo nejzásadnější zohlednit parametr velmi snadné zpracovatelnosti směsi a zároveň její tisknutelnosti. Tyto dva základní parametry ovlivňovala každá součást betonové směsi.

Návrh směsi bylo nutné pečlivě rozmyslet již od samotného výběru frakcí kameniva, přes volbu vodního součinitele až po volbu přítomnosti a jednotlivého množství přísad do betonu. Bylo nutné volit kamenivo velmi malých frakcí, protože při volbě větších frakcí nebylo možné betonovou směs dopravovat skrze prototyp. Dále bylo nutné volit poměrně velký vodní součinitel (okolo 0,5) a poměrně velké množství přísad. Vše s ohledem na co nejsnadnější zpracovatelnost betonové směsi.

6.3 Vliv způsobu provádění 3D tisku

Pro 3D tisk je také zásadní, jakým způsobem je prováděn a jak je nastaven samotný stroj. Je nutné správně zvolit rychlost samotného tisku, kdy při vysoké rychlosti může



docházet k poruchám tisknutého výrobku díky nedostatečně zatuhnutým dříve vytisknutým vrstvičkám a při příliš pomalém tisku může docházet k tuhnutí směsi již ve stroji, kterým je tisknuto a tím pádem znemožnění dalšího tisku.

Dále je nutné správně zvolit výšku jednotlivých vrstev, které tiskneme. V případě příliš malých vrstev by se mohlo stát, že nedojde k jejich dostatečnému spojení díky rychlému tuhnutí betonové směsi a výsledný výrobek nebude celistvý. Naopak v případě, kdy by byla zvolena velká výška tisknuté vrstvy, mohlo by dojít k pomalému tuhnutí takové vrstvy a následnému zborcení celého výrobku díky přetížení od dále vytisknutých vrstev.



7 Možnosti aplikace 3D tisku

Možnosti aplikace 3D tisku jsou velmi rozmanité. Pomocí 3D tisku betonu je možné tisknout výrobky velmi malých rozměrů až po celé budovy. 3D tisk betonu je mnohonásobně rychlejší než dnes používané tradiční metody pro výstavbu budov.

Strojů pro 3D tisk betonu je již poměrně velké množství od velmi malých v podstatě snadno přenosných, přes stroje, které je nutné dopravovat na velkých nákladních automobilech, až po stroje, které jsou stabilně umístěné. Při aplikaci 3D tisku je výhodou mnohonásobně menší nutnost používání lidské síly. Jedná se o rychlejší, snadnější a ekonomičtější postup než při standardních metodách.

Nejčastěji 3D tisk betonu probíhá v místě budoucí konstrukce, kdy na místo dorazí stroj pro 3D tisk. Po jeho přípravě a po přípravě samotného místa pro tisk 3D směsi je nutné dopravit také betonovou směs pro tisk. Doprava směsi může probíhat mnoha způsoby. Dělí se ovšem na dva základní způsoby, kdy směs na místo dorazí již umíchaná, anebo je dopravena směs suchá, která je dále namíchávána na místě.

Omezení pro možnosti 3D tisku betonu plynou pouze z omezení samotné technologie 3D tisku betonu.



8 Budoucí výzkum

Možnosti budoucího výzkumu a vývoje v oblasti 3D tisku jsou velmi otevřené. Jedná se o prozatím ne příliš poznanou a do budoucna určitě velmi vyhledávanou oblast vědy.

8.1 Vývoj stroje

V případě vyvíjeného prototypu je již nyní několik věcí, které by bylo vhodné při pokračování experimentů změnit, doplnit či případně vylepšit.

V první řadě by bylo nutné zlepšit průchodnost celého prototypu a zajistit promíchávání směsi i v přechodovém kusu mezi dopravníkem betonové směsi a hadicí. Následně by bylo vhodné prototyp částečně zautomatizovat a zmotorizovat, aby se jeho ovládání zjednodušilo a nebylo nutné provádět velké množství činností zároveň. Ideálně přidat motorek pro pohánění směsi skrz dopravník zároveň s motorkem, který by zabezpečoval pohyb celého prototypu po zhotovených kolejnicích. V neposlední řadě by bylo vhodné zabezpečit zvýšení tlaku, kterým je betonová směs dopravována. Díky vyššímu tlaku by mělo být možné dopravovat i hůře zpracovatelné směsi, díky kterým by měly vytištěné výrobky lepší výsledné parametry.

Dalším posunem ve vývoji stroje by bylo přidání třetího rozměru tisku.

8.2 Vývoj technologie provádění 3D tisku

Obecně je zatím samotná technologie 3D tisku stále v rané fázi svého vývoje, ale i přes to ve světě již dochází k její aplikaci i na reálných projektech.

Dalšími kroky ve vývoji technologie 3D tisku by mohlo být zapracování drobných vylepšení, které by mohly postupně vyřešit veškeré problémy při současném 3D tisku. Asi největším problémem při 3D tisku je, že je ve většině případů tisknut pouze samotný beton, který bez přidávané výztuže není schopen přenášet výrazná tahová namáhání, a proto je nutné do vytištěných výrobků manuálně přidávat výztuž, případně výrobky navrhovat tak, aby byly namáhány pouze tlakově. Částečně by bylo možné tyto problémy vyřešit tisknutím betonových směsí s obsahem drátků. Takové směsi jsou schopny odolávat větším tahovým namáháním než běžné betonové směsi. Zároveň by bylo samozřejmě možné zautomatizovat proces vkládání výztuže při samotném 3D tisku alespoň do nejvíce namáhaných míst.

