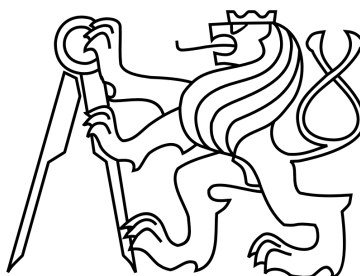


**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
FAKULTA STAVEBNÍ
Katedra technologie staveb**



BAKALÁRSKÁ PRÁCA

**Posúdenie efektívnosti 3D tlače
v stavebníctve**

Martin Bajus

2016

Vedúci bakalárskej práce: Ing. Michal Kovářik

Prehlásenie

Prehlasujem, že som predkladanú bakalársku prácu vypracoval samostatne s použitím odbornej literatury a zdrojov uvedených v zozname citovanej literatúry.

V Praze 6. 1. 2017

.....

Martin Bajus

Pod'akovanie

Rád by som poďakoval Ing. Michalovi Kovaříkovi za cenné rady, odborné pripomienky a podporu, mojim rodičom za skvelé podmienky a zázemie a pánovi Kudelovi za poskytnutie projektovej dokumentácie k spracovaniu v praktickej časti.

Rámcový obsah bakalárskej práce

- Historie tlače
- Budúcnosť printových médií a vývoj 3D tlače
- Metodika produkcie výrobku pomocou 3D tlače
- Technológia 3D tlače v stavebnom priemysle
- Vyvíjané technológie, koncepty
- Komerčne dostupné 3D tlačiarne
- Nedostatky tradičnej výroby nosných konštrukcií
- Projekt rodinného domu Poprad – Stráže

Anotácia

Predkladaná bakalárska práca je zameraná na problematiku 3D tlače v stavebníctve. Práca obsahuje teoretickú časť, kde sa autor venuje histórii tlače, metodike produkcie výrobku a vyvíjaným technológiám 3D tlače v stavebníctve. Praktická časť sa venuje úprave projektu malého jednopodlažného domu pre použitie 3D tlače a časovému a ekonomickému porovnaniu oproti tradičnému murovanému systému konštrukcie. V závere sú zhodnotenú a interpretované výsledky praktickej časti.

Kľúčové slová

3D tlač, aditívna výroba, aditívne technológie v stavebníctve, contour crafting, automatizácia v stavebníctve, apis cor

Annotation

The presented thesis is focusing on the issue of 3D printing in the construction industry. The work includes a theoretical part where the author deals with the history of printing, production methodology and the development of technology of 3D printing in the construction industry. The practical part is devoted to the project of small house for the use of 3D printing and time and cost comparison over traditional masonry construction. The results of practical part are evaluated in conclusion.

Keywords

3D printing, Additive manufacturing, Additive technologies in construction, Contour crafting, Automation in construction, Apis Cor

Obsah

Úvod	11
1 Historie tlače	12
2 3D tlač a aditívna výroba	13
3 Budúcnosť 2D a 3D tlače	15
4 Metodika produkcie výrobku prostredníctvom 3D tlače	17
4.1 Návrh Modelu	17
4.2 Prevedenie dát.....	18
4.3 Revízia dát a predvýrobná príprava	18
4.4 Výroba	18
4.5 Postprodukcia.....	19
5 Technológie 3D tlače v stavebnom priemysle	19
5.1 Delenie technológií aditívnej výroby v stavebníctve.....	19
5.1.1 Rozdelenie podľa spôsobu ukladania materiálu.....	20
5.1.2 Rozdelenie podľa druhu konštrukcie 3D tlačiarne.....	22
5.2 Výskum, vývoj a koncepty	25
5.2.1 Behrokh Khoshnevis, University of Southern California, USA .	25
5.2.2 Loughborough University, UK	28
5.2.3 Winsun Co., Čína	30
5.2.4 Eindhoven University of Technology, Holandsko.....	32
5.2.5 Berry Hendricks – CyBe, Holandsko.....	32
5.3 Komerčne dostupné 3D tlačiarne.....	34
5.3.1 BetAbram, Slovinsko	34
5.3.2 Andrey Rudenko – TotalKustom, USA	34
5.3.3 Apis Cor, Rusko	35

5.3.4 Massimo Moretti – WASP, Taliansko	37
6 Nedostatky tradičnej výroby nosných konštrukcií	38
7 Projekt rodinného domu Poprad – Stráže.....	40
7.1 Úprava projektu pre aplikáciu 3D tlače	40
7.2 Technológia Apis Cor	42
7.3 Technologický postup realizácie zvislých konštrukcií	42
7.3.1 Základné identifikačné údaje	42
7.3.2 Pracovné podmienky	45
7.3.3 Akosť prevedenia	50
7.3.4 BOZ a PO	50
7.3.5 Vplyv na životné prostredie	51
7.3.6 Hlučnosť	52
7.4 Porovnanie jednotlivých projektov	52
7.4.1 Ekonomické porovnanie.....	53
7.4.2 Časové porovnanie	54
7.5 Záver	56
Zoznam použitej literatúry	57
Zoznam obrázkov	61
Zoznam tabuliek	62
Zoznam príloh	62

Úvod

Stavebný priemysel čelí narozdiel od priemyselnej výroby mnohým premenným faktorom. Miesto výstavby, výrobný proces, poveternostné podmienky a jedinečnosť každej stavby komplikuje postupy a predražuje cenu diela. Produktivita, bezpečnosť pri práci, vysoké náklady a nedostatok kvalifikovanej pracovnej sily sú vážnym problémom. Implementácia stavebných strojov a automatizácie v rôznych podobách za posledných tridsať rokov tieto problémy čiastočne eliminovala.

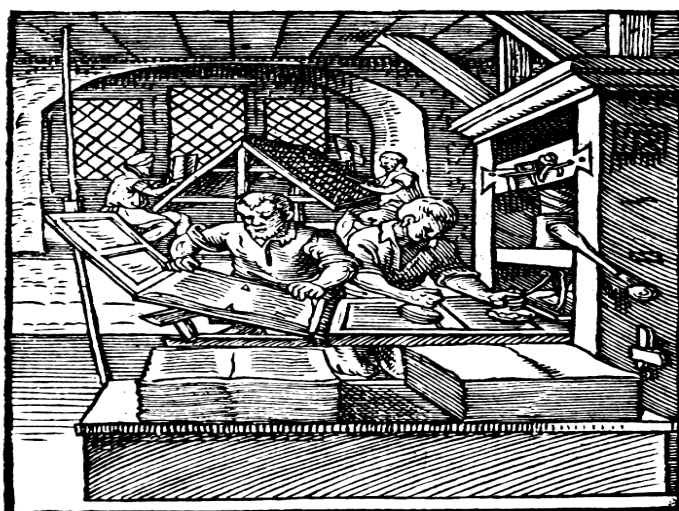
Metóda 3D tlače stavebných konštrukcií za pomoci strojov je založená na plnej automatizácii stavebného procesu nosných konštrukcií. Táto bakalárska práca sa zaoberá možnosťami aplikácie systému 3D tlače v budovaní malých rodinných domov s ohľadom na miesto výstavby, potrebný čas a náklady v porovnaní s tradičným murovaným systémom. Cieľom je zistiť či je táto vyvíjaná technológia výhodná a perspektívna pre výstavbu rodinných domov budúcnosti.

1 Historie tlače

Tlač je definovaná ako nástroj pre reprodukovanie a duplikovanie textu na základe formy, alebo šablóny a v ľudskej histórii zohráva dôležitú úlohu. Prvá zmienka tlače sa datuje približne 200 rokov po narodení krísta do starovekej Číny.

Technika spočívala vo vyrezávaní ornamentou, písmen a znakov do dreveného podkladu a následného pretláčania pomocou farieb na textilie alebo papier. Spomínaná technológia bola v krajinách východnej Ázie využívaná až do 19. storočia. V arabskom svete sa tlač až do časov hodvábnnej cesty vyvíjala nezávisle na podobnom princípe, podklad bol ale pálený z hlíny alebo vytesávaný do kamenných dosiek. [2]

Rozvoj moreplavby a vznik hodvábnnej cesty umožnil okrem obchodu a výmeny rôznych druhov tovaru aj výmenu informácií, znalostí a technológií čo viedlo k zdokonaleniu tlače. Ďalším významným milníkom v histórii bol objav kníhtlače Johanom Gutenbergom v roku 1443 hoci Kórejčania obdobnou technológiou disponovali už v rokoch 1403 - 1405. **Kníhtlač** je technika tlače z výšky, ktorá používa tlačové formy s vystupujúcim tlačovým reliéfom s tlačovými plôškami, na ktoré sa sústavou valcov nanáša farby a tlakom sa na materiál prenáša text, jedná sa o mechanické zariadenie ktoré sa nazýva aj tlačiarenský vlis.



Obr. 1: Kresba dreveného tlačiarenského vlisu z roku 1568 [2].

Najväčším prínosom kníhtlače bola možnosť jednoduchého a lacného kopírovania a vyrábania kníh ako aj tlače celej strany textu naraz. V praxi to znamenalo rýchlejšie a plynulejšie šírenie vedomostí a poznatkov naprieč kultúrami čo v Európe vyústilo vo vznik renesancie. Gutenbergov vynález bol magazínom Time & Life označený za najdôležitejší objav druhého milénia.

Od prvej priemyselnej revolúcie sa rozvoj tlače výrazne zrýchlil, vynálezy nových techník viedli k uspokojeniu stále rastúceho dopytu nižšími nákladmi. Manuálny tlačiarenský vlis bol na začiatku 19. storočia nahradený rotačným parným vlysom. Po zdokonalení vynálezu o papierové rolky, ktoré kontinuálne zásobovali tlačiareň materiálom bola cesta tlače k mäsovej industrializácii a automatizácii vydláždená. Vznikli prvé noviny, gramotnosť naprieč celou demografickou krivkou narastala. Nástupom masovej elektrifikácie v 19. storočí sa vývoj exponenciálne zrýchlil a v 20. storočí sa vystriedalo hneď niekoľko technológií. Od Sieťotlače ktorá je dnes typická hlavne pre odevný priemysel cez xenografiu až po prvé laserové tlačiarne koncom šesťdesiatych rokov. Vynález osobného počítača spôsobil rozmach tlačiarň. Dnes vo vyspelých krajinách disponuje digitálnou tlačiarňou vo svojej domácnosti takmer každý. Zaujímavosťou je, že vyvinutie 3D tlače v roku 1984 predchádzalo skonštruovaniu prvej digitálnej tlačiarne (1993). [2]

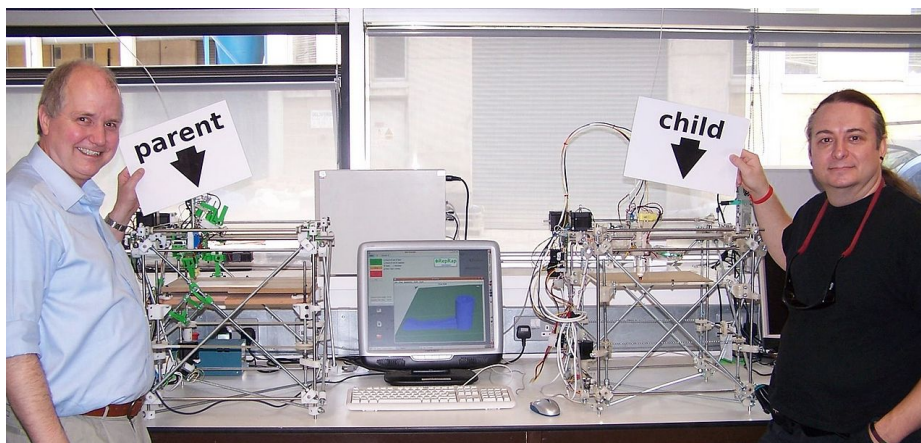
2 3D tlač a aditívna výroba

Termín 3D tlač bol pôvodne určený pre špecifický proces patentovaný ako "3DP" vedcami Massachusettského inštitútu technológií (MIT) v roku 1993. Dnes je termín používaný pre rad súvisiacich procesov. [4] Počiatok 3D tlače siaha do roku 1976 kedy bola vynájdená atramentová tlačiareň. V roku 1984 bola táto technológia adaptovaná a pretavená na tlač s materiálmi namiesto atramentu Charlesom Hullom, zakladateľom firmy "3D systems" [5,6]. Za počiatok aditívnej výroby sa ale považuje prvá komerčná 3D tlačiareň SLA - 1, ktorá bola vyvinutá spomínanou firmou v roku 1987. Technológia bola založená na princípe Stereolitografie - tlačiarenskeho

procesu, ktorý umožňuje vytvorenie hmatateľného 3D objektu pomocou postupného tvrdnutia fotopolymérov. Rýchlosť tvrdnutia závisí na intenzite UV žiarenia. Objekt je vytvorený postupným ukladaním vrstvy na vrstvý predošlú. V závislosti na materále, veľkosti produktu a rýchlosti tvrdnutia môže byť výsledný 3D produkt poskladaný zo stoviek až tisíc vrstiev. Nie je veľkým prekvapením, že táto technológia bola predražená a preto bol jej výskum podporovaný hlavne veľkými výskumnými strediskami univerzít.

Napriek tomu, že technológia mala ďaleko k dokonalosti, dokázala, že v budúcnosti bude možné tvoriť komplexné diely za pár hodín. Po ďalších 10 rokov sa 3D technológie potichu vyvíjali, zdokonolovali a upravovali hlavne vďaka dizajnérom a inžinierom vo verejnom sektore. [6]

V roku 1999 sa 3D tlač znova dostala na popredné stránky viacerých vedeckých časopisov. Vedci z "Wake Forrest Institute of Regenerative Medicine" úspešne implantovali 3D syntetický močový mechúr potiahnutý bunkami pacienta. Vzhľadom nato, že bol močový mechúr potiahnutý týmito bunkami, riziko odmietnutia orgánu kleslo takmer k nule. Tento objav otvoril dvere k vyvíjaniu ďalších stratégií v orgánovom inžinierstve. [4,5]



Obr. 2: RepRap, Materská a dcérska 3D tlačiareň, všetky plastové prvky dcérskej tlačiarne boli vyprodukované materskou tlačiarňou. [2].

Doktor Adrian Bowyer, profesor mechaniky na Univerzite Bath v Anglicku inicioval v roku 2005 projekt jednoduchej nízkonkladovej 3D tlačiarne. Celý výskum bol od počiatkov dostupný verejnosti a zúčastnovalo

sa ho množstvo nadšencov, po roku vývoja bola tlačiareň schopná čiastočnej samoreprodukcie. Traja z účastníkov projektu sa v roku 2009 rozhodli technológiu pretaviť do produktu s názvom RepRap a uviesť na trh prvú spotrebiteľskú 3D tlačiareň (viď obr. 2). Tento ťah spustil živú diskusiu medzi odborníkmi, analytikmi priemyslu ako aj širokou verejnosťou a prvýkrát sa do verejného povedomia dostala 3D tlač [6].

V tom istom roku firma Organovo z oblasti bioprintingu vyvinula 3D tlačiareň využívajúcu ako základný materiál bunky krvných ciev. Vedci veria v budúcnosť tlačenia celých orgánov na základe malej vzorky krvi pacienta [10]. Veľkým technologickým prienikom vo svete protéz bolo vytlačenie zložitej štruktúry protetickej nohy 3D tlačiarkou v roku 2008 na takzvanej ready-made báze bez nutnosti montáže. vývoj bol vedený tímom Bespoke Innovations [9, 5].

Tieto prelomové objavy a zariadenia zapríčinili "boom" na rozhraní dekád v odvetví aditívnej výroby. Stále viac akademických tímov, laikov ale aj nezávislých tímov sponzorovaných firmami z korporátnej sféry vyvíjalo svoje nezávislé tlačiarnie. Rok 2011 priniesol prvé vytlačené lietadlo, auto či možnosť tlačiť objekty zo striebra, alebo zlata. Vedci z University of Southshampton vytlačili prvé bezpilotné lietadlo za sedem dní s eliptickými krídlami, ktoré zlepšujú aerodynamiku a znižujú indukovaný odpor s rozpočtom pod 5 000 \$ [10].

3 Budúcnosť 2D a 3D tlače

Konvenčná tlač ako ju poznáme zohráva vo svete obrovskú úlohu. V najbližších dekádach by mal jej význam pre spoločnosť výrazne klesať. V posledných 10 rokoch zaznamenal európsky printový trh pokles 9,5% [3]. Dôvodov je hneď niekoľko.

