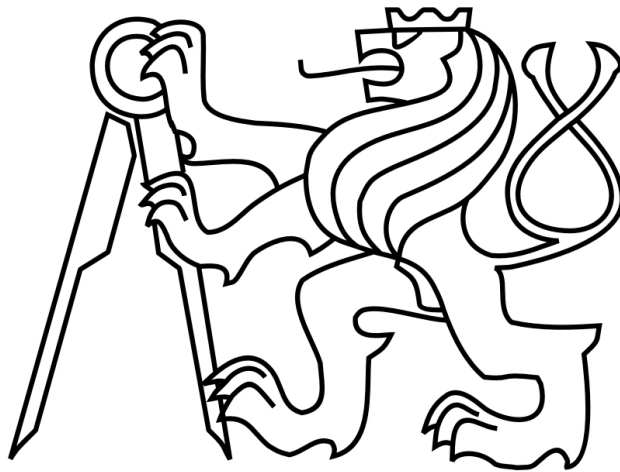


**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA STAVEBNÍ**

**Katedra betonových a zděných konstrukcí**



**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Performance based design složení betonové směsi pro 3D tisk**

**Bc. Veronika Tesařová**

**2018**

**Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Petr Štemberk, Ph.D.**

**Vedoucí specialista: Ing. Michal Kovářík**

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem předkládanou diplomovou práci vypracoval samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

V Praze dne: .....

.....  
**Bc. Veronika Tesařová**

## **Poděkování**

Tímto bych ráda poděkovala všem, kdo mi byli při vypracování této práce nápomocni, tedy především doc. Ing. Petru Štemberkovi, Ph.D. a Ing. Michalu Kovářikovi za odborné vedení, neocenitelné rady a řadu konzultací v průběhu práce.

Dále bych chtěla vyjádřit nesmírnou vděčnost své rodině za neutuchající podporu a obdivuhodnou trpělivost po celou dobu mého studia.

# **Obsah**

1. Úvod.....	6
--------------	---

## **TEORETICKÁ ČÁST**

2. Formativní metody .....	8
3. Subtraktivní metody .....	8
4. Aditivní metody (3D tisk) .....	10
4.1 Aditivní výroba na tekuté bázi .....	11
4.1.1. 3D Systems - SLA .....	11
4.1.2 PolyJet.....	12
4.1.3 EnvisionTEC - Perfactory.....	13
4.2 Aditivní výroba na práškové bázi.....	14
4.2.1 3D Systems - Selective Laser Sintering.....	14
4.2.2 ColorJet Printing .....	15
4.2.3 Voxeljet.....	16
4.3 Aditivní výroba na pevné bázi.....	18
4.3.1 Fused Deposition Modeling.....	18
4.3.2 Laminated Object Manufacturing.....	19
4.3.3 Ultrasonic Consolidation .....	20
4.4 Aditivní výroba betonových konstrukcí .....	22
4.4.1 Contour Crafting .....	24
4.4.2 Loughborough University.....	26
4.4.3 WinSun New Materials.....	28
4.4.4 CyBe .....	30
4.4.5 Minibuilders.....	32
4.4.6 D-Shape .....	36
4.5 Shrnutí aditivních metod .....	38

## **PRAKTICKÁ ČÁST**

5 Použitý materiál.....	40
5.1 Plnivo.....	40
5.2 Pojivo.....	41
5.3 Vodní součinitel a přísady .....	41
6 Směs .....	42

6.1	Složení směsi .....	42
6.1.1	Fáze I – samotná směs .....	42
6.1.2	Fáze II – pistole.....	44
6.1.3	Fáze III – tvorba vzorků.....	48
7	Zkoušky .....	51
7.1.	Použité normy.....	51
7.2	Průběh zkoušek.....	52
7.2.1	Zkouška pevnosti v tlaku .....	52
7.2.2	Zkouška pevnosti v tahu za ohybu.....	53
7.3	Vyhodnocení.....	56
7.3.1	Pevnost v tlaku.....	56
7.3.2	Pevnost v tahu za ohybu .....	57
8	Závěr.....	59
	Seznam obrázků .....	61
	Seznam tabulek .....	63
	Seznam použité literatury .....	64



# 1. Úvod

Aditivní výroba, běžněji veřejností označovaná jako 3D tisk, je technologie, která přitahuje stále více pozornosti v mnoha odvětvích. Její vliv je znatelný od prvních známek lékařských využití, přes prefabrikované i „in situ“ stavebnictví, přes strojírenství až po produkty, které mají čistě dekorativní účely.

Aditivní výroba je schopna použít množství vstupních materiálů a je proto velice variabilní co do složení, velikosti i tvarů. Zpravidla je 3D tisk ovlivněn průměrem trysky, tedy tloušťkou tištěných vrstev, která určuje přesnost výsledného produktu vůči virtuálnímu 3D modelu a také hrubost povrchu výsledného produktu.

Z praktického hlediska 3D tisk umožňuje značné urychlení celkového procesu výroby, zvyšuje možnou tvarovou komplexitu finálního výrobku, čímž designérům výrazně rozšiřuje možnosti jejich umělecké tvorby a architektům dává možnost daleko více se realizovat v takzvané „freeform architektuře“.

V neposlední řadě 3D tisk také v návaznosti na vývoj výpočetních programů nabízí topologickou optimalizaci produktu, což často může vést k nepominutelné úspoře materiálu a tím přispět ke snížení ekologické zátěže.

V teoretické části této práce je věnována pozornost základnímu rozdělení výrobních procesů s důrazem na aditivní metody. Jsou uspořádány a popsány jednotlivé technologie, společně s jejich vzájemnými odlišnostmi, výhodami a nevýhodami. Ve svém závěru se teoretická část věnuje technologiím na bázi betonu aplikovaným či aplikovatelným ve stavebnictví. Kromě akademických pracovišť, která se aditivní výrobou neboli 3D tiskem zabývají, jsou popisovány také komerční metody 3D tisku.

Praktická část se nejprve v několika fázích zabývá návrhem betonové směsi, která se pro využití v technologii 3D tisku jeví jako vhodná. Z navržené směsi jsou následně vytvořeny vzorky, u nichž dochází ke zkouškám vybraných materiálových vlastností – krychelné pevnosti v tlaku a pevnosti v tahu za ohybu. Je také zkoumán vliv jednotlivých způsobů uložení provazců materiálu při 3D tisku na zkoušené vlastnosti. Výsledné naměřené pevnosti způsobů uložení směsi jsou porovnávány se vzorky, které byly vytvořeny monoliticky. Tyto monolitické vzorky byly vytvořeny ze stejné směsi, z jaké byly vytvořeny všechny vzorky 3D tisku, ve vyhodnocení výsledků zkoušek jsou pak naměřené pevnosti 3D tištěných vzorků uvedeny procentuálně vůči právě vzorkům vytvořeným monoliticky.





# TEORETICKÁ ČÁST

Výrobní procesy lze dělit do 3 kategorií – formativní metody, subtraktivní metody a aditivní metody. Tyto procesy mezi sebou mohou být libovolně kombinovány pro optimalizaci výsledného produktu. Příklad kombinace dvou z těchto metod je může být frézované bednění. Dopodrobna rozvedeny jsou v rámci této práce metody aditivní, jinak označované jako 3D tisk.

## **2. Formativní metody**

Při užití formativních metod je materiál zpracováván působením ustálené síly (ohýbání), působením série rázů (kování) nebo uložením do formy (odlévání), čímž se mu dostává výsledného tvaru, formy. Při aplikaci formativní metody tedy zůstává množství materiálu na rozdíl od níže popsaných metod subtraktivních téměř konstantní po celou dobu výrobního procesu.

## **3. Subtraktivní metody**

Subtraktivní metoda je opačným dějem níže popsané metody aditivní. Při tomto zpracování je z „bloku“ (zpravidla většího než výsledný produkt) výchozího materiálu odebírán materiál v místech, kde není žádoucí. Děje se tak mnohými způsoby od základního odřezávání a vrtání až po sofistikované frézování nebo používání laseru.

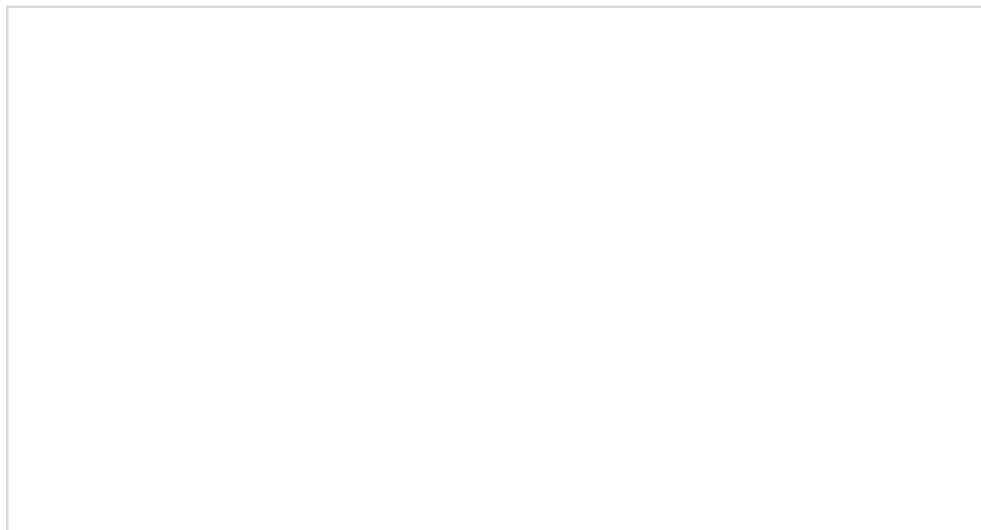
Tato výroba je velice nákladná a také neekologická z hlediska spotřeby materiálu, jelikož ten často není po vytvoření žádaného produktu znovu využitelný a stává se zbytečným odpadem.

Výhodami subtraktivních metod jsou zejména vysoká rychlost výroby, kterou nabízejí, možnost využití přírodních materiálů bez jejich předchozí úpravy a oproti většině technologií 3D tisku výrazně vyšší kvalitu povrchu.

Frézované bednění je příkladem kombinace subtraktivní a formativní metody vyvinuté na dánském technologickém institutu, který v roce 2014 vyhotovil betonovou, tvarově velice komplikovanou konstrukci o délce 21,4 m, viz obr. č. 1. Konstrukce vznikla odlitím do bednění vytvořeného metodou CNC obrábění z extrudovaného

polystyrenu. Bednění tedy bylo vytvořeno subtraktivní metodou s využitím digitální fabrikace, zatímco samotná skulptura vznikla zcela běžnou technologií formativní.

Vzhledem k požadované nízké tloušťce výsledné konstrukce a vzhledem k její komplexitě bylo nutno použít samozhutnitelného materiálu, [1].

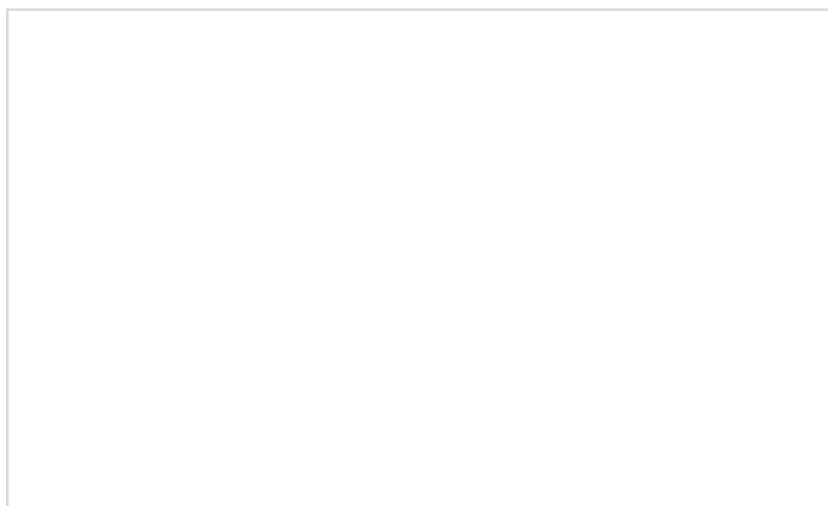


*Obr. č. 1: Skulptura vytvořena ve frézovaném bednění, Danish Technological Institute, zdroj:[1]*

## **4. Aditivní metody (3D tisk)**

Aditivní metody, označované pojmem 3D tisk, jsou založeny na systematickém vrstvení materiálu, tedy postupném horizontálním nanášení jednotlivých řezů objektem vytvořených na základě slicování 3D model. Je proto nutné vytvořit skutečně precizní virtuální 3D model zamýšleného objektu, jenž je poté softwarem rozdělen do jednotlivých řezů, které by měly v ideálním případě tvořit uzavřené křivky.

Tyto metody jsou žádané v mnoha oborech od strojírenství po výrobu medicínských pomůcek. Zejména některé metody (například 3D tisk z termoplastu) se dnes natolik rozšířily, že jsou už několik let cenově a technologicky dostupné pro „domácí užití nadšenců“, k čemuž napomáhá možnost replikace samotné 3D tiskárny, během níž je jedna tiskárna schopna tisknout některé součástky pro druhou, viz obr. č. 2.



*Obr. č. 2: „Sebe replikující“ tiskárna, model Prusa Mendel,  
zdroj:[<https://www.linuxexpres.cz/hardware/3d-tisk>]*

I ve stavebnictví mohou být tyto metody výhodné z mnoha důvodů, například urychlení výrobního procesu díky absenci výroby bednění a procesu jeho aplikace, úspora materiálu díky možnosti ukládání materiálu pouze do míst potřeby a volnost, kterou takové technologie poskytují architektům díky velkým tvarovým možnostem výsledné konstrukce (freeform architecture).

Jedno ze základních dělení aditivní výroby je dle výchozího materiálu, který může být na bázi pevné, tekuté nebo práškové.

V dalším textu jsou některé technologie popsány podrobněji, [2].

## **4.1 Aditivní výroba na tekuté bázi**

Aditivní metody na bázi tekutin ve většině případů pracují s tekutou pryskyřicí, kterou během procesu vytvrzují ozařováním konkrétních oblastí UV zářením, což spouští reakci na ozářeném povrchu v žádané vrstvě materiálu, zpravidla tyto procesy vyžadují velice přesné seřízení.

### **4.1.1. 3D Systems - SLA**

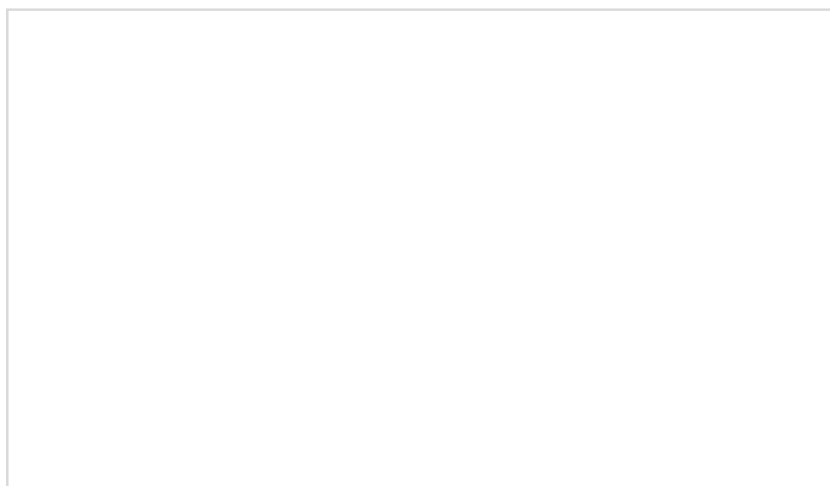
Průkopníkem 3D tisku je společnost 3D Systems (zakladatelé Charles W. Hull a Raymond S. Freed, 1986), která v USA roku 1987 vytvořila první tiskárnu užívanou pro komerční účely. Jedná se o 3D tisk na tekuté bázi. Tato tiskárna nese označení SLA-1 (Stereolithography Apparatus, obr. č. 3) a používá technologii stereolitografie, při které je na materiál aplikováno UV záření, což má za následek vytvrzení výchozího materiálu.

Pro 3D tisk na tekuté bázi je nejčastěji výchozím materiálem pryskyřice, která je při procesu vytvrzována UV zářením. Při výrobě je tekutá pryskyřice umístěna do kádě, do které se ponoří deska, na níž bude tisk aplikován. Hloubka jejího ponoření je určena zamýšlenou tloušťkou vrstvy.

Poté, co deska zaujala v kádi požadovanou pozici, je hladina pryskyřice zarovnáвана stírací čepelí pro přesnost tloušťky vrstvy. Vytvrzování materiálu je zahájeno působením UV záření (směřovaného soustavou čoček a zrcadel) na hladinu pryskyřice, což zapříčiní reakci fotopolymerů. Vzhledem k umístění základní desky těsně pod povrchem dochází k reakci pouze mezi hladinou a tuhým podkladem, kterým je pro první vrstvu základní deska pro další vrstvy pak předchozí vytvrzená vrstva.

Po uzavření křivky každé vrstvy je deska řídicí jednotkou posunuta směrem dolů o tloušťku další zamýšlené vrstvy, následně je opět zarovnáвана hladina v kádi za účelem udržení navržené tloušťky v celém horizontálním řezu a pokračuje se v ozařování hladiny.

Po dokončení všech vrstev tištěného výrobku je z kádě vypuštěna zbylá tekutá pryskyřice a předmět může být dle potřeby dále zpracováван. Přesnost tisku odpovídá množství parametrů – typ, délka a intenzita záření, tloušťka jednotlivých vrstev, složitost tvaru tištěného předmětu apod., [2].



Obr. č. 3: Metoda tisku SLA, zdroj:[[sourcegraphics.com/company/blog/fdm-vs-sla/](http://sourcegraphics.com/company/blog/fdm-vs-sla/)]

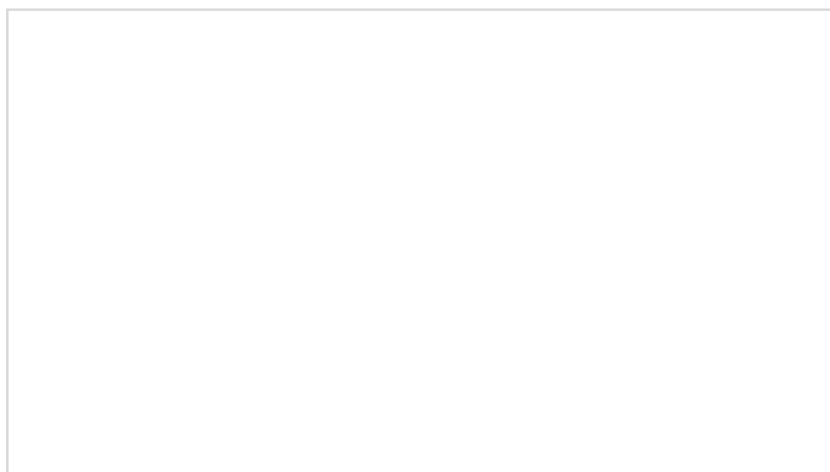
#### 4.1.2 PolyJet

Stejně jako v metodě popisované v 4.1.1 se jedná o 3D tisk na tekuté bázi, nicméně v této technologii probíhá tisk v suchém prostředí, kde je výchozí materiál na desku umístován soustavou trysek, viz obr. č. 4. U této technologie je požadovaná minimální vrstva výchozího materiálu tloušťky 0,015 mm. Po umístění určené vrstvy fotopolymeru nebo termoplastu na desku dle horizontálního řezu modelem probíhá opět ozařování a tím vytvrzování vrstvy materiálu UV zářením.

Pohyb soustavy trysek je možný pouze dvourozměrně, přičemž vertikální posun je stejně jako v předchozí metodě realizován poklesem základové desky vždy po vyhotovení každé jednotlivé vrstvy.

Tato technologie zajišťuje díky soustavě trysek a odděleným zásobníkům možnost aplikace více materiálů najednou, kde jedním materiálem je materiál výsledného produktu a druhým podpůrný materiál, který je využíván po dobu trvání procesu tisku. Poté může být snadno odstraněn manuálně, což ovšem bohužel může zapříčinit drobná poškození výsledného produktu popř. tlakovou vodou.

Tato metoda má oproti metodě předchozí nevýhodu ve vysoké spotřebě gelového podpůrného materiálu, jelikož ten nesmí být použit vícekrát.



