



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

PARAMETRY 3D TISKU Z BETONU

PARAMETRES OF 3D PRINTING OF CONCRETE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

David Navrátil

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Petr Kočiš

BRNO 2023

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student: **David Navrátil**
Studijní program: Základy strojního inženýrství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Petr Kočiš**
Akademický rok: 2022/23

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Parametry 3D tisku z betonu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Student provede důkladnou rešerši zaměřenou na parametry 3D tisku betonu při známých metodách tisku. Práce bude zaměřena především na parametry tisku v souvislosti s minimalizací odpadu nedokonale homogenizované směsi.

Cíle bakalářské práce:

Přehled současného stavu a poznání. Systémový rozbor zjištěných poznatků. Porovnání hlavních nalezených parametrů multikriteriální analýzou. Zhodnocení zjištěných informací na základě systémového rozboru a multikriteriální analýzy. Vlastní doporučení pro praxi.

Seznam doporučené literatury:

MAREK, Jiří. Konstrukce CNC obráběcích strojů III. Praha: MM publishing, s.r.o., 2014. MM speciál. ISBN 978-80-260-6780-1.

NOORANI, Rafiq. 3D Printing: Technology, Applications, and Selection. 1. CRC Press, 2018. DOI: 10.1201/9781315155494. ISBN 9781498783750.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá rešerší parametrů 3D tisku z betonu v souvislosti s minimalizací nedokonale zhomogenizované směsi při známých metodách tisku. První blok práce je věnován rešerši, která je rozdělená na tři kapitoly. V první části rešerše je téma, zabývající se známými technologiemi 3D tisku z betonu. Druhá část rešerše je věnována popisu jednotlivých komponentů 3D tiskového zařízení. Třetí a zároveň poslední část rešerše je stanovení základních parametrů 3D tisku z betonu a to včetně jejich popisu. Druhý blok práce začíná systémovým rozbohem a formulací problematiky. Následuje výpis zjištěných parametrů nabízených tiskáren vybraných společností. Provedla se multikriteriální analýza, která rozhodla o tiskárně s optimálními parametry, jež jsou spojeny s minimalizací odpadu nedokonale zhomogenizované směsi. Závěrem práce je diskuze o možném pokračování problematiky, společně s vlastním doporučením pro praxi.

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with the investigation of 3D printing parameters of concrete in the context of minimizing imperfectly homogenized mixtures with known printing methods. The first part of the thesis is devoted to the research, which is divided into three parts. In the first part of the research is a topic dealing with known technologies of 3D printing from concrete. The second part of the research is devoted to the description of the individual components of 3D printing equipment. As the last part of the research is the determination of basic parameters of 3D printing from concrete, including their description. The second part of the thesis starts with the system analysis and formulation of the problem. This is followed by a listing of the identified parameters of the printers offered by the selected companies. Then, a multicriteria analysis was performed to decide on the printer with optimal parameters, which are associated with minimizing the waste of the imperfectly homogenized mixture. The thesis concludes with a discussion of the possible continuation of the problem, together with its own recommendations for practice.

KLÍČOVÁ SLOVA

3D tisk betonu, aditivní technologie, parametry, betonová směs, minimalizace odpadu

KEYWORDS

3D concrete printing, additive technology, parameters, concrete mix, waste minimization

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

NAVRÁTIL, David. *Parametry 3D tisku z betonu*. Brno, 2023. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/149511>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Petr Kočíš.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval Ing. Petru Kočišovi za ochotu a cenné rady, které mi předal v průběhu vedení této bakalářské práce.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Petra Kočíše a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 25. 5. 2023

.....
Navrátil David

OBSAH

1 ÚVOD	17
2 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ.....	19
2.1 Historie 3D tisku	19
2.2 Obecná technologie 3D tisku	20
2.3 Technologie 3D tisku ve stavebním průmyslu	21
2.3.1 Vytlačování cementové malty (<i>Contour crafting - CC</i>).....	22
2.3.2 Tisk betonu (<i>Concrete printing – 3DCP</i>).....	23
2.3.3 Big Delta WASP	24
2.3.4 CONPrint3D.....	25
2.3.5 WinSun.....	26
2.3.6 Apis Cor	27
2.3.7 ICON	28
2.3.8 Total Kustom.....	29
2.3.9 XtreeE.....	30
2.3.10 HuaShang Tengda	31
2.3.11 CyBe.....	32
2.3.12 Spojování kameniva (<i>D-Shape printing</i>).....	33
2.4 Sestava tiskového zařízení pro 3D tisk z betonu	34
2.4.1 Průmyslový robot	35
2.4.2 Míchací zařízení na beton	35
2.4.3 Dodávací zařízení betonu	36
2.4.4 Ohřívací zařízení betonu	37
2.4.5 Tisková hlava	37
3 PARAMETRY 3D TISKU BETONU.....	39
3.1 Výška vrstvy.....	39
3.1.1 Tryska kruhového průřezu.....	39
3.1.2 Tryska obdélníkového průřezu	40
3.2 Rychlost tisku.....	41
3.3 Teplota tisku.....	41
3.4 Tiskový materiál.....	42
3.4.1 Složení tiskového betonu	42
3.4.2 Tuhnutí a tvrdnutí betonové směsi	44
3.4.3 Kritéria betonové směsi.....	44
3.4.4 Recyklace tiskového materiálu.....	44
3.5 Velikost tiskové plochy	45

3.6 Obecné shrnutí parametrů 3D tisku betonu	46
4 SYSTÉMOVÝ ROZBOR	47
4.1 Problémová situace	47
4.2 Formulace problému	47
4.3 Cíle a řešení	47
4.4 Schéma postupu práce	48
5 PARAMETRY TISKU VYBRANÝCH TECHNOLOGIÍ	49
5.1 Delta WASP	49
5.1.1 Výška vrstvy	49
5.1.2 Rychlost tisku	49
5.1.3 Teplota tisku	50
5.1.4 Tiskový materiál	50
5.1.5 Velikost tiskové plochy	51
5.2 Total Kustom	53
5.2.1 Výška vrstvy	53
5.2.2 Rychlost tisku	53
5.2.3 Teplota tisku	53
5.2.4 Tiskový materiál	54
5.2.5 Velikost tiskové plochy	54
5.3 CyBe	55
5.3.1 Výška vrstvy	55
5.3.2 Rychlost tisku	55
5.3.3 Teplota tisku	55
5.3.4 Tiskový materiál	56
5.3.5 Velikost tiskové plochy	57
5.4 ICE Industrial Services	58
5.4.1 Výška vrstvy	58
5.4.2 Rychlost tisku	58
5.4.3 Teplota tisku	58
5.4.4 Tiskový materiál	59
5.4.5 Velikost tiskové plochy	59
6 MULTIKRITERIÁLNÍ ANALÝZA	59
6.1 Hodnotící parametry	60
6.2 Přiřazení váhy jednotlivým parametrům tisku	61
6.3 Delta WASP – Crane WASP	62
6.4 Total Kustom – StroyBot 6.2	63
6.5 CyBe – CyBe RC 3DP (Mobile)	64

6.6 ICE Industrial Services – Modifikovaný robot Kuka.....	65
6.7 Shrnutí multikriteriální analýzy.....	66
7 DISKUZE A ZHODNOCENÍ	67
7.1 Možné pokračování	67
7.2 Doporučení pro praxi	67
8 ZÁVĚR.....	68
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	70
SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ	75
SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK.....	76
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	77

1 ÚVOD

Automatizace ve stavebním průmyslu je v porovnání s jinými průmyslovými obory na velice nízké úrovni. Všeobecně aditivní technologie ukazují rozvíjející se odvětví průmyslu, které nabízí velikou škálu nových technologických možností. Mezi ty novější technologie patří právě 3D tisk betonových směsí. Tato revoluční metoda přináší obrovský inovativní přístup ke stavbě složitých geometrických tvarů, které jsou zakomponovány do domů i dalších rozsáhlých staveb. Technologie 3D tisku betonu snižuje náklady na stavbu, popřípadě na urychlení procesu výstavby. Další efektivitou této technologie je například úpadek přidružených prací, mezi které patří přeprava stavebních materiálů a stavba bednění pro lící beton.

Přestože je 3D tisk betonových směsí schopen snížit náklady až o 50 %, je zde stále problém týkající se odpadu z nedokale zhomogenizované směsi. Tato nedokonalá betonová směs vzniká při počátku tisku, kdy je nutné čerstvě smíchaný beton nechat proběhnout kompletním tiskovým zařízením. Společně s ideálními parametry tisku se zdatelně sníží možnost výskytu kolize v souvislosti s nedokonale zhomogenizovanou směsí. Dále se samozřejmě docílí betonové směsi, která má požadované vlastnosti pro 3D tisk. Nevýhodou tohoto procesu je vznik velkého množství odpadu. Tato bakalářská práce se bude věnovat parametrům tisku v souvislosti s minimalizací nedokonale zhomogenizované směsi při známých metodách 3D tisku betonových směsí.

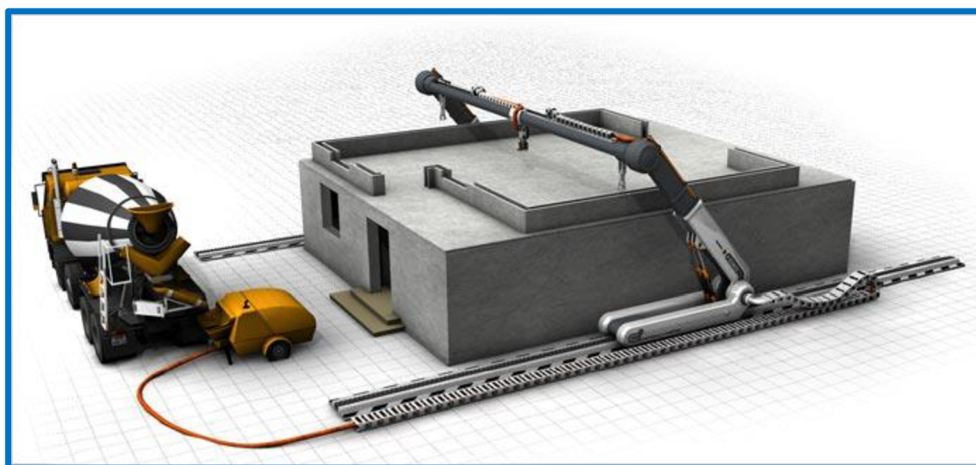
2 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

2.1 Historie 3D tisku

Přestože 3D tisk je pro většinu lidí jedna z novějších technologií, její kořeny sahají do druhé poloviny 20. století. Již v roce 1986 si Chuck Hull nechal patentovat technologii stereolitografie. Tato metoda tisku je založena na trojdimenzionálním laserovém tisku s využitím UV laseru a fotopolymeru v tekuté formě. Těsně před koncem 90. let firma 3D Systems, kterou Chuck Hull vlastnil stvořila první stroj tisknoucí v trojrozměrném formátu. Tato 3D tiskárna neboli tzv. stereolitografický aparát dostal název SLA-1. Modely těchto tiskáren se staly pevným základem pro vývoj dnešních 3D tiskáren, popřípadě i CNC strojů. Je důležité podotknout, že stereolitografický aparát SLA-1 byl používán jen zkušebními (beta) zákazníky. Postupným vývojem přišel na svět nový model SLA-250, který už byl přístupný pro širokou veřejnost, Samotný pojem „3D tiskárna“ se začal používat ve druhé polovině 90. let. [1]

Zmínka o 3D tisku ve stavebním průmyslu přišla o pár let později, kdy americká společnost Contour Crafting v roce 1996 podala první patent. Společnost byla založena v roce 1994 na univerzitě v Jižní Kalifornii. Za jejím vznikem stojí profesor Behrokh Khoshnevis. V roce 2011 byla technologie profesora Khoshnevisa vybrána pro tisk základen na Měsíci a Marsu pod záštitou agentury NASA. Postupem času se o tuto technologii ve stavebním průmyslu začalo zajímat vícero společností. Mezi tyto společnosti patří například AECOM, Skanska. Začaly se zapojovat i univerzity ve spolupráci s firmami. Později přidali ruku k dílu i společnosti, které se zabývají výrobou stavební hmoty. Mezi tyto firmy patří například Lafarge, Holcim a DuPont. Hlavním cílem těchto společností bylo vyvinout ideální materiály pro 3D tisk ve stavebním průmyslu. [2] [3] [4]

V dnešní době se 3D tisk ve stavebnictví stává velice populárním. Výhodou je jeho využití v různých oblastech stavebního průmyslu. Do budoucna lze očekávat, že tato novodobá technologie bude alternativou metody výroby konstrukcí ve stavebnictví.



Obrázek 1 - Contour Crafting [41]

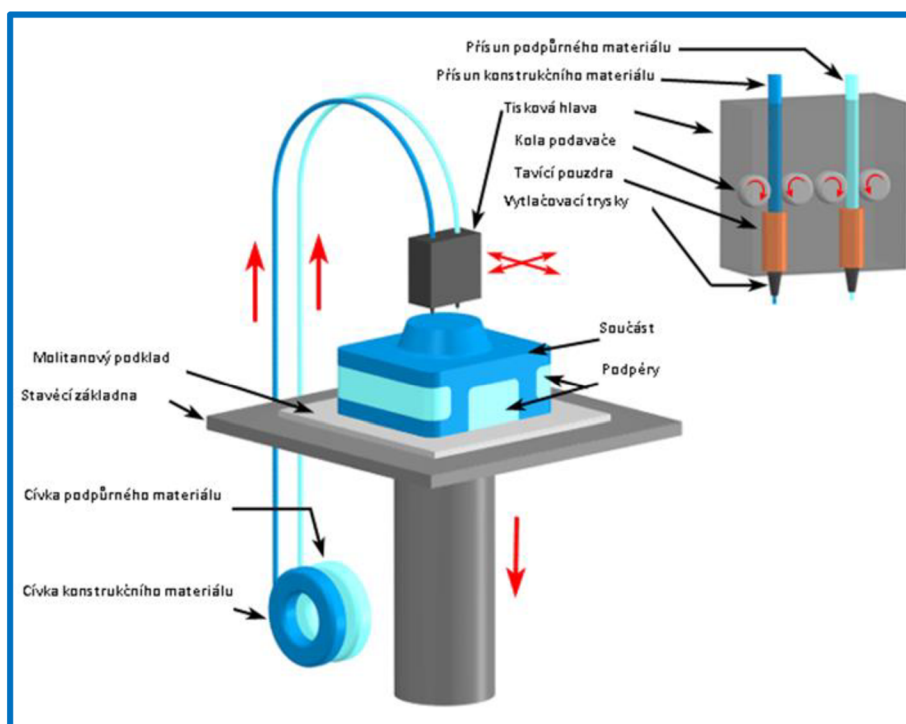
2.2 Obecná technologie 3D tisku

Jedná se způsob výroby trojrozměrných předmětů aditivním procesem. Znamená to tedy, že se materiál přidává (vrstvi). Narozdíl od obráběcích strojů, kde se materiál naopak odebrává (obrábí). Díky této technologii je možné vyrobit díly s jednoduchou, ale i s komplexní geometrií. Na 3D tiskárnách vznikají prototypy i funkční komponenty.

Technologií týkajících se 3D tisku z plastu je spousta. Nejčastěji se vyskytující metodou 3D tisku z plastu je bezesporu FDM (*Fused deposition modeling*), také známá jako FFF (*Fused filament fabrication*) (Obrázek 2). Je založena na tavném nanášení vrstev. Vstupním materiálem (polotovarem) je zde tisková struna neboli filament. Je možnost si vybrat z obrovské škály druhů a barev materiálů. [1] [5]

V dnešní době se 3D tiskárny na plast rozrostly obrovským způsobem. Dá se říct, že nechybí žádnému kutilovi. Není se čemu divit, ceny tiskáren jsou velice přijatelné. Výrobci nepoužívanějších tiskáren jsou Průša, Creality, Anycubic a mnoho dalších.

Proces tvorby modelu pro 3D tisk je velice rychlý a intuitivní. V libovolném CAD systému si vymodelujeme potřebný díl, který si následně uložíme ve formátu STL. Poté tento vytvořený formát vložíme do Sliceru. Jedná se o program, který nám slouží k rozřezání modelu na jednotlivé vrstvy a k nastavení parametrů tisku. Slicer nám umožní nařezaný díl uložit ve formátu G-Code, který vytvoří samotné instrukce pro 3D tiskárnu. Ve zkratce je G-Code formát se kterým je schopný software tiskárny spolupracovat. V tento moment stačí tiskárnu zapnout, zkalibrovat, vložit G-Code z datového zařízení a může se spustit tisk. [1] [6]



Obrázek 2 - Technologie FDM [42]

2.3 Technologie 3D tisku ve stavebním průmyslu

Při použití 3D tisku ve stavebním průmyslu je důležité si uvědomit, kdy se jedná o 3D tisk cementových malt, a kdy o 3D tisk betonových směsí. Je zde několik parametrů, kvůli kterým nelze nazývat směs betonem. [4]

Mezi tyto parametry patří:

- malý vodní součinitel;
- dodatečně vložená vlákna, která zamezí smršťování;
- vysoký obsah příměsí (popílek, mikrosilica) a přísad (plastifikátory, urychlovače). [4]

Nejčastější technologie 3D tisku ve stavitelství mají hodně společného s metodami tisku plastu. Tím je myšleno postupné nanášení vrstev materiálu (Obrázek 3). V případě 3D tisku ve stavebním průmyslu se jako vstupní materiál používá například cementová malta, beton s aditivy, sklo a také nepálená hlína. [2] [3]

U tisku je zásadním faktorem, aby jednotlivé vrstvy byly schopné udržet samy sebe bez deformace. Pro možné vyloučení vzniku deformace se používá aditivum. To se ve většině případů přidává do směsi až v samotné trysce. Nejpoužívanějším aditivem je urychlovač tuhnutí materiálu. Ten má právě za úkol pomoci směsi ztvrdnout za co nejkratší dobu a to bez následné deformace při vrstvení. Tuhnutí materiálu je také ovlivněno časovým intervalem mezi tiskem návazných vrstev. Dalším ovlivňujícím faktorem může být délka samotné vrstvy, popřípadě i krátká přestávka mezi tiskem navazujících vrstev. [2] [3]

Pro tisk se používají víceosá robotická ramena. Mezi nejčastější patří například Kuka, ABB a Fanuc. Dalším typem tiskárny je rámová (portálová) tiskárna, která konstrukcí připomíná dnešní 3D tiskárny na plastový filament typu Průša, Creality Ender a mnoho dalších. Nezvyklou konstrukcí tiskárny je Delta. Vyjmenovaná konstrukční řešení tiskáren jsou fixní (pevně spojená se zemí). Za zmínku stojí i mobilní tiskárny u kterých je možnost jednoduchého přesunu během tisku pomocí kolejničky nebo uložení na pásový podvozek. [2] [3]

Technologie 3D tisku ve stavebnictví se používá pro vytváření modelů a prototypů, tisk prefabrikovaných dílů, výrobu forem betonových konstrukcí a také pro tisk různých dekorativních prvků. [3] [4]