Tlač je neekologická, jej produkt je ľahko zničiteľný v porovnaní s digitalizovanou verziou a niektoré informácie bojujú s neaktuálnosťou kvôli času potrebnému na tlač, distribúciu a predaj. Navyše vytlačenie hmotného vytlačku je nákladnejšie či už na výrobu, prepravu, alebo skladovanie. S

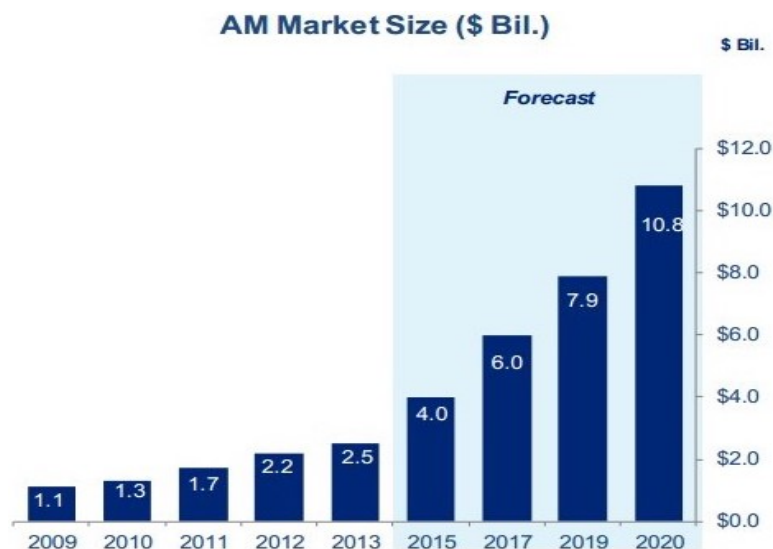
podobným problémom bojujú kedysi výhradne tlačené médiá ako rôzne druhy časopisov, magazínou a novín. Sú stále viac a viac nútené zamerať sa na digitálny obsah pre rôzne čítačky, tablety alebo na internetový obsah ktorý je zadarmo. Vďaka internetu a širokej dostupnosti informácií už ich hlavný príjem nezpočívá z predaja výtlačkov ale z reklamy na týchto digitálnych médiách.

Podobný princíp sa dá aplikovať aj na verejnú správu kde v budúcnosti ubudne vysoká miera byrokracie a veľký počet úradníkov bude nahradený sofistikovanými a rýchlymi systémami na digitálnej báze a umelou inteligenciou. Odpadne nutnosť navštevovať úradi a tým sa šetria náklady a čas oboch zúčastnených strán. Tento trend je pozorovateľný v politike európskej únie a čoraz viac úsilia a prostriedkov smeruje k digitalizácii dát a celých systémov.

Všetky indície vedeckého a technologického pokroku smerujú k neodvratiteľnému faktu - 3D tlač je ďalším vývojovým štádiom tohto segmentu. Futurologisti na čele s Jeremym Rifkinom veria, že 3D tlač signalizuje začiatok tretej priemyselnej revolúcie [8] Vzhľadom k faktu, že 3D tlač umožňuje užívateľom vytvárať a prerábať produkty rýchlo pred začatím nákladných procesov spojených s tradičnou výrobou, možností technológií sú obrovské.

V roku 2015 dosiahla 3D tlač podľa D'Aveni-ho (2015) bodu keď je použitie technológie takmer bežnou metódou produkcie výrobkov. Štúdie v odvetví 3D tlače naznačujú, že takmer 11% veľkých výrobných spoločností implementovali 3D tlač pre mäsovú výrobu produktov alebo ich častí. D'Aveni tvrdí, že vďaka implementovaniu prelomových pokrokov budú manažéri nútení zaoberať sa 3D tlačov na strategickej úrovni pre využitie potenciálu v ich firemných organizáciách.

Popredná medzinárodná auditorská a konzultantská firma Deloitte pôsobiaca v 150 krajinách sveta odhaduje, že priemysel s 3D tlačiarňami by mal od roku 2012 do roku 2020 narásť o 300% (Obr.3). 3D tlač bude mať potenciálne väčší dopad na svet v priebehu nasledujúcich 20 rokov, než všetky inovácie z čias priemyselnej revolúcie v kombinácii. [10]



Obr. 3: Graf, zobrazujúci rast trhu s 3D tlačiarňami. Vodorovná osa - čas v rokoch, zvislá osa – hodnota trhu v miliardách dolárov [10].

4 Metodika produkcie výrobku prostredníctvom 3D tlače

S technológiou 3D tlače a procesom produkcie výrobku sa priamo viaže technológia CAD / CAM (z angl. Computer-Aided Design / Manufacturing). V preklade počítačom riadený návrh, resp. výroba. Z tohto faktu vyplýva, že celý proces od návrhu, optimalizáciu, konvertovanie dát až po samotnú výrobu je riadený počítačom. Všetky technológie 3D tlače vo svojom princípe používajú rovnaký systém nezávisle od veľkosti, tvaru, materiálu alebo cieľového trhu výrobku. Celý unifikovaný proces výroby jednotkového produktu 3D tlače, alebo aditívnej výroby sa môžeme zhrnúť do týchto základných krokov. [11]

4.1 Návrh Modelu

Model sa navrhuje za použitia CAD technológie v užívateľskom rozhraní jednej z množstva podporovaných voľne šíriteľných alebo platených aplikácií. Digitálny model reprezentuje tvar budúceho výrobku a musí spĺňať základné predpoklady pre transformáciu modelu do fyzickej podoby. Model musí mať jednoznačne stanovené svoje hranice je nutné ho navrhnuť tak,

aby sa dal rozdeliť na jednotlivé horizontálne súvrstvia a taktiež musí byť jasne oddelená vnútorná a vonkajšia časť modelu. Dokonalý a presný návrh je najzložitejšou a časovo najnáročnejšou časťou celého výrobného reťazca. Charakteristiky, detailnosť a rozmery produktu sú podmienené výkonnosťou a možnosťami 3D tlačiarne použitej v ďalších krokoch realizácie [11].

4.2 Prevedenie dát

3D tlačiarne nepodporujú výstupný formát CAD programov, preto je 3D model nutné previesť do .STL formátu vytvoreného ešte v počiatočných priekopníkmi z 3D Systems. Program pri prevádzaní dát spracováva model do polygónov a matematicky popisuje tvar daného objektu. Potom tento objekt reže (angl. Slicing) na homogénne 2D vrstvy podobne ako pri konvenčnej tlači. Vrstvy budú neskôr pri samotnej výrobe na seba ukladané jedna po druhej. Celý proces konvertovania dát prebieha automaticky na pozadí programu, preto sa okrem základných atribútov a nastavení nedá ovplyvniť [11].

4.3 Revízia dát a predvýrobná príprava

Neoddeliteľnou súčasťou návrhu je kontrola dát .STL súboru s použitím špecializovaného softvéru. Je nutné overiť, či súbor odpovedá požadovanému tvaru a vlastnostiam modelu. Softvér zároveň ponúka možnosť jednoduchej úpravy dát a odchýliek od pôvodného modelu [11].

Technologicky najnáročnejšou časťou je predvýrobná príprava. V tejto fáze už disponujeme funkčným modelom rozdeleným na vrstvy a nutnosťou je určenie postupu výroby a špecifikácia technologických parametrov súvisiacich s použitou tlačiarnou, materiálom alebo aj detailnosťou celého modelu.

4.4 Výroba

Výroba je plne automatizovaná a riadená softvérom. Ľudská sila je potrebná len pre importovanie finálnej verzie .STL súboru do tlačiarne. Proces výroby môže trvať rádovo od minút až po dni v závislosti na viacerých

premenných ako druh technológie tlače, použitý materiál, veľkosť, detailnosť a tvar výrobku. Výsledkom výroby je 3D produkt.

4.5 Postprodukcia

V rade prípadov je po výrobe nutná postprodukcia resp. úprava a modifikácia výrobku. Jedná sa hlavne o čistenie a odstránenie nedokonalostí na povrchu po tlači, dodatočné farbenie povrchu alebo iné ošetrovanie výrobku. Práca je väčšinou vykonávaná manuálne a hrozí znehodnotenie, alebo zničenie výrobku hlavne pri menších rozmeroch. V budúcnosti pri veľkom množstve vyrobených štandardizovaných kusov bude celý process roboticky riadený [11].

5 Technológie 3D tlače v stavebnom priemysle

V roku 1998 Behrokh Khoshnevis z University of South California predstavil novú technológiu zvanú Contour Crafting (CC) ktorú opísal ako "metóda vrstvenej výroby za použitia polymérov, keramickej kaše, cementu a celej rady ďalších materiálov a zmesí pre stavbu veľkorozmerných objektov s hladkou povrchovou úpravou" [17]. Pomocou počítačom riadenej trysky a výrobnéj technológie vrstvenia disponuje Contour Crafting schopnosťou vytvoriť celý rad tvarov s hladkým povrchom ako je znázornené **na obrázku**. Khoshnevis sa stal priekopníkom aditívnej výroby v stavebníctve v časech keď bola 3D tlač všeobecne v plienkach. Cieľom tejto kapitoly je bližšie zoznámenie s momentálne vyvíjanými technológiami 3D tlače pre nosné konštrukcie, ich rozdelenie a potenciálne využitie pri budovaní pozemných stavieb v budúcnosti.

5.1 Delenie technológií aditívnej výroby v stavebníctve

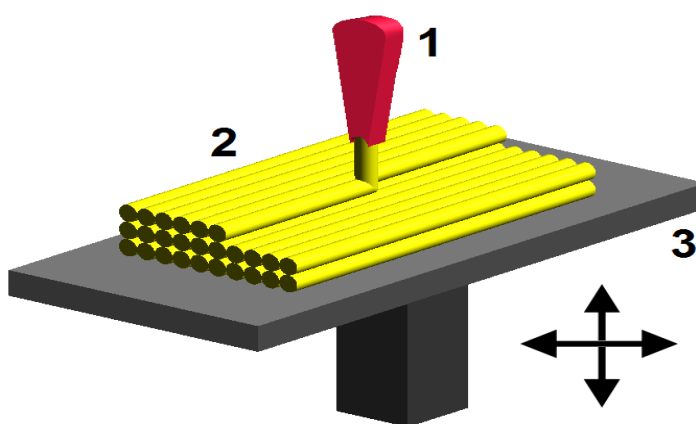
Hlavným a základným delením 3D tlače všeobecne, ako aj v stavebníctve je delenie podľa spôsobu ukladania materiálu. V spôsobe ukladania materiálu sa aplikujú fundamentálne rozdielne prístupy k

dosiahnutiu výsledného produktu. V princípe sa dajú rozdeliť na tri základné spôsoby - lineárne, plošné a kontinuálne [14].

5.1.1 Rozdelenie podľa spôsobu ukladania materiálu

5.1.1.2 Lineárna 3D tlač

Funguje analogicky k technológii FDM štandardne používanej naprieč inými odvetvami. Rozdielom je rozlíšenie resp. jednotková veľkosť vytlačeného pásu. Lineárna 3D tlač v stavebníctve sa rádovo pohybuje v centimetroch, kdežto FDM v desatinách, dokonca stotínach milimetrov.



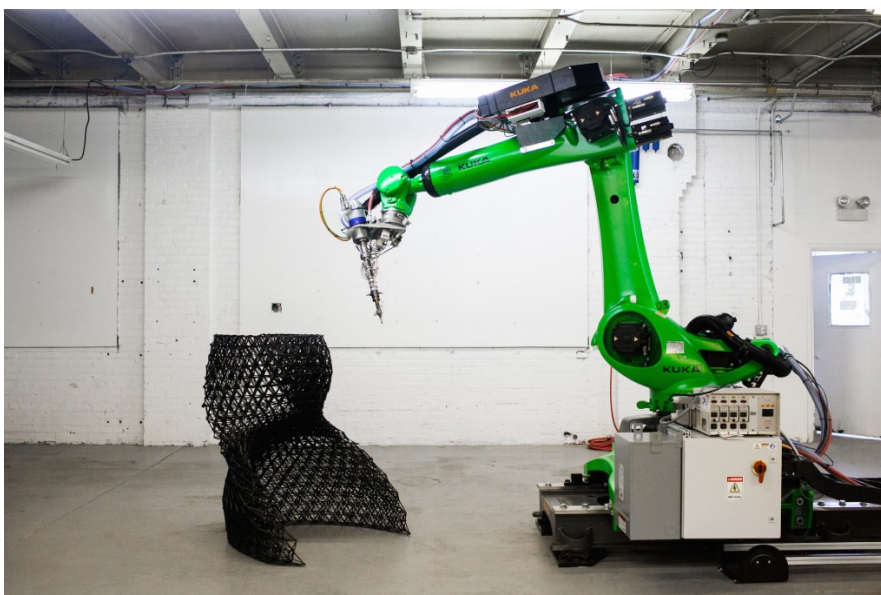
Obr. 4.: Proces lineárnej tlače [17]

Rozdielný je aj použitý materiál a spôsob spracovania -polyméry a termoplasty ktoré sú roztavované pri vysokých teplotách do tekutého stavu sa v stavebníctve nahrádzajú zmesami na betónovej alebo keramickej báze s rýchlotvrdnúcov schopnosťou. Triska (Obr.4–1), operujúca v troch dimenziách pomocou tlaku za pohybu kontinuálne ukladá a vrství materiál (Obr.4–2), do požadovaného tvaru. Celý proces má vertikálny charakter v závislosti od materiálu a rýchlosti tvrdnutia je možné dosiahnuť tvary s rôznou odchylkou od zvislice. Položenie prvej líniovej vrstvy vytlačeného pásu prebieha na pevnú, z pravidla rovinnú plochu (Obr.4–3), ďalšie línie sú kladené na už zhotovené línie pod nimi. 3D tlačiareň pracuje kontinuálne a ukladá materiál až do nadobudnutia požadovaného tvaru kompletnej

konštrukcie. Lineárna 3D tlač neprodukuje žiaden odpadný materiál - 100% materiálu je priamo uschovaného v konštrukcii.

5.1.1.3 Kontinuálna priestorová 3D tlač

Je podmnožinou lineárnej tlače, aplikuje rovnaký princíp k tvorbe konštrukcie ako technológia FDM. Na tlač sa používajú robotické ruky so špeciálnou hlavicou ktorá pri vysokých teplotách taví ocel, zliatiny a rôzne kompozitné materiály. Pomalými ťahavými pohybmi a pri rýchlom tuhnutí týchto materiálov dochádza k vytváraniu prutov ktoré sú spojované do sietovín, analogicky k tvoreniu priestorových priehradových konštrukcií.



Obr. 5.: Robotická ruka s triskou na polyméry (vpravo) a hotová nosná konštrukcia steny (vľavo) [17]

Kontinuálna 3D tlač nevyužíva klasického softwaru pre 3D tlač ktorý delí konštrukciu na jednoduché vrstvy, pracuje s programami podobnými CNC frézovaniu.

5.1.1.4 Plošná 3D tlač

Využíva na vrsvenie konštrukcie diametrálne odlišný prístup. Na rozdiel od lineárnej tlače, kde sa z hlavice trisky vstrekuje už aktivovaný materiál pripravený na tvrdnutie pri kontakte so vzduchom, pri plošnej tlači sa plnivo

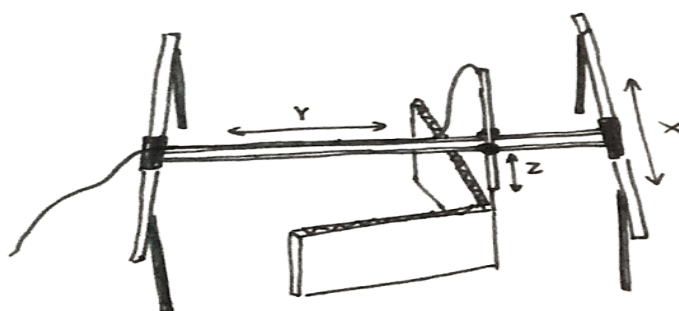
nanáša vo vrstvách definovanej hrúbky a následna aktivácia prebieha pomocou vstrekovania pojiva, alebo zahriatím pomocou laseru.

V prvom kroku sa pojivo rovnomerne nanese v pôdorysných rozmeroch budúcej konštrukcie. Triska vstrekuje pojivo do miest kde bude v tejto výškovej rovine budúca konštrukcia. Každá ďalšia vrstva sa aplikuje rovnako, nanese sa vrstva plniva a pojivo je vstrekované do miest budúcej konštrukcie v danej výške. Vrstva pojiva nesie váhu vrstvy nad ňou a preto je možné dosiahnuť priestorovú flexibilitu tvarov konštrukcií. Po dokončení celého procesu vrsvenia sa zvyšné pojivo mechanicky odstráni, alebo vymyje. Výslednú konštrukciu tvorí len aktivovaný a ztvrdnutý materiál. Zvyšné pojivo sa môže použiť pri tlači ďalšej konštrukcie. Veľkým a zatiaľ nevyriešeným problémom ostáva zhutnenie resp. prepojenie jednotlivých vrstiev a tým aj statika výslednej konštrukcie. Nespornou výhodou je tvarová voľnosť.