Obr. č. 4: Metoda tisku PolyJet, zdroj:[[www.additive.blog/knowledge-base/3d-printers/photopolymer-jetting-3d-printers-polyjet-multijet/](http://www.additive.blog/knowledge-base/3d-printers/photopolymer-jetting-3d-printers-polyjet-multijet/)]

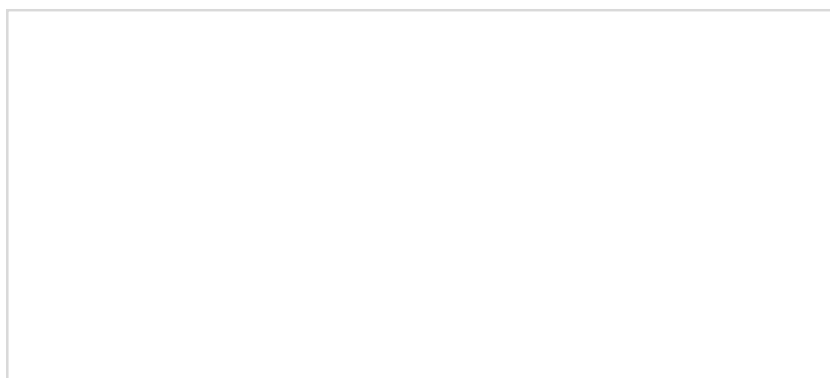
### 4.1.3 EnvisionTEC - Perfactory

I jedna z metod společnosti EnvisionTEC je založena na tekuté bázi. Je ve své podstatě „mezikrokem“ mezi SLA popisované v 4.1.1 a PolyJet v 4.1.2.

Stejně jako PolyJet využívá podpurný materiál, ovšem ten je na rozdíl od metody PolyJet stejného složení, jako materiál pro samotný výrobek. Rozdíl mezi nimi vzniká až v samotném procesu tisku, kde je horizontální řez výrobku zcela vytvrzen, zatímco k vytvrzení podpurného materiálu dochází pouze částečně.

S technologií SLA má tato metoda společné prostředí tisku, tedy kád' vyplněná fotopolymerem. Samotná kád' je tvořena sklem. Na rozdíl od SLA však není ozařována hladina kádě, nýbrž její dno, od kterého se základní deska po vytvoření každé vrstvy pohybuje směrem vzhůru.

Výsledný produkt je tedy oproti předchozím metodám vytvářen od horních vrstev ke spodním (někdy je proto model vytvořen vzhůru nohama). Tím je zamezeno ztrátě materiálu při zarovnávání hladiny při užití technologie SLA.



Obr. č. 5: Tiskárna Perfactory, společnost EnvisionTEC, zdroj:[3]

## **4.2 Aditivní výroba na práškové bázi**

Aditivní výroby s výchozím materiálem v podobě prášku lze rozdělit na dvě kategorie. V první dochází ke spojení jednotlivých částic působením záření, ve druhé je toto zajištěno nanášením lepicího prostředku. Zatímco první zmíněný způsob výroby se vyznačuje vyšší pevností, jelikož ta je závislá pouze na pevnosti jediného materiálu, metody s užitím pojiva mívají nižší náklady a zpravidla jsou jejich produkty vytvářeny vyšší rychlostí.

### **4.2.1 3D Systems - Selective Laser Sintering**

Slinování je pojem, který označuje aplikaci tepla a tlaku na práškový materiál za účelem jeho transformace na pevný produkt předem definovaného tvaru. V tomto případě je užíváno výchozího materiálu, kde velikost zrna je přibližně 90  $\mu\text{m}$ ,

Technologie selektivního laserového slinování pochází z University of Texas at Austin, jejíž tamní výzkumný tým si ji roku 1989 nechal patentovat. Technologie nápadně připomíná technologii SLA popisovanou v 4.1.1, není tedy nijak zarážející, že si její výrobu osvojila stejná společnost – 3D Systems.

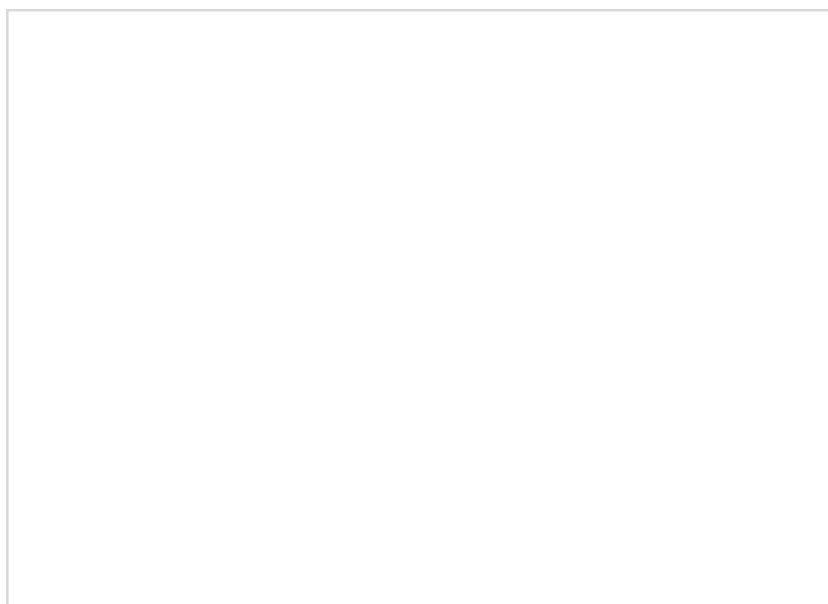
Stejně jako u SLA, i při této technologii je výchozí, zde drobnozrný, materiál umístěn v kádi, nad níž je umístěno zařízení generující postupně v odpovídajících částech řezu záření. Díky působení tohoto záření dochází posléze k vytvoření jedné vrstvy tištěného předmětu. I pro tuto technologii je použit  $\text{CO}_2$  laser (výkon laseru 0,2-1 kW). Působením laseru na materiál je materiál v určených plochách ohříván na teplotu „skelného přechodu“ (to vyžaduje velkou energetickou dávku). Tato teplota se nachází nepatrně pod teplotou tání použitého materiálu a neodpovídá ani pevnému, ani tekutému stavu materiálu, ale rosolovité „mezifázi“ mezi těmito dvěma stavy. V tomto stavu je povrch jednotlivých zrn oslaben, dochází k deformaci zrn a k jejich spojování se zrny v okolí. Následně je po dokončení vrstvy základní deska posunuta o tloušťku jedné vrstvy níže.

Materiál, který při spékání či slinutí vrstvy zůstal nepoužitý, slouží jako podpůrný materiál. To je výhodou oproti technologiím popisovaným v kapitole věnované aditivním metodám na tekuté bázi, jelikož například v technologii PolyJet dochází k jisté neefektivitě ztrátou podpůrného materiálu, který má jiné složení než stavební materiál a nesmí být použit vícekrát, a v technologii tiskárny Perfactory je sice podpůrný materiál je stejného složení jako materiál stavební, ovšem ani zde není znovu využitelný z důvodu jeho částečného vytvrzení. Stavební materiál vzhledem ke svému

skupenství a umístění do kádě může sloužit jako podpůrný beze změny a zůstává tedy nedotčený. Po dokončení tisku je odstraněn tlakem nebo naopak podtlakem vzduchu a může být znovu umístěn do zásobníků. S faktem, že nevyužitý materiál poskytuje často dostatečnou podporu tištěného produktu a není tedy v mnoha případech zapotřebí vytvrzování podpůrného materiálu, zároveň také odpadá potřeba návrhu jeho rozmístění, čímž dochází k urychlení procesu tisku, [4].

Je důležité zmínit, že na rozdíl od SLA, není první vrstva u SLS tištěna na samotnou desku, ale pouze na pečlivě připravený povrch práškového materiálu, který následně klesá poklesem základní desky pod ním. Je proto nutné, zajistit dokonalou rovnoměrnost povrchu materiálu v kádi, aby byla celá vrstva o stejné tloušťce a nacházela se v jedné rovině. To je zajištěno dvěma zásobníky, které se pro snazší rozvrstvení nachází po jednom po stranách kádě určené pro tisk, a válcem, který urovnává povrch pro zpracování další vrstvy, viz obr. č. 6.

Také je vhodné dodat, že pro použití teploty skelného přechodu není materiál skutečně taven a jeho spojování může tedy vytvořit porézní produkt s proměnlivou hustotou materiálu a horším povrchem, který ovšem lze upravit například broušením.



*Obr. č. 6: Technologie Selective Laser Sintering, zdroj:[5]*

#### **4.2.2 ColorJet Printing**

Technologie ColorJet Printing je založena na tiskové hlavici, která je umístěna nad materiálem. V první fázi je ze zásobníku na desce vytvořena rovnoměrná tenká vrstva práškového materiálu. Tisková hlavice pak na tento práškový materiál vstříkuje

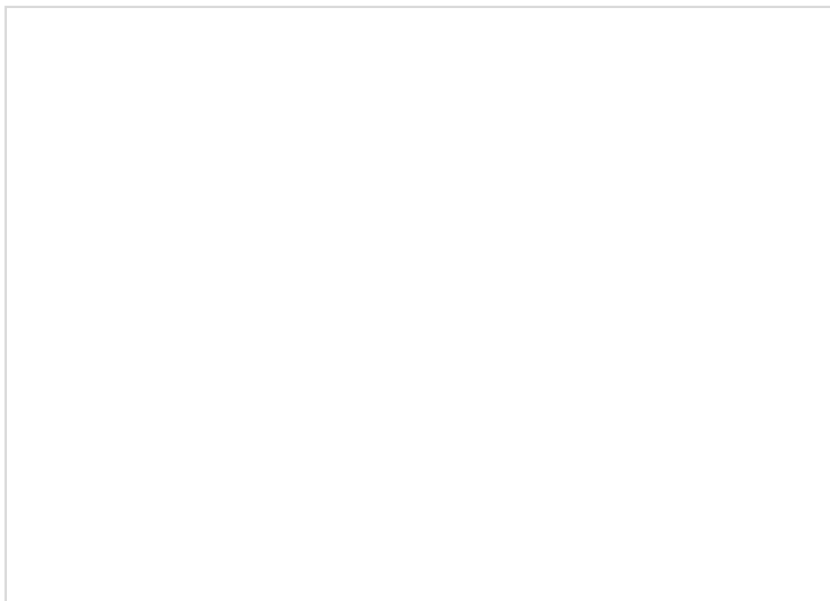


spojovací materiál, který prášek v místech odpovídajících horizontálnímu řezu tištěným objektem vytvrdí, poté poklesne základní deska, je znovu nanесena vrstva materiálu pro další vrstvu a pokračuje se tak do dokončení prvku, viz obr. č. 7.

Stejně jako v předchozích aditivních metodách na bázi prášků slouží nepoužitý materiál jako podpůrný materiál pro produkt, dokud není tisk výrobku dokončen a poté je tlakem vzduchu odstraněn a znovu využit. K jemnějšímu očištění výrobku je použito vody, po čemž následuje nutná povrchová úprava, [6].

Technologie CJP se vyznačuje rychlostí tisku, stejně jako předchozích metod na bázi prášku efektivitou využití materiálu a nižší spotřebou energie z důvodu použití lepidla místo laseru. Na rozdíl od ostatních popisovaných metod je možné použití více barev pro jeden výrobek, stačí změnit barvu použitého lepicího prostředku.

Vzhledem k použití dvou stavebních materiálů – práškového materiálu a lepidla, mívají předměty vytvořené touto metodou nižší pevnosti než předměty vytvořené Selective Laser Sintering. Tato pevnost je závislá na pevnosti použitého lepidla.



Obr. č. 7: ColorJet Printing tiskárna, zdroj:[6]

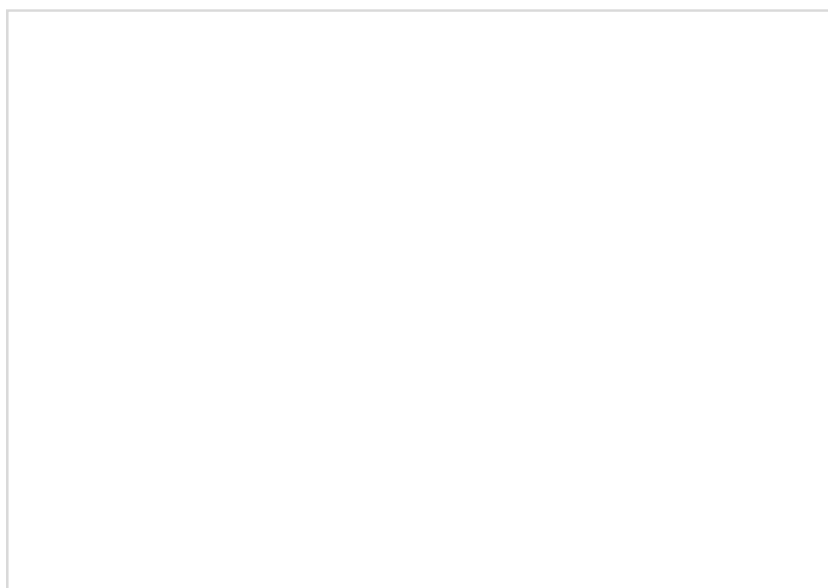
### 4.2.3 Voxeljet

Přestože tiskárna bavorské společnosti Voxeljet stejně jako metoda ColorJet využívá pro tisk vstřikování pojiva/lepidla do sypkého materiálu, vykazuje oproti předchozí metodě značnou spotřebu energie, což je negativním efektem nároků, které jsou na ni kladeny, mimo jiné rychlost, kterou je schopna pracovat. Další nevýhodou je

velký prostor zabíraný samotnou tiskárnou vůči velikosti tištěného předmětu, viz obr. č. 7.

Zmíněná rychlost ovšem tyto nevýhody může vyvážit, tisková hlava obsahuje desetitisíce trysek, umožňuje proto tisknout předměty o velkých rozměrech ( $A=2$  m,  $B=4$  m,  $V=1$  m) rychlostí jedné vrstvy o tloušťce 0,3 mm za pouhých 75 s, [7].

Při dostatečném uvážení namáhání prvku a při použití vhodného materiálu (křemičitý písek) lze tuto metodu pro některé prefabrikované prvky využít i ve stavebnictví.



*Obr. č. 8: Voxeljet 3D tisk, světlé části – nevyužitý materiál, tmavé části – materiál s pojivem, zdroj:[7]*

### **4.3 Aditivní výroba na pevné bázi**

Aditivní metody na pevné bázi zahrnují jako výchozí materiál jakýkoli materiál v pevném skupenství s výjimkou prášků, které jsou popisovány v předchozí kapitole. Mezi jednotlivými technologiemi jsou rozdíly daleko zásadnější než mezi technologiemi na bázi tekuté.

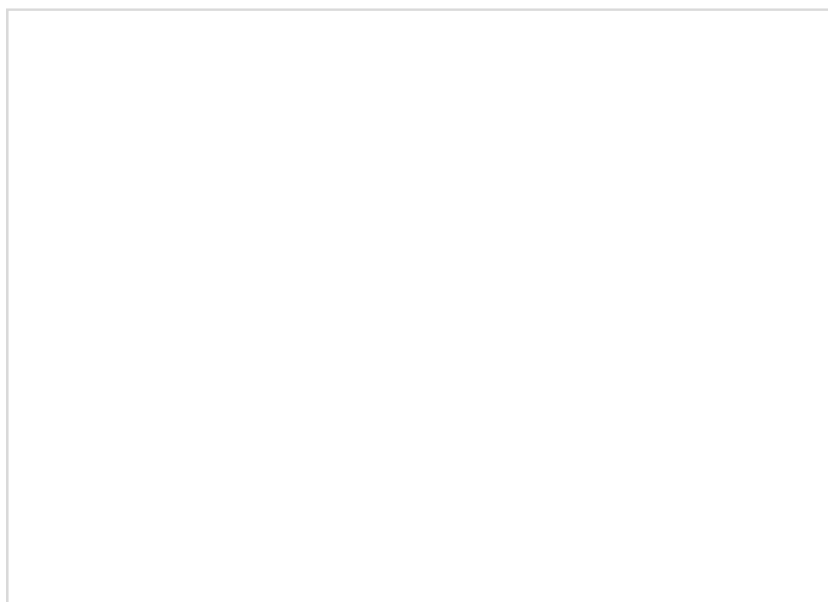
#### **4.3.1 Fused Deposition Modeling**

Pro FDM, která má počátky v roce 1988, je výchozím materiálem termoplast v podobě tenkých vláken. Průměr vláken výrazně ovlivňuje kvalitu, respektive přesnost výsledného výrobku. Tato vlákna jsou při tisku postupně odvíjena z kotouče a během průchodu hlavicí nahřívána na teplotu  $T_{1+1}$ , kde  $T_1$  reprezentuje tavnou teplotu materiálu, [28]. V této fázi je polotekutý materiál tryskou opisující horizontální řez předmětem vytlačen na desku, kde dochází díky teplotě okolního vzduchu k opětovnému přechodu do pevného stavu, viz obr. č. 9.

Vzhledem k rychlosti tuhnutí jednotlivých vrstev jsou tyto vrstvy na finálním výrobku jasně zřetelné, nicméně hrubý povrch lze dalšími úpravami odstranit. Bohužel rychlost tuhnutí má přes některé nesporné výhody jako například rychlost, má i negativní dopady na produkt, například vysoké napětí v materiálu, které je vyvoláno prudkým ochlazením materiálu při jeho opuštění tiskové hlavice. To může mít za následek smršťování a nerovnoměrné deformace produktu.

Stejně jako v některých předchozích popisovaných metodách dochází i zde k tištění dvěma materiály, jedním podpurným, který může být následně vymýváním vodou nebo ručně odstraněn, a jedním, který tvoří výsledný produkt.

Tato metoda je jednou z nejrozšířenější v prostředí „nadšenců“, protože vedle tiskárny Stratasys, která dokáže tvořit výrobky až 2772 x 1683 x 2027 mm, [8], jsou na trhu k dostání například tiskárny společnosti RepRap, jejichž některé součástky (jak bylo popsáno v úvodu aditivních metod) lze replikovat, je nutno doplnit je několika kovovými prvky, tryskou a elektronikou. Jejich montáž není výrazně nákladná, potřebný software je ke stažení zdarma a i na českém internetu lze najít mnoho návodů k obsluze softwaru a kompletaci tiskárny.



Obr. č. 9: Tiskárna FDM, a) výchozí materiál, b) tavení materiálu, c) tištěný výrobek, d) podpůrný materiál, e) pohyblivá základní deska, zdroj: [en.wikipedia.org/wiki/Fused\_deposition\_modeling]

### 4.3.2 *Laminated Object Manufacturing*

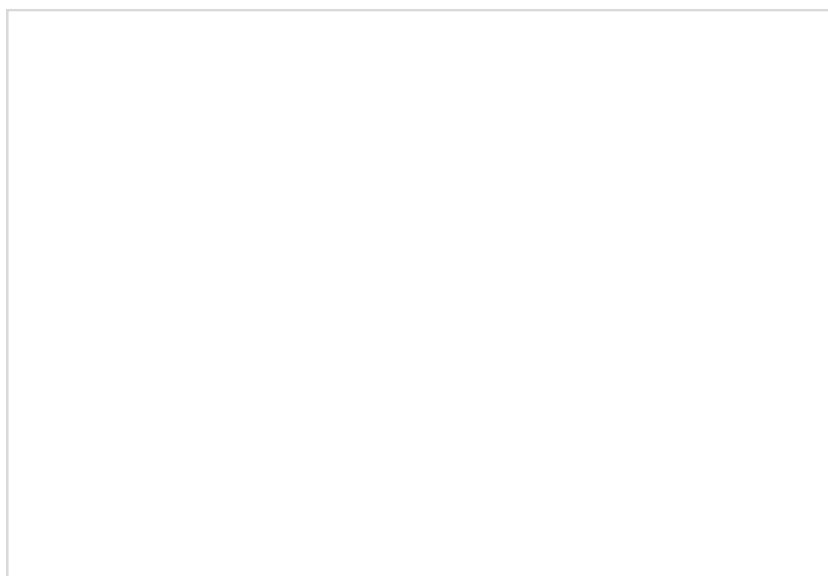
Technologie LOM je jednou z materiálově velice neúsporných technologií, která by se dala označit za kombinaci aditivní a subtraktivní metody. Je při ní využíván laser, který ve výchozím materiálu provádí řez, jehož působení odpovídá tloušťce jedné vrstvy.

Pro provedení vrstvy je vždy z role výchozího materiálu odrolována odpovídající část, která je pokryta tenkou vrstvou lepidla. Laser na bázi CO<sub>2</sub> je, jak již bylo zmíněno, nakonfigurován tak, aby prořízl jen poslední nanesenou vrstvu materiálu, viz obr. č. 10. Nežádoucí, odříznutá část materiálu je poté odstraněna od části, která má zůstat v předmětu zachována. Základní deska společně s již nanesenými vrstvami je v této chvíli oddálena od průběžného materiálu mezi počáteční a koncovou rolí, proříznutý materiál je narolován na koncovou roli, nanesené vrstvy se znovu přiblíží k novému materiálu z počáteční role, ten je přitisknut na předchozí vrstvu, nahřát a proces je opakován, [2]. U této technologie je počítáno s následnými povrchovými úpravami, za účelem snížení průniku vlhkosti do materiálu.

Značnou výhodou LOM je rychlost, se kterou lze předměty tisknout, jelikož je nutné opisovat hlavicí pouze obrys prvku v jednotlivých horizontálních řezech, zatímco v jiných technologiích bylo třeba postupně pokrýt celou jeho plochu.

Pevnost takto vytvořených produktů výrazně závisí na vlastnostech lepidla, protože to je nanášeno mezi každou vrstvou materiálu na rozdíl od ostatních technologií, kdy je předmět tvořen výhradně jedním zvoleným materiálem.