Obrázek 3 - Nanášení vrstvy

2.3.1 Vytlačování cementové malty (*Contour crafting - CC*)

Metoda Contour Crafting je jednou z nejstarších technologií, která byla využívána ve stavebním průmyslu. Také patří mezi nejčastěji vyskytující se metody 3D tisku. Funguje na principu postupného nanášení provazců v horizontálních vrstvách. Vytlačování cementové malty má hodně společného s technologií tisku FDM. Tisknutý materiál je zde cementová malta, nepálená hlína, sklo nebo plast. Protože je u této technologie důležitá únosnost jednotlivých vrstev, je nutné do směsi přidat úměrné množství urychlovače tuhnutí. Tuhnutí materiálu je taky ovlivněno časovým intervalem mezi tiskem návazných vrstev. [4] [7] [8]

Technologie tisku Contour Crafting je určena na tisk mimo halu, tedy ve venkovních prostorech. Z toho důvodu je tiskárna umístěna na velkém portálovém rámu. Dále se skládá z hlavy se třemi tryskami a hladítkem (Obrázek 5). Dvě trysky se starají o tisk vnějších stran stěn a jedna tryska vyplňuje vytvořenou stěnu cementovou směsí vlnitým tvarem. [4] [7] [8]

Výhodou této technologie tisku je samotná konstrukce celé tiskárny. Je zde hodně místa, kde je možné dodatečně připevnit například speciální systém robotické ruky, která je schopna usadit různé obklady stěn. Nevýhodou tisku cementové malty je maximální možný sklon stěny od svislice. Tento sklon činí maximálně 45°. Kdyby tato hodnota sklonu od svislice byla překročena, dojde ke zborcení tištěné stěny. [4] [7] [8]



Obrázek 4 - Metoda Contour Crafting [43]



Obrázek 5 - Tisková hlava s tryskami pro metodu CC [44]

2.3.2 Tisk betonu (*Concrete printing – 3DCP*)

Projekt vznikl na univerzitě Loughborough. Samotná metoda 3DCP je založená na nanášení jednotlivých vrstev, které vznikají vytlačováním předem připravené směsi betonu. Je založena na stejném principu jako metoda vytlačování cementové malty (*Contour crafting*), ale přece jen s malým rozdílem. Největší soustředěnost věnujeme udržování vysokého rozlišení trojrozměrného tvaru pro uložení materiálu. Toto opatření vede k lepším výsledkům při kontrole vnitřní a samozřejmě i vnější geometrie. Běžně se vrstvy horizontálně na tisknoucí podložku. Jako podklad poslouží například paleta s dřevěnou deskou. Každá z vrstev má vliv na konečnou konstrukci. Je nutné brát v potaz jejich orientaci kvůli rozdílné pevnosti v závislosti na směru. [2] [3] [4]

Jak je již z názvu patrné, v tomto případě je vstupním materiálem vysokohodnotný beton, který je v trysce obohacován různými aditivami. V porovnání s předešlou metodou *Contour crafting* se zde dosahuje lepších mechanických vlastností. Řadí se sem pružnost, pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu. [9]

Tisk je určen pro vnitřní prostory. Realizace tisku může být na šestiosém průmyslovém robotu (Obrázek 6) nebo na portálovém systému. Portálové systémy jsou robustní konstrukce, které se rozměrově pohybují okolo 5,4 x 5,5 x 5,4 m. Mezi další důležité komponenty patří řídicí jednotka, čerpadlo a směšovací nádoba. [4]

Další informace týkající se sestavy strojního zařízení pro 3D tisk z betonu budou podrobněji vysvětleny v kapitole 2.4 (Sestava tiskového zařízení pro 3D tisk z betonu).



Obrázek 6 - Pracoviště pro 3D tisk betonu



Obrázek 7 - Výtisky

2.3.3 Big Delta WASP

Zajímavostí této 3D tiskárny je neobvyklá konstrukce. Je označována jako Delta. Jedná se o italský projekt 3D tiskárny pro stavební průmysl. Nepracuje na standardním kartézském systému. Oblastí tisku je tvar trojúhelníku. Obecným a zároveň společným znakem všech 3D tiskáren typu Delta je spodní plošina, která slouží na uchycení tiskové hlavy. Plošina je spojena třemi páry ramen pomocí kulových kloubů, které jsou napojeny na posuvné či rotační osy. [9] [10]

První prototyp má následující velikostní parametry. Vnější strany trojúhelníku měří zhruba 4 m. Maximální výška dosahuje okolo 1,5 m. Směšovací nádoba, která je naplněná betonem se nachází nad tiskovou hlavou (Obrázek 9). Do trysky, která je součástí tiskové hlavy je betonová směs tlačena šnekovým dopravníkem. Mezi další materiály, které se u této metody používají k tisku jsou hlína, vápno a písek. [9]

Velikou výhodou těchto 3D tiskáren je možnost tisku při citelně vyšší rychlosti. Při vývoji tohoto typu tiskárny se zkoušela i výroba železobetonových konstrukcí. Ty vznikají při samotném tisku betonových prvků, které jsou následně spojovány ocelovou výztuží. [9]

S pomocí této tiskárny vznikl velký projekt nesoucí název Gaia, který spočíval v tisku domu s téměř nulovým dopadem na životní prostředí. Při tisku se použilo vícero materiálu mezi který patří hlína, rýžová sláma, rýžových slupek a hydraulické vápno. Celá stavba o ploše 20 m² byla zhotovena za zhruba 10 dní. Náklady této stavby vyšly na zhruba 21 000 Kč. Směšovací nádobou zde byl kolový mlýn, kde docházelo k homogenizaci samotné směsi. [9]



Obrázek 8 - Proces tisku na tiskárně typu Delta [45]



Obrázek 9 - Detail plošiny s tiskovou hlavou [46]

2.3.4 CONPrint3D

Jde o projekt, který je vyvíjen v Drážďanech na technické univerzitě. Technologie CONPrint3D je standardní 3D tisk, který funguje na postupném nanášení jednotlivých vrstev jako v předchozím metodách tisku. Zde byl důraz kladen hlavně na ekonomičnost. Té chtějí docílit použitím stávajících stavebních a výrobních postupů a přizpůsobením nového procesu. Klíčovým přizpůsobením je čerpadlo betonu s výložníky. Na již zmíněné výložníky jsou připojené tiskové hlavy. Čerpadlo na beton je umístěné na nákladním automobilu a dodává beton hadicemi až do tiskové hlavy. Stabilita nákladního automobilu je zajištěna čtyřmi výsuvnými nivelačními rameny, které fungují na hydraulickém principu (Obrázek 10). Výhoda, která stojí za zmínku je vysoká geometrická flexibilita. [9] [11]



Obrázek 10 - Proces tisku u metody CONPrint [47]

2.3.5 WinSun

Jedná se o čínskou společnost, která se dříve zabírala dodávkou stavebního materiálu. V roce 2013 zvládla vytisknout první sérii deseti domů, které v tehdejší době vyšly na zhruba 100 000 Kč. Technologie společnosti Winsun není určena pro venkovní použití. Tiskne objekty ve svém podniku a až poté vytištěný prototyp převáží a kompletuje na místě stavby. Co se týče samotného procesu tisku, tak opět spočívá v postupném nanášení vrstvy materiálu. [9] [12]

U této technologie se využívá betonu, cementu, písku a dalších aditivních přísad, které pomáhají lepšímu průběhu tisku. Zajímavostí této technologie je, že společnost WinSun se snaží využít až 50 % stavebních sutin. Je velmi šetrná k životnímu prostředí a snaží se o optimalizaci odpadu. [12]

Dalšími velkými projekty společnosti WinSun jsou například pěti podlažní bytové domy, které byly realizovány v Šanghaji (Obrázek 11). Tento projekt byl označen jako největší stavba, která byla vytvořena technologií 3D tisku. Mimo vytištěné prvky stěn se využilo i ztraceného bednění, které bylo zalito betonem. Jako další projekt byla výstavba soustav kanceláří v Dubaji o celkové rozloze 250 m² (Obrázek 12). Tento projekt byl tištěn v podniku, nikoli na staveništi. Celková realizace projektu byla hotová za 19 dní. Oba projekty byly úspěšně zkolaudovány. [9]



Obrázek 11 - Vytištěný podlažní bytový dům od společnosti WinSun [48]



Obrázek 12 - Vytištěná kancelář od společnosti WinSun [49]

2.3.6 Apis Cor

Technologie pochází z USA. Věnuje se tisknutí staveb přímo na místě, nikoli mimo stavbu ve vnitřních prostorách. Tisk opět probíhá postupným vrstvením betonové směsi. Společnost má momentálně svoje kompletní tiskové zařízení pojmenované po jednotlivých strojích. Frank (Průmyslový robot s teleskopickým ramenem), Gary (míchací a čerpací zařízení) a Mary (dodávka tiskové směsi). [9] [13]

Apis Cor k tisku využívá zejména geopolymerní beton. Pro zlepšení mechanických vlastností se již zmíněný beton horizontálně zpevňuje výtuzí, která je založená na bázi skleněných vláken (Obrázek 14). Pro lepší izolační vlastnosti se do stěn zabudovává sypaná izolace, popřípadě je možné použít i polyuretanovou pěnu. [9]

Mezi výhody této tiskárny jako celku patří hmotnost a stabilita ramena tiskárny kvůli protizávaží. Asi největší výhodou je mobilita tiskového stroje z důvodu nižší hmotnosti, která je okolo 2 tun. Nevýhody, které stojí za zmínku, jsou omezené kruhové plochy tisku, které se pohybují okolo 132 m². [9] [13]

Jakožto každá společnost, tak i Apis Cor se zapojilo do mnoha projektů. Apis Cor jako první zvládlo vytisknout dům o ploše 38 m² za necelých 24 hodin. Momentálně se společnost zabývá výzkumem tisku staveb na Marsu. [9]



Obrázek 13 - Frank, modifikovaný průmyslový robot [13]



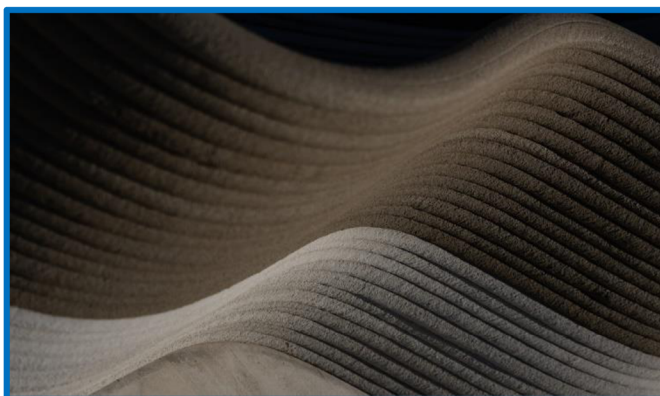
Obrázek 14 - Horizontální zpevnění výtisků [50]

2.3.7 ICON

Jedná se o americký projekt, jehož účelem bylo zpřístupnit dostupné bydlení pro lidi v rozvojových zemích Latinské Ameriky. Technologie ICON také funguje na principu extruze betonových směsí. Konstrukce tiskárny je v tomto případě velký portálový rám (Obrázek 16). Rozměry jsou zhruba 6 x 3,5 m. Tím třetím rozměrem jsou pojezdové kolejnice, po kterých se již zmíněný rám pohybuje. Může se lišit od typu stavby. [9]

Společnost ICON pro svoji technologii vyvinula i vlastní tiskový materiál, který nese název Lavacrete. Tento materiál se pyšní vysokou tiskovou rychlostí při přesném zachování tvaru vrstvy. Je to vysokopevnostní beton s pozoruhodnou pevností v tlaku okolo 13 až 24 MPa. Díky svým mechanickým vlastnostem splnil stavební předpisy o více než 350 %. [14]

Mezi další projekty, do kterých se společnost ICON zapojila, patří například tisk prototypového domu v Texasu. Dům má být udržitelný a cenově dostupný. Jedná se o stavbu, která má rozlohu zhruba 60 m² a byla vytištěna za necelých 48 hodin. V rámci interních projektů ve společnosti ICON následovala prezentace nové 3D tiskárny s názvem Vulcan II. Pyšní se snížením doby tisku a také snížením nákladů na stavbu. V průběhu roku 2019 byla použita pro výstavbu dostupného bydlení v Salvátoru. [9]



Obrázek 15 - Detail materiálu Lavacrete společnosti ICON [14]



Obrázek 16 - 3D tiskárna Vulcan II společnosti ICON [51]

2.3.8 Total Kustom

Jedná se o americkou společnost, která byla založena za účelem výroby 3D tiskáren na stavební směsi. Zakladatelem je Andrey Rudenko. Společnost nabízí 3 varianty tiskáren. Tou hlavní je 3D tiskárna StroyBot Concrete Printer. Jde o tiskárnu s rozměry 10 x 20 x 6 m. Pracuje na principu extruze směsi a je určená pro tisk středně velkých domů. [9] [15]

Z důvodu možnosti tisku takto velkých objektů je konstrukce portálová (rámová). Tiskový materiál je zde beton s aditivními přísadami, které zlepšují fyzikální vlastnosti. Dále se tiskne i z písku s aditivními přísadami. [15]

Projekty, kterými se Andrey Rudenko pyšní, je betonový hrad a vytisknutí rozšíření hotelu. Betonový hrad se skládá ze dvou částí. V první řadě se vytiskly stěny hradu a poté došlo k oddělenému tisku věží (Obrázek 18). Pak došlo ke kompletaci celé stavby. Projekt týkající se rozšíření hotelu Lewis Grand spočíval ve vytištění několika ložnic, obývacího pokoje a dokonce i ve výstavbě vířivé vany. Toto rozšíření bylo o rozloze zhruba 130 m². Společnost momentálně pracuje na vývoji tiskárny, která bude schopna tisknout věže o výšce až 100 metrů. [9]



Obrázek 17 - Extruze betonu [15]



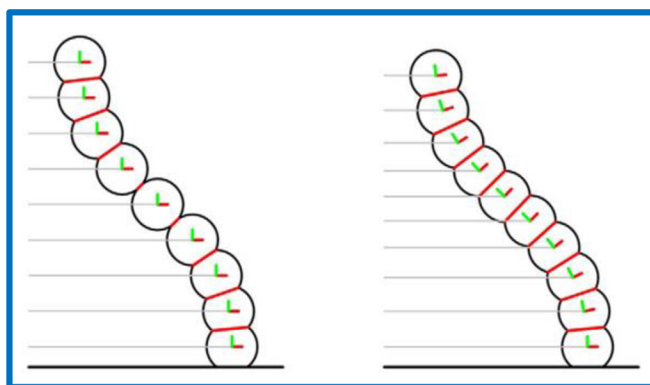
Obrázek 18 - Tištěný hrad před kompletací [15]

2.3.9 XtreeE

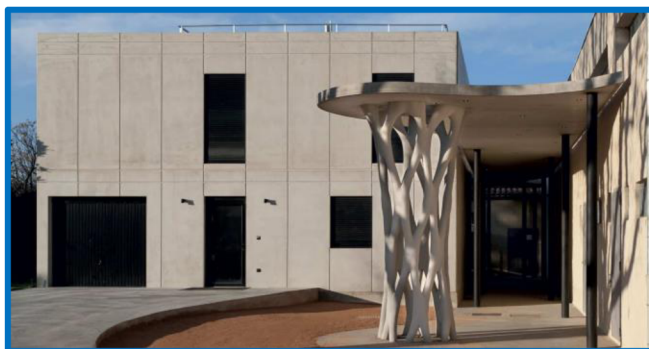
XtreeE je francouzská společnost, které se rozhodla použít vysokohodnotný beton pro velkoformátový 3D tisk. Jako v předchozích případech, tak i zde se jedná o 3D tisk na principu extruze směsi. S jediným rozdílem, který dělá tento tisk originálním. Tato technologie využívá metodu tzv. tangenciální kontinuity. Což znamená, že jednotlivé vrstvy mají různou tloušťku, a tím se dosahuje konstantních stykových ploch mezi jednotlivými vrstvami (Obrázek 19). [9]

Tisk probíhá na šestiosém průmyslovém robotu, který má na svém rameni umístěnou tiskovou hlavu. Nejlepší zkušenosti mají s roboty od firem ABB a Kuka. XtreeE má svůj dvousložkový systém, který je schopný pracovat s různými materiály. Mezi nejčastěji používané materiály patří malta, cementový beton, sádra, geopolymery a materiály na bázi zeminy. Všechny tyto materiály si společnost sama připravuje. [16]

Realizace společnosti XtreeE, které stojí za zmínku, jsou: šachta dešťové kanalizace, tisk podpěrného sloupu střechy, tisk ztraceného bednění pro oddělovací stěnu mezi pokojem a schodištěm a dále tisk čtyř sloupů, které podpírají horní patro budovy. Z těchto realizací je nejzajímavější tisk podpěrného sloupu střechy školy, kdy sloup se skládal ze dvou částí (Obrázek 20). První částí byl výtisk ztraceného bednění a druhá část je nalití konstrukčního betonu do již vytištěného bednění. Geometrie sloupu byla topologicky optimalizována, aby se docílilo co nejlepšího rozložení materiálu v konstrukci. Sloup byl rozdělen na čtyři prvky, které byly prefabrikovaně vyrobeny a poté na místě složeny. [9]



Obrázek 19 - Svislý řez vrstvami se stejnou tloušťkou vrstev běžnou metodou (vlevo) a metodou tangenciální kontinuity (vpravo) [52]



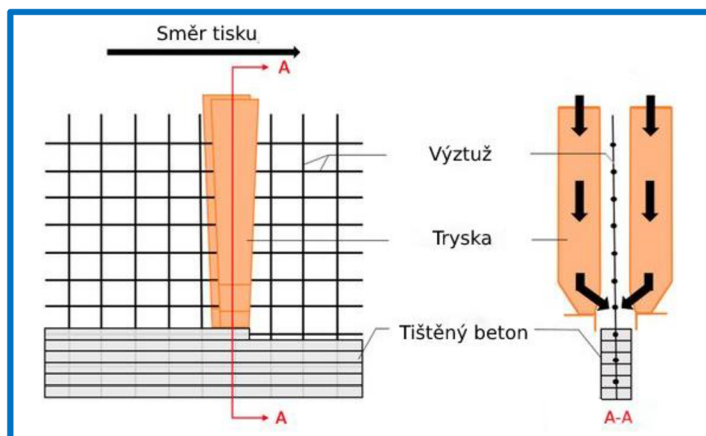
Obrázek 20 - Topologicky optimalizovaný tištěný sloup [16]

2.3.10 HuaShang Tengda

Jedná se o společnost pocházející z Číny stejně jako společnost WinSun. HuaShang Tengda je speciální svojí technologií tisku. Nejzásadnější inovací je v tomto případě rám, který se složen z potrubí a z ocelové výztuže ve formě svázaných ocelových tyčí (roxorů). Spočívá ve standardní extruzi směsi s tím rozdílem, že směs je vytlačována skrze vidlicovou trysku přes zmíněný rám. Směs je postupně nánášena z obou stran zároveň (Obrázek 21). Po dotisknutí je výztuž dokonale obalena směsí a po zatvrdnutí vůči sobě navzájem reagují. [9] [17]