5.1.2 Rozdelenie podľa druhu konštrukcie 3D tlačiarne

5.1.2.1 Rámová konštrukcia (obr. 7)

Konštrukcia s dvoma ramenami v smere x (obr.7) umiestnenými vo výške nad pracovnou plochou na ktorých sú kolaje, horizontálne je umiestnené ďalšie tretie rameno s kolesami (smer y) zabezpečujúcimi pohyb v smere osy x. Na tomto ramene je umiestnený profil s hlavicou s triskou a čerpadlom umožňujúci pohyb v horizontále. Pohyb v smere y dodáva ramenu ďalšia sada kolajníc.

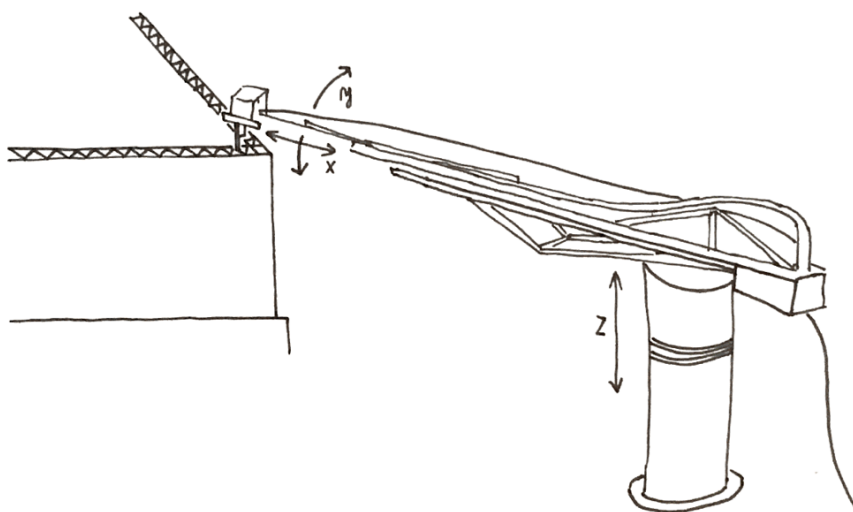


Obr. 6. : Nákres rámovej 3D tlačiarne

Rámová konštrukcia je aplikovateľná hlavne v laboratórnych podmienkach, v dielňach a skladoch, kde by mohla slúžiť na výrobu prefabrikátov. Preprava na miesto výstavby a inštalácia 3D tlačiarne s charakterom rámovej konštrukcie je zdĺhavá a nákladná a navyše by pri inštalácii bola potrebná aj ďalšia mechanizácia.

5.1.2.2 Žeriavová konštrukcia (obr. 8)

Ako už z názvu vyplýva, nesie znaky typického stavebného žeriavu. Skladá sa z teleskopickej veže dodávajúcej zvislý pohyb a vysuvného výložníka s triskou schopného operovať v horizontálnej rovine. Tento systém stavby tlačiarne si zatiaľ veľké uplatnenie nenašiel, jedinou firmou ktorá vyvíja a predáva žeriavové tlačiarne je Moskovská spoločnosť Apis Cor (**viď kapitola X.X.X.X**)

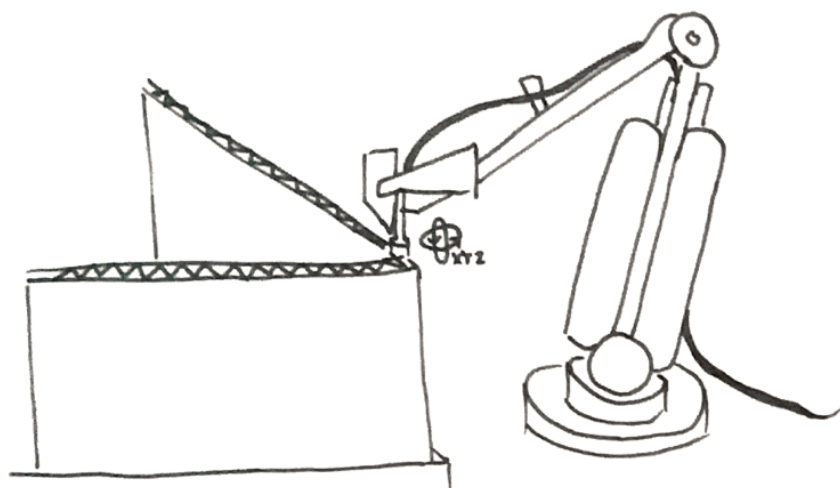


Obr. 7. : Žeriavová konštrukcia 3D tlačiarne.

5.1.2.3 Konštrukcia robotického ruky (obr.9)

Robotická ruka imituje prácu ľudskej paže. Dva ramená spojené kĺbmi umožňujú rotačný pohyb vo všetkých smeroch. Zariadenia tohto typu sa za posledných 30 rokov udomácnili v mnohých priemyselných odvetviach kde sa starajú o montáž, lakovanie, zvarovanie, podávanie, alebo balenie s rýchlosťou a precíznosťou. Typickou a v dnešnej dobe najbežnejšou aplikáciou industriálnej robotického ruky je nájdeme v automobilovom

priemysle. Robotická ruka sa väčšinou využíva na rovnaké a repetitívne činnosti s veľkou presnosťou.



Obr. 8. : Robotická ruka s triskou

podľa [14] je možné aditívnu výrobu v stavebníctve ďalej deliť podľa miesta realizácie na :

"In situ" - automatizovaná produkcia stieň a iných prvkov konštrukcie v reálnom čase priamo v mieste aplikácie hotovej steny resp. prvku.

prefabrikácia - automatizovaná produkcia stieň a iných nosných prvkov v špecializovaných dielňach a ich následný transport na miesto aplikácie.

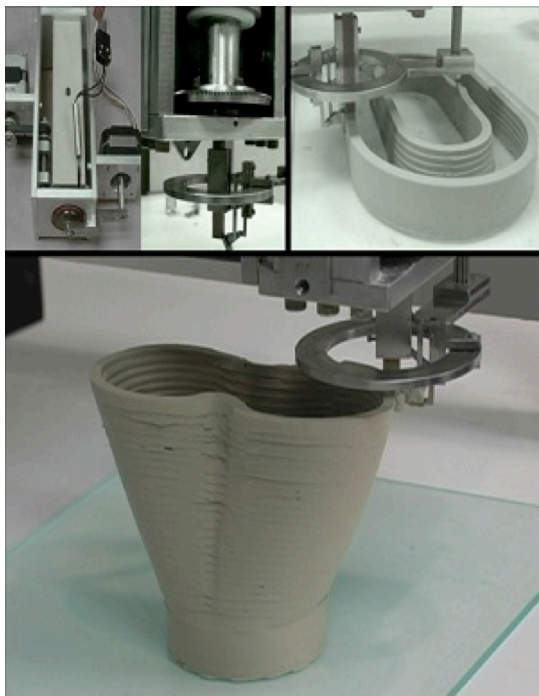
5.2 Výskum, vývoj a koncepty

5.2.1 Behrokh Khoshnevis, University of Southern California, USA

Od roku 1997 skupina akademikov na Americkej univerzite vedení profesorom Khoshnevisom vyvíjajú novátorskú technológiu automatizovanej výroby menom Contour Crafting (CC). Principiálne sa jedná o rámovú konštrukciu 3D tlačiarne. Na vrstvenie respektíve tlač materiálu je využitá špeciálna hlavica s tromi triskami. Krajnú triskú sú zaopatrené prvkami na chladenie vrstvy tak, aby bol povrch stien dokonale rovinný. Chladením sa zároveň aj zabezpečí dokonalé prepojenie jednotlivých vrstiev. Centrálna triska kontinuálne osciluje medzi krajnými vrstvami. Vrstvením, pohybom a vytlačovaním materiálu celej hlavice a oscilačným pohybom centrálnej trisky vzniká konštrukcia steny s prierezom podobným priehradovine (obr.11) so schopnosťou lepšie roznášať momenty a ťahové napätia. Zásluhou dôvtipnej mechaniky hlavice je v jednom okamihu možné klásť celú šírku prierezu s dokonalým povrchom stien. Contour crafting by sa teda dal charakterizovať ako hybridný proces vytlačovania a zároveň chladenia povrchu v jednom, odbúda nutnosť úprav povrchu brúsením, alebo nanášaním vrstiev omietky čím sa šetrí čas, náklady na materiál a pracovné sily.

Ďalším technologickým spôsobom ako dosiahnuť nosnosť steny spočíva v hlavici s jednou, resp. dvoma triskami (obr. 10). V tomto prípade hlavica vykonáva lineárny pohyb v pozdĺžnom smere konštrukcie a pracovná sila vkladá armovacie prvky do prierezu plniace funkciu prepojenia stienok v bližšie nešpecifikovaných vzdialenostiach. Po vytuhnutí je konštrukcia vyplnená napríklad pórobetónom, alebo iným ľahčeným betónom s tepelneizolačnými vlastnosťami. Za posledných dvadsať rokov bolo na University of South California postavených viac druhov tlačiarní. Prvou bola klasická rámová konštrukcia s dvoma nosníkmi (smer x), ramenom s pohybom po kolajniciach (smer Y) a s jednoduchou triskou upevnenou na ramene (smer Z) ešte v roku 2000. Technológia bola opisovaná skôr ako 2.5D. Ďalším vývojovým štádiom bola otáčavá hlavica s tromi triskami a

sklápatelnými hladítkami a najnovšie patentny naznačujú odklon ku konštrukcii robotickej ruky s priestorovým pohybom.



Obr. 9: detail trisky s hladítkom (vľavo hore), Proces výroby zložitých tvarov (vpravo hore, dole) [16]



Obr. 10: Prototyp hlavice s tromi triskami [16]

5.2.1.1 Materiál

Problematickým aspektom technológie je tlačený materiál. Materiál by mal byť viskóznym aby dokázal prúdiť potrubím zároveň však musí rýchlo tvrdnúť aby niesol ďalšiu vrstvu. Pri aplikovaní technológie na nosné steny sa tlačený materiál podobá konzistenciou kaši - či už keramickej, hlinenej alebo cementovej a skladá sa z plniva - piesku, jemnozrnného štrk s drobnou frakciou a pod. ,pojiva - na bázi cementu, rýchlotuhnúcich zmesí, plastifikátorov a vody.

Veľkosť trisky a tlačeného vzorku je oveľa väčšia ako pri iných industriálnych 3D tlačiarňach čo umožňuje aplikáciu rôznych typov aditív pre zvýšenie únosnosti konštrukcie ako sklenené, karbonové alebo drôtové vlákna. Rýchlosť produkcie vrstvy je všeobecne daná otvorom trisky a rýchlosťou tuhnutia materiálu a teda jeho charakteristikami. Pre všetky materiály platia požiadavky na zpracovateľnosť a počiatočnú únosnosť.

Jedným z testovaných materiálov v roku 2002 bola hustá maltová kaša z Portlandského cementu typu II, piesku, plastifikátoru a vody v pomere 37:41:3:19 [18]. Táto kaša je schopná dosiahnuť úplnej pevnosti v priebehu pár hodín. Vodný súčiniteľ zmesi je 0,5 litra, čo by mohlo pri tvrdnutí zapríčiniť vnik kapilárnych pórov. Pomer pojiva k plnivu je výrazne odlišný ako v bežnom betóne kde sa nachádza oveľa viac cementu a menej kameniva resp. piesku, preto sa dá predpokladať zmršťovanie vplyvom hydratácie.

5.2.1.2 *Spolupráca s NASA*

V roku 2014 vyhral tím vedený profesorom Khoshnevisom hlavnú cenu v technologickej súťaži NASA a s tým spojené dotácie na výzkum použiteľnosti technológie CC pri realizácii stavieb na extraterestriálnych telesách. Podľa Khoshnevisa je možné využiť skál a prachu dostupného na Marse ako plniva a síry v pevnom skupenstve ako pojiva. Hornina regolit pokrývajúca povrch mesiaca vo svojich póroch uchováva síru a pri jej drtení by bolo možné dostať zároveň pojivo aj plnivo [20]. Na mesiaci je nedostatok vody takže zmes by bola suchá a zahrievaním vytlačovaná triskou pri bode tavenia síry. Alternatívnym procesom by bolo zahriatie samotných vzorkov na vyše 1100°C a dosiahnutie takmer tekutého skupenstva s vysokou viskozitou. Takýto materiál by bol oveľa pevnejší než sírny betón [19].

5.2.1.3 *Vízia*

Ultimátnym cieľom profesora Khoshnevisa je zautomatizovať väčšinu stavebných procesov. Od vytlačenia základovej dosky cez konštrukciu stien, osadenie prefa prekladov, stropov až po montáž obkladov, inštaláciu elektrických rozvodov a potrubí pre vodovod resp. kanalizáciu. Konštrukcia takejto 3D tlačiarne by sa skôr podobala na jednoramennú rámovú konštrukciu s dvoma podporami, ktorá by sa pohybovala po kolajniciach a okrem hlavice s triskou by disponovala aj robotickou rukou umiestnenou na ramene ktorá by osadzovala výztuž, preklady, elektro inštaláciu a pod. (obr. 12).

V naplnení tejto vízie by mohol pomôcť partner s dlhoročnými skúsenosťami s mechanizáciou [17]. Od roku 2008 podporuje výskum CC najväčší výrobca stavebnej techniky na svete firma Caterpillar. Spoluprácu podnietila realizácia betónovej steny technológiou CC. Pomocou hlavice s jednoduchou triskou a hladítkom bola vytlačená dutá konštrukcia s funkciou podobnou stratenému bedneniu do ktorej bol následne vliaty betón [15]. Prvotná fáza kooperácie bola zameraná na vylepšenie receptu maltovej kaše a vzťahovala sa na materiálové charakteristiky a parametre procesu tuhnutia pomocou analytických metód [16]. Ďalšie fázy majú byť potom zamerané na výskum robotiky, metódu dodávky materiálu, automatizované inštalácie elektrických sietí a kontroly kvality. V tom istom roku vedenie univerzity povolilo komercializáciu patentu pre tvorbu stieň.



Obr. 11. : Vizualizácia rámovej konštrukcie tlačiarne firmy Caterpillar.

5.2.2 Loughborough University, UK

Na univerzite v Anglickom meste Loughborough sa zaoberajú aditívnou výrobou už od roku 2007. V roku 2014 sa o ich výskum začala zaujímať Britská divízia nadnárodnej stavebnej spoločnosti Skanska v kooperácii s uznávanou architektonickou kanceláriou Foster & Partners. Spolupráca naväzuje na výskum veľkorozmernej 3D tlačiarne ktorú na univerzite testujú od roku 2012 [22].

V princípe ide o 3D tlačiareň rámovej konštrukcie (obr. 13) s pracovným priestorom pre tlač o maximálnych rozmeroch 5,4 x 4,4 x 5,4 m. Hlavica s triskou analogicky k CC, povrch ale nieje nijak hladný ani zarovnávaný a priemer trisky resp. vytlačovaného pásu je výrazne menší - 9 mm [21]. Účelom celého projektu je vytvoriť 3D tlačiareň na betón so schopnosťou vytvárať komplexné a tvarovo zložité konštrukcie rýchlo a bez potreby zložitých procesov a ľudskej sily. Tákéto prvky by sa mohli uplatniť hlavne v architektúre.



Obr. 12. : Dielňa na Loughborough University s 3D tlačiarňou.

Koncom roku 2012 tím vedení profesorom Simonom Austinom demonštroval schopnosti ich 3D tlačiarne na príklade "divnej lavice" (z angl. wonder bench) o približných pôdorysných rozmeroch 2 m x 0,9 m a výške 0,8 m (obr.13) zloženej z 128 vrstiev. Divná lavica je celá vyplnená materiálom a obsahuje predpätú výztuž s trojuholníkovým prierezom a dvanásť otvorov ktoré znižujú váhu, spotrebu materiálu a slúžia na vedenie inštalácie a pod. Cementová kaša ktorá bola navrhnutá pre 3D tlač nesie po stuhnutí charakteristiky vysokopevnostného betónu a spĺňa nutné požiadavky na čerpatelnosť, spracovateľnosť a hlavne rýchlu počiatočnú pevnosť nutnú pre prenesenie zaťaženia vyšších vrstiev. Objemová hmotnosť už uloženého materiálu je 2300 kg/m³.