U této technologie je možné na stejné tiskárně použít různé materiály, je nicméně také nutné velice přesně kalibrovat laser, aby nedošlo k poškození předchozích vrstev při nanášení vrstvy nové.



Obr. č. 10: *Laminated Object Manufacturing*, zdroj:[<http://blog.nus.edu.sg/u0804594/common-rp-techniques/laminated-object-manufacturing-lom/>]

### 4.3.3 Ultrasonic Consolidation

Stejně jako u metody LOM kombinuje tato metoda aditivní a subtraktivní postup a stejně jako u LOM se jedná o spojování jednotlivých na sebe pokládaných vrstev, v tomto případě je však výchozím materiálem kov, jelikož pro spojování vrstev je zapotřebí materiálu, který vhodně reaguje na vysokou teplotu. Nedochozí ovšem k jejich tavení.

Jednotlivé tenké fólie jsou slučovány za použití ultrazvuku, dochází ke svaření vrstev. Svařování je následováno frézováním pro finální úpravu předmětu, viz obr. č. 11, [9].



*Obr. č. 11: Ultrasonic Consolidation, zdroj:[9]*

#### **4.4 Aditivní výroba betonových konstrukcí**

Ve stavebnictví zatím 3D tisk není běžným prostředkem, je mu ale věnována čím dál větší pozornost, jelikož možnosti samotné realizace stavebních konstrukcí zaostávají za možnostmi navrhování optimalizovaných konstrukcí s výraznou volností tvarů díky dostupným výpočetním programům.

Užíváním dnes běžných metod výstavby dochází často k nevhodnému nakládání se stavebním materiálem, časem a pracovní silou a kreativita tvůrců možných zajímavých konstrukcí zůstává zatím v mnohých případech nevyužita, jelikož jejich návrhy jsou ekonomicky příliš náročné, pokud má být požadovaného tvaru dosaženo běžnými technologiemi, což mívá při výběrových řízeních většiny zakázek přednost před estetikou, originalitou nebo naopak odpovídajícimu přizpůsobení konstrukce zamýšlené lokalitě a její současné zástavbě. V případě rozvinutí technologie 3D tisku lze dospět do stavu, kdy již tvar nebude pro cenu limitujícím faktorem, místo něj se rozhodující stane spotřeba materiálu.

Jedním z možných materiálů pro 3D tisk je vzhledem ke své vysoké tvárnosti beton. Ten je však omezen zejména použitým bedněním, jelikož to vyžaduje vlastní materiál, podpůrné konstrukce, množství práce a také času. Oproti v dnešní době běžným technologiím nabízí 3D tisk konstrukcí betonu mnoho nových možností, ať už se jedná o prefabrikované konstrukce (s lepší kontrolovatelností kvality a přesnosti jednotlivých prvků, omezení možnostmi dopravy) nebo konstrukce prováděné „in situ“ (jednodušší konstrukce, rozšíření o možnosti zakřivení prvků, zatímco např. konzoly a „plástvové struktury“ je třeba tisknout v jiných rovinách a jsou proto odkázány do prefabrikované výroby).

Na základě předchozího lze přínos 3D tisku do stavebnictví rozdělit do tří přístupů:

- 1) 3D tisk nabízí možnosti urychlení a úspor výstavby díky její automatizaci a výraznému omezení lidského faktoru. Zásadní je z hlediska urychlení výroby betonových konstrukcí také možnost eliminace použití bednění.
- 2) Vzhledem k faktu, že při 3D tisku není zapotřebí bednění, odpadájí omezení s ním spojená, zejména tvarová jednoduchost a opakování jednotlivých segmentů budované konstrukce pro násobné využití bednění. Výrazně se tím rozšiřují možnosti tvarové komplexity budoucích konstrukcí, čímž se architektům otevírající mnohé dveře k tzv. „freeform architecture“.
- 3) Dále díky již zmíněné absenci bednění a výpočetním programům lze využít maximální optimalizaci místo užívání opakovatelných a často předimenzovaných prvků, díky čemuž může dojít ke snižování dopadu na životní prostředí na základě výrazné úspory použitého stavebního materiálu.

V podkapitolách jsou popsány některé z dnes dostupných technologií 3D tisku betonových konstrukcí.

Kromě poslední zmíněné technologie (D-Shape) se jedná u všech popisovaných technologií o liniový tisk. Při liniovém tisku betonu vstupuje materiál do trysky již ve finálním stadiu a z trysky je vytlačován ve formě souvislého provazce, které jsou na sebe poté vrstveny. Provazce materiálu proto musí vykazovat tvarovou stálost a schopnost unést další vrstvy ihned po dokončení vrstvy, ve které se nachází.

Plošný tisk vychází z výše popisovaných aditivních metod na bázi prášků, jejichž zrna jsou poté spojována působením záření nebo spojovacím prostředkem. Do této kategorie zapadá poslední zmiňovaná technologie - technologie D-Shape.



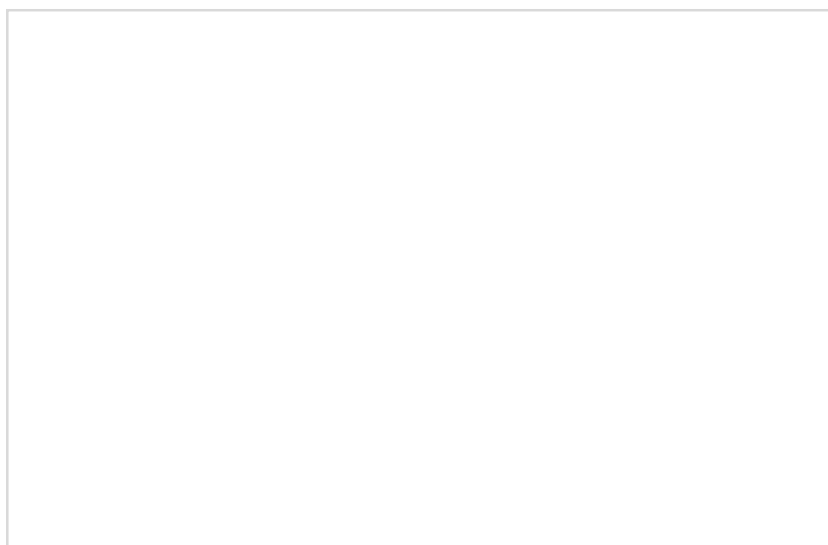
#### 4.4.1 *Contour Crafting*

Průkopníkem 3D tisku s betonovou směsí jako výchozím materiálem je Countour Crafting. Tryska je zde osazena na rámové konstrukci, sama rámová konstrukce je ovšem dvojrozměrná a ve třetím rozměru pohyblivá po kolejnici, což nabízí široké možnosti ohledně rozměru tištěného produktu. Technologie je zamýšlena právě na zhotovení celé budovy popřípadě řady budov v jejich finální lokalitě, [10].

Omezením je v takovém případě délka kolejnice, po které se rám tiskárny pohybuje. Komplikací použití technologie pro běžné provádění staveb je právě kolejnice, jelikož tiskárna takových rozměrů s možností pohybu bude vyžadovat množství přípravných prací, protože tiskárna bude stavbou sama o sobě.

Technologii si její tvůrce profesor Behkrokh Khosnevis z university v Jižní Kalifornii nechal patentovat, [11], a kombinuje v ní aditivní metodu s metodou formativní.

Tryska je pro tuto metodu tisku po stranách vybavena hladítky, [12], která směs zároveň tvarují do tvaru rovnoběžníku, díky čemuž jednotlivé vrstvy společně opticky působí celistvěji, mají větší styčnou plochu, což snižuje napětí mezi jednotlivými vrstvami a zároveň je omezen prostor pro pronikání nežádoucích látek do konstrukce, viz obr. č. 12.

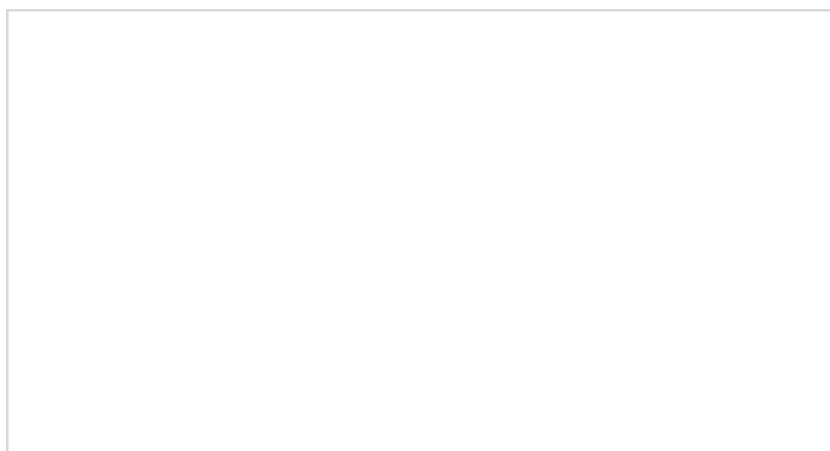


Obr. č. 12: Tryska s bočními hladítky, zdroj:[12]

Problém vyztužování tištěných konstrukcí může být kromě vkládání výztuže mezi jednotlivé vrstvy řešen například vytištěním bočních povrchů stěny, které pak slouží jako ztracené bednění, do něhož je vložena výztuž a následně je vyplněno v celém objemu prvku betonem nebo jiným materiálem.

To je však v přímém rozporu se 3. zmíněným přínosem 3D tisku, tedy optimalizací a úsporou použitého materiálu. Lze proto na základě konkrétních podmínek vnitřní prostor svislých prvků vyplňovat pouze částečně a vytvořit tak jakousi nedokonale stykovanou příhradovou konstrukci (pro takový případ je užíváno tři trysek – dvě s bočními hladítky na obvod prvku a třetí na výplň prvku, ta nevyžaduje hladítka pro úpravu povrchu), [10].

Vedle hladítek obsahuje rámová konstrukce jako další přednost pohyblivé rameno, jehož úkolem je umisťovat do tištěné stavby během tisku například prefabrikované překlady a další prefabrikované horizontální konstrukce (pracuje se i na tiskárně, která by toto rameno neobsahovala a tvořila konstrukce obsahující klenby), [13]. Kombinace 3D tisku „in situ“ s prefabrikovanými kusy umožňuje další zvýšení rychlosti vyhotovení budovy díky využití výhod obou technologií. Oproti zcela prefabrikovaným konstrukcím není totiž Countour Crafting rozměrově zcela závislý na možnostech dopravy a může tisknout v konečném uložení prvku bez další manipulace, na druhou stranu oproti dalším „in situ“ technologiím je schopna si snadno a rychle poradit s horizontálními prvky, viz obr. č. 13.



*Obr. č. 13: Rámová konstrukce CC tiskárny s ramenem pro umístění horizontálních prvků, zdroj:[14]*

Zakřivení povrchu nebo šikmých ploch ve vertikálním směru je dosaženo možností tisku mezi hladítky s nastavitelným sklonem.

Vývoj CC tisku stále pokračuje a v současné době je tiskárna CC technologie opatřena dvěma samostatnými tryskami s hladítky za účelem urychlení tisku.

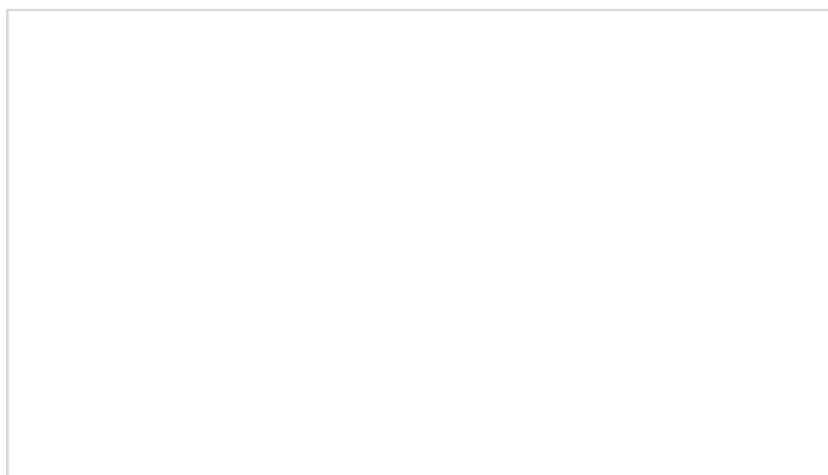
#### 4.4.2 Loughborough University

Aditivními metodami se zabývá také například výzkumný tým britské Loughborough University. Tématu 3D tisku se univerzita začala věnovat roku 2007 a v roce 2014 navázala spolupráci se Skanska UK, za účelem vývoje robota tisknouceho 3D technologií betonové konstrukce, [15].

Tamní pracoviště disponuje CNC řídicí jednotkou (Computer numerical control – pro pohyb v prostoru je užíváno souřadnic X, Y, Z, do kterých je po jednotlivých bodech kompletně převeden celý počítačový model, a body jsou následně rozřazeny do řezů). Tato jednotka pak ovládá trysku umístěnou na rámové konstrukci (A=5,5 m, B=4,4 m, V=5,5 m), viz obr. č. 14.

Pohyb na rámové konstrukci připomíná jeřábovou dráhu – v jednom rozměru se tryska pohybuje po nosníku, ten je na obou svých koncích uložen na kolejnici. Zde je však navíc pohyb kolejníc nahoru a dolů. Oproti předchozím popisovaným aditivním metodám je tedy třetí rozměr dodán pohybem trysky, nikoli základní desky. Ve všech třech rozměrech je tedy výsledný produkt omezen právě velikostí rámové konstrukce.

Kontinuita tisku je zajištěna zásobníkem umístěným nad tryskou, se kterou se společně pohybuje, jelikož je nutné pro zachování vyžadovaných vlastností betonu, aby dráha materiálu byla co možná nejkratší. U této tiskárny se nejedná o celkově provázaný proces tisku – směs je vytvářena po menších dávkách a postupně vkládána do zásobníku tiskárny.



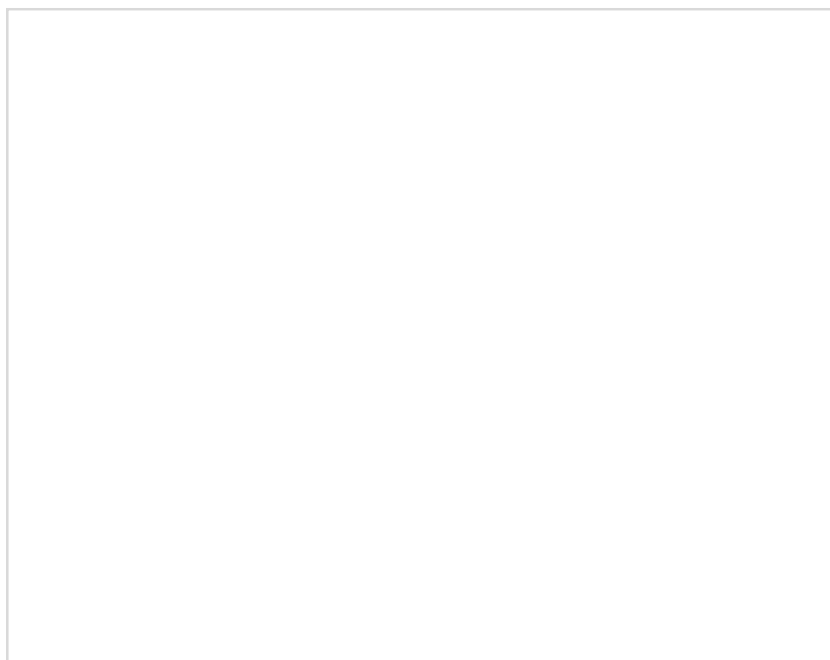
Obr. č. 14: Rámová konstrukce tiskárny, Loughborough University, zdroj:[16]

Na pracovišti vznikají také dekorační výrobky z betonu. Pro tyto účely vyvinula univerzita vlastní UHPC (Ultra High Performance Concrete) směs, kde je zvýšení pevnosti kromě další výztuže zajištěno vlákny (objemová hmotnost směsi

$\rho=2301,2 \text{ kg/m}^3$ , množství vláken  $1,2 \text{ kg/m}^3$ ), [17][18]. Tato směs je tištěna tryskami o maximálním průměru 9 mm rychlostí cca  $1,4 \text{ kg/min}$ , což odpovídá při průměru 9 mm asi 9,5 m dlouhému provazci, [19].

Jedním z jejich prezentovaných výrobků je zakřivená lavička „Wonder bench“ (A=2,0 m, B=0,9m, V=0,8 m), [11]. Výška nanášené vrstvy výrobku je přibližně 6 mm, výrobek má 128 vrstev, celkový čas tisku byl přibližně 43 hodin, [17]. Lavička obsahuje dutiny, které kromě vylehčení její konstrukce demonstrují možnost umístění instalací či předpjaté výztuže do produktu.

Na obr. č. 15 je zřetelný pro aditivní metody obecně typický hrubý povrch. To sice není překážkou pro drobné předměty dekorativního účelu, nicméně pro 3D tisk budov by bylo zapotřebí na tisk navázat povrchovou úpravou.



Obr. č. 15: Wonder bench z roku 2012, Loughborough University, zdroj:[20]

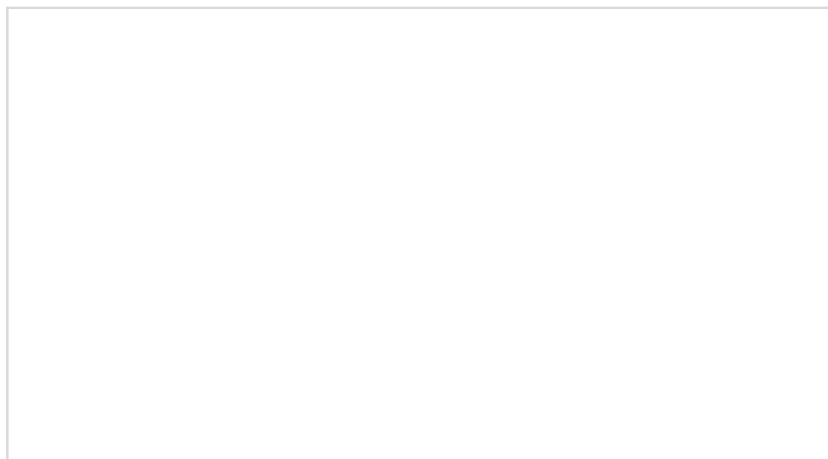
#### 4.4.3 *WinSun New Materials*

WinSun New Material je společnost operující v Číně. Stejně jako Loughborough se zabývají stacionárním tiskem, jejich tiskárna má rozměry  $A=10$  m,  $B=40$  m,  $V=6,4$  m, [10]. Jedná se v současné době o největší tiskárnu na světě, nicméně se lze domnívat, že technologie není původní, ale staví na technologii Countour Crafting popisované v 4.4.1, jak uvádí deník The Guardian, [21], - staví se stejně jak k výztuži, kterou umisťuje mezi jednotlivé vrstvy, případně do nevyplněného prostoru pro následné předpínání, tak k částečnému vyplňování prostoru mezi obrysy tištěné konstrukce, [21].

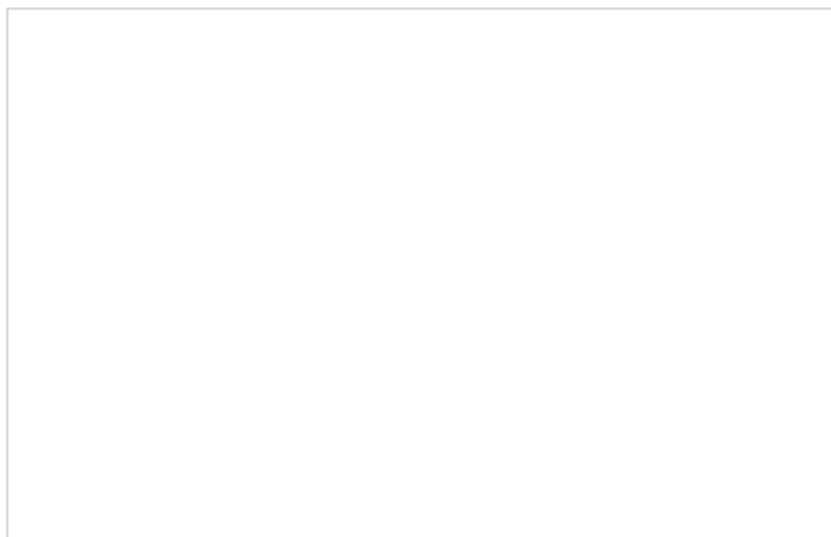
Na rozdíl od Loughborough Univerzity má tryska obdélníkový tvar, vzniká proto hladší povrch a nejsou takové nároky na povrchovou úpravu.

Na této tiskárně vznikají velké, tvarově složité prefabrikované prvky, které jsou později na konečném místě sestavovány do výsledné konstrukce. Technologie proto umožňuje oproti například 4.4.2 výrazně širší aplikaci 3D tištěných výrobků vzhledem k faktu, že poskytuje větší pracovní prostor a zároveň nedochází tisku celého předmětu, ale pouze jeho částí, které jsou následně zabudovány do finálního produktu, je proto omezena nároky na dopravu jednotlivých dílců. Tištěné prvky jsou do konstrukcí zabudovávány zpravidla kolmo na rovinu tisku.