Tisk probíhá na portálových (rámových) 3D tiskárnách, poněvadž se HuaShang Tengda zabývá rozsáhlejšími tisky, mezi které patří například vily. Specializuje se hlavně na proces tisku přímo na staveništi. Nejpoužívanějším materiálem je zde beton. [9]

Jak již byl v přechodchém odstavci zmíněn tisk vil, společnost realizovala stavbu dvoupatrové vily v Pekingu (Obrázek 22). Rozloha vily činí zhruba 400 m². Celkový tisk zabral bezmála 45 dnů. Pro tisk byl použit běžný beton třídy C30, přitom společnost si stojí za tím, že stavba je odolná proti zemětřesení až do 8. stupně RichtEROVY stupnice. [9]



Obrázek 21 - Technologie tisku s výztuží společnosti HuaShang Tengda; upraveno dle [17]



Obrázek 22 - Vila vytištěná společností HuaShang Tengda [53]

2.3.11 CyBe

Společnost CyBe pocházející z Holandského města Oss se zabývá tiskem prefabrikovaných dílů. Tyto prvky jsou po vytištění zkompletovány. Kvůli zmíněným faktorům je společnost schopná tisknout velké rozsáhlé stavby a není omezená velikostí tisknutelné plochy. Tisk je založen na postupném nanášení vrstev směsi jako ve většině předchozích technologiích. [9]

Tisk probíhá na průmyslových šestiosých robotech, tak i na portálových (rámových) tiskárnách. CyBe nabízí 3D tiskárny ve formě průmyslových robotů, mezi které patří CyBe RT (Robot Track) (Obrázek 25), CyBe RC (Robot Crawler) a CyBe R (Robot). Další nabízenou tiskárnou je CyBe G (Gantry), což je portálová (rámová) tiskárna. Všechny zmíněné tiskárny jsou dodávány v setu společně s čerpadlem, kontrolní jednotkou včetně uživatelského rozhraní. Největší chloubou společnosti je jejich vyvinutý tiskový materiál. Dostal název Cybe Mortar a jedná se o speciální tiskový beton (Obrázek 23). Mezi jeho vlastnosti patří rychlé tuhnutí, vysoká pevnost, nízké smrštění a nižší energetická náročnost než běžné stavební směsi. Díky rychlému tuhnutí je možné tisknout citelně vyššími rychlostmi. Vyšší rychlost tisku je pro CyBe klíčovým faktorem. [18]

3D Housing 05 je realizovaný projekt, který je o tisku vily v Itálii, přesněji v Miláně (Obrázek 24). Vila má rozlohu 100 m² a skládá se ze 4 čtyř pokojů a jedné terasy na střeše. Projekt byl tištěný po částech a poté byl zkompletován. Vila se skládá z 35 tištěných dílů a doba tisku byla okolo 46 hodin. Dalším projektem byl tisk pěšího můstku v Holandsku a skládá se ze tří dílů. Celkový tisk zabral zhruba 12 hodin. [9] [18]



Obrázek 23 - Detail tištěné stěny z materiálu CyBe Mortar; upraveno dle [18]



Obrázek 24 - Projekt 3D Housing 05 [18]



Obrázek 25 - Tiskárna CyBe RT (Robot Track) [18]

2.3.12 Spojování kameniva (*D-Shape printing*)

D-Shape printing je technologie společnosti, která určitě stojí za zmínění. Nejedná se o běžný 3D tisk na bázi nanášení vrstev, ale spočívá ve spojování kameniva. Se spojováním kameniva přišla společnost D-Shape (dříve Voxejet) v roce 2004. Jedná se o technologii, která je založena na vytvrzování prášku pomocí nanášeného tekutého pojiva. Podobného procesu využívají i jiné technologie 3D tisku, mezi které patří například SLS (*Selective Laser Sintering*). [4] [7]

Nejpoužívanější plnivo bývá jemnozrnný písek. U pojiv se můžeme setkat s cementem, polymerní pryskyřicí, kapalinou na bázi chlóru, kaší na bázi sorelského cementu, geopolymery a polymerními primery. [4] [7]

Tisk probíhá na portálových (rámových) tiskárnách (Obrázek 27). Tato konstrukce je neobvyklá, protože na velkém rámu jsou umístěny dva portály. Jeden portál rozděljuje a nanáší materiál, mezitím co druhý portál drží tiskovou hlavu s pojivem. Tisková hlava má v tomto případě velké množství trysek kvůli přesnému bodovému dávkování pojiva. Přestože technologie D-Shape je určena pro tisk mimo stavbu, tak v dnešní době se společnost snaží tuto metodu vyvíjet i pro tisk přímo na staveništi. [4] [9] [19]

Výhodou této metody je možnost tisku velice detailních dílů v řádech setin milimetrů. Mezi další výhody patří tisk vnitřních struktur s uzavřenými komůrkami, vysoké pevnosti v tlaku, a to v rozmezí 230 – 245 MPa a pozoruhodná pevnost v tahu a ohybu, která se pohybuje v rozmezí 14 – 19 MPa. K výhodě s přeností tisku se samozřejmě váže i jedna nevýhoda. Tou hlavní nevýhodou je nízká rychlost tisku. Druhou menší nevýhodou je nutnost odstranění přebytečného plniva po dokončení tisku. [4] [9]



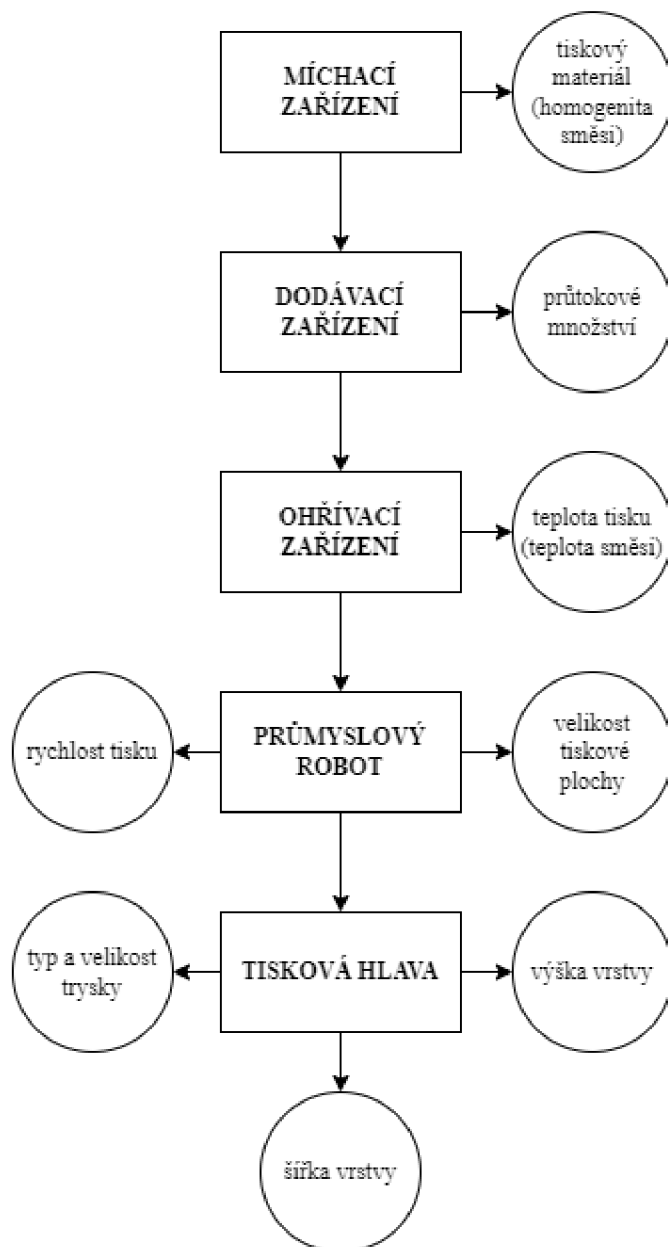
Obrázek 26 - Projekt Root Chair [19]



Obrázek 27 - Proces selektivního spojení pojiva [54]

2.4 Sestava tiskového zařízení pro 3D tisk z betonu

Tiskárny, které slouží k vytváření prvků z betonu, jsou poměrně veliké a těžké stroje ve srovnání s běžnými 3D tiskárnami na plast. Z toho vyplývá, že je potřeba pro tuto sestavu stroje zařídit větší prostor pro lepší manipulaci s robotem. Jak je běžně známo, každá sestava (konstrukce) 3D tiskárny na beton se může lišit v závislosti na konkrétním modelu a výrobci.



Obrázek 28 - Myšlenková mapa tiskového zařízení

2.4.1 Průmyslový robot

Robot je v tomto případě důležitou částí stroje pro 3D tisk z betonu. Právě pomocí něj je možné automatizovat a optimalizovat samotný tisk. V tomto případě se jedná o více-klobového modifikovaného robota značky Kuka, který se může pohybovat v prostoru pomocí rotačních kloubů (Obrázek 30). Obvykle má toto robotické rameno 6 os. Obecně se robotický systém skládá z mechanické části (rameno s motory), elektronické části (centrální jednotka) a počítačové části (ovládání). Při volbě robota je důležité myslet na pár kritérií. Mezi ně patří hlavně typ prostředí ve kterém bude robot pracovat a typ činnosti, kterou bude robot vykonávat. Nevýhodou tohoto zařízení je nosnost robota a velikost tisknutelného prostoru. Mezi výhody použití průmyslového robota patří efektivita, vyšší produkce a optimalizace kvality. [20]



Obrázek 29 - Vedení kabelů a hadic s materiálem



Obrázek 30 - Průmyslový robot Kuka

2.4.2 Míchací zařízení na beton

Obecně je míchací zařízení stroj sloužící k promíchání směsi. Je to jeden z velice důležitých aspektů při vytváření betonu, který je určený k 3D tisku. V tomto případě se bude jednat o kompozitní beton s příměsí kameniva a chemických urychlovačů, které mají za úkol zrychlit proces tuhnutí a tvrdnutí směsi. Hlavními složkami betonu je cement, voda, kamenivo o malé zrnitosti a další doplňující složky. Aby se docílilo směsi, která bude mít specifické vlastnosti, je důležité dodržet poměry jednotlivých složek při mísení. [21]

Záměrem správného míchání směsi je:

- dosažení žádaného povrchu látek směsi;
- dosažení plastické směsi;
- rovnoměrné smísení dvou a více vstupních materiálů. [21]

Míchací zařízení může být poháněno elektrickým nebo spalovacím motorem. Z konstrukčního hlediska se skládá ze směšovací nádoby, která slouží pro vstupní surový materiál a pro lepší manipulaci je připevněna k podvozku s kolečky. Další komponentou míchacího zařízení je pohon, který rotačním pohybem míchá samotnou směs do doby než se docílí požadované konzistence. Směšovací nádoba do které se dodává betonová směs je umístěna nad čerpadlem (2.4.3 Dodávací zařízení betonu). Tato směs dodatečně propadáva přes síto, které zachycuje nežádoucí velikosti kamene (šterku). [21]

2.4.3 Dodávací zařízení betonu

Slouží k přepravě směsi ze směšovací nádoby na místo určení. Nejčastěji se používají tři typy čerpadel. Patří mezi ně pístová čerpadla, čerpadla se šnekovým pohonem nebo čerpadla peristaltická. Jak již bylo zmíněno, čerpadlo se nachází pod směšovací nádobou, ze které přes síto padá směs přímo do čerpadla. Poté směs skrze hadici míří přímo do samotné tiskové hlavy. Výhodou čerpadel pro betonové směsi je dodávka betonu na velké vzdálenosti a umožnění dopravy do těžko přístupných míst. Na trhu je obrovské množství vyráběných čerpadel na betonové směsi. Rozdíly mezi jednotlivými čerpadly se týkají druhu čerpaného materiálu a samozřejmě i výkonu. [22]



Obrázek 31 - Čerpadlo na beton se stojanem na míchací zařízení

2.4.4 Ohřívací zařízení betonu

Jedná se o zařízení, které zajišťuje ideální teplotu směsi. Ve většině případů se používá elektroohřev. Tato metoda je založená na ohříváči, přes který proudí betonová směs. Samotný ohříváč je dodatečně zaizolovaný v tepelné (skelné) vatě kvůli možným ztrátám tepla (Obrázek 32). Teplota betonu by se měla pohybovat okolo 20°C. Realita je zhruba okolo 18°C. Tento jev může být způsoben mnoha faktory, mezi které patří například teplota v hale a přesnost teplotních čidel. Ohřev betonové směsi se provádí hlavně zimním období. [23]



Obrázek 32 - Ohříváč proudícího betonu

2.4.5 Tisková hlava

Jedná se o velice důležité zařízení, které je připevněné ke konstrukci pohyblivého ramena robota. Hlavním cílem tiskové hlavy je nanášení vrstev betonu skrze trysku při určitých parametrech na předem určené místo. Mezi komponenty, které tvoří celek tiskové hlavy, patří tryska, tělo tiskové hlavy, platforma (příruba), do které jsou zapojeny přívodní hadice včetně pohonných jednotek a hnacích zařízení. Obecně se tiskové hlavy rozdělují na aktivní a pasivní. U aktivní tiskové hlavy je součástí mechanismus upravující množství směsi, které proteče tryskou. Dodávka materiálu se reguluje pístovými nebo šňekovými systémy. U pasivní tiskové hlavy se jedná pouze o trysku, která je napojená na hadici dodávající směs pro 3D tisk. Její funkčnost je tedy tvarování tisknuté směsi. Poněvadž pasivní varianta tiskové

hlavy nemá dávkovací mechanismus, je nutné zajistit externí dodávací zařízení materiálu. Nejčastěji se používají čerpadla (2.4.3 Dodávací zařízení betonu). Při návrhu tiskové hlavy je důležité brát v potaz její hmotnost. Při porovnání již zmíněných tiskových hlav, tak u aktivní tiskové hlavy je hmotnost znatelně vyšší kvůli dávkovacímu mechanismu. [22] [24]

Tryska je velice důležitou komponentou tiskové hlavy. Pomocí trysky se docílí finálního tvaru vrstvy. Tryska se vyskytuje v několika variantách, mezi které patří trysky s běžným kruhovým průřezem, čtvercovým průřezem, obdélníkovým průřezem a ve spoustě dalších. Jejich rozměry jsou v různých průměrech a v případě obdélníkového průřezu i v různých šířkách, volí se s ohledem na velikost tisknutého objektu a finálního vzhledu. Trysky se mohou vyskytovat s přidavným hladítkem, které se většinou dávají na otočné tiskové hlavy (Obrázek 33). Již zmíněné hladítko zajistí zahlázení bočních stěn vrstvy a také přesnější šířku vrstvy. Hladítko se většinou používá v kombinaci s tryskou o obdélníkovém průřezu. Většina trysek bývá vyvložkována ořezávací ocelí z důvodu velkého tření. Mezi výhody kruhových trysek patří i o dost jednodušší pozorování zaoblené trasy pohybu a absence otočného mechanismu tiskové hlavy. Nevýhodou kruhových trysek je velké procento vzniku nevyplněných míst. Tento nedostatek může vést ke snížení celkové pevnosti výtisku. [22] [24]



Obrázek 33 - Otočná tisková hlava s tryskou o obdélníkovém průřezu s hladítkem; upraveno dle [56]



Obrázek 34 - Stěna tištěná tryskou o kruhovém průřezu (vlevo) a tryskou o obdélníkovém průřezu s hladítkem (vpravo)



Obrázek 35 - Tisková hlava s nádobkou na směs [55]

3 PARAMETRY 3D TISKU BETONU

Obecně parametry při strojní výrobě zajišťují výslednou kvalitu. U parametrů 3D tisku betonu toto pravidlo platí dvojnásob. Při plnění parametrů tisku se docílí požadovaných vlastností finálního výtisku. Mohou být ovlivňovány:

- technologií;
- konstrukcí;
- složením betonové směsi.

Většina vstupujících parametrů se udává do programu, který nám vygeneruje G-Code (2.2 Obecná technologie 3D tisku). Každý výtisk je originální svým tvarem, velikostí a samozřejmě i použitím. Proto je potřeba parametry každého tisku pečlivě promyslet a následně i kontrolovat při ostrém tisku. U tisku betonu je nejkritičtější samotná směs, která má specifické vlastnosti. Odladění ideálních parametrů tisku s sebou nese spoustu pokusů a také následných omylů.