Skladá sa z piesku (53%), Portlandského cementu (24%), vody(10%), popolčeka(6%), kremičitého úletu(4%), superplastifikátoru , zpomaľovača tuhnutia a polypropylenových vlákien.

Vodní súčiniteľ zmesi je 0,4, pomer pojiva a plniva 60:40. Pevnosť skúšobného vzorku po vytuhnutí bola obdobná betónom používaným pri betonáži stien. [22]



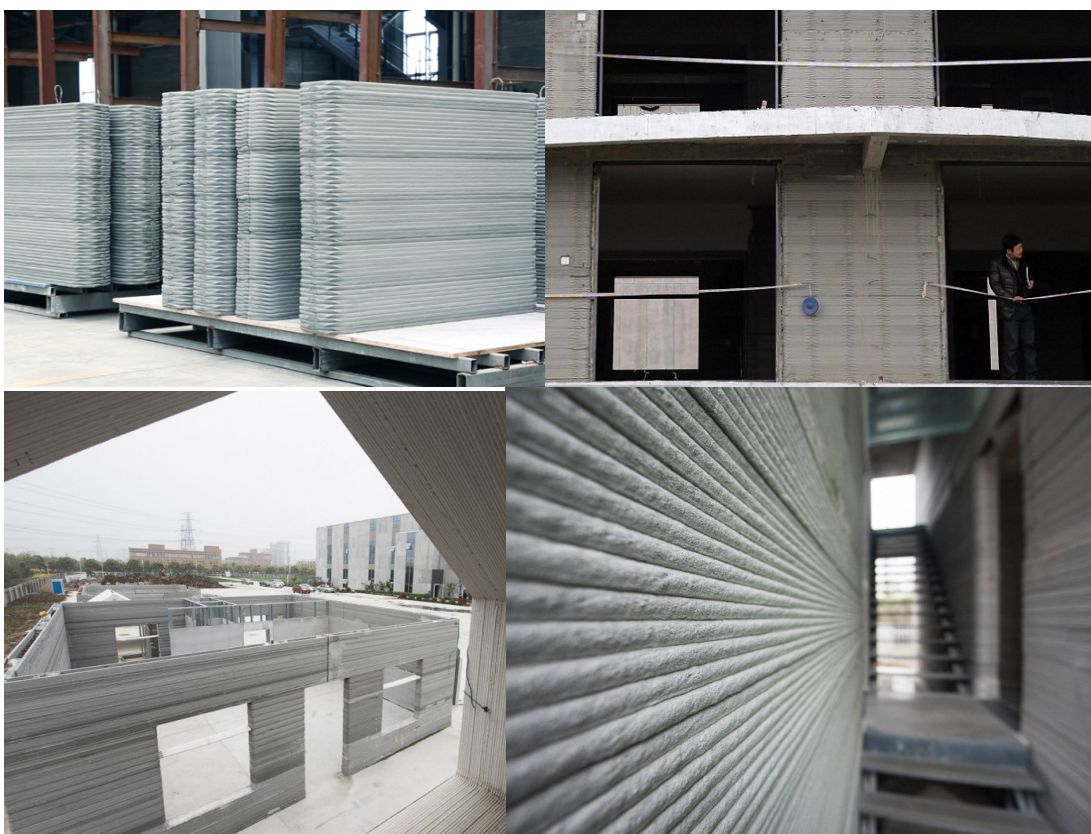
Obr. 13.: fotka "divnej lavice", spolupráca Loughborough Un. a Skanska UK [22].

5.2.3 Winsun Co., Čína

Spoločnosť Winsun vytvorila rámovú 3D tlačiareň o gigantických rozmeroch (dĺžka: 150 m, šírka: 10 m a výška: 6,6 m) priamo v továrni. Stroj je používaný na prefabrikáciu stropov, stieň, striech a plotov pomocou aditívnej technológie podobnej Contour Craftingu. Materiál na tlač pozostáva z cementu, podrtenej stavebnej suti, vody, minerálnych vlákien a urychlovačov tuhnutia. Majiteľ spoločnosti bol dokonca obvinený Khoshnevisom z plagiátorstva. Viaceré charakteristiky trisky a hlavice napodobňujú patenty zaregistrované na Americkom patentovom úrade, ktoré v Číne neuznávajú [24].

Tlačenie jednotlivých prvkov budovy prebieha v oddieloch, potom sú prvky transportované na stavenisko, kde sú zostavené na mieste so žeriavom. Kusy sú obvykle vytlačené tak, že strecha je jeden pevný diel so

stenami a je potrebné ju nakloniť o 90 stupňov v priebehu zostavenia. Winsun sa vo svete stavebných 3D tlačiarň môže písať niekoľkými prvenstvami. Postavili prvý dom s nosnými konštrukciami realizovanými výhradne 3D tlačov. V roku 2014 prefabrikáciou postavili najvyšší objekt a to 5 podlažnú budovu. Majiteľ spoločnosti tvrdí, že 10 domov bolo postavených za 24 hodín čo by z ich tlačiarne urobilo najvýkonnejšou na poli aditívnej technológie. Firma sa vybrala pre stavebný priemysel tradičnejšou cestou prefabrikácie. Manufaktúrny priestor továrne kde je konštantná teplota, žiadne zrážky a je jedno či je deň, alebo noc má svoje nesporné výhody. Veľkou nevýhodou stále ostáva nutnosť zdĺhavej manipulácie s prvkami, riziko ich znehodnotenia pri preprave a prekladaní a montáž na stavenisku [25].

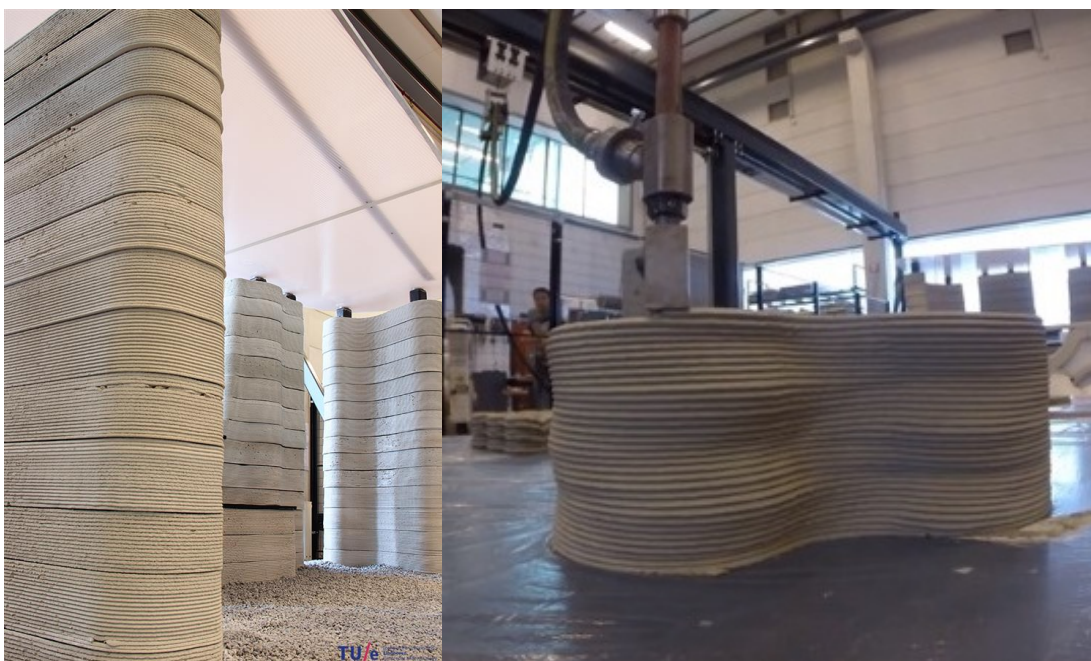


Obr. 14. : Vľavo hore: prefabrikáty pripravené na prevoz na stavenisko. Vpravo hore: fotka realizácie viacpodlažnej budovy. Vľavo dole: obvodová konštrukcia z prefabrikátov Vpravo dole: detail osadeného prefabrikátu [25].

5.2.4 Eindhoven University of Technology, Holandsko

Technická univerzita v meste Eindhoven vykonáva výskum v tlači betónových konštrukcií od roku 2013. Výskumný program sa nazýva 3D Concrete Printing (3DCP) a podieľajú sa na ňom katedry betónových konštrukcií, inovačných technológií a architektonického dizajnu. Výskumná skupina prevádzkuje a vyvíja svoj vlastný model Rámovej 3D tlačiarne fungujúcej na podobnom princípe ako stroj z Loughborough university. Pracovná plocha tlačiarne bola najprv 9 m x 4,5 m a maximálna výška 3 m.

Koncom roka 2015 sa celá technológia preniesla na väčšiu rámovú konštrukciu dodanú strojárskou spoločnosťou ROHACO o rozmeroch 11 m x 5 m x 4 m. Cieľom v najbližších rokoch je vyvinúť ľahko recyklovateľné materiály podobné betónu pre realizáciu stieň s rôznymi vylepšenými stavebno-fyzikálnymi vlastnosťami [26].



Obr. 15.: Ukážky realizácie betónových prvkov [26].

5.2.5 Berry Hendricks – CyBe, Holandsko

Myšlienka konštrukcie robotického ramena so vstavanou hlaviceou s triskou pre tlač betónových konštrukcií sa v hlave Berryho Hendriksa zrodila

v roku 2012 po zhlíadnutí prednášky o Countour Craftingu na konferencii TED v Spojených Štátoch. Od myšlienky k funkčnému prototypu to firme Cybe trvalo iba dva roky. Pracovný rozsah tejto robotickej "tlačiarne" je niečo viac ako 3 metre vo všetkých smeroch a v závislosti na vytlačovanom materiáli a veľkosti trisky dokáže tlačiť rôznymi rýchlosťami.

Práve receptúre materiálu venoval vývojový tím celý rok 2013. Prvým komerčne dostupným produktom je sada troch maltových zmesí Cybe Mortar, Mortar Light a Fibre Mortar. Cybe Mortar je štandardnou zmesou pre tlač menších konštrukcií, Mortar Light je odľahčenou verziou s menšou pevnosťou po finálnej hydratácii a podľa výrobcu by mal slúžiť hlavne na produkciu menších prvkov ako napríklad lavičiek, odpadkových košov alebo umeleckých inštalácií. Fibre mortar je cementová kaša vystužená vláknami s plastifikátormi s dobou tuhnutia 24 hodín. Použitie tohto produktu je určené práve pre stavbu nosných prvkov stien, stĺpov, trámov či prievlakov. Presné zloženie zmesí je firmovým tajomstvom. [28]



Obr. 16. Vľavo mobilný robot CyBe RC 3Dp. Vpravo lavička predávaná firmou Cybe [34]

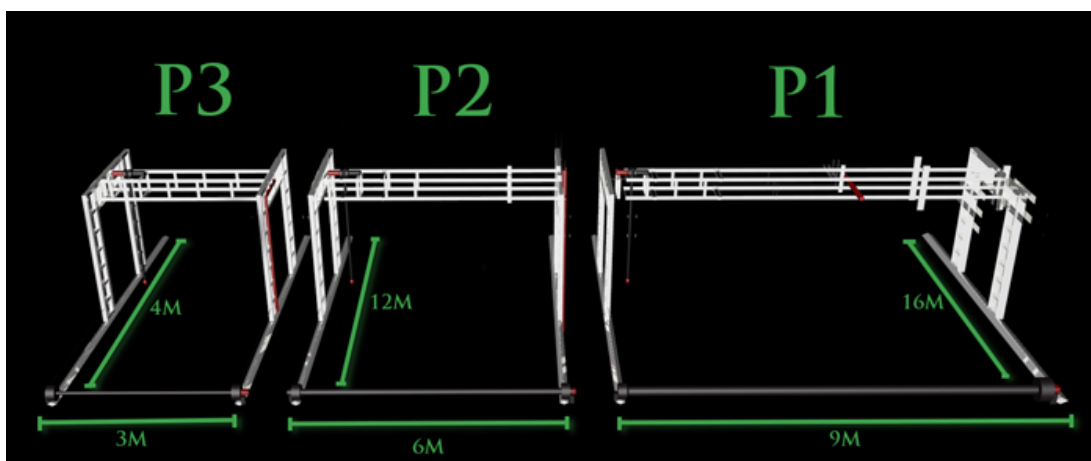
Dieľna nedávno osadila svoj prototyp robotickej ruky na podvozok a tým vytvorila prvú mobilnú 3D tlačiarňu na svete (obr. 18). Robotická ruka dokáže tlačiť pri maximálnej rýchlosti 600 mm/s s použitím novovyvinutej

rýchloschnúcej zmesi schopnej prenášať zaťaženie ďalších vrstiev rádo vo v sekundách. Výškový rozsah trisky sa zväčšil na 4,5 metra pomocou 4 stabilizačných nôh ktoré vysúvajú podvozok do výšky 1,5 metra. [27]

5.3 Komerčne dostupné 3D tlačiarne

5.3.1 BetAbram, Slovinsko

Firma BetAbram vyvíja 3D tlačiarne na betón od roku 2012. Ako material využívajú kašu na bázi cementu s pridanými aditívami pre rýchlejšie tvrdnutie. Približná cena materialu za kubický meter je 130 €. Firma pracuje na kvalitnejších materiáloch bez nutnosti aplikovania výztuže, preto sa zatiaľ táto technológia uplatní pri produkcii menších výrobkov. Od roku 2015 BetAbram predáva rámové tlačiarne v troch veľkostiach (obr. 20). Cena najväčšej tlačiarne s pôdorysnými rozmermi 9 x 16 m je 30 000 € [29].



Obr. 17. Nákres tlačiarní ponúkaných Slovinskou firmou BetAbram [29]

5.3.2 Andrey Rudenko – TotalKustom, USA

Zatiaľ čo väčšina pokroku na poli aplikácie aditívnych technológií v stavebníctve prebieha na akademickej pôde za pomoci rôznych spoločností, stavebník Andrey Rudenko vytvoril funkčný prototyp vo svojej vlastnej garáži. Rudenko vytvoril hlavicu s triskou podobnú Contour Craftingu a po testovaní cementovej zmesi na svojej zkonštruoval rámovú tlačiareň a vytlačil rozprávkový hrad čo mu prinieslo nemalú mediálnu pozornosť a ponuky na prácu od Disneylandu. Reportáž hradu na celeštátnej televíznej sieti mu

neprinieslo len jeho 15 minút slávy ale aj sponzorov a založenie firmy TotalKustom s ktorou o necelé dva roky vytlačil hotelový apartmán na Filipínach

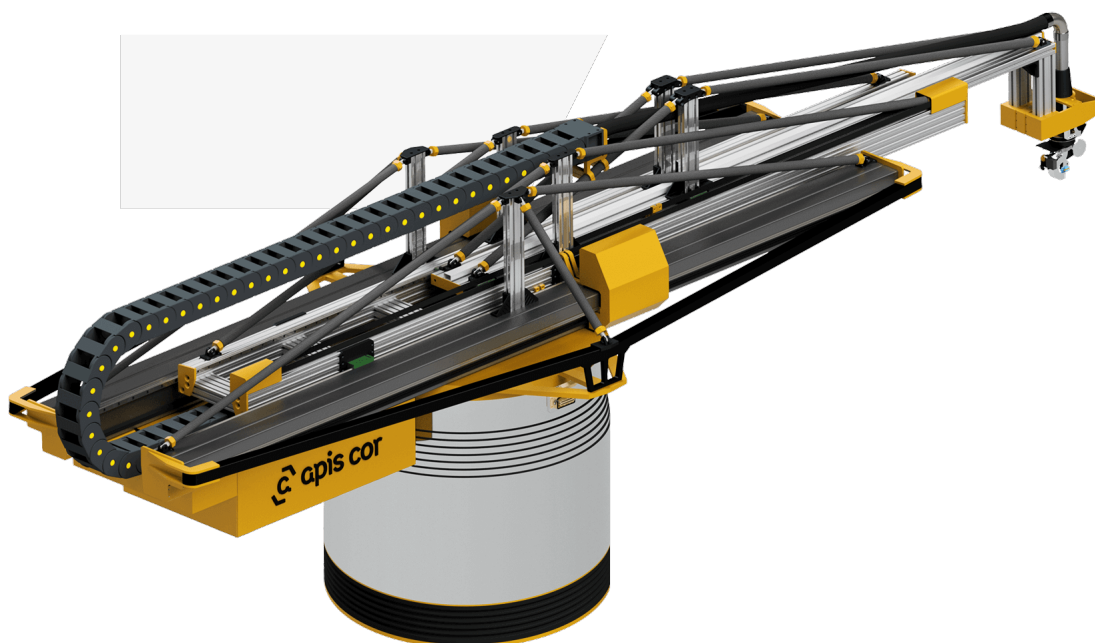


Obr. 18.: Fotka z realizácie apartmánu technológiou TotalKustom. [30]

Pán Rudenko mi ochotne odpisoval na e-maily. Pri otázke na cenu za kubický meter cementovej zmesy a jej zloženia mi napísal, že používa klasický portlandský cement, piesok a aditíva vo forme plastifikátorov. Ceny cementu sú podmienené lokalitou a miestnou ekonomikou, na Filipínach to bolo 15 dolárov na meter kubický. Na konštrukciu hotelového apartmánu o pôdorysných rozmeroch 120 m² to teda bolo približne 2000 dolárov a celý proces tlače trval 48 hodín. 3D tlačiareň od TotalKustom je prvá 3D tlačiareň, ktorá sa dá predobjednať. Cena základneho modelu s rámovou konštrukciou je 300 000 \$. Firma momentálne vyvíja tlačiareň obdobnú k šplhavému žeriavu pre stavbu výškových [30].