Technologie WinSun je již aplikovaná do výstavby a bývá kombinována s prefabrikáty běžné výroby, jelikož technologií WinSun jsou často, zejména u komplikovanějších konstrukcí tištěny pouze obvodové horizontální a vertikální konstrukce a veškeré vnitřní konstrukce jako překlady, schodiště i vnitřní nosné prvky horizontální i vertikální jsou doplněny ze standardní výroby, viz obr. č. 16 na straně 30 a obr. č 17 a 18 na straně 31.



Obr. č. 16: Proces tisku, WinSun, zdroj:[22]



*Obr. č. 17: Montáž prefabrikovaných částí, WinSun, zdroj:[22]*



*Obr. č. 18: Příklad prefabrikovaného prvku, WinSun, zdroj:[22]*

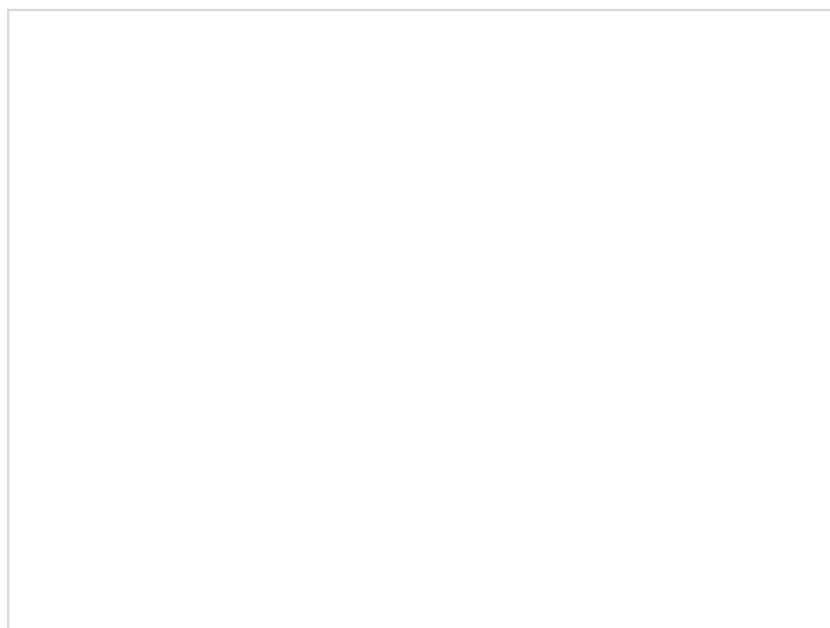
#### 4.4.4 *CyBe*

Na rozdíl od výše popsaných technologií s užitím rámových konstrukcí, metoda společnosti CyBe realizuje tisk pomocí robotické ruky o dosahu 3,15 m zakončeného tryskou a není tudíž pro výrobu menších objektů zapotřebí výrazně většího prostoru pro samotnou tiskárnu, jak tomu bylo u všech předchozích v této práci popisovaných technologií.

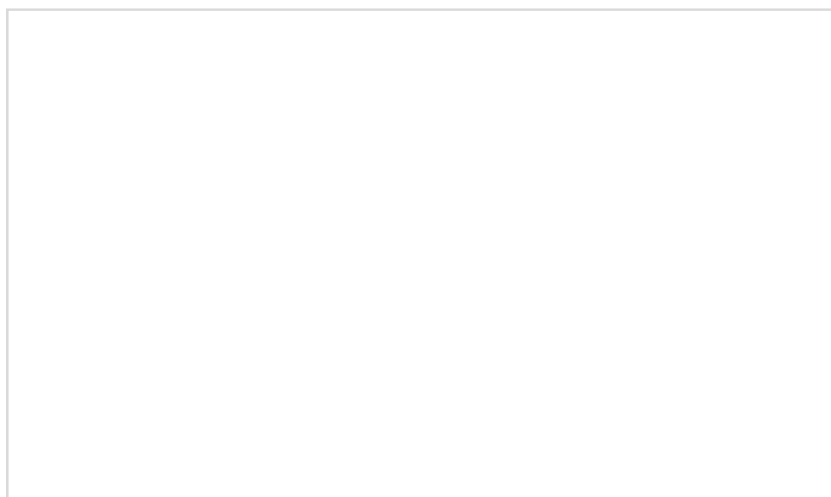
Trysky na robotickém rameni umožňují tisk různými rychlostmi, dle dostupných dokumentů společnosti probíhá tisk 10 – 500 mm/s při použití „Cybe ProTo 3DP Concrete 3D Printer“. Jedná se zpravidla o čtvercový průřez trysky, přičemž standard pro délku strany je 30 mm. Je nicméně možné velikost průřezu trysky měnit a provedením trysky ovlivnit hladkost povrchu výsledného výrobku. I v případě CyBe technologie lze, stejně jako v kapitole 4.4.1 využít postranních hladítek.

Dle dokumentů společnosti byla během zhruba půl hodiny trvajícího pokusu vytvořena stěna bez vnitřní výplně. Tato stěna obsahovala na výšku 41 vrstev a měla rozměry 3,7x0,4x1,23 m, viz obr. č. 19 a 20, [23].

Společnost pracuje se třemi jemnozrnnými cementovými materiály – s materiálem standardním (nejlepší pevnost v tlaku, střední hodnota pevnosti v tahu za ohybu), odlehčeným (nejhorší pevnosti z trojice) nebo s betonem se skelnou rozptýlenou výztuží (střední hodnota pevnosti v tlaku, nejlepší hodnota pevnosti v tahu za ohybu), [23].



Obr. č. 19: Rameno CyBe , zdroj:[<http://www.wind.org/view-post/CyBe-new-Robot-3D-Printer-Prints-Greener-Concrete-1>]



*Obr. č. 20: Tisk ramenem CyBe, zdroj:[<https://www.3printr.com/cybe-construction-to-launch-3d-printable-concrete-4333126/>]*

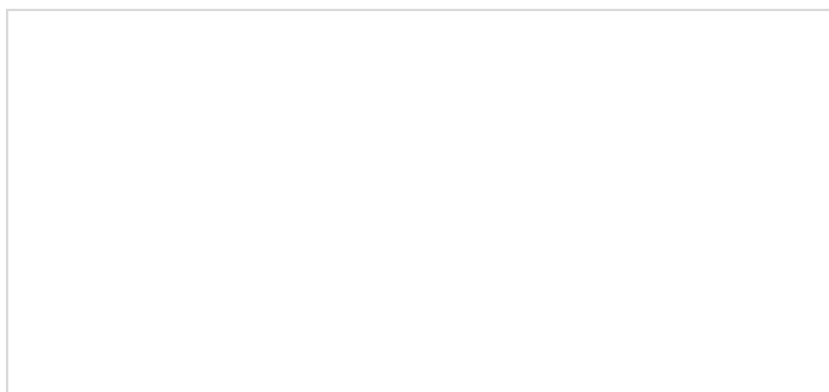


#### 4.4.5 Minibuilders

Všechny dříve popsané technologie zakládají svůj postup na tiskárně, jejíž rozměry jsou výrazně větší, než výsledný produkt a pracují ve svém omezeném prostoru, nebo je tisk realizován pohyblivým ramenem a omezen jeho dosahem. Technologie pracoviště Institute for Advanced Architecture of Catalonia v Barcelověse oproti nim snaží být o krok dál a neomezovat své výstupy pouze na laboratorní podmínky nebo nezbytnost volnosti okolního prostoru ke stavbě tiskárny na kolejnicích „in situ“.

Institut naopak vytvořil pohyblivé prvky malých rozměrů, které jsou schopny samy se pohybovat po konstrukci a byly nazvány Minibuilders, viz obr. č. 21. Omezeny jsou pouze dosahem k přívodu energie a k zásobníku materiálu, k nimž jsou většinou připojeny, ty však mohou také měnit svou polohu, čímž je dosah robotů výrazně zvýšen. Rovněž existují varianty robotů se zásobníkem menšího objemu bez nutnosti stálého přívodu elektřiny, jejich činnost je ovšem zpomalena nutností materiál v pravidelných intervalech do jednotlivých robotů doplňovat.

Minibuilders mají tři varianty jednotlivých robotů, kteří pracují samostatně. Jsou ovšem napojeni na jeden systém a vybaveni senzory pro přesnou kontrolu a precizní řízení jednotlivých úkonů, aby tyto úkony mohly být optimalizovány a řádně koordinovány. Varianty robotů jsou foundation – základový, úchytný – grip a přísavný – vacuum, [20].

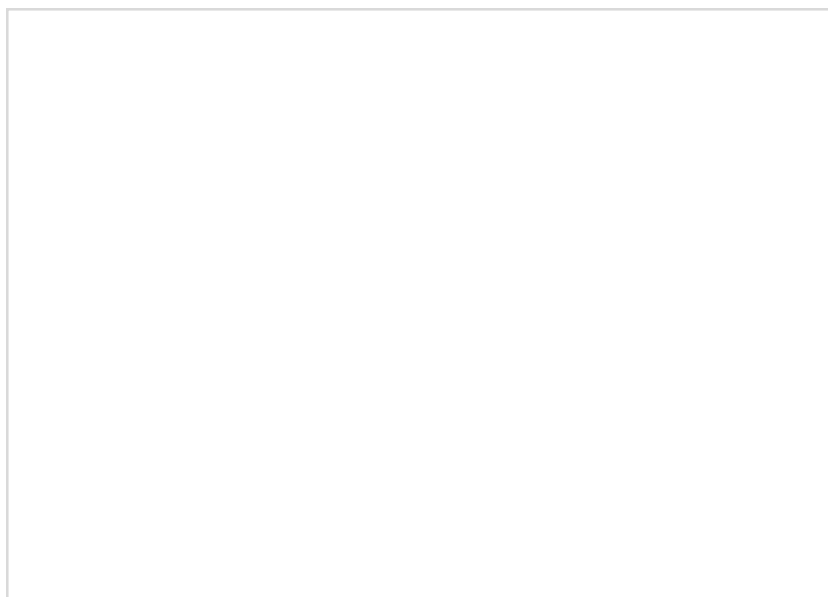


Obr. č. 21: Roboti Minibuilders, a) Foundation Robot, b) Grip Robot, c) Vacuum Robot, zdroj: [24]

**Foundation Robot** – Tento robot se na svých dvou pásech pohybuje pouze po zemi. Svoji polohu určuje na základě odstupu od produktu, který je reprezentovaný nakreslenou vodící linií v odpovídající vzdálenosti. Tu robot sleduje pomocí svých

senzorů, [24]. Tisk je realizován tryskou, která je schopna pohybu pouze ve vertikálním směru.

Vzhledem k názvu robota a způsobu jeho pohybu (po zemi na páslech, viz obr. č. 21 a) a obr. č. 22) je zřetelné, že nastupuje do procesu výstavby jako první a jeho úkol je omezen určitou výškou konstrukce, do které je schopen pracovat (20 vrstev). Tyto jím nanesené vrstvy slouží jako základ pro další stavbu prováděnou dalšími roboty. Po Foundation Robotu následuje činnost Grip Robota.



Obr. č. 22: Tisk základních vrstev pomocí Foundation Minibuilderů,  
zdroj:[<http://www.3ders.org/articles/20140617-minibuilders-tiny-robots-3d-printing-structures-in-any-size.html>]

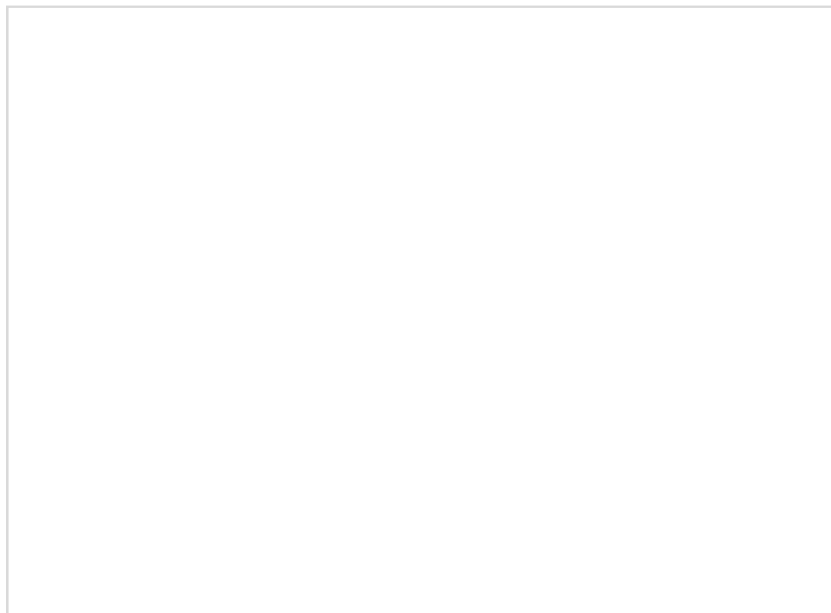
**Grip Robot** – Jeho činnost začíná po ukončení úkonu Foundation Robota. Je umístěn na první vytvořené vrstvy, na kterých se drží a pohybuje pomocí čtyř samostatně regulovatelných válečků (samostatně regulovatelné z důvodu možného zakřivení konstrukce a tedy rozdílných drah jednotlivých válečků, viz obr. č. 23 a 24).

Jelikož je robot umístěn na velice mladém betonu, musí být tento materiál už v takto raném stádiu únosnější, než je vyžadováno u betonu tištěného rámovou konstrukcí nebo ramenem. K tomu slouží ohříváče, které ihned po vytištění zrychlují tuhnutí betonového provazce, [24].

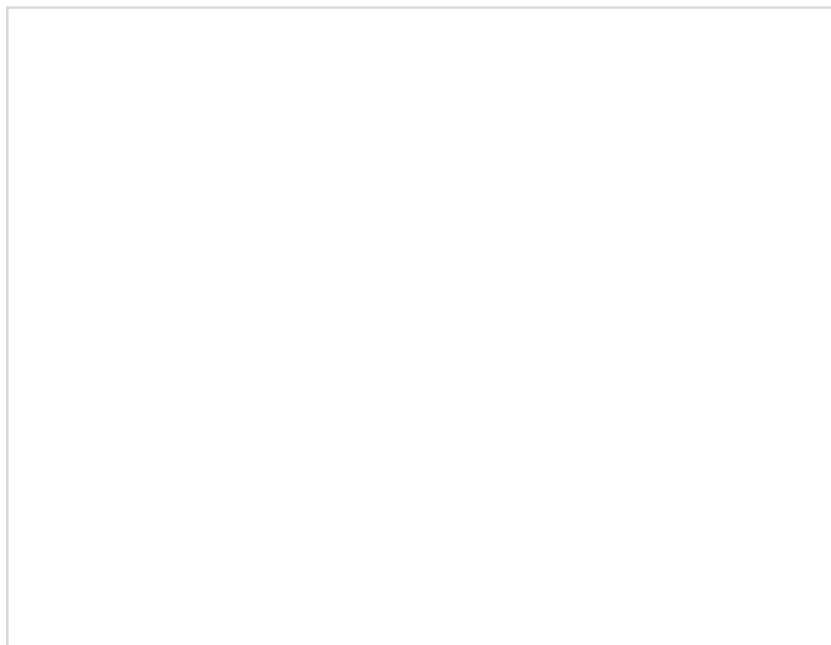
Celkem robot obsahuje válců 6. Jak již bylo řečeno, čtyři slouží k uchycení a pohybu robota po konstrukci. Kromě stabilizace robota slouží zbývající dva válce k úpravě povrchu podobně jako hladítka u Contour Crafting, [25]. Robot je díky své

konstrukci obsahující válečky z obou stran tištěné konstrukce a díky aplikaci ohřívačů schopen i tisku horizontálních konstrukcí, jak je znázorněno na obr. č. 24.

V rovině kolmé k tištěné konstrukci je tryska tohoto robota pohyblivá, což umožňuje náklon konstrukce a tvorbu přiměřených otvorů v konstrukci.

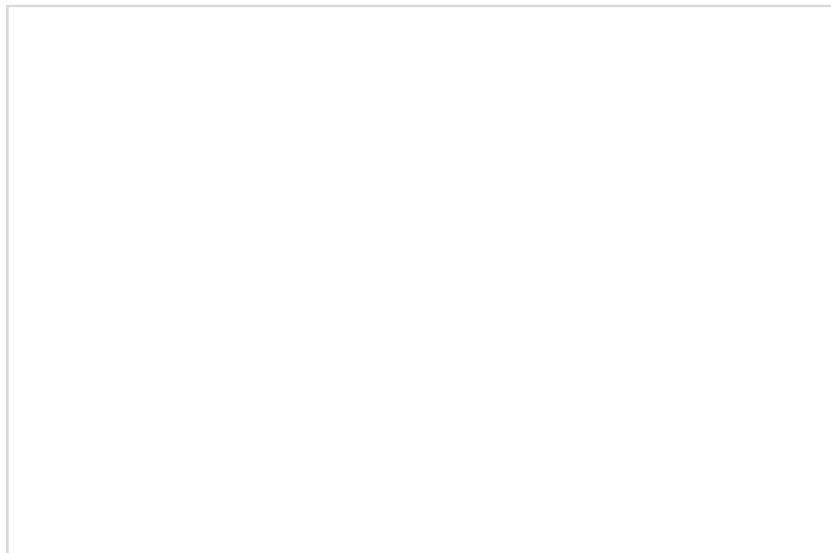


*Obr. č. 23: Grip Minibuilder, zdroj:[<http://www.3ders.org/articles/20140617-minibuilders-tiny-robots-3d-printing-structures-in-any-size.html>]*



*Obr. č. 24: Možnost tisku horizontálních konstrukcí pomocí Grip Minibuilderu, zdroj:[24]*

***Vacuum Robot*** – Vacuum Robot nastupuje do procesu až jako poslední a bývá umístěn na již hotový materiál, na kterém se drží pomocí podtlaku. Jeho orientace tedy není omezen směrem nanášení vrstev. Jeho úkolem je lokálně zesilovat vytištěnou konstrukci přidáváním materiálu, který může přidávat v jakémkoli směru nezávisle na vrstvách pod jím nanášeným materiálem. Tím robot přispívá k realizaci optimalizovaného návrhu.



*Obr. č. 25: Lokální zesilování pomocí Vacuum Minibuilderu,*  
zdroj:[<http://www.3ders.org/articles/20140617-minibuilders-tiny-robots-3d-printing-structures-in-any-size.html>]

#### 4.4.6 *D-Shape*

Technologie Enrica Diniho D-Shape se od ostatních popisovaných technologií využitelných ve stavebnictví liší nejvíce. Tato odlišnost vychází jednak z faktu, že se jako u jediné v této práci zmiňované aditivní metody na bázi betonu nejedná o lineární tisk, ale o tisk plošný, a jednak z faktu, že zde nedochází k tisku připravené betonové směsi, ale pouze k nanášení pojiva v předem určených plochách na rozprostřený práškový materiál dle zpracovaného 3D modelu a jeho jednotlivých řezů.

Z druhého zmíněného faktu je zřejmé, že se technologie D-Shape řadí do aditivních metod na práškové bázi. Pojivem je zde materiál „na bázi anorganické mořské vody a magnézia“ [19, s. 70] a práškovým materiálem je písek, jehož vrstva pro tisk je mezi 5 a 10 mm. Jedná se o relativně nákladné pojivo, nicméně konstrukce z něj vytvořené běžně dosahují pevností, jaké jsou běžné u konstrukcí vytvořených za použití portlandského cementu, [26].

Pískový materiál může být rozprostřen až do rozměrů 6x6 m a rovněž výška může být až 6 m. Stejně jako u Loughborough University se u tiskárny jedná o konstrukci z příhradových nosníků s pohybem nosníku uloženého po obou stranách a poté posunu ve svislém směru. Zde ovšem je ovšem možné díky pracovnímu záběru 6 m využít jednotlivých, od sebe 2 cm vzdálených trysek až 300. Tiskárna samozřejmě stejně jako všechny ostatní aditivní metody na bázi prášku obsahuje také nástroj k vyhlazení povrchu naneseného materiálu za účelem co nejdokonalejšího rozprostření a tím stejnoměrné tloušťky tištěné vrstvy. Nástroj k vyhlazení je však na rozdíl o ostatních těchto metod umístěn přímo u trysek a pohybuje se společně s nimi.