3.1 Výška vrstvy

Jak bylo již bylo zmíněno, existuje několik typů trysek, které se liší především svým průřezem (2.4.5 Tisková hlava). Ke každému průřezu trysky se pojí specifické požadavky. Obecně lze říct, že výška vrstvy by neměla přesáhnout 80 % průřezu trysky. Výška jednotlivých vrstev ovlivňuje dobu tisku a kvalitu tisku (vertikální rozlišení). Při tisku nižší vrstvy se docílí hladších a vzhledově hezčích vrstev, ale je to na úkor doby tisku, která bude znatelně delší. Naopak při vyšší vrstvě bude doba tisku kratší, ale vertikální rozlišení bude znatelně horší. Výška první vrstvy se může zkalibrovat například pomocí puku, který má výšku shodnou s výškou tištěné vrstvy (Obrázek 36). Tímto se zadá robotovi výšková vzdálenost, od které má začít tisknout na podložku. Obecně lze říct, že výška vrstvy 18 mm při trysce o průměru 40 mm se jeví jako ideální řešení. Nutné je ale dodat, že tyto údaje nejsou ideální pro všechny aplikace 3D tisku betonu. Základem je, aby výška vrstvy byla taková, aby došlo ke správnému spojení jednotlivých vrstev a výtisk byl celistvý. Je potřeba zmínit také šířku vrstvy, která má se samotnou výškou vrstvy hodně společného. Šířka je ovlivněná vzdáleností trysky od podložky, popřípadě od již nanesené vrstvy. [25] [26]

3.1.1 Tryska kruhového průřezu

K této trysce se váže několik pravidel (Obrázek 37). Jestliže vzdálenost trysky od podložky “h” je znatelně vyšší, než průměr trysky “d”, tak tištěná vrstva bude mít po stranách a na vrchní části vrstvy zaoblený tvar. Z toho vyplývá, že styčná plocha bude velmi malá a tím pádem pevnost jednotlivých vazeb bude znatelně menší. V případě, kdy je vzdálenost trysky od podložky lehce menší než průměr trysky, tak tištěná vrstva bude mít zaoblené boky a vrchní část vrstvy bude pěkně plochá. Při těchto parametrech tryska zplošťuje horní povrch tištěné vrstvy. V poslední řadě je varianta, kdy je vzdálenost trysky od podložky mnohem menší než průměr trysky. V tento moment je tištěná vrstva nucena být přitlačena k podložce,

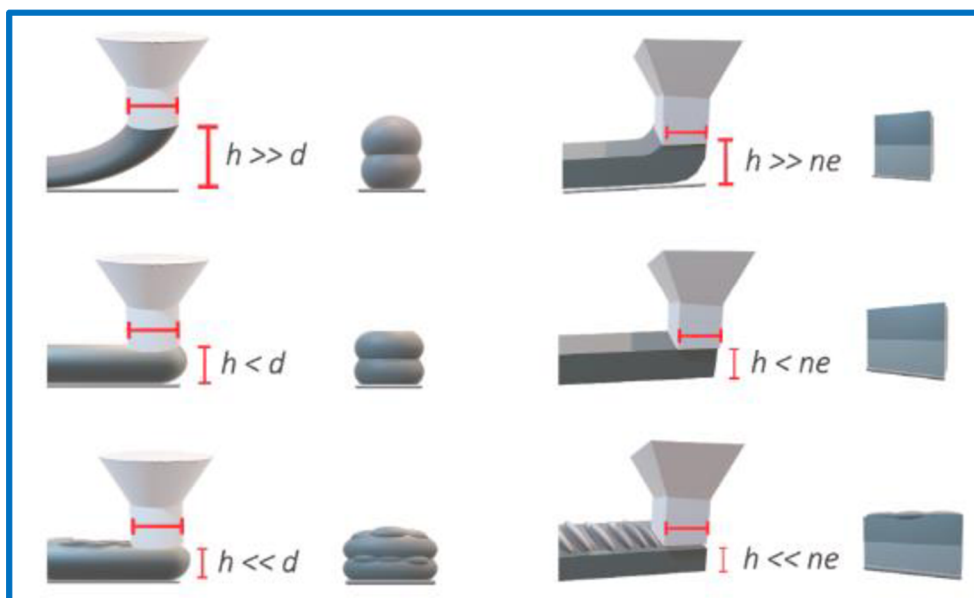
popřípadě k již vytištěné vrstvě. Tím se tištěná betonová směs tlačí do stran. V této konfiguraci se tvoří výrazně silnější vrstvy, ale dochází ke zvlnění vrstvy, které se objevuje na vrchním povrchu tištěné vrstvy. Důležité je zmínit, že všechny popsané varianty jsou závislé na rychlosti tisku a rychlosti průtoku směsi skrze trysku. [27]

3.1.2 Tryska obdélníkového průřezu

Jako u předchozí trysky, tak i zde je několik pravidel, které je nutno zmínit (Obrázek 37). Tvar trysky umožňuje tisknout ploché tvary vrstev, které jsou po stranách, tak i na vrchním povrchu. Jestliže vzdálenost trysky od podložky “h” je výrazně větší než délka kratší hrany trysky “ne”, tak je možné tisknout ploché vrstvy, které nemají příliš vysokou pevnost. V případě, kdy je vzdálenost trysky od podložky o něco menší než délka kratší hrany trysky, tak se docílí citelně pevnější vrstvy, a to při zachování stejné rychlosti tisku jako v předchozím případě. V poslední řadě je zde varianta, kdy je vzdálenost trysky od podložky výrazně menší než délka kratší hrany trysky. Dochází k vadám, které lze vidět na horní straně tištěné vrstvy. Jako u trysky s kruhovým průřezem, tak i zde jsou všechny varianty závislé na rychlosti tisku a rychlosti průtoku směsi skrze trysku. [27]



Obrázek 36 - Kalibrační puk



Obrázek 37 - Pravidla pro kruhovou trysku (vlevo a pro obdélníkovou trysku (vpravo); upraveno dle [27])

3.2 Rychlost tisku

U 3D tisku betonu se rychlost tisku odvíjí od samotné velikosti tištěných objektů. Je zapotřebí, aby v průběhu tisku byla vstava schopna ztuhnout, a mohla se na ni nanést následující vrstva bez vzniku jakékoli deformace. Samozřejmě je také možné tisknout malé objekty při vyšších rychlostech. V takových případech je potřeba upravit dávkování aditiv, které pomůžou k rychlejšímu ztvrdnutí betonové směsi. Opačným problémem může být příliš pomalá rychlost tisku. V tomto případě může docházet k předčasnému tuhnutí betonové směsi již v samotném stroji. To může vézt k fatální chybě a znemožní to tisk dalšího objektu. Ideální rychlost se udává okolo 250 mm/s. Jedná se spíše o návrhovou rychlost, poněvadž každý tisknutý objekt vyžaduje své specifické parametry, které se zjišťují zkušebními tisky. [26]

K rychlosti tisku se také váže rychlost dávkování materiálu (Flow Rate), neboli průtokové množství směsi. Jak již bylo zmíněno, směs se do tiskové hlavy dostane za pomoci vysokotlakového čerpadla. Na některých konstrukcích tiskových hlav bývá dodatečně umístěn šnekový dávkovač, který reguluje množství směsi protékající tryskou. Tímto řešením se docílí přesnějšího dávkování betonové směsi. [26]

3.3 Teplota tisku

Velkým ovlivňujícím faktorem betonové směsi je teplota. Teplota napomáhá směsi rychleji ztuhnout a dosáhnout dalších požadovaných vlastností za jednotku času. Obecně teplota napomáhá rychlejší chemické reakci. Optimální teplota betonové směsi při tisku se pohybuje okolo 20 °C (pokojová teplota). Těchto podmínek lze docílit hlavně v uzavřených prostorách. U venkovních tisků se těchto podmínek docílí velice těžko. Mimo teplotu zde hrají roli i zbylé povětrnostní podmínky, které mají veliký vliv na průběh tisku. Některé menší tisky, které se konají ve venkovních prostorách, je možné zakrytovat plachtou, která povětrnostní podmínky znatelně utlumí a vytvoří ideální podmínky pro průběh tisku. Alternativou optimální teploty při venkovním tisku může být vytvoření speciální směsi, která obsahuje různá aditiva určená na tisk mimo halu. V zimním období je možné betonovou směs ohřívat pomocí ohřívače, který je umístěn mezi čerpadlem a robotem. Při nevyhovujících teplotách betonové směsi lze zaznamenat necelistvost čerstvě tištěné vrstvy (Obrázek 38), ale může také dojít k úplnému zborcení tištěné stěny (Obrázek 39).



Obrázek 38 - Necelistvá vrstva



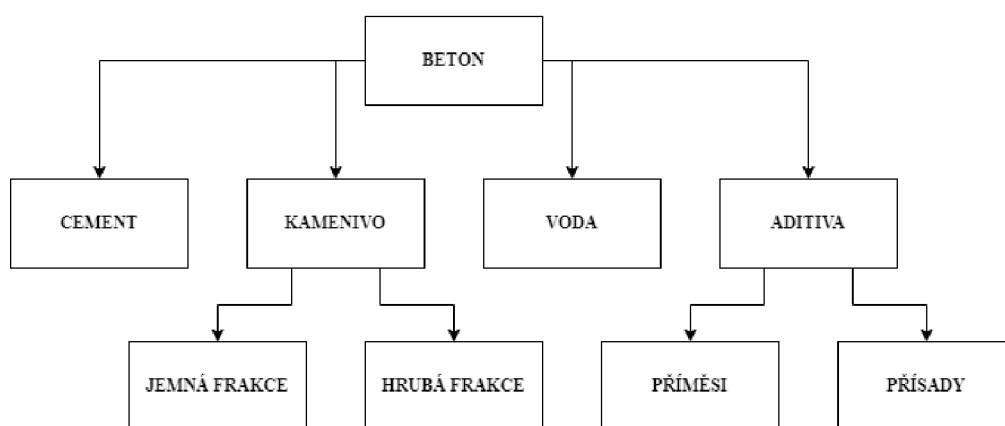
Obrázek 39 - Zborcení stěny

3.4 Tiskový materiál

V tomto případě se bude jednat hlavně o betonovou směs s příměsí kameniva o menší frakci a přídatných aditiv. Beton jakožto tiskový materiál je kompozitní, čili se skládá z několika dalších složek, které budou v následující kapitole popsány (3.4.1 Složení tiskového betonu). Obecně u 3D tisku ve stavebnictví je vytvoření ideální tiskové směsi nesmírně složité, ale bohužel se jedná o nejzásadnější část. Betonová směs musí být vyvinuta tak, aby vyhovovala požadavkům, které jsou nutné pro správný průběh tisku bez kolizí. Je nutné brát v potaz i funkčnost směsi v daném stroji, který bude tisk provádět. Parametry, které by směs měla splňovat, budou níže vypsány (3.4.2 Parametry betonové směsi). [22] [26]

3.4.1 Složení tiskového betonu

Při vytváření směsi je důležité znát všechny vlivy jednotlivých složek na finální směs. Dále je nutné znát přesný poměr složek při samotném mísení. Dá se říct, že neexistuje přesný návod včetně poměrů jednotlivých složek na vytvoření specifické tiskové směsi. Pro každou aplikaci 3D tisku jsou poměry složek betonové směsi úplně jiné. Jedná se stále o firemní tajemství, kdy společnosti začínají od nuly a snaží se přijít na vlastní know-how. Poněvadž, jak již bylo zmíněno, vytvoření ideální tiskové směsi není nic jednoduchého. Je ale známo, že se směs skládá z cementu, kameniva, vody a aditiv (Obrázek 40). [22] [24]



Obrázek 40 - Složení betonu

Cement

Cement zabírá druhé největší procento ve složení betonu hned po kamenivu. Jedná se o hydraulické pojivo, což je jemně mletá anorganická látka, která po smísení s vodou vytvoří kaši. Funkce této kaše spočívá v tuhnutí a tvrdnutí za pomoci hydratačních reakcí a procesů. Při správných poměrech kameniva s vodou je možné docílit vhodné zpracovatelnosti po dostatečně dlouhou dobu. Po uplynutí této doby začne směs tuhnout a docilovat svých předepsaných vlastností, mezi které patří například pevnost. Důležité je zmínit, že ztuhnout může i pod vodou. Mezi hlavní složky pro výrobu cementu patří portlandský slínek, granulovaná vysokopecní struska, popílky, pucolány, kalcinovaná břidlice, vápenec

a křemičitý úlet. Další doplňující složky, mezi které patří třeba síran vápenatý, zlepšují zejména fyzikální vlastnosti cementu. [22] [28]

Kamenivo

Tvoří největší procento ve složení betonu. Je to zrnitý a sypký materiál nejčastěji anorganického původu. Obecně je kamenivo hojně využíváno ve všech oblastech stavitelství. Kamenivo se vyskytuje ve vícero podobách. U 3D tisku betonu se hlavně řeší jemná a hrubá frakce kameniva. Cílem kameniva je vytvořit pevnou vazbu v betonu. [22] [29]

Existují i další rozdělení kameniva:

- podle původu (přírodní, umělé, regenerované – prané a drcené, recyklované);
- podle objemové hmotnosti (pórovité, hutné, těžké). [29]

Voda

Tato složka v betonu má za úkol hydrataci a ovlivnění zpracovatelnosti. Když se smísí voda s cementem, tak dojde k chemické reakci, která nese již zmíněný název hydratace. Tato reakce způsobí, že beton začne po několika minutách tuhnout a následně tvrdnout. Pro hydrataci je potřeba asi 25 až 35 % vody z celkové hmotnosti použitého cementu. Při použití menšího množství vody vznikne hutný ztvrdlý beton, který má malé póry. Naopak při použití velkého množství vody vznikne porézní ztvrdlý beton, který má velké póry snižující odolnost vůči vlivům prostředí. [22] [30]

Vodu dělíme podle technologického hlediska:

- betonářská voda (využívá se jako hydratační složka u mísení s cementem);
- ošetřovací voda (používá se na vhlčení tuhého betonu při tvrdnutí). [22]

Aditiva

Do aditiv spadají přísady a příměsi. Přísady jsou chemické látky, které zlepšují některé vlastnosti čerstvého, popřípadě i ztvrdlého betonu. Jedná se hlavně o mechanické vlastnosti. Co se týče dávkování, tak se jedná o velice malá procenta hmotnosti použitého cementu. Podle funkce je mnoho druhů přísad. Mezi tyto druhy patří plastifikátory, zpomalovače (tuhnutí a tvrdnutí), urychlovače (tuhnutí a tvrdnutí), provzdušňující, zpěňující, stabilizační, inhibitory koroze a spoustu dalších. [22] [31]

Příměsi jsou anorganické látky. Do směsi betonu se přidávají ve formě prášku k docílení lepších vlastností čerstvého, tak i ztvrdlého betonu. Vyskytují se dva typy příměsí, mezi které patří inertní příměsi a latentně hydraulické příměsi. [22] [32]

3.4.2 Tuhnutí a tvrdnutí betonové směsi

Jedná se o základní mechanické vlastnosti tiskové směsi. Proces tuhnutí je doba přeměny čerstvého betonu z plastického stavu do stavu tuhého. Proces tvrdnutí je doba, při které se postupně navyšuje pevnost betonu. Ideální směs se pozná podle toho, zda má dobrou zpracovatelnost při jejím vytlačování skrze trysku na předem určené místo. Také by po následné extruzi měla začít rychle tuhnout, aby bylo možné na již vytištěnou vrstvu položit další vrstvy bez deformace. Samotné tuhnutí směsi závisí především na rychlosti hydratace cementu. Samozřejmě je možné tuhnutí ovlivnit například výběrem druhu cementu, množstvím přidávané vody a teplotou okolí. Poněvadž, jak již bylo zmíněno, vyšší teplota urychluje chemickou reakci. Ke zrychlení, popřípadě ke zpomalení tuhnutí či tvrdnutí také napomáhají chemická aditiva (3.4.1 Složení tiskového betonu). [22]

3.4.3 Kritéria betonové směsi

Jak již bylo zmíněno výše, betonová směs je klíčová část pro bezproblémový 3D tisk. Je nutné, aby splňovala několik kritérií. Mezi ně patří:

- docílit nejvyšší možné pevnosti v tlaku;
- docílit nejlehčí zpracovatelnosti směsi;
- docílit nejvyšší možné tekutosti směsi v systému 3D tiskárny;
- docílit nejrychlejšího tuhnutí betonu;
- přizpůsobit složení směsi pro danou 3D tiskárnu;
- přizpůsobit složení směsi pro prostředí, kde bude směs tisknuta. [26]

3.4.4 Recyklace tiskového materiálu

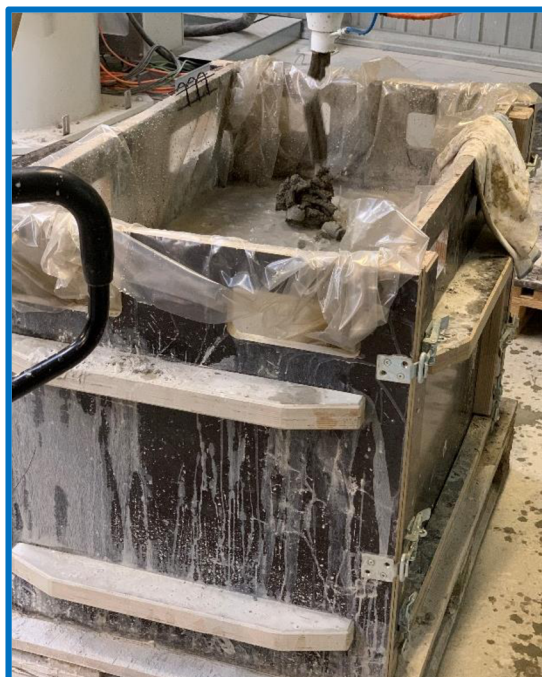
Proces tisku vyžaduje správně namíchanou betonovou směs. Homogenita betonu je podstatnou částí bezproblémového tisku. Před samotným tiskem je zapotřebí tuto směs vyzkoušet a zároveň ji nechat zaběhnout v tiskové trysce pro vytvoření správného tlaku pro přesnou extruzi. Zkušební (nedokonale zhomogenizovaná) směs se vytlačuje do dřevěných beden (Obrázek 42). Touto předpřípravou se většinou spotřebuje velké množství betonu, které přijde vniveč. Z tohoto důvodu je nutné zajistit následnou recyklaci směsi, která se již nedá využít.

U nás v České republice přišla s recyklací betonu společnost Sika CZ, která si také v této problematice drží svůj patent. Tento proces se nazývá “reCO2 ver” a spočívá v chemicko-mechanickém zpracování odpadu ze zdemolovaného betonu. Dalším krokem je povrchová karbonatace, během které se cementová matrice změkčuje a následně odstraňuje otěrem. To umožní získat čerstvě holý povrch, který se může dále karbonátovat do doby, než se získá kamenivo bez jakéhokoli cementového materiálu. Tímto procesem lze betonový či maltový demoliční materiál rozdělit na tzv. sekundární kamenivo, které má kvalitu srovnatelnou s primárním materiálem. Další složkou recyklace je práškový materiál, který lze

využit jako druhotnou surovinu v dalších mnoha oblastech. Testy prokázaly, že beton s obsahem recyklátu má obdobné vlastnosti jako úplně nový výrobek. [33]



Obrázek 41 - Skladiště nedokonale zhomogenizované směsi



Obrázek 42 - Bedna na zaběhnutí materiálu

3.5 Velikost tiskové plochy

Jedná se o jeden z omezujících parametrů 3D tisku z betonu. Při tisku větších staveb mezi které patří například domy, je nutné promyslet volbu konstrukce tiskárny. Mezi nejpoužívanější konstrukce pro 3D tisk betonu patří portálové (rámové), popřípadě se využívá průmyslového robota (robotického ramene). Samozřejmě existuje spousta dalších kombinací, z nichž určitě stojí za zmínku robotické rameno, které je umístěno na pásovém podvozku. Tato kapitola bude věnovaná hlavně portálové konstrukci (Obrázek 43) a robotickému ramenu (Obrázek 44).

Robotické rameno se používá častěji na menší projekty a portálová tiskárna se využívá právě na velké stavby. Přesné rozměry využitelné tiskové plochy robotického ramene jsou ovlivněny typem a velikostí samotného robota. Jeho pracovní plocha je ve tvaru polokoule, což znamená, že je důležité brát v úvahu i výškové rozměry výtisku. Při nutnosti využití robotického ramene na tisk výškově orientovaných dílů je možno celého robota vypodložit. Rozměry tiskové plochy portálové tiskárny jsou ovlivněny zejména délkou kolejnic po kterých se rám pohybuje. Tiskový prostor má tvar kvádra, popřípadě i krychle. Rozměry tiskových ploch některých 3D tiskáren jsou zmíněny výše (2.3 Technologie 3D tisku ve stavebním průmyslu).



Obrázek 43 - Portálová 3D tiskárna



Obrázek 44 - Modifikované robotické rameno [36]

3.6 Obecné shrnutí parametrů 3D tisku betonu

U technologie 3D tisku betonu je nutné brát v potaz, že ke každému novému projektu se budou také vázat nové specifické parametry, které bude potřeba optimalizovat, aby při tisku nedošlo ke zbytečné kolizi. Všechny zmíněné parametry mezi sebou korespondují, a je nezbytné mít tyto jednotlivé vlivy nastudované a otestované. Jedině tímto se docílí správných tiskových parametrů. Obecně je ale důležité dodržet pravidlo automatizované výroby. Tedy docílit nejpřesnějších výsledků za co nejkratší čas, a nejlépe s co nejmenšími ztrátami.