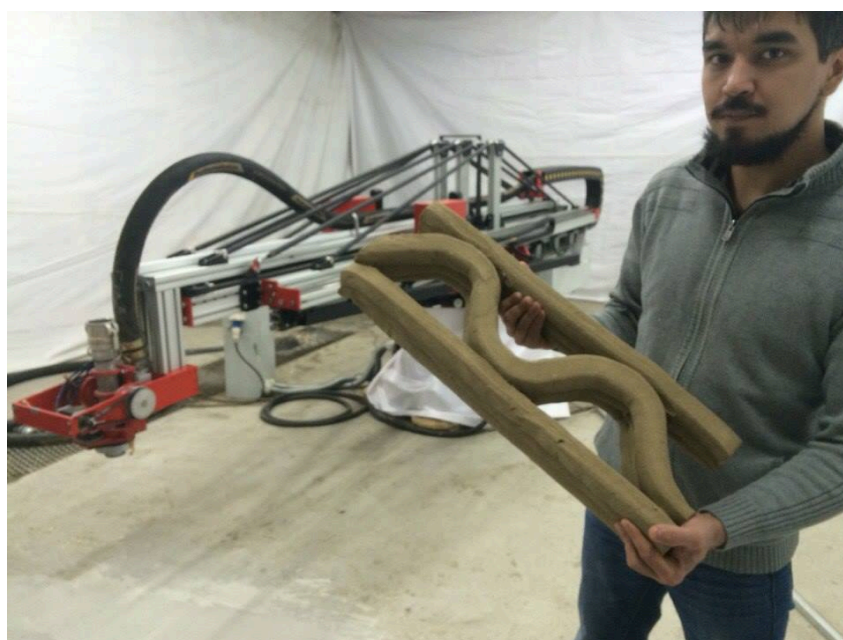
5.3.3 Apis Cor, Rusko

Ruský start-up vyvinul prvú mobilnú 3D tlačiareň na svete (obr. 20) s hmotnosťou 2 tony. Žeriavová konštrukcia dokáže tlačiť v rádiuse 12,8 metra a na jej prepravu stačí Nakladač s hydraulickou rukou. Cena tlačiarne s autodomiešavačkou, softwarom a zaškolením je približne 100 000 €.



Obr. 19.: Žeriavová konštrukcia tlačiarne apis cor 7R [31]

Tlačiareň používa špeciálne vyvinutý maltový mix na bázy cementu s prísadami vrátane výztužných vlákien a predáva sa po vreciach. Pevnostné charakteristiky vytvrdnutého krychlového vzorku boli skúšané nezávislým laboratóriom a odpovedajú betónu C25/30 [31].



Obr. 20.: Majiteľ firmy - Nikita Chen-yun-tai pózuje so skúšobným vzorkom [31]

5.3.4 Massimo Moretti – WASP, Taliansko

Za projectom WASP talianskeho vynálezca Massima Morettiho sú dlhoročné skúsenosti s 3D tlačov rôznych rozmerov. Firma ponúka na predaj celú radu tlačiarní s aplikáciou rôznych materiálov. Tlačiarnie ponúkané firmou WASP sú z konštrukčného hľadiska podľa rozdelenia z kapitoly 5.1.1 najbližšie k rámovým konštrukciám. Nejedná sa o kartézku ale o takzvanú delta konštrukciu.

Tlačiareň WASP BigDelta je momentálne najväčšia delta tlačiareň na svete o výške 12 metrov. Podorys tlačiarnie má šesťuholníkový tvar a hlavica s triskou a zásobníkom na materiál je uchytená troma ramenami ktoré sa po dokončení každej vrstvy posunú po rámovej konštrukcie vyššie. Pohyb v smere X a Y zabezpečujú spomínané 3 ramená. Spotreba energie stanovená výrobcom je do dvoch kilowattov a na jej pohon by mal stačiť jeden solárny panel [32].

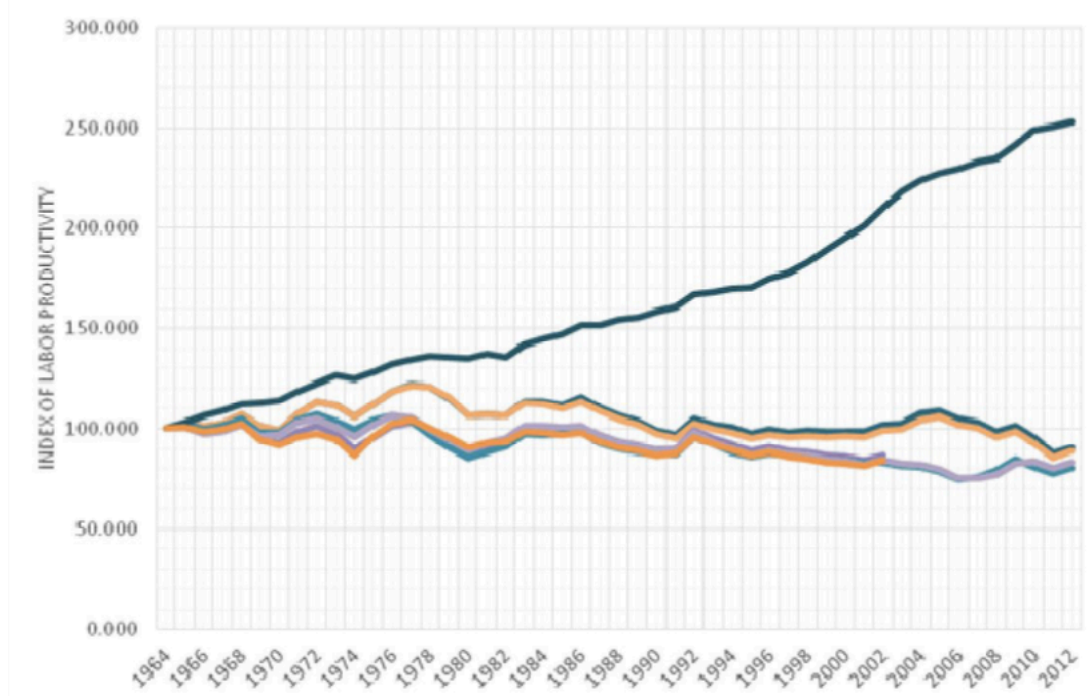
Projekt si dáva za cieľ vyvinúť technológiu k výstavbe klembových konštrukcií domčekov v najchudobnejších častiach sveta a na výstavbu postačí materiál dostupný každému - zem, alebo presnejšie íl v spojení s vodou a rastlinnými zložkami. Firma ukázala svoj koncept v roku 2015 keď na lúke neďaleko mesta Bologna vytlačila malý domček s takmer nulovými nákladmi. Tohto roku začali s výstavbou dedinky s názvom Shaballa podľa mytologického mesta symbolizujúceho mier, rovnosť a šťastie [33].



Obr. 21. : Vľavo vývojársky tím a tlačiareň Delta WASP, Vpravo triska v procese tlače. [32]

6 Nedostatky tradičnej výroby nosných konštrukcií

Z hľadiska technického rozvoja a naplnenia očakávaní zákazníka možno tvrdiť, že stavebníctvo za inými odvetviami, ako je letecký, automobilový alebo lodný priemysel zaostáva. Základné princípy konštrukcie sa nezmenili už stovky rokov; Rimania vynašli betón 100 rokov pred naším letopočtom a o 2200 rokov neskôr ho stále používame ako primárny stavebný materiál a (viac či menej) ho kontrolovane ukladáme ľudskou rukou. Analýza údajov vypočítaných podľa Amerického štatistického úradu za posledných 48 rokov naznačuje pozitívny 2% medziročný nárast ceny a negatívny 0,32% pokles produktivity, tieto čísla možno pôsobia zanedbateľne ale z dlhodobého hľadiska spôsobujú významnú stagnáciu celého odvetvia [13]. Hlavne ak si predstavíme, že u niektorých iných priemyselných odvetví stúpla produktivita za rovnaké obdobie aj o viac ako 200 %. Dnešné stavebné procesy a postupy obmedzujú predstavivosť a tým aj potláčajú inovácie. Nové metódy výroby a montáže majú často za následok odvrátenie "neviditeľnej ruky trhu" od stavebníctva skôr než rozvíjanie nových radikálnych procesov. [11]



Obr 22.: Produktivita práce v stavebnom priemysle (modrá) verzus ostatné odvetvia, okrem poľnohospodárstva za posledných 50 rokov. [13]

Proces vytvárania betónových konštrukcií ako ho poznáme sa obvykle skladá z montáže bednenia, umiestnenia výstuže, betonáže a odstránenia bednenia. Proces je stále zdokonalovaný za cieľom šetrenia financií a urýchlenia celkovej realizácie. Logickým vyústením je unifikácia a vytváranie modulových systémov bednenia ktoré potláčajú optimalizáciu pre danú konštrukciu a nahrádzajú ju modularitou za cenu úspor. Tento trend v stavebnom priemysle má negatívny účinok na tvarovú voľnosť nosných konštrukcií ktorá klesá.

Pri realizácii betónových, ale aj pri použití iných konvenčných postupov zohráva úlohu odpadný materiál ktorý zvyšuje náklady na výstavbu a má neblahý vplyv na životné prostredie. Úroveň odpadu pozorovateľná v stavebníctve je bezprecedentná. SMART alliance™ odhaduje, že viac ako 50% materiálu na výstavbu nakoniec skončí na skládke. The Engineering News Report odhadujú, že z celkového objemu výstavby 1,288 bilióna \$ v Spojených štátoch - 50% týchto nákladov je pripisovaná plytvaniu. Inými slovami a zjednodušene, majitelia platia dvakrát za tú istú budovu. [13] Taktiež je nutné disponovať veľkým počtom pracovníkov čo priamo súvisí s bezpečnosťou práce a rizikom úrazu a znova predražuje výstavbu. Stavebné prvky s vysokými požiadavkami na presnosť a kvalitu sú prefabrikované mimo staveniska a následne prepravované na stavenisko. Geometrické parametre týchto konštrukcií sú ale značne obmedzené možnosťami dopravy a zdvíhacími prostriedkami na stavenisku, tieto faktory priamo ovplyvňujú cenu jednotlivých prefabrikátov a aj celého diela. Ďalší problém zužujúci stavebný priemysel vo vyspelých krajinách je nedostatok kvalifikovanej pracovnej sily. Hodinová mzda zručného murára v Amerike je porovnateľná s kuchárom. Niet divu, že si v západnej civilizácii málokto vyberie toto remeslo [13].

Väčšina investícií na zhotovenie celkového produktu v dnešnom stavebníctve smerujú do výrobnjej fázy ktorá je najnákladnejšia, tu sa otvárajú dvere pre BIM technológie a aditívnu výrobu ktorá by v budúcnosti mohla dokázať celé konštrukcie alebo ich časti produkovať s použitím minimálnej ľudskej sily a bez strát na materiále.

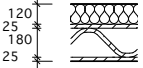

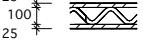

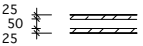
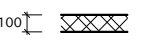
7 Projekt rodinného domu Poprad – Stráže

Pre posúdenie efektívnosti 3D tlače som použil projekt rodinného jednopodlažného domu o celkovej zastavanej ploche 129 m². Holodom bol realizovaný stavebnou firmou BBG stav s.r.o. v druhej polovici roku 2015, dokončovacie práce prebiehali v prvej polovici roku 2016. Objekt rodinného domu je z hľadiska využitia funkčne i stavebne riešený ako jeden celok s priestormi určenými výhradne pre bytovú jednotku. Na prízemí stavby sa nachádza hlavný vstup so zádverím, samostatným WC pri hlavnom vstupe, chodbovým priestorom, ktorý komunikačne spája všetky priestory podlažia – 2 samostatné izby, kúpeľňu, technickú miestnosť, kuchyňu s komorou a hlavnú obývaciu miestnosť. S obývacej haly je riešený výstup na vonkajšiu terasu naväzujúcu na južnú fasádu domu. Na juhozápadnej strane pozemku a miesto pre riešenie odpadov. Svetlá výška vnútorných priestorov je 2,80 m od podlahy po podhľad.

Stavba je založená na jednoduchých základových pásoch do nezamrzlej hĺbky, stužená základovou doskou. Zvislú konštrukciu tvorí tehlový systém od firmy Porotherm. Valbová strecha objektu je pevne ukotvená na stužujúci veniec obvodových konštrukcií. Ako plošná tepelná izolácia obvodových stien bola použitá minerálna vlna hrúbky 120 mm. Tepelná izolácia strechy a podlahy je z minerálnej vlny hr. 260, resp. 100 mm. Stropnú konštrukciu v každej miestnosti tvorí sadrokartónový podhľad. V objekte je nainštalované podlahové vykurovanie pomocou elektrických odporových káblov. Ohrev vody je zabezpečený elektrickým boilerom.

7.1 Úprava projektu pre aplikáciu 3D tlače

V pôvodnom projekte (PP) sú umiestnené rohové okná, funkciu prekladu prenáša obvodový veniec. V projekte pre 3D tlač (3DP) som použil 2 klasické okná medzi ktorými je stĺp prenášajúci zaťaženie od strechy. Pri stavbe holodomu bola realizovaná terasa, tú som v PP a 3DP zanedbal a v technologických normáloch ako aj rozpočtoch sa nevyskytuje.

 <p>120 25 180 25</p>	<p>Obvodová nosná stena z cementovej kaše APIS COR C25/30 hr 230 mm, Zatepovací systém BAUMIT STAR hr. 120 mm</p>	 <p>120 380</p>	<p>Obvodové murivo z tehál POROTHERM PROFI 38 hr. 380 mm na maltu POROTHERM PROFI, P10 + Zatepovací systém BAUMIT STAR hr. 120 mm</p>
 <p>25 100 25</p>	<p>Priečka z cementovej kaše APIS COR C25/30 hr. 150 mm</p>	 <p>250</p>	<p>Vnútoromé murivo z tehál POROTHERM 25 P+D, hr. 250 mm na maltu POROTHERM PROFI na maltu VC, P8</p>
 <p>25 50 25</p>	<p>Priečka z cementovej kaše APIS COR C25/30 hr. 100 mm</p>	 <p>100</p>	<p>Priečkové murivo z tehál POROTHERM 8 P+D, hr. 100 mm na maltu POROTHERM PROFI na maltu VC, P8</p>

Obr. 24.: Skladba zvislých konštrukcií 3DP (vľavo) a PP (vpravo).

Hlavnou materiálou zmenou prešli zvislé konštrukcie stien a priečok (obr. 24). Nosné obvodové steny majú so zateplením v 3DP hrúbku 350 mm oproti pôvodným 500 mm v PP. Vďaka menšej hrúbke obvodových konštrukcií sa úžitná plocha zväčšila o 2 m², zmena konštrukcie negatívne ovplyvnila tepelne-technické vlastnosti budovy.



Obr. 23.: Vizualizácia 3DP (hore) a fotka PP (dole).

V PP bol súčiniteľ prestupu tepla $U = 0,15 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ a spĺňal doporučenú hodnotu pre pasívne domy stanovenú podľa ČSN 73 0540-2:2011. V 3DP bol súčiniteľ prestupu tepla stanovený v rozmedzí $0,17\text{--}0,21 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, (nieje známe presné zloženie zmesy a jej tepelná vodivosť). Tento fakt sa odzrkadlí na ročných prevádzkových nákladoch za elektrickú energiu, ktoré budú vyššie rádovo v desiatkách eur.

7.2 Technológia Apis Cor

Pre realizáciu projektu som zvolil sústavu strojov pre 3D tlač od firmy Apis Cor (Kapitola 5.3.3.) . Ako jediná na trhu má svoje zmesy pre tlač certifikované a dostupné k predaju. Všetky vstupné dáta ako rýchlosť tlače, cena zmesy a pod. sú čerpané z ich webových stránok a užívateľskej príručky pre obsluhu sústavy strojov.