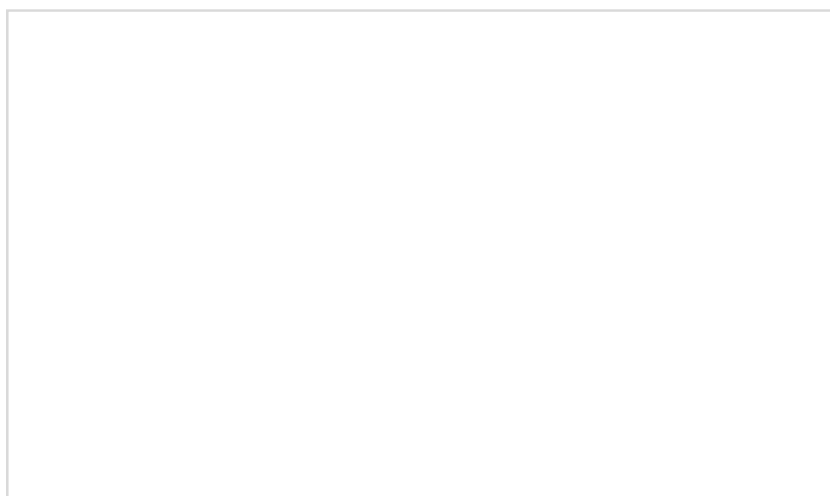
I zde zaujímá materiál, na nějž nebylo nanášeno pojivo, dočasně podpůrnou funkci. Je ovšem nutné nechat po tisku všechny materiál „odpočinout“, jelikož proces tvrdnutí trvá až 24 hodin. Stejně jako u ostatních metod na bázi prášku je poté přebytečný materiál odstraněn a produkt očištěn.

Tato technologie je výhodná ze dvou základních důvodů. Prvním je snížený dopad na životní prostředí díky využití relativně ekologických materiálů. Druhá výhoda, zásadnější, je snížený ekologický dopad na základě optimalizace konstrukce. Jako jedna z mála technologií 3D tisku tohoto typu umožňuje také tvorbu konstrukcí, v jejichž řezech se nenacházejí pouze uzavřené křivky, jelikož pro tvorbu nové vrstvy není nutný tuhý podklad nebo předchozí vrstva, díky využití podpůrného materiálu po dobu tisku a tvrdnutí. Vzniká tím tedy opět větší volnost pro designéra daného prvku a možnost

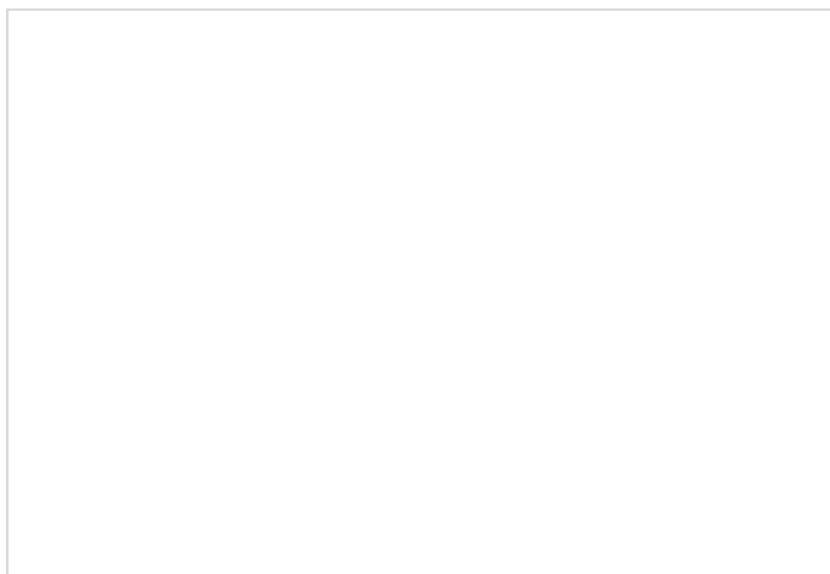
výrazné úspory nutného materiálu. Je však nutné podpůrný materiál odstraňovat s nejvyšší opatrností, aby nedošlo k poškození výrobku.

Nevýhodou ovšem je již výše zmíněný omezený prostor, který předurčuje tuto metodu především k umělecké, případně prefabrikované tvorbě. Stejně jako u ostatních metod na práškové bázi je spotřeba materiálu pro samotný proces tisku výrazně vyšší než materiál použitý pro samotný výsledný produkt, viz obr. č. 26 a 27.

D-Shape je technologií, která se podílí na možnosti výroby staveb na měsíci, spolupracuje za tímto účelem s Evropskou kosmickou agenturou, [27].



*Obr. č. 26: Tisk D-Shape, zdroj:[<https://www.fastcompany.com/1579263/3-d-printing-whole-buildings-stonein-space-printer-rocks>]*



*Obr. č. 27: Produkt D-Shape, zdroj:[<https://inhabitat.com/nyc/new-york-city-plans-to-fix-its-crumbling-harbors-using-3d-printed-concrete/d-shape-fabienbelcourt1/>]*

#### **4.5 Shrnutí aditivních metod**

Aditivní metody digitální fabrikace jsou příčinou i následkem velkého technologického pokroku a automatizace, která se stále více prosazuje v mnoha rozličných odvětvích výroby. Jsou neocenitelným pomocníkem jako varianta pro tvorbu a následné posuzování prototypů bez nutnosti vynaložení nákladů spojených obvykle s pozdější sériovou výrobou již při vývoji dané součástky, jelikož odpadá nutnost vytváření jednotlivých a často tvarově velice složitých forem nebo produkce velkého množství odpadního materiálu při využití subtraktivních metod.

Ve stavebnictví tyto metody zejména urychlují celkový čas potřebný pro výrobu, z relativně velké části eliminují lidský faktor a s ním časté nepřesnosti nebo dokonce chyby v různých stádiích procesu. Díky sofistikovaným systémům a mechanismům také redukují množství potřebného vybavení k provedení konstrukcí. Umožňují tvorbu komplikovaných, v současné době běžně užívanými technologiemi prakticky nerealizovatelných tvarů a tím do budoucna možnost výrazného zvyšování kreativity a rozmanitosti větších urbanistických celků, které ovšem zároveň díky optimalizaci nebudou vyžadovat takové ekologické zatížení jako dnešní lokálně předimenzované konstrukce.

Nevýhodou aditivních metod je zpravidla hrubý povrch (míra hrubosti je v popisovaných technologiích variabilní, nicméně i v pokročilých metodách 3D tisku je vrstvení materiálu stále velice zřetelné), který může z dlouhodobého hlediska způsobovat problémy a bude proto vyžadovat provedení důkladných povrchových úprav za účelem zamezení průniku a šíření nečistot a tím zpomalení celkového procesu degradace konstrukce.

Mnoho technologií zatím vykazuje nižší pevnost, stejně jako další nedostatky oproti produktům vyrobeným formativními nebo subtraktivními metodami, nicméně jak samotné metody 3D tisku a k nim nutná technologická zařízení, tak i v nich užívané materiály jsou neustále předmětem dalšího výzkumu a vývoje na předních pracovištích.

## PRAKTICKÁ ČÁST

V rámci praktické části této práce je navržena betonová směs pro 3D tisk. Z této směsi jsou následně vytvořeny zkušební vzorky, na kterých je zkoušen vliv uložení na vybrané vlastnosti.

Návrh 3D tištěného betonu je oproti běžné betonářské práci výrazně specifitější pro návrh samotné směsi.

Základním rozparem v potřebných vlastnostech pro 3D tisk je na jednu stranu nutnost dostatečně řídké konzistence, aby betonová směs byla schopna projít celým zařízením tiskárny a po vytištění se důkladně spojit s předchozími vrstvami materiálu. Na druhou stranu je ale také zapotřebí, aby směs zároveň rychle tuhla a provazce materiálu byly po vytisknutí nejen dostatečně tvarově stálé, ale i únosné po nanesení dalších vrstev. Směs proto musí již velice brzy po vlastní aplikaci působit jako nosný prvek.

Při technologii 3D tisku je návrh směsi oproti běžně užívaným technologiím výrazně více ovlivněn obměnami v aplikaci směsi, jelikož požadovaná konzistence je závislá na délce a průměru jednotlivých částí tiskárny, průměr součástí tiskárny a trysky ovlivňuje velikost kameniva a podobně.

Je tedy nutno brát v úvahu okolnosti konkrétní situace, pro kterou je prvek navrhován, a v návaznosti na ni upravovat jednotlivé parametry směsi a konkrétního způsobu tisku včetně tloušťky trysky, jelikož se všechny tyto parametry 3D tisku vzájemně ovlivňují a je zapotřebí najít pro každou situaci specifickou betonovou směs a k ní vhodný způsob její aplikace.



## 5 Použitý materiál

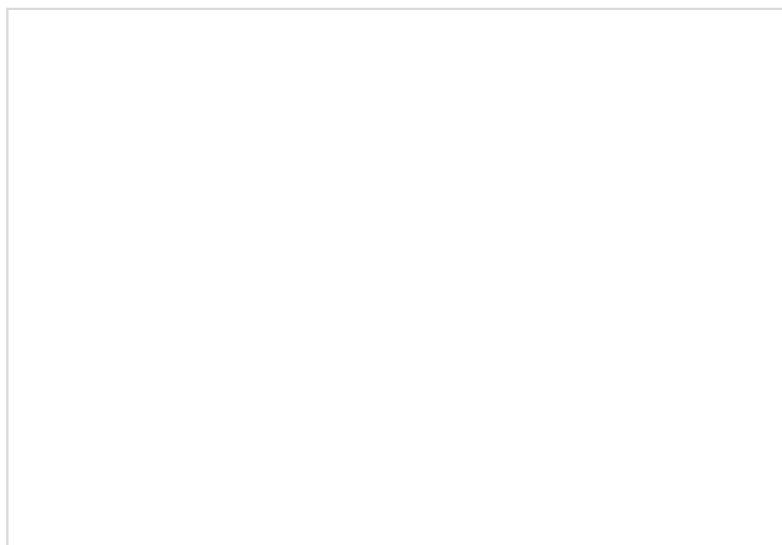
### 5.1 Plnivo

Pro 3D tisk je jedním ze zásadních parametrů velikost kameniva, respektive její poměr vůči trysce, kterou je daná směs vytlačována. Při nevhodné volbě tohoto poměru mohou v trysce vznikat vnitřní klenby, které by další vytlačování směsi znemožnily. Tomuto jevu by mohlo být zamezeno například umístěním vhodně zvoleného vibrátoru k trysce za účelem jejich rozrušení. K výběru je třeba přistupovat s opatrností, neboť působení vibrátoru nesmí být příliš intenzivní, aby nedocházelo k narušení rovnoměrného rozložení všech složek směsi v rámci celého jejího objemu.

Původním záměrem pro maximální velikost kameniva byla velikost odpovídající přibližně  $\frac{1}{4}$  průměru trysky ( $d_{tr}=10$  mm,  $d_{kam}=2,5$  mm), nicméně po vytvoření prvních vzorků bylo rozhodnuto, že tato velikost není vhodná a mohla by být pro vytlačování směsi problematická. Pro další fázi byla zvolena tryska o větším průměru a postupně na základě pokusů snižována poměrná velikost zrn kameniva vůči ní.

Jelikož byla pro vytvoření zkušebních vzorků použita zrna o velikosti nejvýše 1 mm, jedná se dle názvosloví definovaného v ČSN EN 206 o maltu (maximální velikost kameniva  $< 4$  mm), nikoli o beton, [31].

Zpočátku bylo po určení maximální velikosti zrn pro prvotní návrh kameniva směsi využito Bolomeyovy křivky zrnitosti.



Obr. č. 28: Bolomeyova křivka zrnitosti, vodorovná osa velikost zrna kameniva, svislá osa procenta propadu

Od této křivky bylo ovšem ustoupeno, jelikož se pro účely této práce neukázala být vhodná. Na místo toho bylo zvýšeno poměrné zastoupení menších částic.

## **5.2 Pojivo**

Pro výrobu jednotlivých vzorků směsi byl použit Českomoravský cement CEM I 42,5 R od společnosti HeidelbergCement Group, závod Mokrá.

Pro směs nebylo použito žádných příměsí.

## **5.3 Vodní součinitel a přísady**

3D tisk vyžaduje velmi protichůdné vlastnosti v rámci jedné směsi. Vzhledem k potřebným vlastnostem směsi pro 3D tisk (dostatečná únosnost nižších vrstev jako základ pro vrstvy vyšší, tvarová stálost, pórovitost) je vhodné snižovat množství záměsové vody, čímž však zároveň vzniká nutnost použití plastifikátoru, případně retardéru, jelikož je zapotřebí zajistit správnou konzistenci směsi při jejím pohybu mezi zásobníkem a tryskou.

Také ovšem dochází v některých případech k aplikaci urychlovačů tuhnutí, neboť přestože je nutné zajistit dostatečnou tekutost při průchodu samotným zařízením 3D tiskárny, je také zapotřebí, aby směs po vytištění provazce držela požadovaný tvar a v relativně krátkém čase byla schopna unést další vrstvy směsi.

Pro tuto práci byl použit pouze superplastifikátor a to superplastifikátor na bázi polykarboxylátetheru.

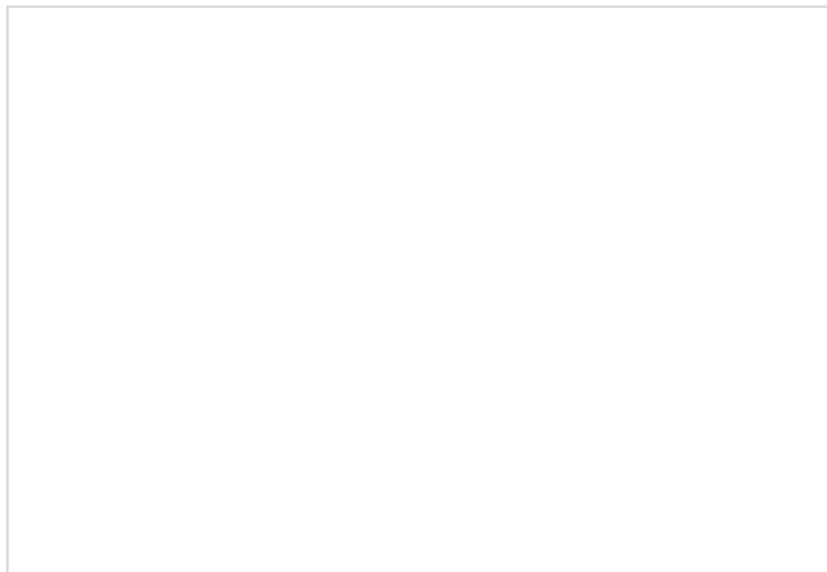
## 6 Směs

V počátku návrhu směsi tato práce čerpá z výzkumu již v teoretické části této práce zmíněné Loughborough University, jejíž výzkum se stal výchozím pro vhodný poměr plniva k pojivu, který se ukázal být optimálním při poměru 3:2. Vzhledem k malé zrnitosti použitého kameniva je zapotřebí oproti běžně užívaným směsím zvýšit množství cementu.

Ve zmíněné směsi se složením uvedeným v tabulce č. 1 pracoviště bylo zároveň použito  $1,2 \text{ kg/m}^3$  polypropylenových vláken o průměru  $180 \mu\text{m}$  a délce 12 mm.

Tato diplomová práce ze směsi vyvinuté Loughborough University vychází pouze v poměru plniva k pojivu, který se stal výchozím a zůstal přibližně zachován ve všech fázích práce, ovšem pro účely této práce nebyla použita žádná vlákna ani jiná výztuž.

*Tabulka č. 1: Směs Loughborough University, zdroj:[18]*

The image shows a large, empty rectangular box with a thin black border, which is intended to contain the data for Table 1. The table content is not visible in the provided image.

### 6.1 Složení směsi

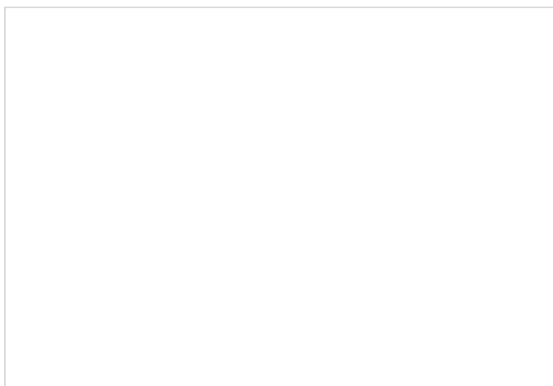
#### 6.1.1 Fáze I – samotná směs

V první fázi byly tvořeny směsi pouze za účelem posouzení konzistence při jednotlivých kombinacích množství vody a superplastifikátoru, aby mohlo být určeno jejich vhodné množství pro směs, ze které by vycházela další fáze pro následnou simulaci 3D tisku.

Směsi nebyly dále zpracovávány, pouze bylo menší množství směsi špachtlí nanášeno na rovný povrch, aby bylo možné posoudit tvarovou stálost při nanášení další vrstvy směsi.

Celkem bylo vytvořeno 5 směsí, jejichž složení je uvedeno v tabulce č. 2.

*Tabulka 2: Složení směsí Fáze I (pozn.: Hodnoty jsou uvedeny v poměrných hmotnostech, NEJEDNÁ se o množství na určitý objem.)*



Pro směsi 1 a 2 bylo použito maximálního doporučeného množství superplastifikátoru, pro směs 3 méně, ovšem po počátečním pokusu se směsí 1 bylo snahou pro směs 2 a 3 co nejvíce snižovat vodní součinitel. Bohužel vzhledem k faktu, že u směsí s nižším množstvím záměsové vody se ukázalo být prakticky nemožným úkonem odpovídajícím způsobem je promíchat a vytvořit relativně homogenní směs, bylo množství záměsové vody ve směsích 2 i 3 během míchání postupně navýšeno, dokud se se směsí nedalo pracovat. Ve chvíli, kdy začal superplastifikátor plně působit se však směs stala natolik řídkou, že nebyla ani jedna ze směsí 1-3 použitelná.

První tři směsi se tedy projeví jako naprosto nevhodné pro záměry této práce, jejich konzistence byla příliš tekutá a směsi nevykazovaly absolutně žádnou tvarovou stálost. Z prvních dvou nebyl ani vytvořen vzorek. Třetí směs se během několika vteřin po nanášení na rovný povrch nekontrolovatelně rozlila a vytvořila přibližně 2 mm tlustou vrstvu, jak lze ostatně vidět na obr. č. 29.

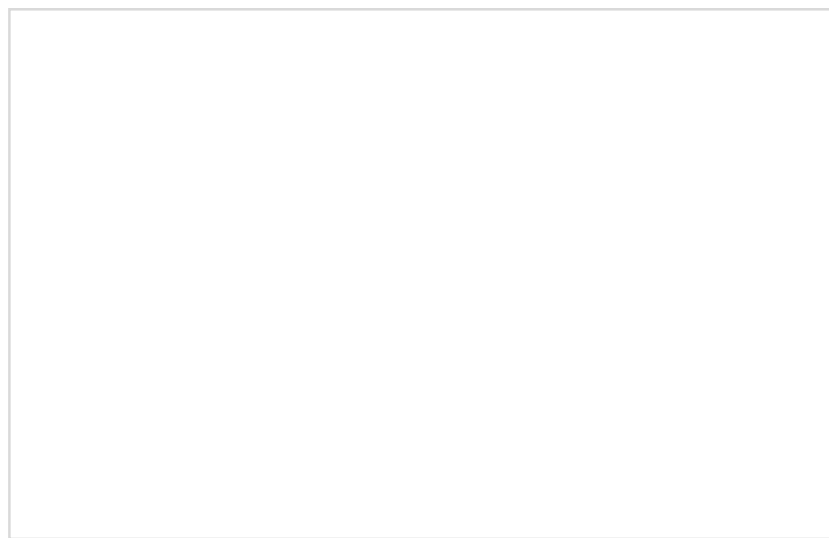
Pro směsi 4 a 5 byl tedy postup oproti směsím 1, 2 a 3 opačným – při obdobném vodním součiniteli je snižováno množství superplastifikátoru.

V kontrolní směsi 5 je zachován vodní součinitel a poměrné množství plastifikátoru, ovšem byl pozměněn poměr plniva k pojivu ve prospěch kameniva. Tato směs byla naprosto nezpracovatelná, jen s velkými obtížemi zaujala požadovaný tvar a její průchod tenkou tryskou se tedy zdál být zcela nemyslitelným, stejně jako vytvoření spojitého provazce ze směsi takového složení. Vzorek vytvořený z této směsi také

vykazoval špatnou přilnavost k povrchu, na který byly směsi nanášeny - během 24 hodin vlivem drobných vibrací (oříznutí desky) z povrchu jako jediný samovolně odpadl.

Pro další fázi byla vybrána směs 4, která jako jediná vykazovala zdánlivě vhodnou konzistenci a tvarovou stálost, kterou si udržela i po nanesení další vrstvy směsi.

Ukázka konzistencí směsí je zachycena na obr. č. 29.



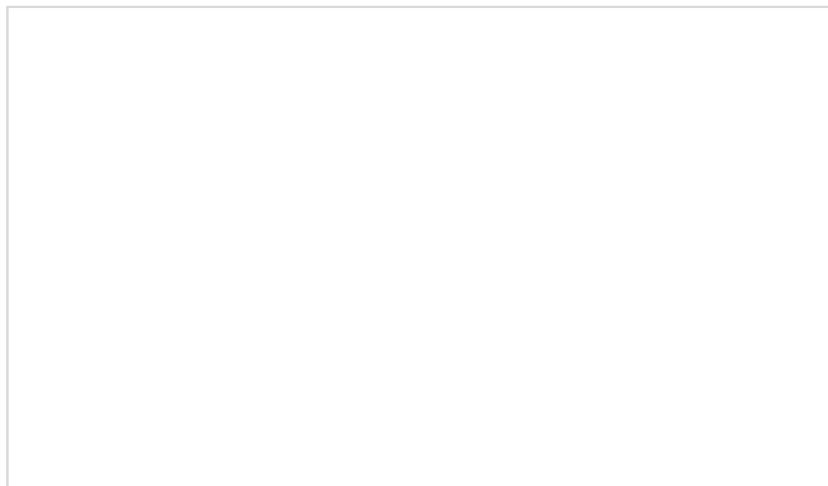
Obr. č. 29: Ukázka směsí, zleva směs 3, 4 a 5, zdroj:[vlastní]

### 6.1.2 Fáze II – pistole

Záměrem této fáze bylo zjistit, zda je navržená směs z fáze I kompatibilní se zvolenou tryskou, jejíž výslednou zvolenou variantu lze vidět společně s pistolí na obr. č. 30.