4 SYSTÉMOVÝ ROZBOR

4.1 Problémová situace

Parametry 3D tisku určují výslednou kvalitu tištěného dílu. Odladění takovýchto parametrů sebou nese nespočet pokusů a bohužel i omylů. Ve srovnání parametrů tisku s technologií tisku plastu FDM (*Fused deposition modeling*), jsou u tisku betonové směsi značné nedostatky, které se neustále vyvíjí. Nedostatky se týkají hlavně tiskové betonové směsi, která je u této technologie opravdu velkou problematikou.

Homogenita směsi je důležitým prvkem pro bezproblémový 3D tisk betonu. Před samotným tiskem objektu je třeba tuto směs nechat projít kompletním tiskovým zařízením. Tímto prouděním směsi se docílí lepšího smíchání tiskového materiálu. Zároveň se v trysce vytvoří správný tlak na vytlačování materiálu. Bohužel při tomto procesu vzniká veliké množství odpadu, mezi který spadá tisková směs a hlavně voda, které opravdu není málo.

4.2 Formulace problému

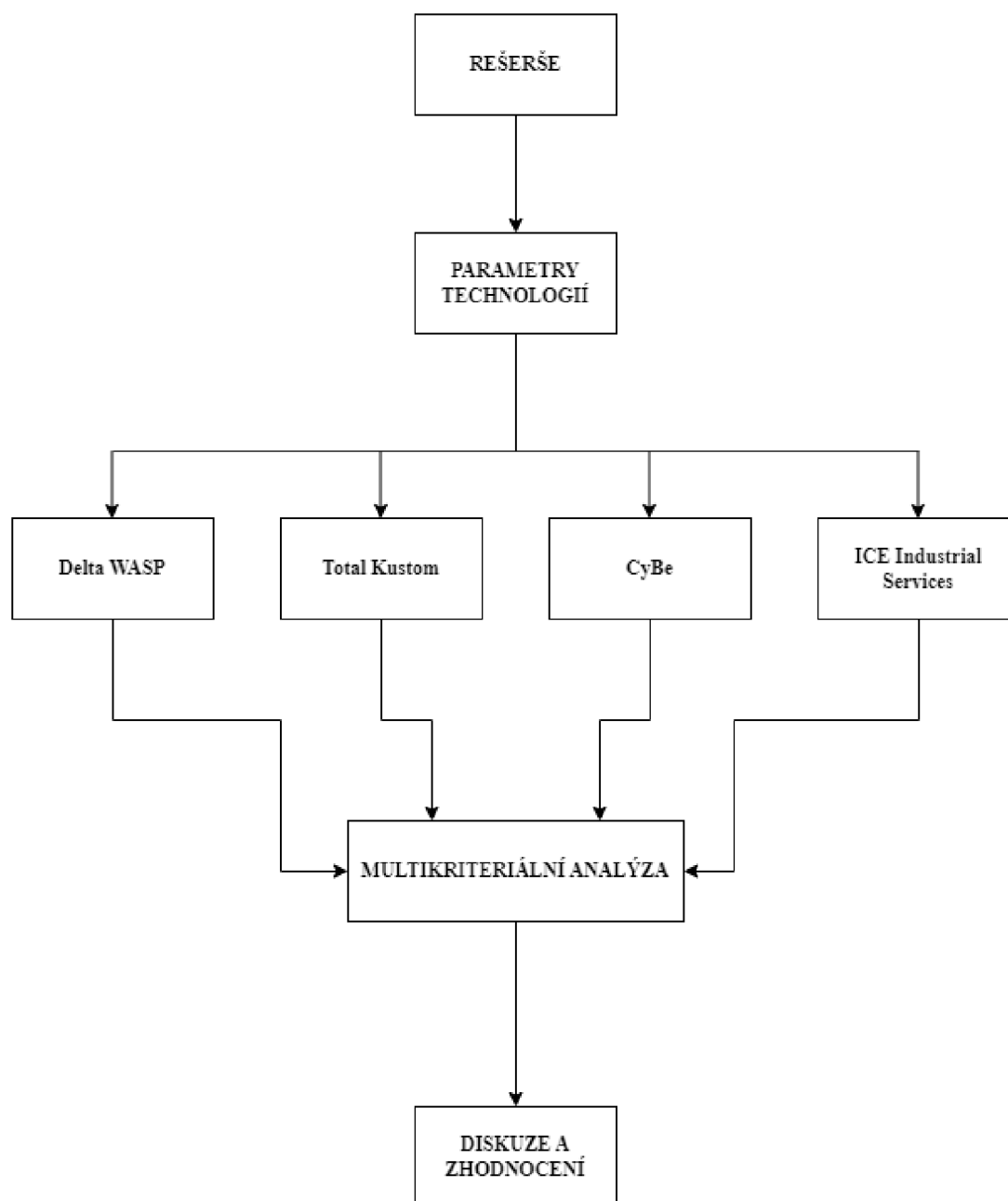
Problémem je značný odpad vzniklý kvůli potřebným parametrům tisku, a to zejména betonové směsi.

4.3 Cíle a řešení

- Rešerše současných technologií 3D tisku betonových směsí
- Rešerše obecných parametrů 3D tisku betonových směsí
- Rešerše parametrů 3D tisku vybraných technologií
- Multikriteriální analýza hlavních parametrů vybraných technologií
- Doporučení pro praxi

Ze zadání bakalářské práce je zřejmé, že je potřeba zjistit používané parametry vybraných technologií. Co se týče parametrů tisku, tak se práce věnuje výšce vstvy, rychlosti tisku, teploty tisku, tiskové směsi a velikosti tiskového prostoru (3 PARAMETRY 3D TISKU BETONU). Zmíněné parametry tisku se budou držet východiska spojeného s minimalizací odpadu nedokonale zhomogenizované směsi.

4.4 Schéma postupu práce



Obrázek 45 - Postupový diagram práce

5 PARAMETRY TISKU VYBRANÝCH TECHNOLOGIÍ

Vybranými a zároveň těmi nejzajímavějšími jsou technologie společností Delta WASP, Total Kustom, CyBe a doposud nezmíněná společnost ICE Industrial Services. Jsou zde parametry tisku zejména těch nejpozoruhodnějších tiskáren jednotlivých společností.

5.1 Delta WASP

5.1.1 Výška vrstvy

Delta WASP 3MT CONCRETE

Tiskárna je osazena tryskou kruhového průřezu. Dodává se ve dvou konfiguracích, které mají rozdíly v extruderu. U provedení XL extruderu se dodává s tryskami o průměru 4, 6 a 8 mm. U druhého provedení XXL se dodává s tryskami o průměru od 8 do 30 mm. K tisku pomocí trysky kruhového průřezu se pojí jistá kritéria, která byla již zmíněna (Obrázek 37). [34]

Příkladem může být tryska kruhového průřezu o průměru 8 mm. U této volby se výška udává zhruba do 6 mm, přičemž při tisku musí být vzdálenost od vyústění trysky k podložce o něco menší, aby se docílilo krásně zploštělé vrstvy. Ideální výška vrstvy by u této trysky mohla být okolo 4 až 5 mm. Věc týkající se šířky vrstvy neboli jednoho perimetru se odvíjí již od zmíněné vzdálenosti trysky od podložky. [34]

Crane WASP

Tiskárna může mít trysky v rozmezí od 18 do 30 mm a dodává se pouze v jedné konfiguraci, kterou ale lze zduplikovat. Tím je myšleno, že je možné složit set stožárů, na nichž jsou dlouhá otočná ramena (Obrázek 47). Společnost uvádí, že minimální ověřená výška vrstvy může být 9 mm, která se pojí k trysce o průměru 18mm. Dalším příkladem může být tryska o průměru 30 mm. U této trysky se může ideální výška vrstvy pohybovat zhruba od 15 do 23 mm, ale samozřejmě záleží na účelu použití. Šířka vrstvy se zase odvíjí od vzdálenosti trysky od tiskové podložky. [34]

5.1.2 Rychlost tisku

Delta WASP 3MT CONCRETE

Společnost udává maximální rychlost tisku 200 mm/s. Jako další parametr je rychlost posuvu (rychloposuvu). Zde se rychlost nemění a zůstává těž na 200 mm/s. Určitě stojí za zmínění i zrychlení posuvu, které je 150 mm/s². Parametr pojící se k obecné rychlosti tisku patří i průtok materiálu, kdy společnost udává maximální průtok materiálu rovných 250 l/h při maximálním tlaku 35 baru. [34]

Crane WASP

Maximální rychlost tisku se uvádí 300 mm/s. Oproti tiskárně Delta WASP 3MT CONCRETE je zde změna v rychlosti posuvu (rychloposuvu). Maximální rychlostí, kterou se tiskárna může pohybovat je 500 mm/s. U této tiskárny je razantně menší zrychlení z důvodu masivní hliníkové konstrukce. Toto zrychlení činí 20 mm/s². [34]

5.1.3 Teplota tisku

Delta WASP 3MT CONCRETE

Tiskárna má využití jak ve venkovních, tak i ve vnitřních prostorech. Častější použití je však ve vnitřních prostorech, zejména v halách. Teplota je tedy uváděná v rozmezí 15 až 20 °C. Jak již bylo zmíněno, teplota ovlivňuje hlavně tuhnutí a tvrdnutí tiskové směsi. Při nižších teplotách se využívá ohřivače, který je součástí nabízeného kompletu. [34]

Crane WASP

Zde se jedná o zařízení, které se používá především ve venkovních prostorech z důvodu jeho velikosti a účelu použití. Společnost udává použitelné teploty v rozmezí od 10 do 40 °C. Tato tiskárna se využívá hlavně v letním období kvůli příznivějším teplotám. [34]

5.1.4 Tiskový materiál

Delta WASP 3MT CONCRETE

Tiskárna se dodává ve dvou již zmíněných konfiguracích. Ke každé konfiguraci je doporučeno použít určité materiály. Konfigurace s extruderem XL je vhodná pro tisk smíchaných cementových malt s aditivou. U varianty s extruderem XXL je doporučený tisk s betonovou směsí, jejíž frakce je 1 mm. Materiál je aditivovaný polymerními vlákny. Mezi další doporučené materiály u této varianty extruderu patří porcelán a tiskové směsi na bázi zeminy s přírodními vlákny. Nejčastějším tiskovým materiálem je zde hlavně beton z důvodu jednoduchého zajištění okolních podmínek v hale. Zde se společnost snaží minimalizovat odpad pomocí kvalitního míchacího zařízení a kratší promazávané přívodové hadice materiálu přímo do trysky a to pod tlakem 35 baru. Součástí přívodové hadice je také šnekový extruder, který reguluje přesnou dávku materiálu protékajícího tiskovou tryskou. Firma sama poskytuje poradenství v rámci optimalizace tiskové směsi. Chce, aby pro zaběhnutí materiálu stačilo vytisknout pouze obrys objektu před samotným “ostrým” tiskem. [34]

Crane WASP

U tohoto typu tiskárny se tisknou materiály jako geopolymery, betonové směsi a materiály na bázi zeminy. U takto velkoformátového tisku není estetika příliš důležitá, ale je zde nutná směs o přesných vlastnostech mezi které patří hlavně rychlé tuhnutí a tvrdnutí. Tím se docílí správné pevnosti vrstvy před následným nanesením další vrstvy. Rychlého tuhnutí a tvrdnutí se docílí aditivou, a to zejména urychlovači. Poněvadž se zde tiskne hlavně z materiálu na bázi zeminy, tak se minimalizace odpadu až tolik neřeší. Zemina se těžší a míchá v blízkosti staveniště, čili jeho dodávka je velice rychlá a hlavně efektivní. [34]

5.1.5 Velikost tiskové plochy

Delta WASP 3MT CONCRETE

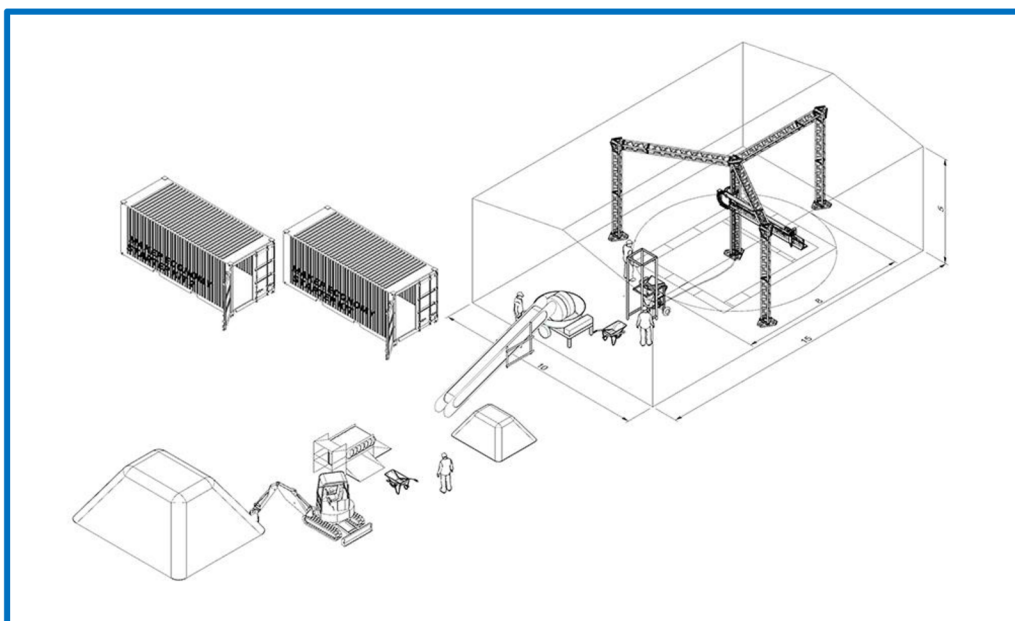
Tiskový prostor je zde ve tvaru válce s rozměry 1000 mm v průměru a výšce 1000 mm. Vyhrazený prostor pro kompletní sadu tiskového zařízení má mít půdorys 5,5 x 2,5 m a na výšku okolo 3,6 m. Největší prostor samozřejmě zabírá samotná 3D tiskárna (robot) typu Delta. Zbytek vyhrazeného prostoru zabírá ovládací panel, míchací zařízení a dodávací čerpadlo směsi (Obrázek 46). [34]



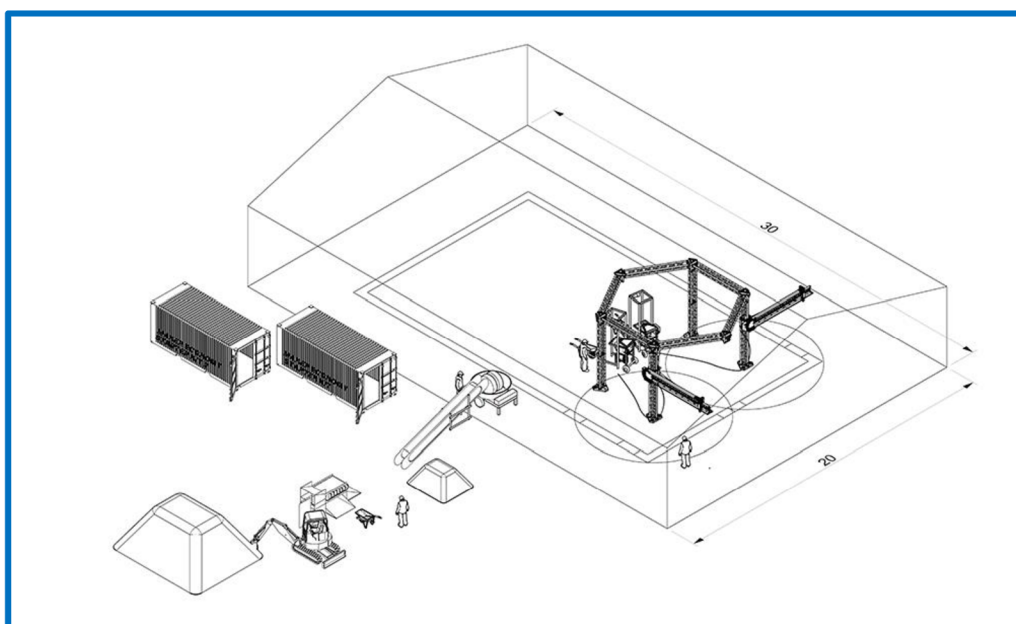
Obrázek 46 - Sestava tiskového zařízení Delta WASP 3MT CONCRETE [34]

Crane WASP

Tiskárna se skládá z dlouhého otočného ramene. Typ konstrukce této tiskárny se nazývá jeřábová. Využitelný tiskový prostor je zde též ve tvaru válce, který má v průměru 6300 mm a na výšku 3000 mm. Plocha, kterou toto otočné rameno včetně jeho dalších zařízení potřebuje, má rozměry 15 x 10 m (Obrázek 47). Je zde možnost sestavit staveniště jako sadu otočných ramen na jednotlivých hliníkových stožárech, které jsou mezi sebou propojené (Obrázek 48). Kdy tato varianta potřebuje plochu o rozměrech 30 x 20 m a její využitelná tisková plocha je větší jak 100 m². [34]



Obrázek 47 - Rozvržení staveniště Crane WASP pro jednotné otočné rameno [34]



Obrázek 48 - Rozvržení staveniště Crane WASP pro sadu otočných ramen na spojených stožárech [34]

5.2 Total Kustom

5.2.1 Výška vrstvy

StroyBot 6.2

Extruder této tiskárny je kompatibilní s vyměnitelnými tryskami o kruhovém průřezu s průměrem od 20 do 40 mm. Společnost uvádí, že je zařízení schopno tisknout kvalitní výtisky s výškou vrstvy v rozmezí 10 až 30 mm. Tloušťku vrstvy (jednoho perimetru) uvádí od 25 do 60 mm. Přesnost polohování os “X/Y” tohoto modelu je 1 až 2 mm a v ose “Z” je to 0,5 až 1 mm. [15]

LAByrinth 3D Concrete Printer

Tiskárna může být osazena tryskami kruhového průřezu o průměru vyústění od 10 do 40 mm. Doporučené výšky vrstev jsou udávány v rozmezí od 5 do 30 mm. Dalším doporučeným parametrem je šířka vrstvy, která se u této 3D tiskárny pohybuje od 15 až do 50 mm. Přesnost polohování os “X/Y” modelu LAByrinth je 1 až 2 mm a v ose “Z” je to 0,5 až 1 mm. [15]

5.2.2 Rychlost tisku

StroyBot 6.2

Společnost Total Kustom uvádí rychlost tisku v rozmezí od 1 do 15 m/min. Total Kustom doporučuje průměrnou tiskovou rychlost okolo 100 m²/min. Při této rychlosti je tiskárna schopna vytisknout jednopodlažní dům o rozměrech 13 x 20 x 7 m za zhruba 48 hodin. Rychlost přejezdu mezi vrstvami je udávána jako ideální v rozmezí od 1 do 25 m/min podle potřeby. Přičemž maximální rychlost posuvu (rychluposuvu) je 40 m/min. [15]

LAByrinth 3D Concrete Printer

Rychlost tisku je udávána v rozmezí od 1 do 15 m/min a její velikost záleží na složitosti tištěného objektu. Rychlost přejezdů mezi jednotlivými perimetry se doporučuje od 1 do 25 m/min. Maximální rychlost, kterou se mohou jednotlivé osy pohybovat, je 40 m/min. Parametry rychlosti tisku jsou u těchto dvou zmíněných modelů naprosto stejné. [15]

5.2.3 Teplota tisku

U obou popisovaných modelů společnost bohužel neuvádí teplotu, při které by měl tisk probíhat. Teplota se vztahuje hlavně na samotný tiskový materiál, který při nanášení musí nějakým způsobem rychle ztuhnout a ztvrdnout. Když se vezme v potaz škála materiálů, kterou tato společnost využívá, tak teplota tisku by se určitě měla držet mezi 15 až 25 °C. V případě nižších teplot je možnost vstupní materiál ohřívat na požadovanou teplotu, kterou určitá směs vyžaduje.