Dále by bylo určitě vhodné již při samotném tisku například budov připravit budoucí stěny pro rozvody instalací. Dále v případě tisku budov zabezpečit tepelnou izolaci stěny již



v průběhu samotného tisku, bez nutnosti tvorby dodatečného vnějšího zateplovacího systému například vyplněním tisknuté stěny izolačním materiálem.

V neposlední řadě je ovšem nutné věnovat pozornost hlavně samotné betonové směsi, která je tištěna. Je nutné zohlednit fakt, že se jedná o poměrně nestandardní betonové směsi, které často obsahují velké množství přísad do betonu a nemusí být vždy dostatečně prozkoumáno chování takovýchto směsí v delším časovém horizontu. Každá betonová směs podléhá ve výsledku smršťování a dotvarování a proto i tyto faktory je nutné zvažovat při návrhu samotného výrobku, ale hlavně používané betonové směsi.



9 Závěr

Cílem práce bylo zhotovit funkční prototyp pro 3D tisk betonu s použitím běžně dostupných materiálů a součástí při vynaložení minimálního množství financí. Dalším cílem bylo navrhnout betonovou směs, která by byla vhodná pro 3D tisk.

V podstatě celá práce byla prováděna jako experiment, který sestával z několika částí. Nejprve byla vyhotovena základní verze prototypu, na které byly postupně zkoušeny betonové směsi, které byly vyvíjeny a zkoušeny současně se samotným prototypem. Dále bylo součástí experimentu i podrobnější zkoumání betonových směsí, konkrétně vliv na konzistenci a vzájemné ovlivňování přísad v betonové směsi.

Bylo odzkoušeno několik desítek zkušebních směsí, z nichž bylo vybráno sedm, které byly nejvýznamnější pro celý experiment a byly podrobněji popsány v práci.

Zprvu bylo záměrem navrhnout betonovou směs pro 3D tisk, která bude obsahovat minimální množství přísad do betonu. Bylo ovšem zjištěno, že návrh směsi, která by neobsahovala žádné přísady, není možné dosáhnout.

Veškeré experimenty byly prováděny na prototypu velmi malého měřítka, ale je reálné konstatovat, že získané trendy, které se vyskytují ve výsledcích, bude možné využít i u měřítek větších v reálných aplikacích 3D tisku. Hlavními parametry funkčního stroje 3D tiskárny jsou zabezpečení dostatečného čerpacího tlaku, dokonalá průchodnost systému stroje bez výrazných změn průměru průchodného profilu, kterým prochází betonová směs skrz stroj a kontinuální dávkování směsi.

Pro složení betonové směsi určené k 3D tisku je nejdůležitější její zpracovatelnost a rychlost tuhnutí po jejím vytisknutí. V případě absence použití přísad do betonu je nutné používat poměrně vysoký vodní součinitel dosahující hodnot okolo 0,5. V případě, že jsou přísady do betonu používány, je reálné dosahovat nižšího vodního součinitele. Je ovšem nutné volit přísady do betonu, které jsou vzájemně kompatibilní.

Vyžitím získaných poznatků a jejich použití do reálných aplikací 3D tisku betonu je možné výrazně zefektivnit a zjednodušit výrobu některých betonových prvků.



10 Seznam použité literatury

- [1] GOSSELIN, C., R. DUBALLET, Ph. ROUX, N. GAUDILLIÈRE, J. DIRRENBARGER a Ph. MOREL. Materials & Design: Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete – a new processing route for architects and builders [online]. Elsevier, 2016 [cit. 2016-11-21]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127516303811>
- [2] MALAEB, Zeina, Hussein HACHEM, Adel TOURBAH, Toufic MAALOUF, Nader EL ZARWI a Farook HAMZEH. 3D CONCRETE PRINTING: MACHINE AND MIX DESIGN [online]. , 14-22 [cit. 2016-12-29]. 20320150606002. Dostupné z: <http://www.researchgate.net/publication/280488795>
- [3] 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 [cit. 2016-12-29]. DOI: 10.1617/s11527-012-9828-z. ISSN 1359-5997. Dostupné z: <http://www.springerlink.com/index/10.1617/s11527-012-9828-z>
- [4] FABIO, Adam. MAN BUILDS CONCRETE 3D PRINTER IN HIS GARAGE. In: HACKADAY [online]. 2014 [cit. 2016-11-10]. Dostupné z: <https://hackaday.com/2014/05/29/man-builds-concrete-3d-printer-in-his-garage/>
- [5] Giant Chinese 3D printer builds 10 houses in just 1 day (PHOTOS, VIDEO). In: RT: Question more [online]. [cit. 2016-12-29]. Dostupné z: <https://www.rt.com/news/155220-3d-printer-houses-china/>
- [6] FENG, Peng, Xinmiao MENG a Hanqing ZHANG. Mechanical behavior of FRP sheets reinforced 3D elements printed with cementitious materials [online]. 2015 [cit. 2016-10-01]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822315007722>