Jak již bylo uvedeno v 5.1, původní odhad maximální velikosti kameniva, které bylo použito ve fázi I, byla velikost zrna 2,5 mm odpovídající  $\frac{1}{4}$  průměru zamýšlené trysky o průměru 10 mm. Z obavy ze vzniku vnitřních kleneb v trysce byl ovšem tento poměr oproti původnímu záměru pozměněn.

Vzhledem k tomu, že autorka práce nedisponuje 3D tiskárnou pro betonovou směs, je tisk pouze simulován. Tato simulace probíhá po konzultaci s vedoucím specialistou Ing. Michalem Kovářikem z Katedry technologie staveb FSv ČVUT v Praze za použití ručního vytlačování pistole na tmel, doplněné plastovou tryskou o vnitřním průměru 18 mm, jelikož průměr trysky, která byla k pistolí na tmel dodána, byl pro účely tisku příliš malý (8 mm). Pistole viz obr. č. 30.



*Obr. č. 30: Použitá pistole a tryska pro simulaci 3D tisku, zdroj:[vlastní]*

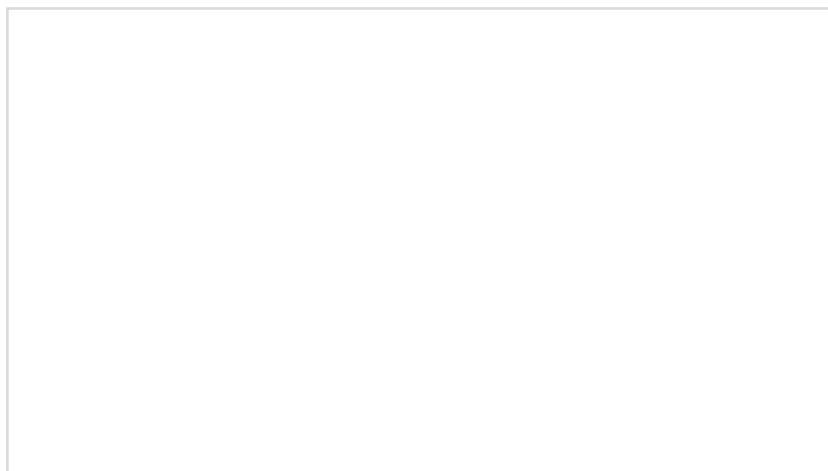
Na základě tak razantního nárůstu průměru trysky oproti původnímu záměru bylo nejdříve použito kamenivo o maximální velikost zrna 2 mm a opět byla pro další volbu množství menších frakcí následována Bolomeyova křivka zrnitosti. Taková směs však nebyla se zmíněnou tryskou kompatibilní, po asi 5-8 mm dlouhém provazci bylo prakticky nemožné směs vytlačit.

Následoval pokus s kamenivem o velikosti zrna nejvýše 1 mm a dále byla pro určení množství kameniva nižších frakcí při těchto pokusech stále opisována Bolomeyova křivka zrnitosti. Poté byl jako velikost největšího zrna použit průměr 0,5 mm a dále opět dle Bolomeyovy křivky zrnitosti. Ani jedna z těchto směsí se neukázala být vhodnou, přes veškerou snahu a využitou sílu nebylo možné soustavně vytlačovat provazec směsi a ta poté v zásobní části pistole zatuhla a bylo tedy znemožněno dále pracovat.

Vzhledem k neuspokojivým výsledkům pokusů následovala konzultace s vedoucím specialistou Ing. Michalem Kovářikem z Katedry technologie staveb FSv ČVUT v Praze, ze které vyšel návrh ustoupit od použití Bolomeyovy křivky pro množství jednotlivých frakcí kameniva, jelikož ta je sice výhodná pro účely této práce, tedy technologii 3D tisku, není právě výhodná z hlediska uvažované technologie tisku. Místo toho bylo rozhodnuto, že oproti Bolomeyovi bude sníženo množství větších zrn a naopak bude do směsi zařazeno větší množství drobnozrnnějších částic.

Tento fakt vychází z toho, že ačkoli výrazné množství velkých zrn je pro již zmíněné hledisko únosnosti dobré, v rámci trysky takové množství značně komplikuje vzájemný pohyb zrn a tím také vytlačování celé směsi. Pro vzájemný pohyb zrn je tedy

žádoucí, aby bylo každé jednotlivé zrno většího průměru obklopeno množstvím menších částic, mezi kterými bude jeho pohyb násobně usnadněn. Na toto je nutno dbát při míchání, které musí být dostatečně důkladné, aby se jednotlivé směsi správně promísily, viz obr. č. 31.



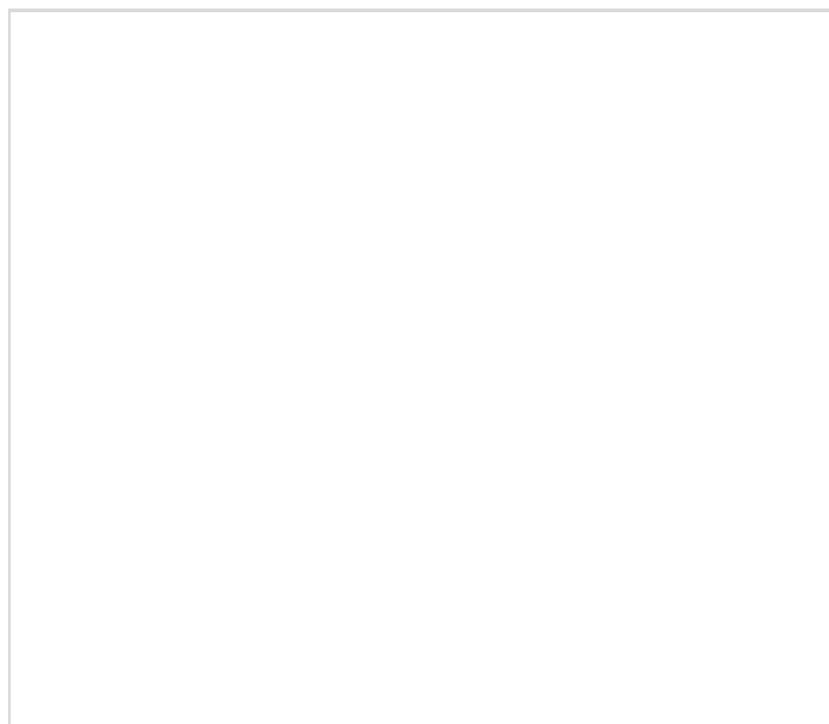
*Obr. č. 31: Schéma rozložení kameniva, vlevo nevhodné, vpravo vhodné (větší zrna „obalena“ menšími, lepší vzájemný pohyb), zdroj:[vlastní]*

Na základě této konzultace a úprav směsi z ní vycházejících byly provedeny další pokusy, které postupně upravovaly množství kameniva jednotlivých frakcí. Použití frakce byly 0/0,125, 0,125/0,25, 0,25/0,5 a 0,5/1.

Společně se zvýšením množství drobnozrnějších částic se také výrazně zvětšil celkový měrný povrch částic kameniva. Bylo proto nutné zvýšit zároveň s povrchem také objem záměsové vody a použitého plastifikátoru.

V tabulce č. 3 jsou zkoušené směsi včetně jednotlivých frakcí podrobně rozepsány. Lze v ní pozorovat postupné snižování množství větších částic, naopak zvyšování množství menších částic a zvýšení vodního součinitele. Je také zřejmá snaha přibližně dodržovat poměr plniva k pojivu 3:2, jak již bylo zmíněno v úvodu praktické části práce.

Tabulka 3: Složení směsí Fáze II (pozn.: Hodnoty jsou uvedeny v poměrných hmotnostech, NEJEDNÁ se o množství na určitý objem.)



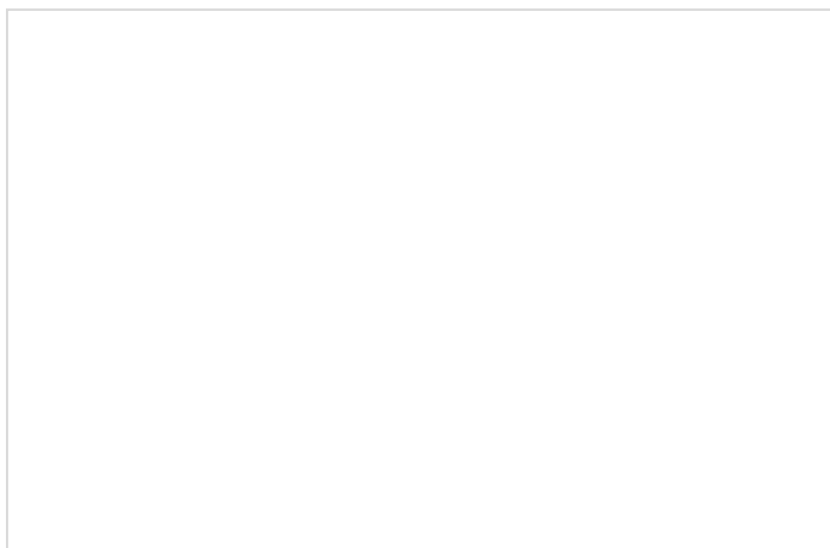
Obrázek č. 32 zachycuje vzorky vytvořené zmíněnou pistolí na tmel ze směsí popsaných v tabulce č. 3.

Ze směsi 1 vzorek vytvořen nebyl. Jedná se znovu, pro kontrolu, o téměř stejnou směs, jaká byla v této fázi již dříve zkoušena a její složení je uvedeno ve fázi I jako směs 4, ve které je ovšem jako maximální velikost kameniva použit průměr 1 mm místo předchozího průměru 2,5 mm, protože byl mírně zvýšen vodní součinitel.

Směsi 2-4, kde jak již bylo zmíněno, byla snaha optimalizovat vzájemné poměry velikostí částic, se při výrobě vzorků ukázaly být použitou technologií velice složitě vytlačitelné, zároveň však po nanesení na rovný povrch absolutně nedrží tvar a během krátké chvíle se z provazce nekontrolovatelně roztékají. Při použití některých v teoretické části zmíněných technologií by konzistence mohla být z důvodu průchodu všech částí tiskárny vhodná, nicméně by takový průchod zařízením vyžadoval vyvinutí velké síly, což by mohlo způsobit zhoršení promísení dané směsi.

Jako vhodná směs, která byla pro tvorbu zkoušených vzorků použita, byla zvolena směs 5. Přestože tato směs stejně jako předchozí vyžadovala značnou sílu, vytlačený provazec vykazoval celistvost a relativně ustálený tvar, který by ještě mohl být stabilizován například hladítky použitými v technologii Contour Crafting.



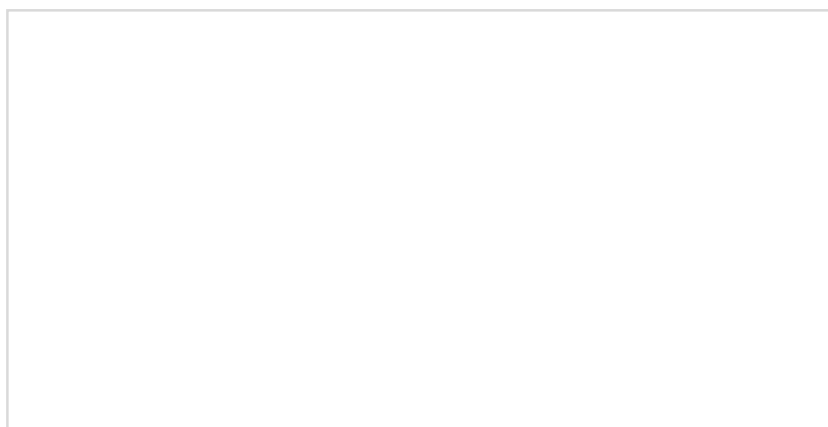


Obr. č. 32: Vzorky vytvořené pistolí z Obr. č. 30, zleva směs 2, 3, 4, 5 z tabulky X, zdroj:[vlastní]

### 6.1.3 Fáze III – tvorba vzorků

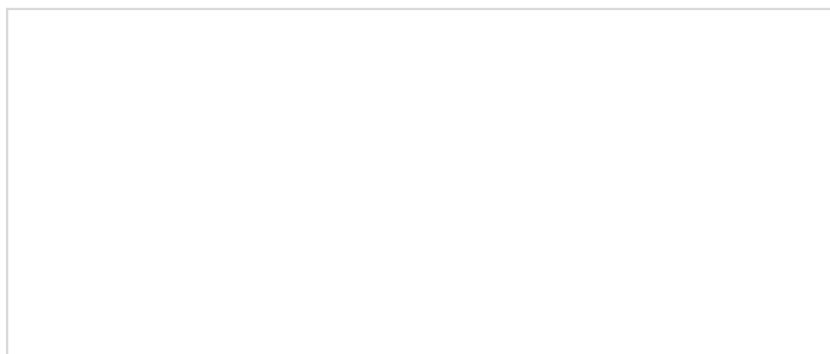
Po zvolení směsi 5 z Fáze II byly pomocí výše zmíněné pistole na tmel vytvořeny vzorky.

Celkem bylo vytvořeno 6 krychelných vzorků 100x100x100 mm pro zkoušku pevnosti směsi v daném způsobu uložení v tlaku, kde 3 z těchto vzorků byly uloženy monoliticky a poté řádně zhutněny. Zbývající 3 vzorky byly vytvořeny jako soubor rovnoběžně orientovaných provazců výchozího materiálu, viz obr. č. 33. 3D tištěné vzorky však nebyly následně zhutňovány, jelikož autorka práce vychází z předpokladu eliminace bednění, zhutňování materiálu v reálné výstavbě je tedy vyloučeno.



Obr. č. 33: Vlevo krychle 3D tisk, vpravo monolitická, zdroj:[vlastní]

Dále bylo vytvořeno celkem 12 vzorků pro zkoušku tahu za ohybu. Zde byly užity kvádry o rozměrech přibližně 40x40x160 mm. Stejně jako u krychlí zkoušených na tlak, 3 vzorky byly i zde vytvořeny monoliticky. Další vzorky byly po třech vytvořeny s rovnoběžně orientovanými provazci, dále s jejich rotací o 45° a 90°, viz obr. č. 34. Ke zkoušce tahu za ohybu byl použit trojbodový ohyb.



*Obr. č. 34: Zleva kvádr 1) monolitický, 2) rovnoběžně orientované provazce, 3) rotace vrstev o 90°, 4) rotace vrstev o 45°, zdroj:[vlastní]*

3D tištěné vzorky byly stejně jako ty monolitické ukládány do formy. Je však nutno zmínit, že tento fakt je způsobem záměrem vytvořit rozměrově stejné vzorky z důvodu vypovídajících výsledků zkoušek, formy byly tedy použity pouze jako vodící linie.

Při pohledu na 3D tištěné vzorky lze pozorovat jistou nerovnoměrnost průměru provazců. Toto vychází ze způsobu simulace 3D tisku, tedy použití pistole na tmel, kde k vytlačování provazce dochází jejím cyklickým stlačováním lidskou silou. Není proto možné zajistit soustavný rovnoměrný tlak, což se projevilo na zmíněném proměnlivém průřezu jednotlivých provazců.

Jistá nevhodnost tohoto způsobu vychází také z malého objemu zásobníku pistole, jelikož jeho doplňováním docházelo k prostojům mezi ukládáním jednotlivých provazců, což by mohlo mít za následek nedokonalou provázanost jednotlivých provazců v celek.

V tiskárně pro reálné využití by bylo zapotřebí zajistit jednak ustálený tlak na vytlačování směsi, jednak dostatečnou dodávku směsi do zásobníku, ovšem také zařízení, např. výše zmíněný jemný vibrátor, aby vlivem stlačování nedocházelo k nerovnoměrnému rozložení jednotlivých složek materiálu.

*Tabulka č. 4: Směs použitá pro tvorbu vzorků, není uveden plastifikátor*

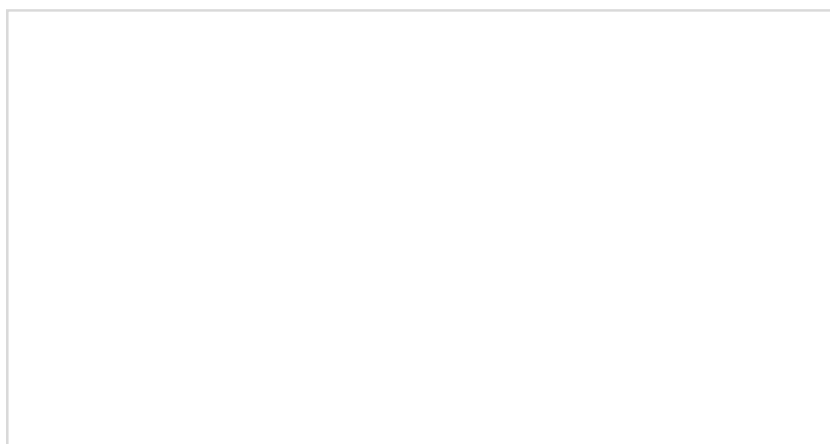
--

## 7 Zkoušky

### 7.1. Použité normy

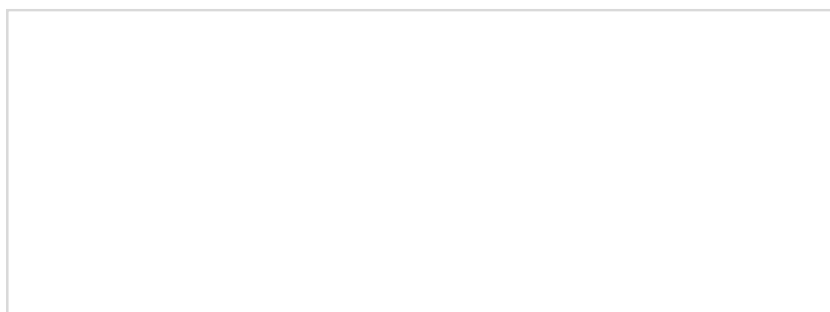
Vytvořené vzorky materiálu byly zkoušeny na pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu. Každé zmíněné uložení materiálu bylo odpovídající zkoušce podrobeno na třech tělesech.

Zkouška pevnosti v tlaku proběhla ve zkušebním lisu na základě normy ČSN EN 12390-3. Výsledná pevnost je krychelná a zkoušena byla na vzorcích o rozměrech 100x100x100 mm. Schéma zkoušky je uvedeno na obr. č. 35.



*Obr. č. 35: Uspořádání pro zkoušku pevnosti betonu v tlaku,  
zdroj:[<http://www.ebeton.cz/pojmy/pevnost-betonu-v-tlaku-zkouska>]*

Zkouška pevnosti v tahu za ohybu proběhla ve zkušebním lisu na základě normy ČSN EN 12390-5. Pevnost byla zkoušena na trámcích o rozměrech 40x40x160 mm. Schéma zkoušky je uvedeno na obr. č. 36.



*Obr. č. 36: Uspořádání pro zkoušku pevnosti betonu v tahu za ohybu, trojbodový ohyb,  
zdroj:[<http://www.kitnarf.cz/publications/2004/2004.06.plm4/2004.06.plm4.html>]*

## **7.2 Průběh zkoušek**

Zkoušky byly prováděny v prostorách akreditované laboratoře Katedry betonových a zděných konstrukcí ČVUT.

Monoliticky uložený materiál byl zkoušen normově kolmo na směr hutnění. Vzhledem k tomu, že (jak již bylo výše zmíněno) 3D tištěný beton nebyl hutněn, byly vzorky pro nejuvěrnější nápodobu reálných podmínek pro beton „in situ“ na rozdíl od vzorků monolitických do lisu ukládány ve směru, v jakém byly tvořeny, ne kolmo na něj.