5.2.4 Tiskový materiál

StroyBot 6.2

Tiskárna je uzpůsobená pro tisk různých směsí betonu. Součástí tiskárny je míchací zařízení, do kterého se sype surový materiál. U toho modelu se využívá písek, cement a přídavná aditiva. Věc týkající se minimalizaci odpadu není firmě lhostejná. Snaží se docílit co nejlépe smíšené směsi za přidávání přesných poměrů jednotlivých surových materiálů, které se sypou do míchacího zařízení. Při tisku stěn větších projektů je samotná stěna dutá. Čili má jeden perimetr na vnějšku a jeden perimetr na vnitřku. Před startem přímého tisku objektu se vyplní čestvým materiálem budoucí dutý prostor a následně, jak je směs zaběhnutá, se tiskárna pustí do tisku již zmíněné stěny. [15]

LAByrinth 3D Concrete Printer

Tento model se dodává se třemi vyměnitelnými extrudery, z nichž každý je určen pro jiný materiál. První je určen pro velkoformátový tisk betonu. Druhý je pro velkoformátový tisk keramiky. Poslední je určen pro velkoformátový tisk plastu při technologii FDM a je v provedení “Direct”. [15]

5.2.5 Velikost tiskové plochy

StroyBot 6.2

Tiskárna má rámovou (portálovou) konstrukci. Maximální tiskový prostor je 10 x 20 x 6 m. Total Kustom nabízí čtyři varianty tohoto modelu, které mají specifické rozměry. Obecně společnost nabízí tiskárny s ocelovou, kompozitní a hliníkovou konstrukcí. Při tisku stěny s ocelovou konstrukcí tiskárny je možné tisknout stěny 4 metry vysoké. U stěny, která je tištěná tiskárnou s kompozitní konstrukcí, je možnost vytisknout stěny vysoké až 6 metrů a to z důvodu hmotnosti pohyblivých elementů. Prostor vyhrazený pro kompletní tiskové zařízení má rozměry 13 x 20 x 7 m. [15]

LAByrinth 3D Concrete Printer

Zajímavostí tohoto modelu je jeho přizpůsobivost. Tuto tiskárnu je možnost upravit na přání, aby se vlezla do laboratoře. Rozměry tiskového prostoru jsou v rozmezí od 1 x 1 x 1 m do 5 x 5 x 3 m. Podle maximálních rozměrů tiskárny lze odvodit to, že se jedná spíše o tiskárnu do vnitřních prostorů. Věnuje se hlavně tisknutí menších a přesnějších produktů z betonu. [15]



Obrázek 49 - Tisková hlava modelu StroyBot 6.2 [15]

5.3 CyBe

5.3.1 Výška vrstvy

CYBE RC 3DP (Mobile)

Tato mobilní 3D tiskárna je osazena tryskou kruhového průřezu, která se dodává pouze v jedné variantě. Průměr této trysky je 25,4 mm. Tiskárna je schopna tisknout výšku vrstvy v rozmezí 10 až 50 mm. Šířka vrstvy je o něco větší než výška samotné vrstvy, poněvadž jednotlivé vrstvy musí být pěkně zploštělé. Ovlivňující parametr pro šířku vrstvy je vzdálenost trysky od tiskové podložky. Přesnost tisku je zde vysoká, a to 1 / 1 / 1 mm. [18] [35]

GANTRY

Používá trysku kruhového průřezu o průměru 25,4 mm. Tryska se dodává pouze v této jedné variantě. Tiskárnou je možno tisknout vrstvu o výšce 10 až 50 mm. Šířka vrstvy je zde definována stejně jako u modelu CYBE RC 3DP. Přesnost tisku zde zůstává taktéž stejná, a to 1 / 1 / 1 mm. [18] [35]

5.3.2 Rychlost tisku

CYBE RC 3DP (Mobile)

CyBe uvádí maximální možnou rychlost posuvu tohoto modelu okolo 0,8 m/s. Doporučená rychlost tisku je v rozmezí od 50 do 500 mm/s. [18] [35]

GANTRY

Model GANTRY má maximální uváděnou rychlost posuvu taktéž okolo 0,8 m/s. Rychlost tisku se uvádí v mezích od 50 do 250 mm/s. [18] [35]

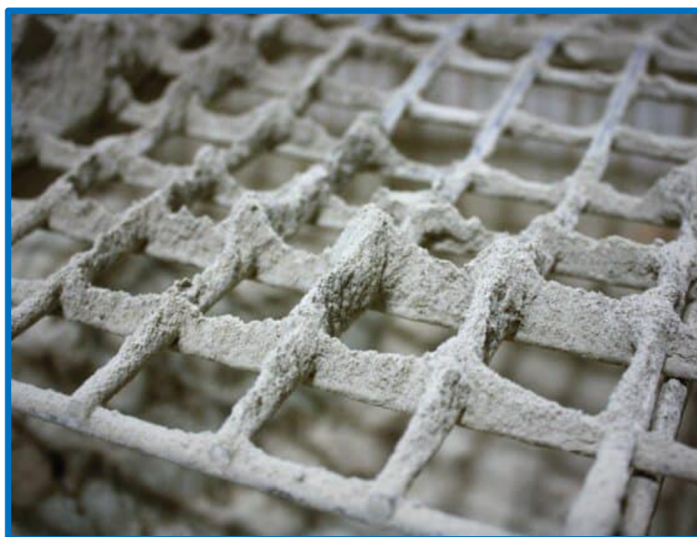
5.3.3 Teplota tisku

Pro všechny nabízené 3D tiskárny společnosti CyBe platí stejné podmínky týkajících se teplot při procesu tisku. Doporučená teplota při tisku betonové směsi CyBe Mortar, kterou si firma sama vyvinula, se pohybuje v rozmezí od 5 do 50 °C při relativní maximální vlhkosti 95 %. Společnost uvádí i další specifikace, které se týkají ovlivňujících teplotních podmínek při tisku. Doporučuje se vyvarovat tisku na přímém slunci a při vysoké rychlosti větru. Tyto parametry razantně ovlivní hydrataci a samotné vytvrzení tisknutého betonu. Některá staveniště se dají zakrytovat, tímto se eliminuje hlavně sluneční svit, ale bohužel to sebou nese nedostatky. Mezi tyto nedostatky patří zejména narůstající teplota a vlhkost na zakrytovaném staveništi. [18] [35]

5.3.4 Tiskový materiál

Jak již bylo zmíněno, všechny tiskárny společnosti CyBe mají stejné teplotní podmínky (5.3.3 Teplota tisku), a to z toho důvodu, že všechny nabízené tiskárny jsou doporučeny používat v kombinaci s materiálem CyBe MORTAR. Jedná se o vysoce výkonnou betonovou směs, kterou si společnost sama vyvinula. Je očividné, že se jedná o firemní tajemství, čili infomací ohledně složení této směsi je opravdu málo. Jedná se o jednoučelový materiál, který odolává všem prostředím. Jednoučelový materiál je zde myšlen tak, že se jedná o beton, který se vyvinul čistě pro 3D tisk. [18] [35]

CyBe udává, že směs je schopna tuhnout do tří minut a pevnou strukturu získává po jedné hodině. Minimalizace odpadu nedokonale homogenizované je zde dá se říct minulostí. Betonová směs je po smísení ihned připravena na “ostrý” tisk bez nutnosti zaběhnutí směsi před tiskem. V praxi se pro jistotu tiskne v první řadě krátká čára pro vytvoření souvislého průtoku směsi skrze trysku. Přesně tak, jak je to známo například u technologie tisku FDM. Zmíněné parametry umožňují rychlý a hlavně efektivní tisk, který razantně sníží náklady, se kterými je možné se setkat u jiných technologií. Společnost tvrdí, že při používání jejich směsi se sníží uhlíková stopa a celkový dopad na životní prostředí. Výroba této CyBe Mortar vypustí do ovzduší o neuvěřitelných 32 % méně oxidu uhličitého než běžný portlandský cement. [18] [35]



Obrázek 50 - Prášková směs CyBe Mortar [18]

5.3.5 Velikost tiskové plochy

CYBE RC 3DP (Mobile)

Konstrukce této tiskárny se skládá z pojízdné platformy, na které je umístěno robotické šestiosé rameno (Obrázek 51). Součástí platformy je též nivelační systém pro zajištění pevnosti a tuhosti konstrukce při tisku pouze na jednom místě bez nutnosti pohybu kompletního tiskového zařízení. Jelikož se jedná o průmyslového robota, tak jeho využitelný tiskový prostor má tvar polokoule, která může mít průměr 5 m a na výšku může mít až 4,5 m. Výška možného tisku je ovlivnitelná již zmíněným nivelačním systémem, kdy bez použití tohoto systému může být výška maximálně 3,2 m. [18] [35]

GANTRY

U tohoto modelu se jedná o portálovou konstrukci (Obrázek 52). Zde je využitelný tiskový prostor ve tvaru kvádra o rozměrech 7 x 10 x 4 m. [18] [35]



Obrázek 51 - Model CyBe RC 3DP [18]



Obrázek 52 - Model CyBe G (Gantry) [18]

5.4 ICE Industrial Services

Tato společnost nebyla ještě vůbec zmíněná. Jedná se totiž o ryze českou firmu, která se v posledních letech věnuje 3D tisku betonu. Patří mezi největší průkopníky 3D tisku betonu v České republice. Závod ICE CORAL, který se tiskem zabývá, sídlí přímo ve Žďáru nad Sázavou. Mezi velké projekty společnosti patří například výstavba obranných a vojenských bezpečnostních prvků, které jsou tisknuty z vysokopevnostního betonu (UHPC) (Obrázek 55). ICE nenabízí kompletní tisková zařízení, ale nabízí zakázkový 3D tisk, a to i na předem určeném místě. Přestože ICE využívá vícero konstrukcí 3D tiskáren, v této práci bude popsáno tiskové zařízení s průmyslovým šestiosým robotem značky Kuka. Mezi zbylé platformy tiskárny patří portálová (rámová) a jeřábová řešení. [36]

5.4.1 Výška vrstvy

ICE vlastní patenty na tiskové hlavy a používané trysky pro vícesložkový tisk. Používá trysky kruhového průřezu, tak i trysky obdélníkového průřezu s hladítky v kombinaci s patentovanou otočnou tiskovou hlavou. Rozměry trysek kruhového průřezu, které společnost používá, je v rozmezí průměrů od 30 do 50 mm. Ideální výškou vrstvy v případě použití kruhové trysky je 18 mm. Tato výška se jeví jako ideální v poměru kvality a času. U trysek obdélníkového průřezu nejsou přesné rozměry známy, ale jedná se o tvar obdélníku s poměrem stran 3 : 1. K nanášení vrstev u trysek obdélníkového průřezu se pojí jistá kritéria, která byla již zmíněná výše (Obrázek 37).

Doplňujícím parametrem u výšky vrstvy je i šířka vrstvy (jednoho perimetru). Při tisku tryskou kruhového průřezu, která tiskne vrstvu o výšce 18 mm je šířka vrstvy zhruba 45 mm. U tisku tryskou obdélníkového průřezu s hladítky je šířka vrstvy téměř shodná s délkou delší strany obdélníkového průřezu.

5.4.2 Rychlost tisku

Rychlost tisku se zde pohybuje okolo 250 mm/s. První vrstva se tiskne většinou pomaleji, a to na nějakých 180 mm/s. Průtokové množství čerpadla na beton je zde okolo 15 l/min. Součástí tiskové hlavy je i šnekové čerpadlo regulující dodávku směsi do trysky. Otáčky tohoto čerpadla jsou okolo 1000 ot/min.

5.4.3 Teplota tisku

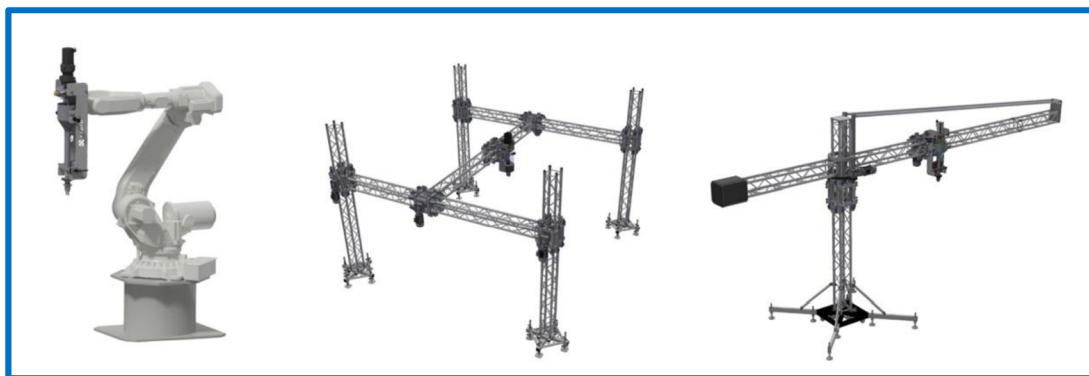
Společnost tiskne z větší části hlavně ve vnitřních prostorech. Snaží se držet teplotu směsi na 20 °C. Ve skutečnosti se ale teplota pohybuje okolo 17 až 19 °C. Jestliže jsou teploty v zimním období opravdu nízké, je možné použít ohříváč směsi.

5.4.4 Tiskový materiál

Společnost vyvíjí vlastní vícesložkový beton, který má hrubost zrna od 4 mm a více. V ICE se tiskne pouze beton, popřípadě jeho zlepšené formy. Oproti standardnímu stavění se 3D tiskem betonu ušetří až 50 % stavebního materiálu. Homogenizaci a čerpání směsi zajišťuje patentovaná unikátní tisková hlava. Při vyvíjení tiskové směsi se bohužel kvůli zaběhnutí materiálu a získání potřebné homogenity likviduje velké množství materiálu, který přijde vniveč. Společnost si ale všimla většího problému týkajícího se zdatelně vyššího úbytku vody, která je jednou ze vstupních surovin. ICE se snaží vodu z části nahradit chemickými plastifikátory. Plastifikátor je aditivum, přesněji řečeno přísada, která umožní snazší zpracovatelnost betonové směsi. Firma se do budoucna chce podílet na vývoji materiálů, které vyprodukují o 70 % méně oxidu uhličitého při zachování stejné ceny. [36] [37]

5.4.5 Velikost tiskové plochy

Konstrukcí je šestiosé robotické rameno připevněné ke zvýšené platformě (Obrázek 53). Využitelný tiskový prostor je ve tvaru polokoule. Společně s prodlouženou patentovanou tiskovou hlavou má průmyslový robot dosah okolo 3000 mm. Z toho tedy vyplývá, že půdorys je kruh o průměru 6000 mm. Když se vezme v potaz platforma o výšce okolo 800 mm, tak na výšku je tiskový prostor zhruba 3800 mm. [36]



Obrázek 53 - Používané konstrukce 3D tiskáren společnosti ICE [36]



Obrázek 54 - Detail výšky vrstvy



Obrázek 55 - Výtisky obranných barikád

6 MULTIKRITERIÁLNÍ ANALÝZA

Pro porovnání a výběr ideálních parametrů 3D tisku z betonu vybraných tiskáren jednotlivých společností byla použita multikriteriální analýza. Tato analýza bude hodnotit vybrané tiskárny, které jsou určeny zejména pro tisk větších projektů, nikoli pro tisk malých prototypů. Ze začátku je nutné zvolit hodnotící parametry tisku betonu a každému z nich přiřadit váhu podle jejich důležitosti. V další části při hodnocení jednotlivých tiskáren se každému z hodnotících parametrů udělí počet bodů, který se poté vynásobí s již zadanou vahou hodnotícího parametru. Tyto násobky určitých parametrů se poté sčítají. Hodnocení jednotlivých parametrů vybraných tiskáren spočívá v tom, že nejvyšší možná hodnota je 5 a naopak nejnižší hodnota je 1. Optimální varianta bude vybrána podle nejvyšší hodnoty součtu.

6.1 Hodnotící parametry

Základní parametry 3D tisku betonu byli již zmíněny výše (3 PARAMETRY 3D TISKU Z BETONU). Do zmíněných parametrů tisku bylo zahrnuto vícero parametrů, které určitě stojí za zhodnocení.