7.3 Technologický postup realizácie zvislých konštrukcií

7.3.1 Základné identifikačné údaje

7.3.1.1 Identifikačné údaje stavby

Stavba jednopodlažného rodinného domu o pôdorysných rozmeroch $13,5 \times 10 \text{ m}$ v Poprade, mestskej časti Stráže, založená na základových pásoch stužená základovou doskou. Nosná konštrukcia a konštrukcia priečok je zabezpečená technológiou 3D tlače. Valbová strecha objektu je pevne ukotvená na stužujúci veniec obvodových konštrukcií. Ako plošná tepelná izolácia obvodových stien je použitá minerálna vlna hrúbky 120 mm . Tepelná izolácia strechy a podlahy je z minerálnej vlny tl. 260 resp. 100 mm .

7.3.1.2 Vymedzenie predmetu riešenia (stručná charakteristika technológie)

Pre realizáciu de facto všetkých zvislých konštrukcií hrubej stavby je použitá technológia 3D tlače. Plne mechanizovaná sústava zariadení je poháňaná strojom s ramenom, na ktorom konci je počítačom ovládaná

hlavica. Z hlavice sa kontinuálne tlačí pás materiálu na bázy cementu. Aditívnou metódou sa konštrukcia vrství až do požadovanej výšky. Presnosť tlače udávaná výrobcom je $\pm 0,1 - 0,2$ mm. Ďalšie časti výrobného systému sa skladajú zo sila s uskladneným materiálom a napájaciej jednotky s kontinuálnou miešačkou. Aditívna metóda je okrem konštrukcie stien a priečok použitá aj na tlač strateného bednenia.

7.3.1.3 Vstupné materiály a výrobky

Tab. 1.:

Apis Cor Mortar mix	Objem mat. [m ³]	Celkový Objem stien [m ³]	Pevnosť v tlaku [Mpa]	Pevnosť v ťahu [Mpa]	Modul pružnosti [GPa]	Cena za m ³ [€]	Celková cena [€]
Nosné obvodové steny	8,18	15,53	27,4	1,9	29	114	932,52
Priečka - 150 mm	6,48	12,3	27,4	1,9	29	114	738,72
Priečka - 100 mm	0,77	1,54	27,4	1,9	29	114	87,78
Stratené bednenie venca	0,64	0,64	27,4	1,9	29	114	72,96
Σ	15,43	29,37				Σ	1831,95

pozn.: v celkovej cene materiálu sú zarátané aj náklady na spotrebu el. energie - 55,2 €. Pri spotrebe 8 kW (4 kW tlačiareň, 4 kW jednotka na automatickú prípravu malty) v cene 11,5 cent/kWh.

Tab. 2.:

Keramické preklady Porotherm	Množstvo [ks]	Hmotnosť [kg/m]	Tep. vodivosť λ [W/(m.K)]	Max zaťaženie [kN]	Max moment [kNm]	Hmotnosť [kg]	Cena za kus [€]	Celková cena [€]
70x238x1000	6	35	1	14,7	1,62	210	8	48
70x238x2000	15	35	1	14,3	4,84	525	16	240
70x238x2250	3	35	1	14,2	5,81	105	18	54
Σ	24				Σ	840	Σ	342

Tab. 3.:

Výztuž prekladu 10 512	Množstvo [m ¹]	Pevnosť v tlaku [Mpa]	Pevnosť v ťahu [Mpa]	Mez Kluzu [Mpa]	Hmotnosť na m ¹ [kg]	Hmotnosť [kg]	Cena za kg [€]	Celková cena [€]
pozdĺžna - 4 pruty $\varnothing 16$ mm	20,96	340	340	400	1,58	33,12	1,2	39,74
pozdĺžna - 4 pruty $\varnothing 12$ mm	20,96	340	340	400	0,889	18,63	1,2	22,36
priečna - strmeň S1 $\varnothing 8$ mm	305,4	340	340	400	0,395	10,78	1,2	12,94
					Σ	62,53	Σ	75,04

Tab. 4.:

Výztuž armokoša 10 512	Množstvo [m ¹]	Pevnosť v tlaku [Mpa]	Pevnosť v ťahu [Mpa]	Mez Kluzu [Mpa]	Hmotnosť na m ¹ [kg]	Hmotnosť [kg]	Cena za kg [€]	Celková cena [€]
------------------------	----------------------------	-----------------------	----------------------	-----------------	---------------------------------	---------------	----------------	------------------

pozdĺžna - 4 pruty \varnothing 12mm	166	340	340	400	0,899	147,54	1,2	177,05
priečna - strmeň S1 \varnothing 8mm	139,4	340	340	400	0,395	55,063	1,2	66,08
					Σ	202,6	Σ	243,12

Tab. 5.:

XPS Polystyrén STYROFOAM	Plocha dosky [m ²]	Potrebné plocha [m ²]	Množstvo [ks]	Tep. vodivosť λ [W/(m.K)]	Faktor dif. odporu μ [-]	Hmotnosť [kg]	Cena za m ² [€]	Celková cena [€]
STYROFOAM 1250 x 600 mm, 10 mm	0,75	2,88	4	0,036	100	140,03	6,5	19,5

Tab. 6.:

Cementotrieskové dosky	Plocha dosky [m ²]	Potrebné plocha [m ²]	Množstvo [ks]	Tep. vodivosť λ [W/(m.K)]	Faktor dif. odporu μ [-]	Hmotnosť [kg]	Cena za m ² [€]	Celková cena [€]
CETRIS BASIC 3350x1250 mm, hrúbka 24 mm	4,15	8,06	2	0,287	61	140,03	15,08	30,16

Tab. 7.:

Betón do stĺpov a vencov	Množstvo [m ³]	Pevnosť v tlaku [Mpa]	Pevnosť v ťahu [Mpa]	Modul pružnosti [Gpa]	Tep. vodivosť λ [W/(m.K)]	Faktor dif. odporu μ [-]	Cena za m ³ [€]	Celková cena [€]
C20/25	3	20	2,2	30	1,6	50	95,86	287,58

7.3.1.4 Výpis materiálu

Materiál pre tlač sa na stavbu dodáva v sile, je strojne mixovaný pomocou kontinuálnej miešačky. Celkový objem materiálu zahrňajúci nosné steny, priečky a stratené bednenie stužujúceho venca je 15,43 m³. U otvorov v nosnej konštrukcii do dĺžky 2m sa inštalujú preklady Porotherm 1000, 1850, 2000 a 2250 mm. V otvore pre budúci oblok s dvermi dĺžky 4250 mm sa namiesto 250 mm venca osadí veniec o výške 500 mm. Na betonáž vencov a stĺpov sa celkovo použije betón B2 C20/25 o objeme 3 m³ betónu a 265 kg betonárskej výztuže. Pre premostenie a zakrytie otvorou v nosnej konštrukcii sa použijú cementotrieskové dosky CETRIS o celkovej výmere 8,06m².

Tab. 8.:

Materiál	MJ	Množstvo
Apis Cor Mortar	m ³	15,43
Betón B20 C20/25	m ³	2,98
Keramický preklad Porotherm (70x238x1000)	ks	6

Keramický preklad Porotherm (70x238x2000)	ks	15
Keramický preklad Porotherm (70x238x2250)	ks	3
Cementotrieskové dosky CETRIS	m ²	8,06
Výztuž priečna - strmienka S1, S2 , ø8 mm	kg	79,02
Výztuž pozdĺžna, ø12 mm	kg	199,41
Výztuž pozdĺžna, ø16 mm	kg	39,74
Polystyren STYROFAM 10 mm	m ²	2,88

7.3.1.5 Zásady manipulácie, dopravy a skladovania materiálu

S vreciami s pojivom pre 3D tlač je nutné manipulovať opatrne, aby nedošlo k poškodeniu obalu a následnému zvlhnutiu materiálu a strate vlastností. Pri uskladňovaní na stavenisku sa odporúča materiál zakryť fóliami, skladovať na paletách alebo tak, aby sa zabránilo kontaktu so zemou a pri daždoch s vodou. Materiál by mal byť skladovaný pri teplote -5°C až 40°C. Prepravu všetkých materiálov a výrobkou je ideálne prepraviť na stavenisko deň pred ich použitím. Armokoše do vencov sú viazané a skladované na firémovej dielni, deň pred betonážou budú prevezené na stavenisko.

7.3.1.6 Metódy kontroly a kvality materiálu

Vedúci pracovník skontroluje podľa dodacieho listu množstvo a technický stav vriec po dodaní, technický stav sa kontroluje tiež tesne pred začiatkom prípravy malty. Stroj na prípravu malty je plne automatizovaný. Kým malta nemá správnu konzistenciu stroj na 3D tlač nezačne tlačiť. Ďalej je nutné skontrolovať počet dodaných prekladov, Množstvo dĺžku a počet vencov po prevoze.

7.3.2 Pracovné podmienky

7.3.2.1 Pripravenosť pracoviska

Stavební objekt je vo fázi dokončenia základových konštrukcií, v miestach stien a priečok sú natavené asfaltové pásy. Na stavenisku je zabezpečený prívod vody a elektriny. V tomto konkrétnom prípade je na

stavbe umiestnená rozvodná skriňa. V budúcom interiéri budovy je umiestnená 3D tlačiareň, v blízkosti stavby je tiež jednotka na automatickú prípravu malty a silo. Pred začiatkom osadzovania prekladov je nutné overiť, stav vytlačených stien a zabezpečiť, že materiál je dostatočne tvrdý. Pred osadzovaním premostenia sa overí, či su cementotrieskové dosky presne namerané a následne odrezané maximálna možná odchylka je ± 1 mm.

7.3.2.2 Štruktúra pracovnej čaty

Pracovná čata sa skladá z odborného pracovníka, ktorý absolvoval školenie pre prácu s danou technológiou a disponuje technickými znalosťami pre prácu s CAD softvérom a softvérom 3D tlačiarne. Viazanie výztuže prebieha na dielni dvoma pracovníkmi. Pracovná čata pre betonáž sa skladá z troch pracovníkov. Lešenie budú stavať 5 pracovníci. Po dokončení tlače sa pracovná čata zväčší o ďalšieho pracovníka pre osadenia prekladov a premostení. Pri tlači strateného bednenia venca ostane na stavenisku len odborný pracovník. Ďalší deň sa k nemu pridajú dvaja betonári pre betonáž stužujúceho venca.

7.3.2.3 Bezprostredné podmienky pri práci

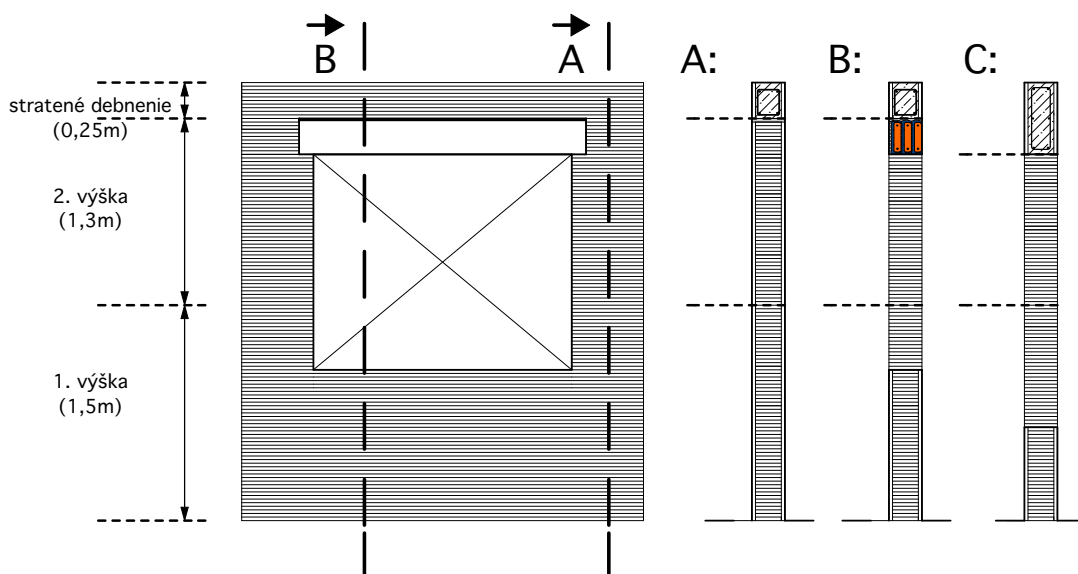
Použitie 3D tlače si vyžaduje špecifické poveternostné podmienky. Teplota vzduchu musí byť väčšia ako 5°C, relatívna vlhkosť nesmie prekročiť 80% a taktiež nesmie pršať. Riziko spôsobuje aj vietor ktorého rýchlosť by nemala byť väčšia ako 19 m/s. Počas betonáže je nutné aby teplota neklesla pod bod mrazu.

7.3.2.4 Stroje a prístroje, pracovné pomôcky

3D Mobilný automatizovaný mix a napájacia jednotka pre stavebné zmesy, 3D tlačiareň, autodomiešavačka s čerpadlom, vibrátor, urovnávacia lať, lešenie, pomôcky BOZP, kladivo, viazacie kliešte, príklepová vrtačka, 2x debnacia doska DOKA 3S-basic, 2x Nosníkové debnenie DOKA 5000 mm, 6x stropné podpery DOKA Eurex 20. Veľká uhlová brúska, vodováha, ochranné odevy, prilby.

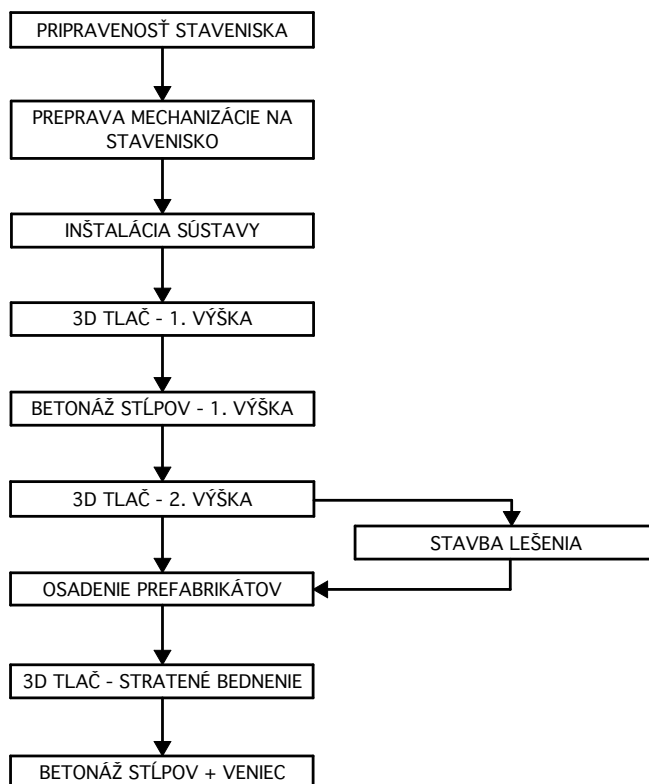
7.3.2.5 *Technologický postup doplnený postupovým diagramom*

Deň pred začatím prác je nutné uistiť sa o vyhovujúcich poveternostných podmienkach, skontrolovať hydroizoláciu pod budúcimi stenami, pripraviť miesto pre inštaláciu automatizovaného mixu, napájacej jednotky a 3D tlačiarne. Ďalší deň sa mechanizácia prepraví na stavenisko. Odborný pracovník osadí a nainštaluje celú sústavu, pripojí ju na prívod vody a elektriny. 3D tlačiareň nieje potrebné nijak špeciálne ukotviť, disponuje stabilizačným systémom. Celý proces by podľa výrobcu nemal trvať viac ako hodinu. Ďalším krokom je nainštalovanie 3D modelu budúcej budovy pomocou USB flash disku do integrovaného počítača na automatizovanom mixe. Hlavica 3D tlačiarne sa ovládačmi umiestni do primárneho bodu tlače. Teraz je už všetko pripravené a môže sa začať samotná tlač. Pri tlači prvej vrstvy je nutné overiť presnosť a umietnenie budúcej steny. Tlačiareň nasleduje presnú trajektóriu vrstvy po vrstve a po pár minútoch sú viditeľné kontúry budúcej budovy. Počas tlače je nutná prítomnosť odborného pracovníka na stavenisku pre prípadnú podporu a riešenie vzniknutých problémov či pri zmene poveternostných podmienok. Celá 3D tlač je naprogramovaná tak, aby sa vo výške 1,5 m stieň automaticky zastavila. Po dokončení 1. výšky sa do hlavice vloží malá gumená guľička a na počítači sa zapne automatický čistiaci cyklus. Loptička prebehne celým prívodným potrubím a odstráni všetky usadeniny a nečistoty. Tento proces je nutné zopakovať vždy po dokončení práce s 3D tlačou. Povolené technické prestávky pri 3D tlači nesmú prekročiť 30 minút.