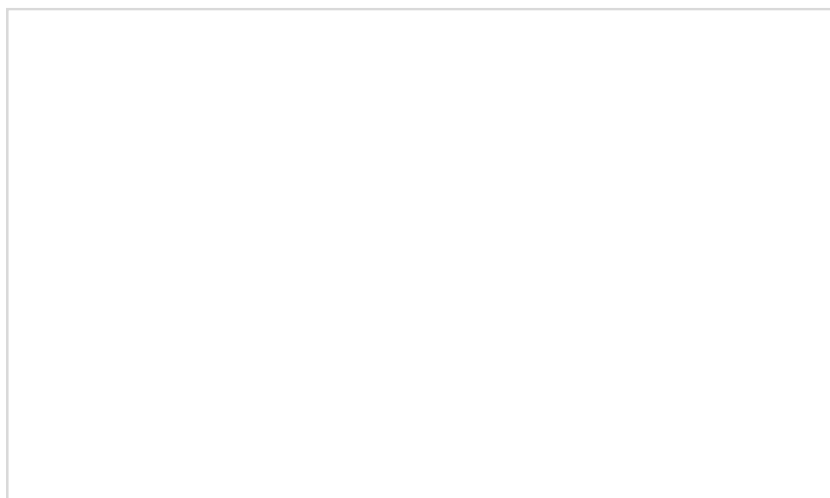
Nejprve proběhly zkoušky těles na pevnost v tlaku, poté na pevnost v tahu za ohybu.

### **7.2.1 Zkouška pevnosti v tlaku**

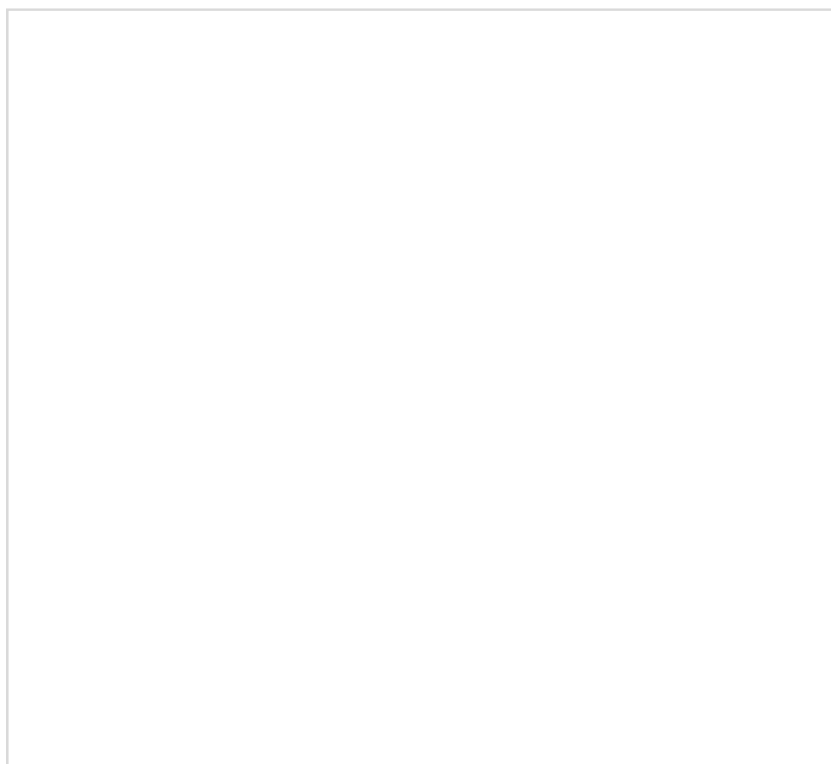
Jak již bylo uvedeno, pro zkoušku pevnosti v tlaku bylo vytvořeno celkem 6 vzorků tvaru krychle 100x100x100 mm, 3 krychle monolitické a 3 krychelná tělesa tvořená rovnoběžně orientovanými provazci materiálu. Tělesa byla v lisu zatěžována až do chvíle porušení.

Zkouška v tlaku monoliticky vytvořených krychelných vzorků proběhla zcela standardním způsobem, jejich pevnosti budou dále uvedeny v grafu.

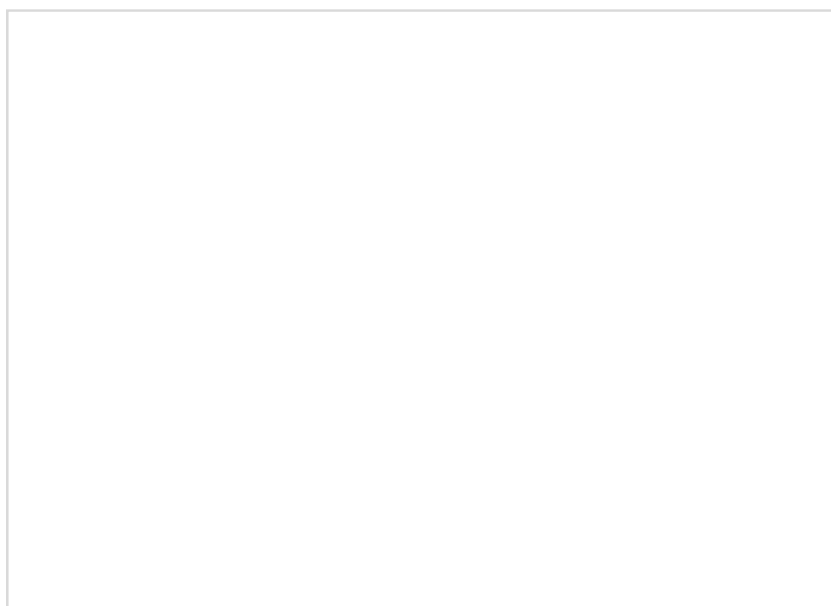
Při zkoušení prvního 3D tištěného krychelného vzorku došlo k porušení srovnatelnému s monolitickým betonem. Druhý vzorek byl daleko více porušen příčným tahem a u třetího vzorku byl během zkoušky průřez porušen oddělením krajní vrstvy provazců od zbylého vzorku, jak je vidět v levé části vzorku zachyceného na obr. č. 39.



Obr. č. 37: Zkouška krychle 100x100x100 mm z monolitického betonu, zdroj:[vlastní]



*Obr. č. 38: Zkouška krychle 100x100x100 mm z rovnoběžně orientovaných provazců materiálu, zdroj:[vlastní]*



*Obr. č. 39: Porušení třetího vzorku 3D tištěné krychle s rovnoběžně orientovanými provazci materiálu, zdroj:[vlastní]*

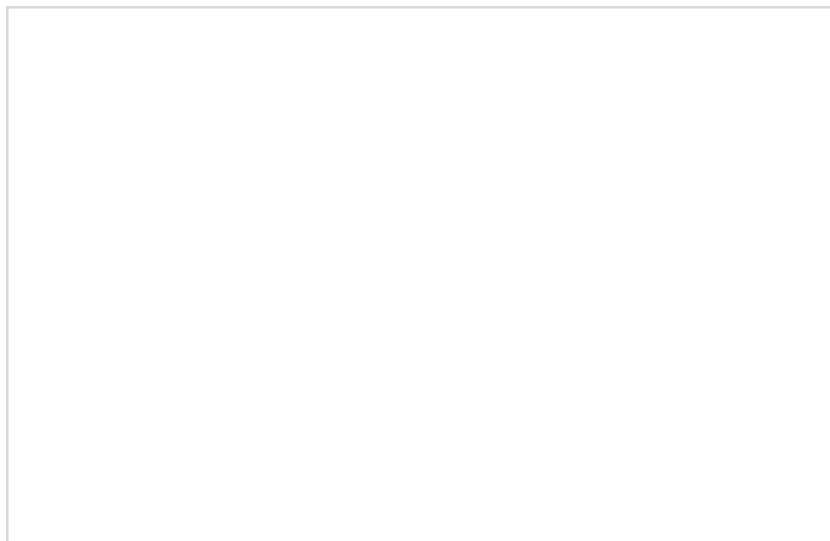
### 7.2.2 Zkouška pevnosti v tahu za ohybu

Zkoušce pevnosti v tahu byly podrobeny vzorky tvaru kvádrů o velikosti 40x40x160 mm, z nichž 3 byly stejně jako u výše zmíněných krychlí zkoušených na

tlak vytvořeny monoliticky. Další vzorky byly po třech kusech vytvořeny s provazci s nulovou rotací a dále s rotací o  $45^\circ$  a  $90^\circ$ .

Stejně jako u krychlí vykazují vzorky ve spodní části tvar formy, ve které byly tvořeny, nicméně ve vyšších vrstvách materiálu vykazují jednotlivé provazce zřetelnou tvarovou stálost, viz obr. č. 40.

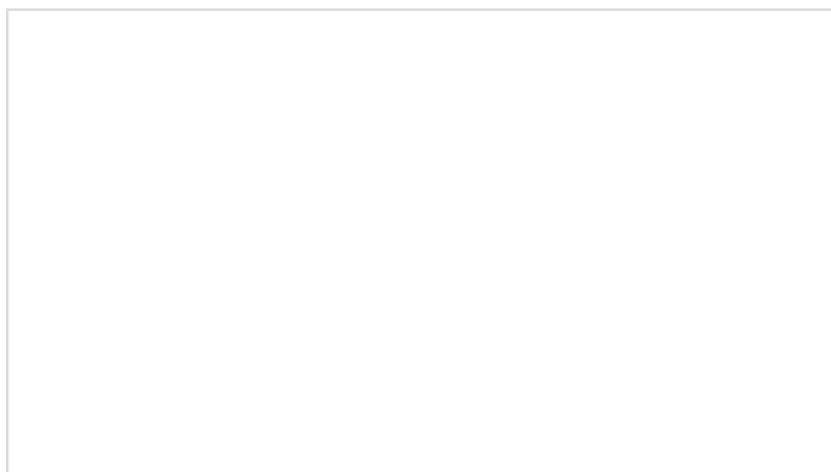
Zkouška na těchto tělesech proběhla v prostorách laboratoře Katedry betonových a zděných konstrukcí ČVUT, jednalo se o zkoušku trojbodovým ohybem.



*Obr. č. 40: Zkouška pevnosti v tahu za ohybu – těleso s rovnoběžně orientovanými provazci, zdroj: [vlastní]*

Zatímco u vzorků monolitického betonu bylo porušení tvarově i vyvinutým zatížením srovnatelné se vzorky se vzájemným pootočením o  $45^\circ$ , u dvou ze tří vzorků s rotací o  $90^\circ$  bylo porušení vzorku způsobeno rozpojením provazců ve střední vrstvě, tedy právě ve vrstvě příčně směřované, viz obr. č. 41.

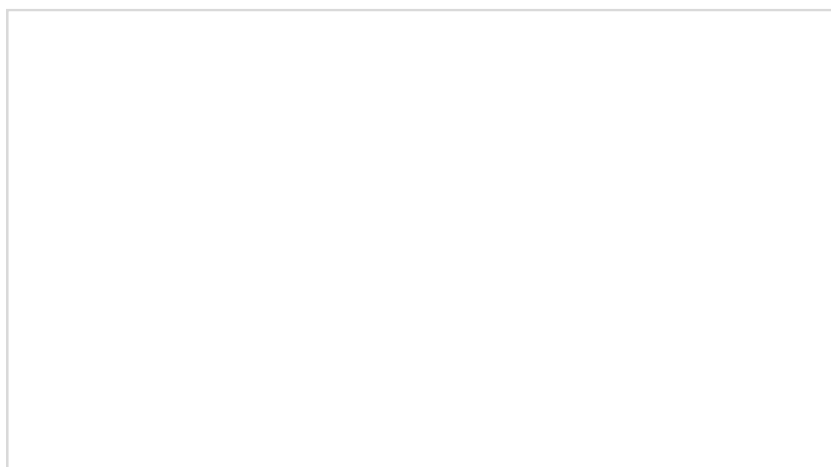
Přestože pevnost v tahu za ohybu dosahovala i v tomto případě uspokojivě vysokých hodnot, bylo by vhodné věnovat se v dalším výzkumu úpravám směsi ve smyslu vzájemného spojování materiálu vzhledem k faktu, že při praktickém využití směsi by byl prostož mezi nanášením jednotlivých vrstev materiálu z důvodu velikosti a složitosti tvaru výsledného produktu delší než při tvorbě zkoušených vzorků a spojování vrstev by tedy mohlo způsobovat snížení pevnosti. Tento způsob uložení směsi vykazoval nižší pevnosti než předchozí zmíněné vzorky monolitické a s rotací o  $45^\circ$ .



*Obr. č. 41: Porušení vzorku s rovnoběžně orientovanými provazci, zdroj: [vlastní]*

Vzorky s rovnoběžně orientovanými provazci oproti očekávání vykazovaly nejnižší pevnost ze zkoušených způsobů uložení. V tomto případě došlo k porušení jednotlivých provazců v rozdílných místech blízkých působišti zatížení, každý provazec byl tedy porušen v závislosti na vlastních nedokonalostech, místo toho, aby se průřez choval zcela jako jeden prvek, viz obr. č. 42.

Při zkoušce sice nedošlo k vzájemnému odtržení provazců od sebe, nicméně stejně jako u předchozího zmíněného způsobu uložení, tedy vzájemné pootočení provazců o  $90^\circ$ , je zřejmá nedokonalá propojenost jednotlivých vrstev. Na základě této zjištěné skutečnosti vyvstává otázka možného rizika v chování materiálu při tomto uložení v případě, že by se jednalo o ohýbaný prvek s výztuží vkládanou mezi jednotlivé vrstvy. V takovém případě by mohlo dojít například k porušení spodní vrstvy materiálu a jejímu odpadnutí vedoucímu k nežádoucímu odkrytí výztuže.



*Obr. č. 42: Porušení vzorku s rovnoběžnými provazci, zdroj: [vlastní]*



## 7.3 Vyhodnocení

### 7.3.1 Pevnost v tlaku

Vzorky vytvořené monoliticky obecně vykazovaly vyšší pevnost v tlaku než vzorky tvořené simulací 3D tisku. U pevností v tlaku je u použité směsi tento rozdíl daleko výraznější než u pevností v tahu za ohybu.

Z tabulky 5, která popisuje výsledky zkoušek jednotlivých vzorků, je zřejmé radikální snížení průměrné pevnosti v tlaku při uložení materiálu 3D tiskem oproti standardnímu způsobu uložení materiálu. Vzorky, které vznikly právě 3D tiskem, dosahovaly bohužel pouze přibližně 65% pevnosti monoliticky vytvořených vzorků.

Takové razantní snížení tlakové pevnosti si lze vysvětlit spojením dvou faktorů. Prvním z nich je již popisovaná vzájemná přilnavost jednotlivých vrstev materiálu, jejímuž rozvíjení by bylo vhodné dále se ve výzkumu zabývat a odpovídajícím způsobem upravit směs, aby se prvek vytvořený 3D tiskem choval celistvěji.

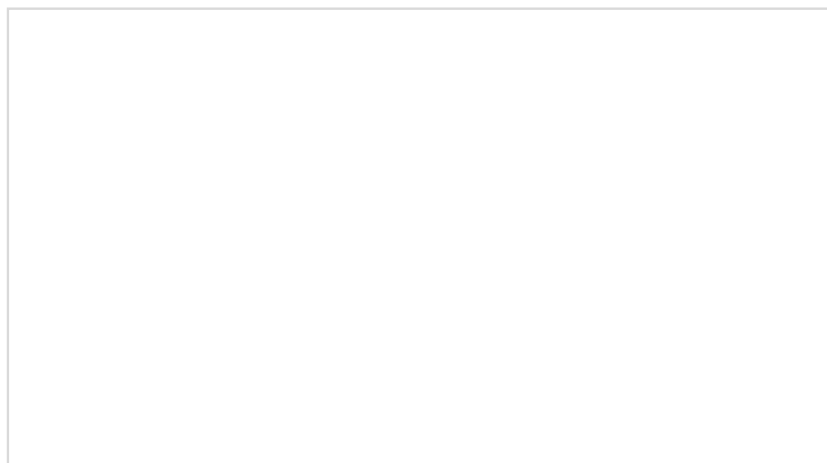
Druhým faktorem ovlivňujícím snížení pevnosti je průřez samotné trysky. Při tvorbě provazců zkoušených vzorků byla použita tryska ve tvaru kruhu bez jakýchkoli hladítek či jiného částečně formativně působícího prvku během tisku. Jednotlivé provazce na sebe z tohoto důvodu nedoléhají v plné ploše a vznikají mezi nimi dutiny, jak je zřetelné například na obr. č. 39. Tlak mezi jednotlivými vrstvami je tedy lokálně přenášen průřezem o menší ploše a stejná síla vyvozuje výrazně větší napětí na materiál.

Vyšší pevnost by také mohl zajistit vyšší a zároveň také stabilnější tlak na směs při jejím vytlačování, jelikož při simulaci 3D tisku pomocí pistole na tmel nebylo možné vyvíjet stálý tlak, který by umožnil vznik ustáleného průřezu a tudíž jistou standardizaci jednotlivých provazců a jejich vlastností.

Tyto problémy jsou relativně snadno řešitelné a to použitím rovnoběžníkové trysky ve větší tiskárně, která je schopna zajistit ustálený průběh tisku.

Přes zmíněné obtíže a z nich vycházející snížení pevnosti v tlaku oproti monoliticky vytvořeným vzorkům však tlaková pevnost směsi v tomto uložení dosahuje i při zjištěném snížení relativně uspokojivých hodnot.

Tabulka 5: Výsledky zkoušky pevnosti v tlaku



### 7.3.2 Pevnost v tahu za ohybu

Stejně jako u výsledků zkoušek pevnosti v tlaku dosahuje materiál i při zkoušení pevnosti v tahu za ohybu nejvyšších hodnot při monolitickém uložení, ovšem na rozdíl od předchozí kapitoly o zkoušení pevnosti v tlaku, při této zkoušce již různé způsoby uložení nevykazují tak dramatické vzájemné rozdíly pevností.

Jak již bylo zmíněno dříve, u vzorků s provazci se vzájemnou rotací o 90° došlo v souladu s očekáváním k porušení vzorků v místě styku provazců ve střední, příčně orientované vrstvě. Styčná plocha těchto provazců pravděpodobně nebyla dostatečná, aby byla schopna bezpečně zajistit jejich spojení. Rovněž styčná provazců s provazci podélnými byla velice nízká a k porušení podélných provazců došlo v odlišném místě než na porušeném spoji příčných provazců. Pevnost v tahu za ohybu vzorků takto uloženého materiálu dosahovala přibližně 83% pevnosti monoliticky vytvořených vzorků.

Navzdory očekávání se však uložení materiálu s rotací provazců o 90° prokázalo jako nejméně vhodný způsob uložení. Nejhorší hodnoty pevnosti v tahu za ohybu byly zjištěny při rovnoběžném uložení jednotlivých provazců. Tento fakt je zřejmě, jak bylo popsáno již dříve u zkoušek pevnosti v tlaku, způsoben nedostatečnou vzájemnou přilnavostí jednotlivých provazců a dutinami mezi provazci vzorku. Jednotlivé provazce byly porušeny v různých místech v závislosti na vlastním nejslabším místě směsi, místo aby se chovaly jako jeden celek. Pevnost takového uložení vykazovala přibližně 79% pevnosti materiálu při monolitickém uložení.

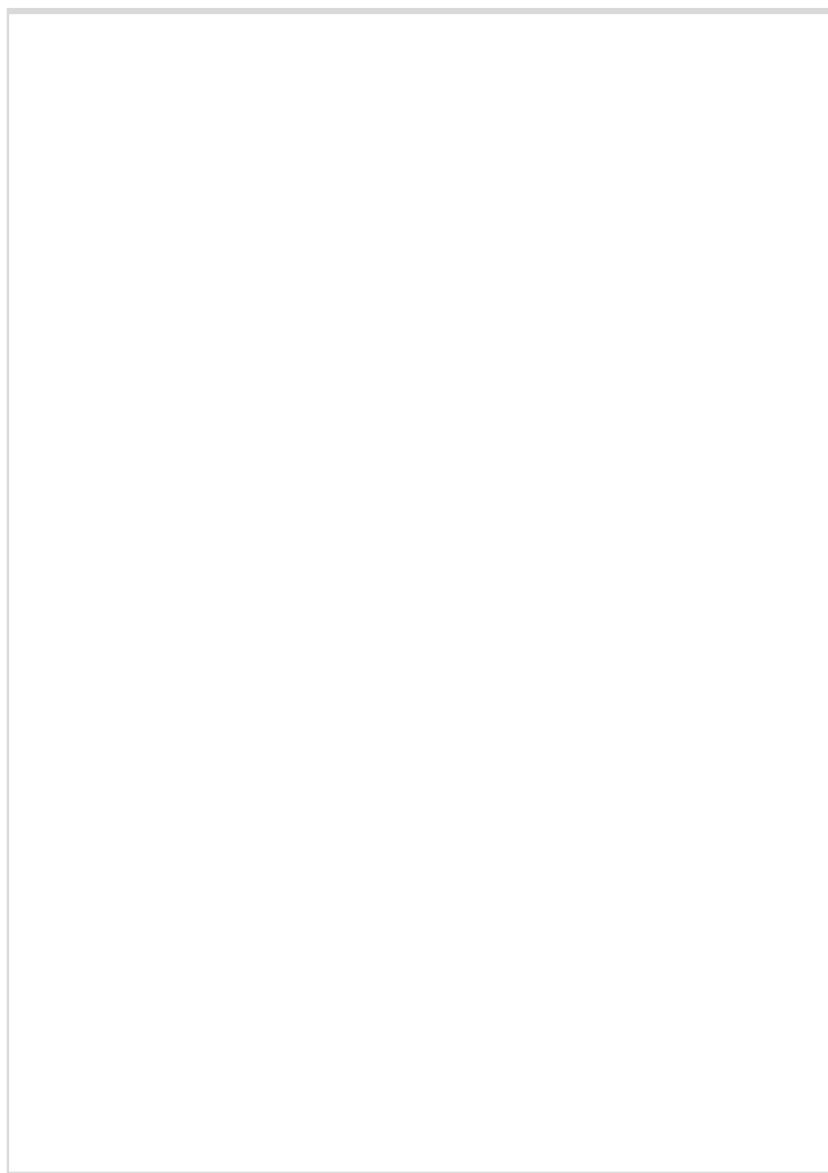
Mezi vzorky z 3D tištěného betonu byly nejvyšší hodnoty naměřeny u vzorků se vzájemnou rotací provazců o 45°. Kromě monolitického uložení se jedná o jediný způsob uložení, kdy porušení průřezu proběhlo celistvěji, ne jako porušení jednotlivých

částí průřezu. Pevnost vzorků takového uložení vůči pevnosti monolitických vzorků byla přibližně 98%. Zdá se tedy být zcela srovnatelným způsobem uložení.