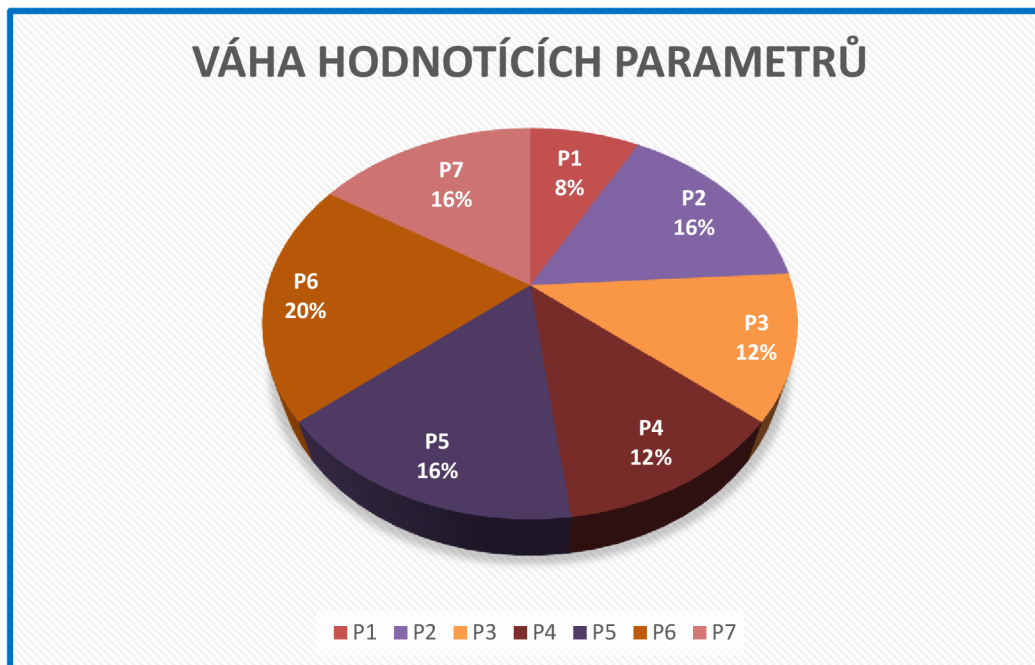
Mezi reprezentativní parametry 3D tisku betonu patří:

- P1: Technologie tisku
- P2: Konstrukce 3D tiskárny
- P3: Výška vrstvy
- P4: Rychlost tisku
- P5: Teplota tisku
- P6: Tisková směs
- P7: Velikost tiskové plochy

6.2 Přiřazení váhy jednotlivým parametrům tisku

Tabulka 1 - Váhy jednotlivých parametrů 3D tisku z betonu

Parametr	Váha	Důvod
P1	V1 = 2,0	Parametr nemá velký výběr z důvodu dosavadního vývoje, ale ovlivňuje přesnost tisku
P2	V2 = 4,0	Parametr ovlivňuje velikost stavby, maximální rychlosti možných pohybů při tisku a přesnost tisku
P3	V3 = 3,0	Parametr ovlivňuje kvalitu povrchu, dobu tisku a spotřebu materiálu
P4	V4 = 3,0	Parametr ovlivňuje kvalitu a soudržnost jednotlivých vrstev vlivem čerpaného množství směsi
P5	V5 = 4,0	Parametr ovlivňuje rychlost chemické reakce (tuhnutí, tvrdnutí) ve směsi
P6	V6 = 5,0	Parametr zřetelně ovlivňuje množství odpadu při homogenizaci směsi a vlastnosti výtisku (tisknutelnost a mechanické vlastnosti)
P7	V7 = 4,0	Parametr ovlivňuje možnou velikost stavby, přesnost tisku a samozřejmě také cenu výtisku



Obrázek 56 - Graf váhy hodnotících parametrů 3D tisku betonu

6.3 Delta WASP – Crane WASP

Tabulka 2 - Hodnocení Delta WASP - Crane WASP

Parametr	Body parametru	Důvod
P1	DW1 = 3,0	Založeno na standardní extruzi směsi
P2	DW2 = 3,5	Jedná se o otočnou jeřábovou konstrukci, mezi jejíž nevýhody patří nutná minimalizace hmotnosti tiskové hlavy
P3	DW3 = 3,0	Velká škála výběru průměrů trysek, čili i velký rozsah volby výšky vrstvy
P4	DW4 = 5,0	Při kombinaci většího počtu ramen se doba tisku razantně sníží
P5	DW5 = 2,5	Tisk probíhá ve venkovních prostorech a v teplých ročních obdobích
P6	DW6 = 3,0	Využívá se geopolymerních směsí, betonových směsí a zejména směsí na bázi zeminy, která se těží v blízkosti staveniště
P7	DW7 = 4,0	Ve variantě s vícero tiskovými rameny je schopná mít využitelnou tiskovou plochu větší jak 100 m ²

$$\alpha_{DW} = \frac{DW1 \cdot V1 + DW2 \cdot V2 + DW3 \cdot V3 + DW4 \cdot V4 + DW5 \cdot V5 + DW6 \cdot V6 + DW7 \cdot V7}{V1 + V2 + V3 + V4 + V5 + V6 + V7} \quad (1)$$

$$\alpha_{DW} = \frac{3,0 \cdot 2,0 + 3,5 \cdot 4,0 + 3,0 \cdot 3,0 + 5,0 \cdot 3,0 + 2,5 \cdot 4,0 + 3,0 \cdot 5,0 + 4,0 \cdot 4,0}{2,0 + 4,0 + 3,0 + 3,0 + 4,0 + 5,0 + 4,0}$$

$$\alpha_{DW} = 3,4$$

6.4 Total Kustom – StroyBot 6.2

Tabulka 3 - Hodnocení Total Kustom - StroyBot 6.2

Parametr	Body parametru	Důvod
P1	TK1 = 3,0	Založeno na standardní extruzi směsi
P2	TK2 = 4,5	Konstrukce je zde rámová (portálová), což umožňuje tisk velkých projektů, a to zejména s konstrukcí z kompozitního materiálu
P3	TK3 = 3,0	Velká škála výběru průměrů trysek, čili i velký rozsah volby výšky vrstvy
P4	TK4 = 2,5	Kvůli masivní konstrukci se doporučuje tisknout pomalejším tempem, aby nedošlo ke kolizi při procesu tisku stavby
P5	TK5 = 3,5	Tisk probíhá ve venkovních prostorech, při nutnosti vyšší teploty se využívá ohřivače tiskové směsi
P6	TK6 = 3,5	Používají se různé směsi betonu, které se zabíhají formou výplně budoucích dutých prostorů stěn
P7	TK7 = 4,5	Jedná se o portálovou konstrukci, která má využitelnou tiskovou plochu přes 250 m ²

$$\alpha_{TK} = \frac{TK1 \cdot V1 + TK2 \cdot V2 + TK3 \cdot V3 + TK4 \cdot V4 + TK5 \cdot V5 + TK6 \cdot V6 + TK7 \cdot V7}{V1 + V2 + V3 + V4 + V5 + V6 + V7} \quad (2)$$

$$\alpha_{TK} = \frac{3,0 \cdot 2,0 + 4,5 \cdot 4,0 + 3,0 \cdot 3,0 + 2,5 \cdot 3,0 + 3,5 \cdot 4,0 + 3,5 \cdot 5,0 + 4,0 \cdot 4,0}{2,0 + 4,0 + 3,0 + 3,0 + 4,0 + 5,0 + 4,0}$$

$$\alpha_{TK} = 3,52$$

6.5 CyBe – CyBe RC 3DP (Mobile)

Tabulka 4 - Hodnocení CyBe - CyBe RC 3DP (Mobile)

Parametr	Body parametru	Důvod
P1	CB1 = 3,0	Založeno na standardní extruzi směsi
P2	CB2 = 5,0	Jedná se o robotické rameno, které je upevněno na pojízdné nivelační platformě
P3	CB3 = 3,0	Tiskárna se dodává pouze s jedinou variantou trysky s kruhovým průřezem, ale za to je schopna tisknout širokou škálu výšek vrstvy
P4	CB4 = 3,0	Je zde nutné brát v potaz i rychlost pojízdné platformy, ta se hlavně podepíše při rychloposuvu mezi perimetry
P5	CB5 = 3,0	Tisk je určen pro vnitřní i venkovní použití, ve venkovních prostorech nesmí být materiál vystaven přímému slunci a vysoké rychlosti větru
P6	CB6 = 5,0	Jednouúčelový tiskový materiál vyvinutý společností CyBe disponující skvělými vlastnostmi po správném smíchání složek
P7	CB7 = 5,0	Variabilita využitelné tiskové plochy díky pojízdné platformě a nivelačnímu systému

$$\alpha_{CB} = \frac{CB1 \cdot V1 + CB2 \cdot V2 + CB3 \cdot V3 + CB4 \cdot V4 + CB5 \cdot V5 + CB6 \cdot V6 + CB7 \cdot V7}{V1 + V2 + V3 + V4 + V5 + V6 + V7} \quad (3)$$

$$\alpha_{CB} = \frac{3,0 \cdot 2,0 + 5,0 \cdot 4,0 + 3,0 \cdot 3,0 + 3,0 \cdot 3,0 + 3,0 \cdot 4,0 + 5,0 \cdot 5,0 + 5,0 \cdot 4,0}{2,0 + 4,0 + 3,0 + 3,0 + 4,0 + 5,0 + 4,0}$$

$$\alpha_{CB} = 4,04$$

6.6 ICE Industrial Services – Modifikovaný robot Kuka

Tabulka 5 - Hodnocení ICE - Modifikovaný robot Kuka

Parametr	Body parametru	Důvod
P1	IC1 = 3,0	Založeno na standardní extruzi směsi
P2	IC2 = 3,0	Modifikované robotické rameno Kuka, které je upevněno na vyvýšené nosné platformě
P3	IC3 = 3,5	Využívá trysky kruhového i obdélníkového průřezu v širokém rozmezí velikostí, ke kterým se váží i různé výšky vrstev
P4	IC4 = 3,5	Rychlost tisku se zde doporučuje okolo 250 mm/s, což se považuje za standard při tisku robotickým ramenem
P5	IC5 = 3,5	Toto rameno je určeno především na tisk ve vnitřních prostorech, při nižších teplotách se využije ohřívače směsi
P6	IC6 = 4,0	Tiskový materiál je zde beton obohacený aditivou, u kterého je možnost recyklace, což je dobré pro velký odpad vznikající při homogenizaci směsi
P7	IC7 = 3,0	Pevné ukotvení robotického ramene neumožňuje tisk rozsáhlých výtisků, je ale možné robotické rameno vypodložit pro tisk vyšších výtisků a to i při samotném procesu tisku

$$\alpha_{IC} = \frac{IC1 \cdot V1 + IC2 \cdot V2 + IC3 \cdot V3 + IC4 \cdot V4 + IC5 \cdot V5 + IC6 \cdot V6 + IC7 \cdot V7}{V1 + V2 + V3 + V4 + V5 + V6 + V7} \quad (4)$$

$$\alpha_{IC} = \frac{3,0 \cdot 2,0 + 3,0 \cdot 4,0 + 3,5 \cdot 3,0 + 3,5 \cdot 3,0 + 3,5 \cdot 4,0 + 4,0 \cdot 5,0 + 3,0 \cdot 4,0}{2,0 + 4,0 + 3,0 + 3,0 + 4,0 + 5,0 + 4,0}$$

$$\alpha_{IC} = 3,4$$

6.7 Shrnutí multikriteriální analýzy

Tabulka 6 - Výsledky multikriteriální analýzy

3D tiskárna	Crane WASP	StroyBot 6.2	CyBe RC 3DP (Mobile)	Modifikovaný robot Kuka
Celkové hodnocení	3,4	3,52	4,04	3,4

Při kontrole výsledků si lze všimnout, že vyhovující parametry má tiskárna od společnosti CyBe nesoucí název CyBe RC 3DP (Mobile) (Tabulka 6). V zápětí na druhém místě se umístila tiskárna společnosti Total Kustom a o poslední místo se společně dělí tisková zařízení od společností Delta WASP a ICE Industrial Services. Při této multikriteriální analýze byla klíčová směs, a to zejména minimalizace odpadu nedokonale zhomogenizované směsi, čehož si lze všimnout v úvodu multikriteriální analýzy podle váhy jednotlivých reprezentujících parametrů (Tabulka 1).

Bylo by dobré zmínit i další doplňující informace týkající se tiskárny CyBe RC 3DP (Mobile). Společnost udává seřizovací dobu této tiskárny okolo 2 hodin při spolupráci dvou operátorů. Při pořízení tiskového zařízení dostane zákazník také přístup k příslušným programům. Software CyBe Artysan pomůže zdokonalit 3D model tak, aby vyhovoval aditivním technologiím a zároveň, aby doba tisku byla co nejkratší. Druhý software je CyBe Chysel. Jedná se o Slicer, který nám vytvoří G-Code s určitými parametry, o kterých je psáno výš. Jednoduše řečeno, Slicer vytvoří program podle kterého bude 3D tiskárna pracovat. Přestože tiskový materiál CyBe Mortar je spíše firemním tajemstvím, tak společnost k objednaným 3D tiskovým zařízením zaslá tuto směs ve formě prášku. K přípravě tiskové směsi je potřeba do sypké směsi přidat přesné množství vody a může se začít tisknout. CyBe tvrdí, že přesné poměry jednotlivých složek a zejména správné zamíchání směsi dělá CyBe Mortar tou pravou směsí pro 3D tisk. Při procesu tisku je ale nutné se vyvarovat některým nepříjemnostem (5.3.3 Teplota tisku). Ceník tiskových zařízení je u společnosti CyBe na vyžádání. Na internetových bazarech lze pořídit 3D tiskárnu CyBe RC 3DP (Mobile) od zhruba 4 350 000 Kč. [35] [38]

7 DISKUZE A ZHODNOCENÍ

Bakalářská práce se zabývá rešerší na parametry 3D tisku z betonu, a to v souvislosti s minimalizací odpadu nedokonale zhomogenizované směsi.

7.1 Možné pokračování

Práce řeší pouze technologii a klíčové parametry 3D tisku betonu. Není zde doslovně popsáno, jak například probíhá samotný proces tisku včetně přesného popisu rozhraní programů k ovládání 3D tiskárny betonu.

Otázka, nad kterou je potřeba popřemýšlet se týká reologie směsi u 3D tiskáren. Reologie je věda zabývající se deformací látek v závislosti na čase. V tomto případě by se jednalo o reologické vlastnosti čerstvého betonu, kde jsou vztahy mezi napětím, třením, viskozitou a deformací. Ve zkratce řečeno, reologie se věnuje chování čerstvého betonu. Samotná reologie je důležitá pro úspěšnou dopravu a zpracování samozhutnitelného betonu, který má specifické vlastnosti. Reologie úzce souvisí s třením. Beton, jakožto kompozitní a hlavně abrazivní materiál má negativní vliv na všechny komponenty, kterými protéká právě zmíněným třením. [39]

Další věcí na průzkum může být například zastavení tisku v určitém bodě a následné spuštění tisku od téhož bodu. Tento proces se používá například při zaznamenání vady při tisku, která je způsobená již nevyhovující a opotřebovanou tiskovou tryskou. Tisk se zastaví, tryska se vymění a následně se tisk zase obnoví. K zastavení a následnému spuštění se také váže problematika týkající se odříznutí 3D tiskárny od elektrického proudu.

7.2 Doporučení pro praxi

Doporučení se se bude týkat hlavně souvislosti s minimalizací odpadu nedokonale zhomogenizované betonové směsi. V tomto případě nepůjde o úplnou minimalizaci, ale spíše o recyklaci směsi, kterou je možné provézt rovnou na staveništi. Poněvadž se betonové stavby tisknou ve formě ztraceného bednění, tak by bylo možné vzniklé dutiny vysypat nadrceným betonem. Nedokonale zhomogenizovaná směs by se rozdrtila za pomoci mobilního drtiče sutin. Mezi favority mobilních drtičů sutin patří například zařízení od společnosti SDTW nesoucí název Kompaktní drtič SWMD 400s. Jedná se o drtič, který je schopný se pomocí pásového podvozku pohybovat po celém staveništi. [40]

8 ZÁVĚR

Předmětem této bakalářské práce jsou parametry tisku v souvislosti s minimalizací odpadu nedokonale zhomogenizované směsi. Rešeršní část řeší známé technologie tisku betonu určitých společností, popis sestavy tiskového zařízení a základní tiskové parametry.

Následovala kapitola řešící systémový rozbor práce. Zde byla vyřešena kompletní metodika postupu práce, která napomohla k docílení optimálního řešení zadaného problému. V této kapitole byl navrhnout i postupový diagram práce, ve kterém jsou stanoveny vybrané technologie společností, které se věnují 3D tisku betonu.

V další kapitole byly popsány základní parametry tisku vybraných technologiích určitých společností. Mezi stanovené parametry patří výška vrstvy, rychlost tisku, teplota tisku, tiskový materiál a velikost využitelné tiskové plochy. Pro lepší komplexnost byly do základních parametrů zahrnuty i doplňující parametry tisku, mezi které patří například velikost tiskové trysky, velikost celého tiskového zařízení a spousta dalších.

Po zjištění parametrů tisku, které využívají jednotlivé společnosti se provedla multikriteriální analýza, která ukázala optimální řešení. Optimální parametry tisku související s minimalizací odpadu nedokonale zhomogenizované směsi měla společnost CyBe se svojí 3D tiskárnou CyBe RC 3DP (Mobile).

Závěrečný blok bakalářské práce je věnován možnému pokračování problematiky 3D tisku betonu a vlastnímu doporučení pro praxi. Cíle této bakalářské práce byly splněny.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] DORŇÁK, Jiří. *TECHNOLOGIE 3D TISKU: Erasmus+* [online]. Valašské Meziříčí: SUPŠ sklářská, 2016 [cit. 2023-03-12]. Dostupné z: https://www.sklarskaskola.cz/userfiles/files/Projekty/TECHNOLOGIE_3D_TISKU.pdf
- [2] ZÁMEČNÍK, Michal. *3D tisk z betonu ve stavebním průmyslu* [online]. 2022, **2022**(20221), 4-6 [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: https://www.ebeton.cz/clanky/2022_1_4_3d-tisk-z-betonu-ve-stavebnim-prumyslu/
- [3] KOVÁŘÍK, Michal. *Technologie 3D tisku v architektuře a stavebnictví* [online]. Earch.cz, 2018 [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: <https://www.earch.cz/technologie/clanek/technologie-3d-tisku-v-architekture-a-stavebnictvi>
- [4] POLÁKOVÁ, Anna. *3D tisk ve stavitelství* [online]. Plzeň, 2020 [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/41557/1/DP_Anna_Polakova_2020.pdf. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [5] FANTA, Michal. *Základy 3D tisku* [online]. Earch.cz, 2020 [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: <https://www.earch.cz/technologie/clanek/zaklady-3d-tisku>
- [6] UVÍRA, Dominik. *Vlastnosti kompozitních materiálů pro FDM tisk s příměsí dřeva* [online]. Brno, 2021 [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/197148>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Oskar Zemčík.
- [7] ČECHAL, Petr. *Technologie pro 3D tisk prototypů ve stavebnictví* [online]. Brno, 2018 [cit. 2023-03-19]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/84327>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav automatizace inženýrských úloh a informatiky. Vedoucí práce Jan Podroužek.
- [8] HONGXI, Yin. *3D Printing and Buildings: A Technology Review and Future Outlook* [online]. Washington: Washington University in St. Louis, 2022 [cit. 2023-03-19]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/325491864_3D_Printing_and_Buildings_A_Technology_Review_and_Future_Outlook
- [9] LIPOLDOVÁ, Marie. *Cementové kompozitní materiály pro technologii 3D tisku* [online]. Brno, 2019 [cit. 2023-03-22]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/179811>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Lenka Bodnárová.
- [10] TURINSKÝ, Robert. *Vývoj technologie 3D tisku s využitím konstrukce typu Delta* [online]. Praha, 2018 [cit. 2023-03-23]. Dostupné z: <file:///C:/Users/42072/Downloads/F2-DP-2018-Turinsky-Robert-Diplomova%20prace.pdf>. Diplomová práce. Fakulta strojní ČVUT v Praze.