Obr. 24.: Vizualizácia procesu 3D tlače nosných stien.

Súbežne s tlačou prebieha na dielni príprava armokošov. Po technologickej prestávke sa realizuje betonáž stĺpov pomocou autodomiešavača s čerpadlom, po vybetonovaní sa 3D tlačiareň znova zapína a pokračuje v tlačení do výšky 2,8 m. Proces tlače je naprogramovaný tak, aby vynechával v miestach pre pralky presný priestor na ich osadenie. Počas tlače pracovníci z vonkajšej strany montujú lešenie. Koncom pracovného dňa sa na stavbu prepravujú preklady s armokošmi. Ďalší deň sa osadia preklady, pripravujú sa dočasné premostenie dverných otvorov v priečkach. Nad otvorom s veľkým oblokom a dverami smerujúcimi na terasu pracovníci namontujú nosníkové debnenie, debniacu dosku a stojky. Na plochu stien sa primontujú drevotrieskové dielce. Tlačiareň sa zase zapína tento krát tlačí stratené debnenie pre veniec a následne aj poslednú výšku priečok. Ďalší deň sa osadia armokoše, vzájomne sa previažu a previažu sa aj s výztužou stĺpov. Na stavbu smeruje autodomiešavačka s betónovou zmesou. Zvyšná výška stĺpov ako aj obvodový stužujúci veniec sa spolu zabetónujú.



Obr. 25.: Postupový diagram.

7.3.2.6 Pracnosť

Tab. 9.:

činnosť	MJ	Mno- žstvo	Jedn. pracnosť	Celková pracnosť	Počet pracovn.	Časový fond [h]	Výsl. pracnosť [dni]
Preprava sústavy pre 3D tlač na stavenisko	km	19.20	0.17	3.3	1	8	0.50
Inštalácia sústavy pre 3D tlač	ks	1.00	1.00	1.0	1	8	0.10
Viazanie výztuže pre veniec	kg	265.13	0.08	21.2	3	8	1.00
3D tlač - 1.výška (1.5m)	m3	7.64	3.70	28.26	1	24	1.20
Betonáž stĺpov - 1.výška (1.5m)	m3	0.39	1.27	0.5	3	8	0.20
3D tlač - 2.výška (1.3m)	m3	5.19	3.74	19.44	1	24	1.00
Montáž ľahkého lešenia	m2	117.50	0.30	35.3	5	8	1.00
Preprava prekladov a armokošov na stavenisko	km	9.60	0.17	1.6	1	8	0.20
Montáž premostenia otvorov v priečkach	m'	3.70	0.80	3.0	1	8	0.20
Osadenie prekladov	m'	7.10	0.84	6.0	2	8	0.40
Osadenie premostenia drevocementových dosiek	m2	8.06	0.49	3.9	2	8	0.25
3D tlač - strateného bednenia venca	m3	0.63	4.03	2.5	1	24	0.20
3D tlač - 3.výška priečky (1.05m)	m3	2.72	3.58	9.76	1	24	0.40
Betonáž stĺpov + venca	m3	2.59	1.29	3.3	3	8	0.20
Preprava sústavy pre 3D tlač na sklad	km	19.20	0.17	3.3	1	8	0.40

V súčte budú stavebné práce prebiehať 9 dní. Sústava pre 3D tlač bude v prevádzke 60 hodín. Celý harmonogram stavebných prác, ako aj časopriestorový graf je k nahliadnutiu v prílohe.

7.3.3 Akosť prevedenia

Po dokončení nosných stien je potrebné overiť ich rovinnosť, ktorá musí byť v dĺžke každého metru ± 1 mm, taktiež sa vodováhou skontroluje zvislosť ktorá môže byť v tolerancii ± 20 mm, nutnosťou je skontrolovať aj okenné zárožia a ich pravouhlosť.

7.3.4 BOZ a PO

7.3.4.1 Konkrétne vymedzenie jednotlivých opatrení pre zaistenie BOZ a PO

Pri práci na stavbe musia byť splnené základné podmienky bezpečnosti práce, s ktorými musia byť všetci robotníci na stavbe oboznámení. Rovnako tak musia byť oboznámení s technologickými postupmi. Všetky tieto predpisy BOZP sú robotníci povinní dodržiavať. Počas vykonávania stavby totiž môžu ľahko prísť k úrazu alebo ujme na zdraví - pri nesprávnej manipulácii s materiálom môžu privodiť úraz.

1. *Zákon č. 309/2006 Zb.* - Ktorým sa upravujú ďalšie požiadavky bezpečnosti a ochrany zdravia pri práci v pracovnoprávných vzťahoch a o zaistenie bezpečnosti a ochrany zdravia pri činnosti alebo poskytovaní služieb mimo pracovnoprávne vzťahy (zákon o zaistení ďalších podmienok bezpečnosti a ochrany zdravia pri práci) - týmto zákonom je zriadený koordinátor bezpečnosti práce na stavbe.

2. *Nariadenie vlády č. 362/2005 Zb.* - O bližších požiadavkách na bezpečnosť a ochranu zdravia pri práci na pracoviskách s nebezpečenstvom pádu z výšky alebo do hĺbky (+ prílohy)

3. *Nariadenie vlády č. 591/2006 Zb.* - O bližších minimálnych požiadavkách na bezpečnosť a ochranu zdravia pri práci na staveniskách (+ prílohy)

7.3.4.2 Vymedzenie zodpovednosti za dodržiavanie týchto podmienok

Za dodržiavanie podmienok BOZP je v plnej miere zodpovedný zhotoviteľ, ktorý je povinný zamestnancom zabezpečiť všetky ochranné prostriedky potrebné pre jednotlivé stavebné činnosti. Pracou koordinátora BOZP je dávať podnety, doporučovať technické riešenia, poskytovať odborné konzultácie. Ďalej koordinuje jednotlivých zhotoviteľov, zúčastňuje sa kontrolných prehliadok stavby a navrhuje termíny kontrolných dní.

7.3.5 Vplyv na životné prostredie

Ak sa budú dodržiavať predpísané alebo odporúčané požiadavky na skladovanie materiálov, nemalo by dôjsť k únikom materiálu do pôdy alebo atmosféry. Materiály sú chemicky stabilné a nemali by vznikajú žiadne nebezpečné reakcie. Keďže sú stavebné práce vykonávané vonku, musíme dbať na zvýšenú pozornosť na znečistenie pôdy a snažíme sa zamedziť nadmernému kontaktu materiálu s pôdou (nešikovné rozsypania alebo rozliatie materiálu). Pri práci sa treba dodržiavať základné pravidlá obmedzenia vplyvu na životné prostredie.

1. Prašnosť spôsobená v dôsledku stavebných prác nepresahuje limity uvedené vo vyhláške č. 268/2009 Zb. o technických požiadavkách na stavby.

2. Hospodárenie a zaobchádzanie s odpadmi dodrží v súlade so zákonom č. 185/2001 Zb. O odpadoch a vyhláškou č. 381/2001 Zb. Katalóg odpadov.

3. Nakladanie s chemickými látkami sa bude riadiť zákonom č. 356/2003 Zb. O chemických látkach a chemických prípravkoch.

4. Stavebné práce budú vykonávané tak, aby z hľadiska hluku boli v súlade s nariadením vlády č. 148/2006 Zb. O ochrane zdravia pred nepriaznivými účinkami hluku a vibrácií.

7.3.6 Hlučnosť

Ak by 3D bola v prevádzke kontinuálne aj počas noci v časoch 22:00 - 6:00 je potrebné zabezpečiť podľa *Nariadenia vlády č. 217/2016 Sb. o ochrane zdravia pred nepriaznivými účinkami hluku a vibrácií* maximálnu hodnotu hlučnosti pri prevádzke strojov 40 dB. Najbližšia obývaná budova je vo vzdialenosti približne 9 m. Maximálny akustický výkon strojov nesmie prekročiť 62,3 dB.

Tab. 10.:

f	125	250	500	1000	2000	4000	[Hz]
K _A	-16,1	-8,6	-3,2	0	1,2	1	[dB]
L _{w1}	62,3						[dB]
L _w	62	64,5	64,6	64,5	54,7	59,9	[dB]
L	34,0	36,5	36,6	36,5	26,7	31,9	[dB]
L+K _A	17,9	27,9	33,4	36,5	27,9	32,9	[dB]
L _A	40.0						[dB]

- f* - frekvencia
L_{w1} - hladina akustického výkonu stroja
L_w - hladina akustického výkonu stroja pre jednotlivé frekvencie
L - hladina akustického tlaku v mieste príjmu
L+K_A - upravená hladina akustického tlaku v mieste príjmu
L_A - Celková hladina akustického tlaku

Výrobca túto hodnotu neuvádza, uvažujem, že predpoklad je splnený. Ak by hodnota akustického výkonu prekračovala maximálnu povolenú hodnotu bolo by nutné umiestniť medzi zdrojom a miestom príjmu dočasnú akustickú prekážku vo forme steny.

7.4 Porovnanie jednotlivých projektov

Ako základný podklad pre ekonomické a časové porovnanie PP s upraveným projektom (3DP) slúžil pôvodný rozpočet na stavbu holodomu spolu so softvérom pre oceňovanie a riadenie stavebnej výroby cenkros4 a podklad s orientačnými časovými ukazovateľmi prác a dodávavok dostupný zo stránok katedry technológií Stavebnej fakulty ČVUT. K jednotlivým

stavebným procesom bola priradená jednotková pracovnosť, pracovná čata a v technologickom normále boli chronologicky zoradené. Podľa návaznosti jednotlivých stavebných procesov a ich doby trvania bol ďalej vypracovaný časopriestorový graf jednak pre PP ako aj 3DP.

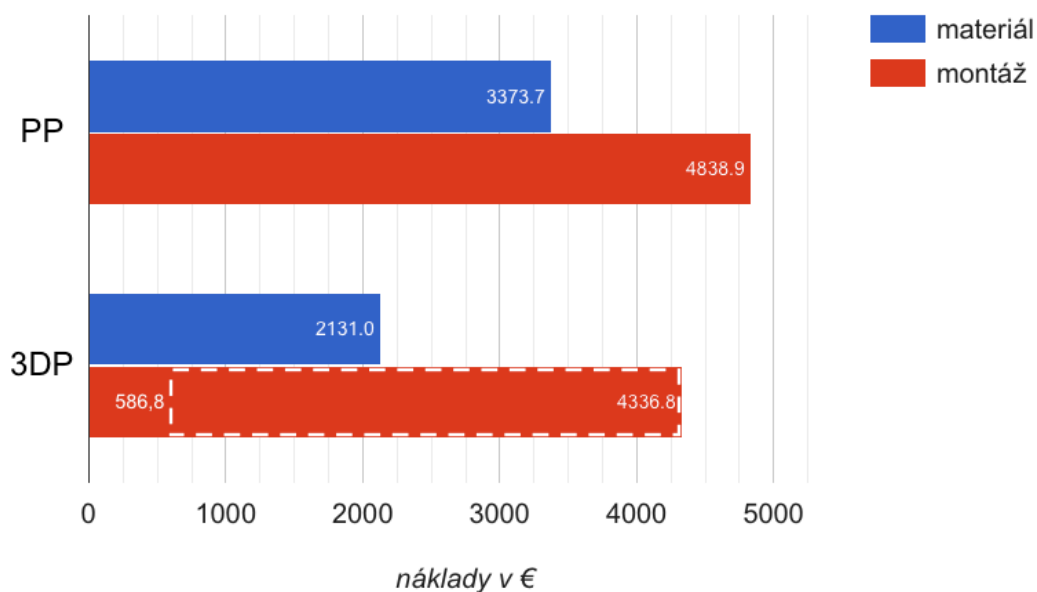
7.4.1 Ekonomické porovnanie

Celková cena stavebného diela 3DP bola 61 000 € čo v porovnaní s PP predstavuje pokles o viac ako 10%. Aditívna technológia tlače priamo ovplyvnila hlavnú stavebnú výrobu a to konkrétne zvislých a vodorovných konštrukcií. V nasledujúcej tabuľke je uvedené porovnanie nákladov na tieto stavebné procesy a percentuálny podiel úspory.

Tab. 11.:

	PP	3DP	%
HSV spolu	37 272 €	29 354 €	21,2
Zvislé nosné konštrukcie spolu	9 685 €	4 661 €	51,9
Obvodové steny	4 931 €	1 121 €	77,3
Priečky	2 337 €	993 €	57,5
Stužujúci veniec	1 091 €	688 €	36,9

Najväčšiu zásluhu na úsporách nesie automatizácia a zníženie potreby ľudskej sily pri výstavbe. Tento fakt je najbadateľnejší pri nákladoch na realizáciu obvodových stien. Náklady na materiál 3DP pre nosné steny sú približne o tretinu menšie ako v PP, náklady na montáž sa ale znížili viac ako osemnásobne za predpokladu, že dodávateľ disponuje sústavou pre 3D tlač. Pri prenájme sústavy za 25 € za hodinu čo predstavuje bežnú cenu prenájmu malého rýpadla s obsluhou realizácia nosných konštrukcií 3D tlačou stráca svoje opodstatnenie. Na obr. 27 je znázornená distribúcia nákladov na realizáciu zvislých konštrukcií PP a 3DP.

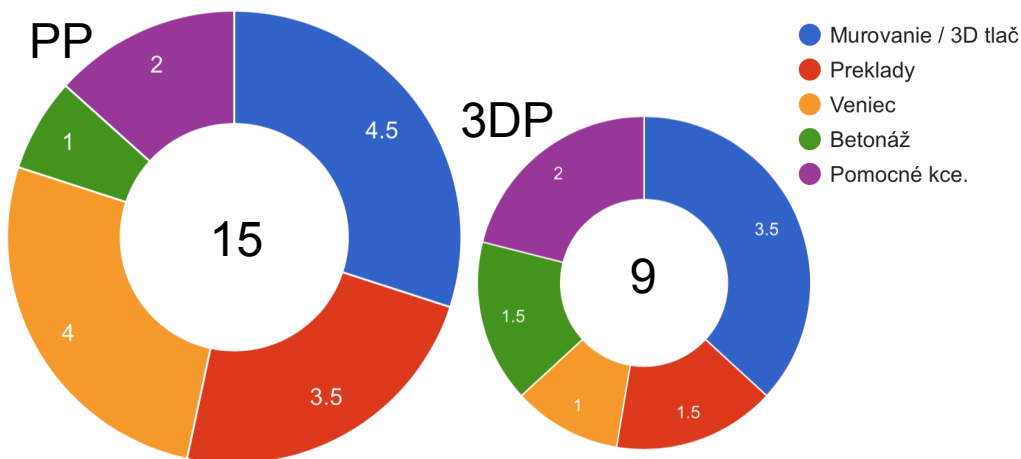


Obr. 26.: Graf distribúcie nákladov pre zvislé konštrukcie v PP a 3DP projekte. Čiarkovaný rámček – náklady na prenájom sústavy pre 3D tlač.

7.4.2 Časové porovnanie

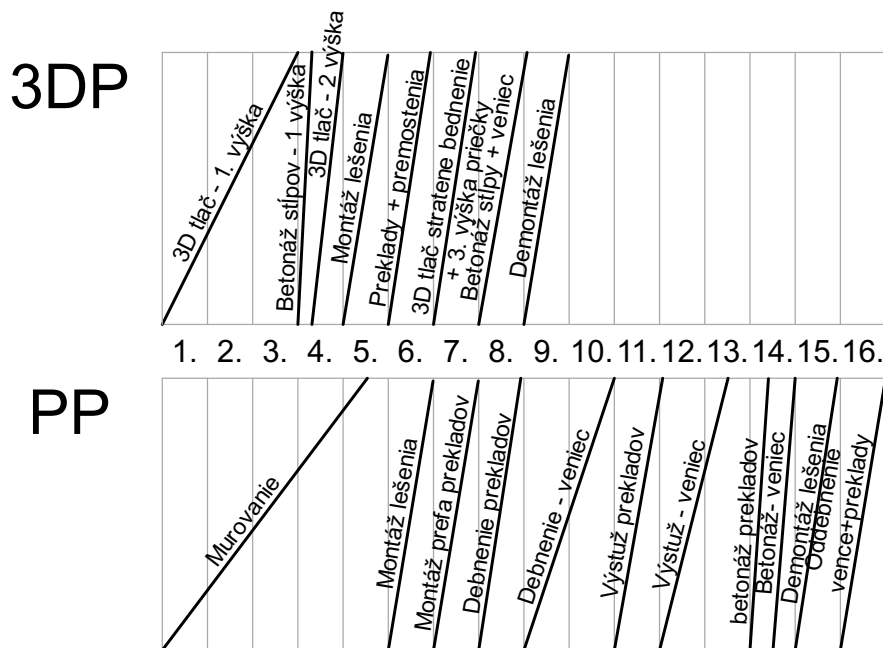
Práce na nosnej konštrukcii s použitím 3D tlačiarne by trvali o približne 6 dní menej, celá stavba by bola dokončená o 11 dní skôr. Hlavný rozdiel v časovej náročnosti sa prejavil pri realizácii stužujúceho venca. V PP je nutné stužujúci veniec pracne debniť a po betonáži aj oddebniť kdežto v 3DP funkciu bednenia prenáša vytlačené stratené bednenie. V 3DP sú armokoše zhotovené v dielni v čase, keď je na stavenisku v prevádzke 3D tlač ak by sa podobný princíp aplikoval na PP práce na nosnej konštrukcii by trvali o deň menej. Realizácia stien a priečok bola v 3DP skrátaná o 1,5 dňa oproti PP.