Je však nutno mít na paměti, že tyto zkoušky byly prováděny na zcela vyplněných průřezích. Dá se předpokládat, že reálný 3D tisk bude probíhat především na podélně tištěných prvcích s možností částečného vyplnění ve smyslu vytvoření „vnitřní příhradové konstrukce“ nebo s použitím vytištěných provazců jako ztraceného bednění pro následně vlévaný materiál.

Stejně jako u zkoušek pevnosti v tlaku 3D tištěné vzorky z vytvořené směsi, přes zjevné nedostatky pevnosti v tahu za ohybu oproti monolitickému uložení materiálu, dosahovaly překvapivě uspokojivých hodnot. Tyto hodnoty jsou uvedeny v tabulce č. 6.

*Tabulka 6: Výsledky zkoušky pevnosti v tahu za ohybu*

The image shows a large, empty rectangular frame, which is likely a placeholder for a table. The table is not visible, only the empty border is present.

## 8 Závěr

Teoretická část práce si za cíl vytyčila obeznámení čtenáře s pojmem aditivní výroby neboli 3D tisku a s možnostmi současných technologií 3D tisku napříč různými výchozími materiály. Byly uvedeny univerzitní výzkumy i komerční tiskárny a vysvětleny základní principy jejich využití včetně zmínění výhod, nevýhod a vzájemných odlišností nebo naopak vzájemných rozvíjení jednotlivých technologií.

Byly zmíněny přístupy k aditivní výrobě a z toho vyplývající přínos těchto technologií vzhledem k možnostem zvýšení efektivity práce a využití materiálních i lidských zdrojů, vzhledem k možnostem optimalizace konstrukcí, zvýšení využití kreativity jejich tvůrců a v neposlední řadě výrazný potenciál k významnému zmírnění ekologické zátěže jednotlivých budovaných stavebních objektů.

Cílem praktické části práce bylo nejdříve navrhnout směs použitelnou pro zvolenou metodu 3D tisku a poté sledovat rozdílné vlastnosti této výchozí směsi při různých způsobech uložení.

V úvodu praktické části jsou popsána úskalí návrhu směsi pro 3D tisk v podobě protichůdných požadavků na konzistenci směsi při průchodu tiskárnou a na schopnost nést vrstvy dále nanášené. Dále byla zmíněna nutnost návrhu specifické směsi pro každou jednotlivou konstrukci s jejími konkrétními podmínkami ohledně způsobu tisku směsi i konečného působení prvku.

V průběhu praktické části práce jsou postupně popisována stádia návrhu od zjištění vyhovujícího vodního součinitele a množství plastifikátoru po vhodné zastoupení jednotlivých velikostí zrn kameniva ve směsi. Podrobně jsou popsány změny směsi vykonané v závislosti na jednotlivých zjištěních.

Tyto snahy vedly k vytvoření krychelných vzorků zkoušených na pevnost v tlaku a vzorků pro zkoušky pevnosti v tahu za ohybu.

Zatímco u krychelných vzorků byly zkoušeny pouze dva způsoby uložení (monolitické a soubor rovnoběžně orientovaných provazců) a pevnostní rozdíl těchto uložení byl v tlaku markantní, vzorky pro zkoušení pevnosti v tahu za ohybu byly vytvořeny ve čtyřech různých způsobech uložení (monolitické, soubor podélných rovnoběžně orientovaných provazců, provazce s rotací o 45° a 90°) a vzájemné rozdíly těchto uložení se jeví výrazně nižší.

Dle očekávání byly u obou zkoušek hodnoty pevnosti nejvyšší v monolitickém uložení. Ve zkoušce vzorků v tahu za ohybu pak vysokou pevnost vykazovaly vzorky s

provazci s rotací o 45° o něco nižší pevnost byla naměřena u vzorků s provazci s rotací o 90° a nejnižší pevnosti dosáhly vzorky s podélnými rovnoběžně orientovanými provazci.

Snížená pevnost 3D tištěných může být vysvětlena nedostatečnou vzájemnou přilnavostí jednotlivých provazců, která se ostatně projevila během zkoušky pevnosti v tahu za ohybu u vzorků s provazci s rotací o 90°, kde ve dvou případech ze tří došlo k oddělení ve vrstvě s rotací. Dalším faktorem je množství dutin v průřezech vzorků podél jednotlivých provazců, jelikož ty byly tištěny kruhovou tryskou a směs byla navržena pro tvarovou stálost pro vytisknutí, nedošlo tedy ke spojení provazců v žádoucí ploše.

Za prvé je nutno zaměřit se na zařízení k 3D tisku betonu, které by mělo obsahovat trysku rovnoběžníkového průřezu nebo trysku osadit hladítka po vzoru Countour Crafting, případně obojí. Je také nutno zajistit ustálený tlak na směs s dostatečným zásobníkem, který by ovšem bylo nutno osadit jemným vibrátorem nebo zařízením, které zajistí promíchávání čerstvého materiálu v zásobníku.

Za druhé by bylo zapotřebí dále se věnovat vývoji vhodné směsi, jelikož jednak změna zařízení na 3D tisk přirozeně zapříčiní dílčí změny v samotné směsi a jednak přes uspokojivé výsledky pevnostních zkoušek se při zkouškách objevila slabina směsi v nedokonalém propojení a tedy spolupůsobení provazců.

Vzhledem k poměru plniva k pojivu 3:2 lze u směsi očekávat relativně velké hodnoty smršťování. Záležitost smršťování nebyla v této práci řešena a bylo by vhodné dále se jí stejně jako ostatním zmíněným faktorům věnovat jako předmětu dalšího výzkumu.

## Seznam obrázků

Obr. č.	Název obrázku	Číslo stránky
1	Skulptura vytvořena ve frézovaném bednění, Danish Technological Institute	11
2	„Sebe replikující“ tiskárna, model Prusa Mendel	12
3	Metoda tisku SLA	14
4	Metoda tisku PolyJet	15
5	Tiskárna Perfactory, společnost EnvisionTEC	15
6	Technologie Selective Laser Sintering	17
7	ColorJet Printing tiskárna	18
8	Voxeljet 3D tisk, světlé části – nevyužitý materiál, tmavé části – materiál s pojivem	19
9	Tiskárna FDM, a) výchozí materiál, b) tavení materiálu, c) tištěný výrobek, d) podpurný materiál, e) pohyblivá základní deska	21
10	Laminated Object Manufacturing	22
11	Ultrasonic Consolidation	23
12	Tryska s bočními hladítky	26
13	Rámová konstrukce CC tiskárny s ramenem pro umístění horizontálních prvků	27
14	Rámová konstrukce tiskárny, Loughborough University	28
15	Wonder bench z roku 2012, Loughborough University	29
16	Proces tisku, WinSun	30
17	Montáž prefabrikovaných částí, WinSun	31
18	Příklad prefabrikovaného prvku, WinSun	31
19	Rameno CyBe	32
20	Tisk ramenem CyBe	33
21	Roboti Minibuilders, zleva: Foundation, Grip, Vacuum Robot	34
22	Tisk základních vrstev pomocí Foundation Minibuilderů	35
23	Grip Minibuilder	36
24	Možnost tisku horizontálních konstrukcí pomocí Grip Minibuilderu	36
25	Lokální zesilování pomocí Vacuum Minibuilderu	37
26	Tisk D-Shape	39
27	Produkt D-Shape	39

<b>Obr. č.</b>	<b>Název obrázku</b>	<b>Číslo stránky</b>
28	Bolomeyova křivka zrnitosti	42
29	Ukázka směsí, zleva směs 3, 4 a 5	46
30	Použitá pistole a tryska pro simulaci 3D tisku	47
31	Schéma rozložení kameniva, vlevo nevhodné, vpravo vhodné (větší zrna „obalena“ menšími, lepší vzájemný pohyb)	48
32	Vzorky vytvořené pistolí z Obr. č. 29, zleva směs 2, 3, 4, 5	50
33	Vlevo krychle 3D tisk, vpravo monolitická	50
34	Zleva kvádr 1) monolitický, 2) rovnoběžně orientované provazce, 3) rotace vrstev o 90°, 4) rotace vrstev o 45°	51
35	Uspořádání pro zkoušku pevnosti betonu v tlaku	53
36	Uspořádání pro zkoušku pevnosti betonu v tahu za ohybu, trojbodový ohyb	53
37	Zkouška krychle 100x100x100 mm z monolitického betonu	54
38	Zkouška krychle 100x100x100 mm z rovnoběžně orientovaných provazců materiálu	55
39	Porušení třetího vzorku 3D tištěné krychle s rovnoběžně orientovanými provazci materiálu	55
40	Zkouška pevnosti v tahu za ohybu – těleso s rovnoběžně orientovanými provazci	56
41	Porušení vzorku s rovnoběžně orientovanými provazci	57
42	Porušení vzorku s rovnoběžnými provazci	57

## Seznam tabulek

<b>Tabulka. č.</b>	<b>Název tabulky</b>	<b>Číslo stránky</b>
1	Směs Loughborough University	44
2	Složení směsí Fáze I	45
3	Složení směsí Fáze II	49
4	Směs použitá pro tvorbu vzorků	52
5	Výsledky zkoušky pevnosti v tlaku	59
6	Výsledky zkoušky pevnosti v tahu za ohybu	60



## Seznam použité literatury

Označení	Zdroj
[1]	Nielsen, Kurt. Robots create architecture of the future. <i>sparc-robotics.eu</i> . [Online] 2014. [Citace: 4. 1 2018] <a href="http://sparc-robotics.eu/robots-create-the-architechure-of-the-future/">http://sparc-robotics.eu/robots-create-the-architechure-of-the-future/</a> .
[2]	CHUA, Chee Kai a LEONG, Kah Fai. <i>3D printing and additive manufacturing: principles and applications. Fourth edition of Rapid prototyping</i> . Hackensack, New Jersey: World Scientific, 2015, xxviii, 518 stran. ISBN 9789814571418.
[3]	ENVISIONTEC, Brožura. Biofabrication Booklet [online]. 2015 [Citace: 4. 1 2018]. Dostupné z: <a href="http://envisiontec.com/envisiontec/wp-content/uploads/MK-INDBiofabricationBooklet-V01-FN-EN.pdf">http://envisiontec.com/envisiontec/wp-content/uploads/MK-INDBiofabricationBooklet-V01-FN-EN.pdf</a>
[4]	Chee Kai Chua, Kah Fai Leong. <i>3D Printing and Additive Manufacturing - Principles and applications</i> . Nanyang Technology University, Singapore : World Scientific, 2015. ISBN 9789814571401. [Citace: 4. 1 2018]
[5]	Obrázek z webu. <i>Quill and Pad</i> . [Online] [Citace: 4. 1 2018] <a href="http://quillandpad.com/wp-content/uploads/2014/06/3D-printing-processes.jpg">http://quillandpad.com/wp-content/uploads/2014/06/3D-printing-processes.jpg</a> .
[6]	Vaughan, Kevin. How to print a 3D architectural model on a project 660 from 3D systems. <i>www.tavco.net</i> . [Online] 31. 10 2013. [Citace: 4. 1 2018] <a href="http://www.tavco.net/wide-format-plotter-scanner-blog/bid/128038/How-to-Print-a-3D-Architectural-Model-on-a-ProJet-660-from-3D-Systems">http://www.tavco.net/wide-format-plotter-scanner-blog/bid/128038/How-to-Print-a-3D-Architectural-Model-on-a-ProJet-660-from-3D-Systems</a> .
[7]	VOXELJET. <i>VX4000: The World's biggest industrial 3D printer</i> [online]. Firemni podklady společnosti Voxeljet, 2015 [Citace: 4. 1 2018]. Dostupné z: <a href="http://www.voxeljet.de/en/systems/vx4000/">http://www.voxeljet.de/en/systems/vx4000/</a>
[8]	HUSSEY, Matt. <i>3D printing robot by Joris Laarman draws freeform metal lines</i> [online]. El. článek 02/2014, Dezeen magazine [Citace: 4. 1 2018]. Dostupné z: <a href="http://www.dezeen.com/2014/02/21/3d-printing-robot-by-joris-laarman-drawsfreeform-metal-lines/">http://www.dezeen.com/2014/02/21/3d-printing-robot-by-joris-laarman-drawsfreeform-metal-lines/</a>
[9]	Nouari Saheb, Samir Mekid. Fiber-Embedded Metallic Materials: From Sensing towards Nervous Behavior. <i>mdpi - materials</i> . [Online] 2015. [Citace: 4. 1 2018] <a href="http://www.mdpi.com/1996-1944/8/11/5435">http://www.mdpi.com/1996-1944/8/11/5435</a> .
[10]	Khoshnevis, Behrokh. Automated construction by Contour Crafting - Related robotics and information technologies . <i>Contourcrafting.org</i> . [Online] 2004. [Citace: 4. 1 2018] <a href="http://contourcrafting.org/wp-content/uploads/2013/04/AIC2004-Paper1.pdf">http://contourcrafting.org/wp-content/uploads/2013/04/AIC2004-Paper1.pdf</a> .
[11]	Le, Thanh T., Austin, Simon A., Lim, Sungwoo, Buswell, Richard A. a kol. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. <i>Loughborough University Institutional Repository</i> . [Online] 2012. [Citace: 4. 1 2018] <a href="https://dspace.lboro.ac.uk/2134/10930">https://dspace.lboro.ac.uk/2134/10930</a> .
[12]	KHOSHNEVIS, Behrokh. <i>Automated Construction by Contour Crafting – Related Robotics and Information Technologies</i> [online]. 01/2004 [Citace: 4. 1 2018]. Dostupné z: <a href="http://contourcrafting.org/wp-content/uploads/2013/04/AIC2004-Paper1.pdf">contourcrafting.org/wp-content/uploads/2013/04/AIC2004-Paper1.pdf</a>
[13]	Grozdanic, Lidija. Huge 3D printer can print an entire two-story house in under a day. <i>Inhabitat.com</i> . [Online] 2014. [Citace: 4. 1 2018]

	<a href="http://inhabitat.com/large-3d-printer-can-print-an-entire-two-story-house-in-under-a-day/">http://inhabitat.com/large-3d-printer-can-print-an-entire-two-story-house-in-under-a-day/</a> .
[14]	CLIFFORD, Matt. <i>Huge 3D printer can build homes in 24 hours</i> [online]. El. članek [Citace: 4. 1 2018]. Dostupne z: <a href="http://www.technology4change.com/article.jsp?id=354#.Vpgsi_krLct">http://www.technology4change.com/article.jsp?id=354#.Vpgsi_krLct</a>
[15]	LOUGHBOROUGH, University. <i>Partnership aims to develop 3D concrete printing in construction</i> [online]. Webove stranky univerzity, 2014 [Citace: 4. 1 2018]. Dostupne z: <a href="http://www.lboro.ac.uk/news-events/news/2014/november/204-skanska.html">http://www.lboro.ac.uk/news-events/news/2014/november/204-skanska.html</a>
[16]	Firemní web. Kuka industrial robots. <a href="http://www.kuka-robotics.com/">http://www.kuka-robotics.com/</a> . [Online] Kuka Roboter GmbH. [Citace: 4. 1 2018] <a href="http://www.kuka-robotics.com/cs/products/industrial_robots/medium/kr30_116_2/start.htm">http://www.kuka-robotics.com/cs/products/industrial_robots/medium/kr30_116_2/start.htm</a> .
[17]	BUSWELL, Richard et al. <i>Development od a viable concrete printing proces</i> [online]. Loughborough University 2012 [Citace: 4. 1 2018]. Dostupne z: <a href="http://www.iaarc.org/publications/fulltext/S20-3.pdf">http://www.iaarc.org/publications/fulltext/S20-3.pdf</a>
[18]	LE, Thang et al. <i>Hardened properties of high-performance printing concrete</i> [online]. Loughborough University, 2012 [Citace: 4. 1 2018]. Dostupne z: <a href="https://dspace.lboro.ac.uk/2134/10929">https://dspace.lboro.ac.uk/2134/10929</a>
[19]	ZEMÁNEK Martin, <i>Možnosti využití aditivní výroby ve stavebnictví</i> . Dipl. Práce, 2016 [Citace: 4. 1 2018].
[20]	STOTT, Rory. <i>IAAC Invents a Family of Robots to 3D Print Structures of Any Size</i> . [online]. El. članek 06/2014 [Citace: 4. 1 2018]. Dostupne z: <a href="http://www.archdaily.com/517378/iaac-invents-a-family-of-robots-to-3d-printstructures-of-any-size/">http://www.archdaily.com/517378/iaac-invents-a-family-of-robots-to-3d-printstructures-of-any-size/</a>
[21]	SUN, Alex. <i>3D-printed cities: is this the future?</i> [online]. El. novinovy članek 02/2015 [Citace: 4. 1 2018]. Dostupne z: <a href="http://www.theguardian.com">http://www.theguardian.com</a>
[22]	WINSUN. <i>3D Printing Construction</i> [online]. Firemni webove stranky, 2015 [Citace: 4. 1 2018]. Dostupne z: <a href="http://www.yhbm.com/">http://www.yhbm.com/</a>
[23]	WHEELER, Andrew. <i>CyBe Be 3D Printing Concrete Walls</i> , [online]. El. novinovy članek 12/2015 [Citace: 4. 1 2018]. Dostupne z: <a href="http://3dprintingindustry.com/2015/01/07/cybe-3d-printing-concrete-walls/">http://3dprintingindustry.com/2015/01/07/cybe-3d-printing-concrete-walls/</a>
[24]	JOKIČ Saša, NIVIKOV Petr et al. <i>Small robots printing big structures – Robots IAAC</i> [online]. 06/2014 [Citace: 4. 1 2018]. Dostupne z : <a href="http://robots.iaac.net/#robots">http://robots.iaac.net/#robots</a>
[25]	JOKIČ Saša, NIVIKOV Petr et al. <i>Robotic positioning device for threedimensional printing, IAAC</i> [online]. 06/2014 [Citace: 4. 1 2018]. Dostupne z: <a href="http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1406/1406.3400.pdf">http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1406/1406.3400.pdf</a>
[26]	DINI Enrico. <i>Large Scale Free-form 3D Printing</i> , [online]. Firemni podklady spolčnosti D-shape, 2015 [Citace: 4. 1 2018]. Dostupne z: <a href="http://www.d-shape.com">www.d-shape.com</a>
[27]	CESARETTI, Giovanni. <i>3D Printed building blocks using lunar soil</i> [online]. Firemni podklady spolčnosti ALTA S.p.A. 05/2012 [Citace: 4. 1 2018]. Dostupne z: <a href="http://gsp.esa.int/documents/10192/43064675/C22835ExS.pdf/ce5dca46-e4c9-4980-a9d3-918decd24bd0">gsp.esa.int/documents/10192/43064675/C22835ExS.pdf/ce5dca46-e4c9-4980-a9d3-918decd24bd0</a>
[28]	HOFMEISTER, William et al. <i>Investigating Solidification with the Laser-Engineered Net Shaping (LENS™) Process</i> [online]. 07/1999 [Citace: 4. 1

	2018].Dostupne z: <a href="http://tms.org/pubs/journals/jom/9907/hofmeister/hofmeister-9907.html">http://tms.org/pubs/journals/jom/9907/hofmeister/hofmeister-9907.html</a>
[29]	ČEPEC Martin, <i>CAM výroby atypických stavebních dílců na bázi betonu a její ekonomické porovnání s konvenční technologií</i> . Dipl. Práce, 2016 [Citace: 4. 1 2018].
[30]	WOLFS, Rob. <i>3D Printing of Concrete Structures</i> [online]. 02/2015 [Citace: 4. 1 2018]. Dostupne z: <a href="http://encistudieprijs.nl/wp-content/uploads/2015/12/2015-06-R.J.M.-Wolfs-Graduation-Thesis.pdf">http://encistudieprijs.nl/wp-content/uploads/2015/12/2015-06-R.J.M.-Wolfs-Graduation-Thesis.pdf</a>
[31]	ČSN EN 206 Concrete - Specification, performance, production and conformity, [Citace: 4. 1 2018].

Odkazy na všechny v této práci uvedené webové stránky byly v době psaní a odevzdání práce aktivní.