- [11] BOHÁČ, Radek. *Autonivelační systém pracovního stroje* [online]. Liberec, 2021 [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: file:///C:/Users/42072/Downloads/BP_Bohac.pdf. Bakalářská práce. TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI. Vedoucí práce Ing. Jan Koprnický, Ph.D.
- [12] Winsun: Innovation Cases. *Futureofconstruction* [online]. futureofconstruction [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: <https://www.futureofconstruction.org/case/winsun/>
- [13] *MEET FRANK AND HIS FAMILY* [online]. USA: Apis Cor, 2022 [cit. 2023-03-25]. Dostupné z: <https://apis-cor.com/technologies/>
- [14] *ICON* [online]. USA: ICON [cit. 2023-03-25]. Dostupné z: <https://www.iconbuild.com/technology>
- [15] RUDENKO, Andrey. *Total Kustom - Home* [online]. USA: totalkustom [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <http://www.totalkustom.com/home.html>
- [16] *XtreeE - We design and manufacture large-scale 3D printers* [online]. Francie: XtreeE [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: <https://xtreee.com/en/solutions/>
- [17] WU, Zhengyu. Existing Reinforcement Concepts for 3D Printed Concrete: Construction & Building Technology. *Scholarly Community Encyclopedia* [online]. 2022 [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: doi:10.3390/en15010360
- [18] *CyBe* [online]. Holandsko: CyBe [cit. 2023-03-28]. Dostupné z: <https://cybe.eu/3d-concrete-printing/mortar/>
- [19] *D-Shape* [online]. Londýn: D-Shape [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: <https://d-shape.com/>
- [20] *Robot: Jak funguje?* [online]. Zdíby, ČR: Kuka [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: <https://www.kuka.com/cs-cz/produkty,-slu%C5%BEby/robotick%C3%A9-syst%C3%A9my/robot-clanek>
- [21] KLIČMAN, Jan. *Návrh planetové míchačky betonu* [online]. Praha, 2020 [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/86273/F2-DP-2020-Klicman-Jan-Diplomova%20prace%20Jan%20Klicman.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Diplomová práce. Fakulta strojní ČVUT v Praze. Vedoucí práce Ing. Josef Kamenický.
- [22] SLAVÍČEK, Jakub. *Konstrukce tiskové hlavy pro 3D tisk velkorozměrových dílů z betonové směsi* [online]. Brno, 2018 [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/82485>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav konstruování. Vedoucí práce David Paloušek.
- [23] *Betonování v zimě* [online]. Brno: TRANSBETON [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: <https://www.transbeton.cz/o-betonu/betonovani-v-zime>
- [24] MACHOVEC, Jan. *PROBLEMATIKA 3D TISKU Z BETONU* [online]. Praha, 2022 [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/102840>. Disertační práce. Fakulta stavební ČVUT v Praze. Vedoucí práce Jiří Litoš.
- [25] *Vrstvy a perimetry. : Nastavení tisku* [online]. Prusa Research [cit. 2023-04-07]. Dostupné z: https://help.prusa3d.com/cs/article/vrstvy-a-perimetry_1748

- [26] ČERNOSTA, Lukáš. *Prototyp 3D tiskárny betonu a vývin betonové směsi pro 3D tisk* [online]. Praha, 2016 [cit. 2023-04-08]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/67914/F1-DP-2017-Cernosta-Lukas-CernostaL_DP_2017-KOS.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Diplomová práce. Fakulta stavební ČVUT v Praze. Vedoucí práce Doc. Ing. Petr Štemberk, Ph.D.
- [27] SOUZA, Marcelo, Igor FERREIRA, Elisângela MORAES, Luciano SENFF a Antonio OLIVEIRA. *3D printed concrete for large-scale buildings: An overview of rheology, printing parameters, chemical admixtures, reinforcements, and economic and environmental prospects* [online]. 2020, **2020** [cit. 2023-04-08]. Dostupné z: [doi:10.1016/j.jobe.2020.101833](https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101833)
- [28] *Složení betonu – složky betonu* [online]. Praha: eBETON [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/pojmy/slozeni-betonu-slozky-betonu/>
- [29] *Složení betonu – složky betonu: Kamenivo* [online]. Praha: eBETON [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/pojmy/kamenivo/>
- [30] *Voda: Složení betonu – složky betonu* [online]. Praha: eBETON [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/pojmy/voda/>
- [31] *Přísady: Složení betonu – složky betonu* [online]. Praha: eBETON [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/pojmy/prisady/>
- [32] *Příměsi: Složení betonu – složky betonu* [online]. Praha: eBETON [cit. 2023-04-10]. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/pojmy/primesi/>
- [33] *INOVATIVNÍ PROCES RECYKLACE BETONU PROCESEM RECO₂VER* [online]. Brno: Sika CZ [cit. 2023-04-11]. Dostupné z: <https://cze.sika.com/cs/o-nas/inovace/recyklace-betonu-reco2ver.html>
- [34] *3D Printers* [online]. Itálie: WASP [cit. 2023-04-14]. Dostupné z: <https://www.3dwasp.com/en/#>
- [35] *CyBe 3Dcp SPECIFICATIONS* [online]. Nizozemsko: CyBe, 2022, **2022**(38), 17 [cit. 2023-04-15]. Dostupné z: https://lybrary.cybe.eu/wp-content/uploads/dlm_uploads/2021/07/3D-Specifications.pdf
- [36] Přinášíme revoluci do stavebního průmyslu. In: *ICE - Coral* [online]. Žďár nad Sázavou: ICE [cit. 2023-04-12]. Dostupné z: <https://www.ice.cz/cs/ice-coral>
- [37] *Plastifikátor betonu Den Braven 5 l* [online]. DEK [cit. 2023-04-16]. Dostupné z: <https://www.dek.cz/produkty/detail/2235512003-plastifikator-betonu-5l>
- [38] *CyBe RC 3DP* [online]. Holandsko: Aniwaa, 2018 [cit. 2023-04-29]. Dostupné z: <https://www.aniwaa.com/product/3d-printers/cybe-rc-3dp/>
- [39] *Reologie* [online]. Praha: eBETON [cit. 2023-04-29]. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/pojmy/reologie/>
- [40] *MOBILNÍ DRTIČE* [online]. Rosice: SDTW [cit. 2023-04-30]. Dostupné z: <https://www.sdtw.cz/mobilni-drtice/>
- [41] M, Ronan. Contour Crafting. In: *3D PRINTING* [online]. Ronan M., 2016 [cit. 2023-03-13]. Dostupné z: <https://3dprinting.com/news/contour-crafting-expected-to-be-used-to-build-homes-by-2018/>

- [42] 3D tisk a jeho možnosti - FDM. In: *Fakulta strojní ČVUT v Praze* [online]. Praha: Fakulta strojní ČVUT v Praze [cit. 2023-03-15]. Dostupné z: <https://www.fs.cvut.cz/ostatni/sekce-3dtisk/3dtisk/moznosti-3dtisk/rozdeleni-technologii-3dtisk/fdm-3dtisk/>
- [43] GAGET, Lucie. 3D printing for construction: What is Contour Crafting?. In: *Sculpteo.com* [online]. Sculpteo, 2018 [cit. 2023-03-19]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/blog/2018/06/27/3d-printing-for-construction-what-is-contour-crafting/>
- [44] ABRAMS, Michael. 3D Printing Houses. In: *ASME.org* [online]. ASME, 2014 [cit. 2023-03-22]. Dostupné z: <https://www.asme.org/topics-resources/content/3d-printing-houses>
- [45] Big Delta, una solida casa in argilla 3D (made in Italy). In: *Youtradeweb.com* [online]. Itálie: youtradeweb, 2015 [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: <https://www.youtradeweb.com/2015/09/big-delta-una-solida-casa-in-argilla-3d-made-in-italy/>
- [46] VOŘÍŠEK, Lukáš. Největší deltová 3D tiskárna na světě má 12 metrů na výšku a tiskne celé domy!: Technologie. In: *Cdr.cz* [online]. CDR, 2015 [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: <https://cdr.cz/clanek/nejvetsi-deltova-3d-tiskarna-na-svete-tiskne-domy-wasp-bigdelta>
- [47] WECKBRODT, Heiko. Häuser aus dem 3D-Drucker. In: *Oiger.de* [online]. Drážďany: Oiger, 2016 [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: <https://oiger.de/2016/04/11/haeuser-aus-dem-3d-drucker/159090>
- [48] MASSIE, Caroline. China's WinSun Unveils Two New 3D Printed Buildings. In: *Architectmagazine.com: Technology* [online]. architectmagazine, 2015 [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: https://www.architectmagazine.com/technology/chinas-winsun-unveils-two-new-3d-printed-buildings_o
- [49] GHAFAR, Hamidreza. Office building in Dubai printed by WinSun. In: *Researchgate.net* [online]. researchgate, 2018 [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Office-building-in-Dubai-printed-by-WinSun_fig3_325106129
- [50] JOEL, Chris. APIS COR” 3D PRINTS A BUILDING MEASURING 37-SQUARE-METER IN RUSSIA. *3dprintersonlinestore* [online]. 3dprintersonlinestore [cit. 2023-03-25]. Dostupné z: <https://www.3dprintersonlinestore.com/apis-cor-3d-prints-a-building>
- [51] GOEHRKE, Sarah. 3D Printed Housing Gets A Boost: \$35M For ICON. In: *Fabbaloo.com* [online]. fabbaloo, 2020 [cit. 2023-03-25]. Dostupné z: <https://www.fabbaloo.com/2020/08/35m-for-icon>
- [52] Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete – a new processing route for architects and builders. *ELSEVIER* [online]. Francie, 2016, **2016**, 2 [cit. 2023-03-26]. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2016.03.097
- [53] 3D 프린팅. In: *Bomnae.chuncheon.go.kr* [online]. Korea: bomnae.chuncheon, 2019 [cit. 2023-03-27]. Dostupné z: <https://bomnae.chuncheon.go.kr/contentView?contentNo=460&no=343>

- [54] 3D printing for construction and architecture projects: The Ultimate Guide 2022. In: *Sculpteo.com* [online]. Francie: Sculpteo [cit. 2023-03-29]. Dostupné z: <https://www.sculpteo.com/en/3d-learning-hub/applications-of-3d-printing/construction-and-architecture/>
- [55] KAUPPILA, Ile. 3D Concrete Printing – The Ultimate Guide. In: *All3dp.com* [online]. all3Dp, 2023 [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/3d-concrete-printing-guide/>
- [56] The smoothest 3d printed concrete I've seen so far. In: *Reddit.com* [online]. reddit, 2021 [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: https://www.reddit.com/r/3Dprinting/comments/p6565k/the_smoothest_3d_printed_concrete_ive_seen_so_far/

SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

Obrázek 1 - Contour Crafting [38].....	19
Obrázek 2 - Technologie FDM [39].....	20
Obrázek 3 - Nanášení vrstvy	21
Obrázek 4 - Metoda Contour Crafting [40].....	22
Obrázek 5 - Tisková hlava s tryskami pro metodu CC [41].....	22
Obrázek 6 - Pracoviště pro 3D tisk betonu	23
Obrázek 7 - Výtisky	23
Obrázek 8 - Proces tisku na tiskárně typu Delta [42].....	24
Obrázek 9 - Detail plošiny s tiskovou hlavou [43].....	25
Obrázek 10 - Proces tisku u metody CONPrint [44].....	25
Obrázek 11 - Vytištěný podlažní bytový dům od společnosti WinSun [45].....	26
Obrázek 12 - Vytištěná kancelář od společnosti WinSun [46]	26
Obrázek 13 - Frank, modifikovaný průmyslový robot [13].....	27
Obrázek 14 - Horizontální zpevnění výtisků [47].....	27
Obrázek 15 - Detail materiálu Lavacrete společnosti ICON [14].....	28
Obrázek 16 - 3D tiskárna Vulcan II společnosti ICON [48].....	28
Obrázek 17 - Extruze betonu [15]	29
Obrázek 18 - Tištěný hrad před kompletací [15]	29
Obrázek 19 - Svislý řez vrstvami se stejnou tloušťkou vrstev běžnou metodou (vlevo) a metodou tangenciální kontinuity (vpravo) [49]	30
Obrázek 20 Topologicky optimalizovaný tištěný sloup [16].....	30
Obrázek 21 - Technologie tisku s výztuží společnosti HuaShang Tengda; upraveno dle [17] 31	
Obrázek 22 - Vila vytištěná společností HuaShang Tengda [50]	31
Obrázek 23 - Detail tištěné stěny z materiálu CyBe Mortar; upraveno dle [18].....	32
Obrázek 24 - Projekt 3D Housing 05 [18]	32
Obrázek 25 - Tiskárna CyBe RT (Robot Track) [18]	32
Obrázek 26 - Projekt Root Chair [19]	33
Obrázek 27 - Proces selektivního spojení pojiva [51].....	33
Obrázek 28 - Myšlenková mapa tiskového zařízení	34
Obrázek 29 - Vedení kabelů a hadic s materiálem.....	35
Obrázek 30 - Průmyslový robot Kuka.....	35
Obrázek 31 - Čerpadlo na beton se stojanem na míchací zařízení.....	36
Obrázek 32 - Ohříváč proudícího betonu.....	37
Obrázek 33 - Otočná tisková hlava s tryskou o obdélníkovém průřezu s hladítkem; upraveno dle [53]	38
Obrázek 34 - Stěna tištěná tryskou o kruhovém průřezu (vlevo) a tryskou o obdélníkovém průřezu s hladítkem (vpravo)	38
Obrázek 35 - Tisková hlava s nádobkou na směs [52].....	38
Obrázek 36 - Kalibrační puk	40

Obrázek 37 - Pravidla pro kruhovou trysku (vlevo a pro obdélníkovou trysku (vpravo); upraveno dle [27]	40
Obrázek 38 - Necelistvá vrstva	41
Obrázek 39 - Zborcení stěny	41
Obrázek 40 - Složení betonu	42
Obrázek 41 - Skladiště nedokonale zhomogenizované směsi	45
Obrázek 42 - Bedna na zaběhnutí materiálu	45
Obrázek 43 - Portálová 3D tiskárna	46
Obrázek 44 - Modifikované robotické rameno [51].....	46
Obrázek 45 - Postupový diagram práce	48
Obrázek 46 - Sestava tiskového zařízení Delta WASP 3MT CONCRETE [34]	51
Obrázek 47 - Rozvržení staveniště Crane WASP pro jednotné otočné rameno [34].....	52
Obrázek 48 - Rozvržení staveniště Crane WASP pro sadu otočných ramen na spojených stožárech [34]	52
Obrázek 49 - Tisková hlava modelu StroyBot 6.2 [15]	54
Obrázek 50 - Prášková směs CyBe Mortar [18]	56
Obrázek 51 - Model CyBe RC 3DP [18]	57
Obrázek 52 - Model CyBe G (Gantry) [18]	57
Obrázek 53 - Používané konstrukce 3D tiskáren společnosti ICE [36]	59
Obrázek 54 - Detail výšky vrstvy	59
Obrázek 55 - Výtisky obranných barikád	59
Obrázek 56 - Graf váhy hodnotících parametrů 3D tisku betonu	61

SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK

Tabulka 1 - Váhy jednotlivých parametrů 3D tisku z betonu	61
Tabulka 2 - Hodnocení Delta WASP - Crane WASP	62
Tabulka 3 - Hodnocení Total Kustom - StroyBot 6.2	63
Tabulka 4 - Hodnocení CyBe - CyBe RC 3DP (Mobile).....	64
Tabulka 5 - Hodnocení ICE - Modifikovaný robot Kuka	65
Tabulka 6 - Výsledky multikriteriální analýzy	66

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

ZKRATKA	VÝZNAM	JEDNOTKA
3D	Trojrozměrný	[-]
SLA	Stereolithography (z angličtiny: Stereolitografie)	[-]
FDM/FFF	Fused Deposition Modeling (z angličtiny: Nanášení materiálu v tenké vrstvě)	[-]
CNC	Computer Numerical Control (z angličtiny: Stroje řízené počítačem)	[-]
UV	Ultraviolet (z angličtiny: Ultrafialové)	[-]
CAD	Computer Aided Design (z angličtiny: Počítačem podporované navrhování)	[-]
STL	Formát souboru stereolitografického programu	[-]
G-Code	Formát souboru pro 3D tiskárnu	[-]
CC	Contour Crafting (společnost zabývající se tiskem cementové malty)	[-]
3DCP	Concrete Printing (z angličtiny: Tisk betonu)	[-]
V1	Váha parametru 1	[-]
V2	Váha parametru 2	[-]
V3	Váha parametru 3	[-]
V4	Váha parametru 4	[-]
V5	Váha parametru 5	[-]
V6	Váha parametru 6	[-]
V7	Váha parametru 7	[-]
DW1	Body parametru 1 tiskárny Delta WASP - Crane WASP	[-]
DW2	Body parametru 2 tiskárny Delta WASP - Crane WASP	[-]
DW3	Body parametru 3 tiskárny Delta WASP - Crane WASP	[-]
DW4	Body parametru 4 tiskárny Delta WASP - Crane WASP	[-]
DW5	Body parametru 5 tiskárny Delta WASP - Crane WASP	[-]
DW6	Body parametru 6 tiskárny Delta WASP - Crane WASP	[-]
DW7	Body parametru 7 tiskárny Delta WASP - Crane WASP	[-]
TK1	Body parametru 1 tiskárny Total Kustom - StroyBot 6.2	[-]
TK2	Body parametru 2 tiskárny Total Kustom - StroyBot 6.3	[-]
TK3	Body parametru 3 tiskárny Total Kustom - StroyBot 6.4	[-]
TK4	Body parametru 4 tiskárny Total Kustom - StroyBot 6.5	[-]
TK5	Body parametru 5 tiskárny Total Kustom - StroyBot 6.6	[-]
TK6	Body parametru 6 tiskárny Total Kustom - StroyBot 6.7	[-]
TK7	Body parametru 7 tiskárny Total Kustom - StroyBot 6.8	[-]
CB1	Body parametru 1 tiskárny CyBe - Cybe RC 3DP (Mobile)	[-]
CB2	Body parametru 2 tiskárny CyBe - Cybe RC 3DP (Mobile)	[-]
CB3	Body parametru 3 tiskárny CyBe - Cybe RC 3DP (Mobile)	[-]

CB4	Body parametru 4 tiskárny CyBe - Cybe RC 3DP (Mobile)	[-]
CB5	Body parametru 5 tiskárny CyBe - Cybe RC 3DP (Mobile)	[-]
CB6	Body parametru 6 tiskárny CyBe - Cybe RC 3DP (Mobile)	[-]
CB7	Body parametru 7 tiskárny CyBe - Cybe RC 3DP (Mobile)	[-]
IC1	Body parametru 1 tiskárny ICE - Modifikovaný robot Kuka	[-]
IC2	Body parametru 2 tiskárny ICE - Modifikovaný robot Kuka	[-]
IC3	Body parametru 3 tiskárny ICE - Modifikovaný robot Kuka	[-]
IC4	Body parametru 4 tiskárny ICE - Modifikovaný robot Kuka	[-]
IC5	Body parametru 5 tiskárny ICE - Modifikovaný robot Kuka	[-]
IC6	Body parametru 6 tiskárny ICE - Modifikovaný robot Kuka	[-]
IC7	Body parametru 7 tiskárny ICE - Modifikovaný robot Kuka	[-]
α_{DW}	Hodnocení tiskárny Delta WASP - Crane WASP	[-]
α_{TK}	Hodnocení tiskárny Total Kustom - StroyBot 6.2	[-]
α_{CB}	Hodnocení tiskárny CyBe - Cybe RC 3DP (Mobile)	[-]
α_{IC}	Hodnocení tiskárny ICE - Modifikovaný robot Kuka	[-]