V pôvodnom projekte sa časová náročnosť na jednotlivé stavebné procesy pri zvislých konštrukciách zobrazila aj v súčte normohodín remeselných pracovníkov a pomocných síl s celkovým časom 294 hodín. V 3DP súčet normohodín a strojhodín 3D tlačiarne činí 210 hodín.



Obr. 27.: Koláčový graf zobrazujúci časovú náročnosť realizácie konstrukčných prvkov v dňoch.

Budovanie stien 3D tlačov je sezónne a náročné na poveternostné podmienky ktoré zvyknú byť pod Tatrami premenlivé. Pri silnom vetre, teplotách pod 5°C, alebo zrážkach by sa práce museli pozastaviť.



Obr. 28.: Časopriestorový graf vodorovných a zvislých konštrukcií 3DP a PP.

7.5 Záver

Z výsledkov výskumu vyplýva, že vývoj aditívnych technológií v stavebníctve má svoje opodstatnenie. Ukázalo sa, že by sa týmto spôsobom dal ušetriť čas a aj nemalé finančné prostriedky na výstavbu. Ďalšou výhodou je tvarová voľnosť, nulové ztraty na materiále a zníženie rizika pracovných úrazov. V najbližších rokoch bude pokračovať trend úbytku zručných remeselníkov a aditívna výroba by naň mohla byť odpoveďou.

Pravdepodobnosť zavedenia tejto technológie vo veľkom merítku je ale závislá na mnohých faktoroch a to hlavne vysokých počiatočných nákladoch. Veľkou nevýhodou oproti klasickým metódam výstavby sú poveternostné podmienky, ktoré musia byť pre tlač ideálne. Technológia ma potenciál v rozvojových krajinách pri výstavbe nízkonákladného ubytovania alebo núdzového prístrešia a v luxusných konštrukciách s veľkou tvarovou náročnosťou ktoré by bolo obtiažné postaviť tradičným spôsobom. Vzhľadom k tomu, že technológia je stále vo fázy vývoja je ťažké odhadnúť konkrétne problémy, ktorým môže čeliť a preto je potrebné ju dostať do širšieho povedomia spoločnosti a pokračovať vo vývoji.

Zoznam použitej literatúry

- [1] *Time-Life Magazine: 1,000 Years, 1,000 People: Ranking The Men and Women Who Shaped The Millennium* [online]. 1998 [cit. 2016-09-27]. Dostupné z: <http://www.timelife.com/>
- [2] BORGMAN, Christine. *From Gutenberg to the global information infrastructure: access to information in the networked world*. Cambridge, Mass.: MIT Press, 2003. Digital libraries and electronic publishing. xviii, 324 strán, ISBN 0-262-52345-0.
- [3] VEHMAS, Kaisa. *Future of European printing industry* [online]. 2011 [cit. 2016-09-27]. Dostupné z: <http://www.printpower.eu/>
- [4] CURLEY, Robert. *Encyclopaedia Britannica - 3D Printing* [online]. 2016 [cit. 2016-10-05]. Dostupné z: <http://www.academic.eb.com.ezproxy.techlib.cz/levels/collegiate/article/571533>
- [5] A Brief history of 3D printing, In: *T. Rowe Price Associates, Inc.* [online]. 2011 [cit. 2016-09-27]. Dostupné z: <https://www.individual.troweprice.com/>
- [6] MATIAS, Elizabeth. *3D Printing: On its historical evolution and the implications for business*. [online]. [cit. 2016-10-05]. Dostupné z: <http://www.faculty.poly.edu/~brao/3dppicmet.pdf>
- [7] RIFKIN, Jeremy. *The Third Industrial Revolution: How Lateral Power Is Transforming Energy, the Economy, and the World*. New York: Macmillan, 2011, 304 stran. ISBN 02-303-4058-X.
- [8] Bespoke innovations makes beautiful, custom prosthetic legs. In: *WIRED magazine* [online]. [cit. 2016-10-07]. Dostupné z: <https://www.wired.com/2010/12/bespoke-designs-makes-beautiful-custom-prosthetic-legs/>
- [9] Disruptive manufacturing – the effects of 3D printing. In: *Deloitte* [online]. [cit. 2016-10-07]. Dostupné z: <https://www2.deloitte.com/content/>
- [10] CHUA, Chee Kai a LEONG, Kah Fai. *3D printing and additive manufacturing: principles and applications. Fourth edition of Rapid prototyping*. Hackensack, New Jersey: World Scientific, 2015, xxviii, 518 stran. ISBN 9789814571418.

- [11] BUSWELL, Richard et al. *Freeform construction: mega-scale rapid manufacturing for construction* [online]. Zborník Automation in construction, 2007. [cit. 2016-10-12]. Dostupné z: <https://dspace.lboro.ac.uk/2134/9925>
- [12] ZEMÁNEK, Martin. *Možnosti využití aditivní výroby ve stavebnictví*. Praha: ČVUT 2016, Diplomová práce, ČVUT, Fakulta stavební, Katedra technologií staveb.
- [13] SOARES, Roberto. *Reengineering management of construction projects* [online]. Jacksonville: International Journal of Business and Social Science 2013, Vedecký článok. [cit. 2016-10-13]. Dostupné z: http://ijbssnet.com/journals/Vol_4_No_7_July_2013/1.pdf
- [14] KOVÁŘÍK, Michal a SVOBODA, Pavel. *Potenciál využití technologie 3D tisku ve stavebnictví a přehled dostupných technologií* [online]. Sborník z workshopu doktorandů 12/2015 [cit. 2016-10-13]. Dostupné z: <http://www.technologie.fsv.cvut.cz/novinky/sbornik-z-workshopu-doktorandu>
- [15] KHOSHNEVIS, Behrokh a HWANG, Dooil. *Concrete Wall Fabrication by Contour Crafting* [online]. 2004 [cit. 2016-10-17]. Dostupné z: <http://www.iaarc.org/publications/fulltext/isarc2004-S09-05.pdf>
- [16] MANKIN, Eric. *CATERPILLAR INC. FUNDS VITERBI 'PRINT-A-HOUSE' CONSTRUCTION TECHNOLOGY* [online]. El. článok [cit. 2016-10-17]. Dostupné z: <http://viterbi.usc.edu/news/news/2008/caterpillar-inc-funds.htm>
- [17] KHOSHNEVIS, Behrokh , *Automated Construction by Contour Crafting - Related Robotics and Information Technologies* [online]. 01/2004 [cit. 2016-10-17]. Dostupné z: <http://contourcrafting.org/wp-content/uploads/2013/04/AIC2004-Paper1.pdf>
- [18] KHOSHNEVIS, Behrokh a HWANG, Dooil. *Concrete Wall Fabrication by Contour Crafting* [online]. 2004 [cit. 2015-11-22]. Dostupné z: <http://www.iaarc.org/publications/fulltext/isarc2004-S09-05.pdf>
- [19] KHOSHNEVIS, Behrokh et al. *Contour Crafting Simulation Plan for Lunar Settlement infrastructure build-up* [online]. 01/2011 [cit. 2015-11-20]. Dostupné z: https://www.nasa.gov/pdf/716069main_Khoshnevis_2011_PhI_Contour_Crafting.pdf

- [20] NASA. Lunar Settlement: Piecing Together a Full Moon Picture [online]. Firemní podklady, 2011 [cit. 2015-11-21]. Dostupné z: http://www.nasa.gov/offices/oct/home/niac_countour_crafting.html
- [21] LE, Thang et al. *Hardened properties of high-performance printing concrete*. [online]. Loughborough University, 2012 [cit. 2015-11-08]. Dostupné z: <https://dspace.lboro.ac.uk/2134/10929>
- [22] The Concrete Producer. *Loughborough University, Skanska Sign 3D Concrete Printing Agreement* [online]. El. článok [cit. 2016-10-17]. Dostupné z: http://www.theconcreteproducer.com/business/loughborough-university-skanska-sign-3d-concrete-printing-agreement_c
- [23] The Concrete Producer. *Loughborough University, Skanska Sign 3D Concrete Printing Agreement* [online]. El. článok [cit. 2016-10-17]. Dostupné z: http://www.theconcreteproducer.com/business/loughborough-university-skanska-sign-3d-concrete-printing-agreement_c
- [24] 3Dprint. *Exclusive: How Winsun Stole IP from Contour Crafting and Is "Faking" Their 3D Printed Homes & Apartments* [online]. El. článok, [cit. 2016-10-07]. Dostupné z: <https://3dprint.com/57764/winsun-3d-print-fake/>
- [25] 3Ders.org. *Exclusive: WinSun China builds world's first 3D printed villa and tallest 3D printed apartment building* [online]. El. článok, [cit. 2016-10-07]. Dostupné z: <http://www.3ders.org/articles/20150118-winsun-builds-world-first-3d-printed-villa-and-tallest-3d-printed-building-in-china.html>
- [26] TU Eindhoven. *TU Eindhoven starts using kingsize 3D concrete printer* [online]. El. článok, [cit. 2016-10-07]. Dostupné z: <https://www.tue.nl/en/university/news-and-press/news/22-10-2015-tu-eindhoven-starts-using-kingsize-3d-concrete-printer/>
- [27] 3D printing industry. *3DPI spoke with CyBe about their concrete 3D printer on-wheels* [online]. El. článok, [cit. 2016-10-07]. Dostupné z: <https://3dprintingindustry.com/news/3dpi-spoke-cybe-concrete-3d-printer-wheels-101406/>
- [28] 3Ders.org. *CyBe to release 3D printable mortar in 2016, working to certificate on-site 3D concrete printing* [online]. El. článok, [cit. 2016-10-07]. Dostupné z: <http://www.3ders.org/articles/20151214-cybe-to-release-3d-printable-mortar-in-2016-certificate-on-site-3d-concrete-printing.html>

- [29] BETABRAM, *Betabram Printer specifications, FAQ*. [online]. Firémne podklady 2015. [cit. 2015-12-12] Dostupné z: <http://www.betabram.com>
- [30] RUDENKO, Andrey. *3D Printed Concrete Castle is Complete* [online]. Firémne podklady spoločnosti Total Kustom 09/2014 [cit. 2015-11-20] Dostupné z: <http://www.totalkustom.com/news.html>
- [31] Apis cor. *Apis Cor 3D printer buyer guide*. [online]. Technická dokumentácia 2016 [cit. 2015-11-12] Dostupné z: <http://apis-cor.com/en/documentation/technical-documentation>
- [32] WASP, *The 3D printer to realize houses is realit*. [online]. Firémne podklady 2015. [cit. 2015-12-12] Dostupné z: <http://www.wasproject.it>
- [33] 3Dprint. *Construction of the 3D Printed Village of Shamballa is Progressing Wonderfully* [online]. El. článok, [cit. 2016-10-07]. Dostupné z: <https://3dprint.com/145439/shamballa-3d-printed-construction/>

Zoznam obrázkov

Obr. 1: Kresba dreveného tlačiarenského vlisu z roku 1568 [2].	12
Obr. 2: RepRap, Materská a dcérska 3D tlačiareň, všetky plastové prvky dcérskej tlačiarne boli vyprodukované materskou tlačiarňou. [2].	14
Obr. 3: Graf, zobrazujúci rast trhu s 3D tlačiarňami. Vodorovná osa - čas v rokoch, zvislá osa – hodnota trhu v miliardách dolárov [10].	17
Obr. 4.: Proces lineárnej tlače [17]	20
Obr. 5.: Robotická ruka s triskou na polyméry (vpravo) a hotová nosná konštrukcia steny (vľavo) [17]	21
Obr. 6. : Nákres rámovej 3D tlačiarne	22
Obr. 7. : Žeriavová konštrukcia 3D tlačiarne.	23
Obr. 8. : Robotická ruka s triskou	24
Obr. 9: detail trisky s hladítkom (vľavo hore), Proces výroby zložitých tvarov (vpravo hore, dole) [16]	26
Obr. 10: Prototyp hlavice s troma triskami [16]	26
Obr. 11. : Vizualizácia rámovej konštrukcie tlačiarne firmy Caterpillar.	28
Obr. 12. : Dielňa na Loughborough University s 3D tlačiarňou	29
Obr. 13.: fotka “divnej lavice”, spolupráca Loughborough Un. a Skanska UK [22].	30
Obr. 14. : Vľavo hore: prefabrikáty pripravené na prevoz na stavenisko. Vpravo hore: fotka realizácie viacpodlažnej budovy. Vľavo dole: obvodová konštrukcia z prefabrikátov [25].	31
Obr. 15.: Ukážky realizácie betónových prvkov [26].	32
Obr. 16. Vľavo mobilný robot CyBe RC 3Dp. Vpravo lavička predávaná firmou Cybe [34]	33
Obr. 17. Nákres tlačiarň ponúkaných Slovinskou firmou BetAbram [29]	34
Obr. 18.: Fotka z realizácie apartmánu technológiou TotalKustom. [30]	35
Obr. 19.: Žeriavová konštrukcia tlačiarne apis cor 7R [31]	36
Obr. 20.: Majiteľ firmy - Nikita Chen-yun-tai pózuje so skúšobným vzorkom [31]	36
Obr. 21. : Vľavo vývojársky tím a tlačiareň Delta WASP, Vpravo triska v procese tlače. [32]	37
Obr 22.: Produktivita práce v stavebnom priemysle (modrá) verzus ostatné odvetvia, okrem poľnohospodárstva za posledných 50 rokov. [13]	38

Obr. 23.: Vizualizácia 3DP (hore) a fotka PP (dole).	41
Obr. 24.: Vizualizácia procesu 3D tlače nosných stien.	48
Obr. 25.: Postupový diagram.	49
Obr. 26.: Graf distribúcie nákladov pre zvislé konštrukcie v PP a 3DP projekte. Čiarkovaný rámček – náklady na prenájom sústavy pre 3D tlač.	54
Obr. 27.: Koláčový graf zobrazujúci časovú náročnosť realizácie konstrukčných prvkov v dňoch.	55
Obr. 28.: Časop. graf vodorovných a zvislých konštrukcií 3DP a PP.	55

Zoznam tabuliek

Tab. 1.: Vstupné materiály a výrobky: Apis Cor mortar mix	43
Tab. 2.: Vstupné materiály a výrobky: Keramické preklady Porotherm	43
Tab. 3.: Vstupné materiály a výrobky: Výztuž prekladu 10 512	43
Tab. 4.: Vstupné materiály a výrobky: Výztuž armokoša 10 512	43
Tab. 5.: Vstupné materiály a výrobky: XPS Polystyrén Styrofoam	44
Tab. 6.: Vstupné materiály a výrobky: Cementotrieskové dosky	44
Tab. 7.: Vstupné materiály a výrobky: Betón do stĺpov a vencov	44
Tab. 8.: Výpis materiálu	45
Tab. 9.: Tabuľka pracnosti	49
Tab. 10.: Výpočet hlučnosti	52
Tab. 11.: Porovnanie ekonomickej náročnosti výstavby	53

Zoznam príloh

Príloha č. 1:	Rozpočet PP
Príloha č. 2:	Technologický Normál PP
Príloha č. 3:	Rozpočet 3DP
Príloha č. 4:	Technologický Normál 3DP
Príloha č. 5:	Časopriestorový graf PP
Príloha č. 6:	Časopriestorový graf 3DP
Príloha č. 7:	Harmonogram zvislých konštrukcií 3DP
Príloha č. 8:	Výkresy PP
Príloha č. 9:	Výkres pôdorysu 3DP
Príloha č. 10:	Výkres zariadenia staveniska 3DP
Príloha č. 11:	Súhrnná technická správa 3DP