

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA APLIKOVANÝCH VĚD**

KATEDRA MECHANIKY

OBOR STAVITELSTVÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

3D tisk ve stavitelství

Originál (kopie) zadání BP/DP

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá 3D tiskem ve stavitelství. Jsou zde popsány různé druhy materiálů, metody 3D tisku a používané tiskárny. Dále jsou zde rozebrány konstrukční řešení, navrhování a dimenzování. Cílem práce je vytvořit model budovy pro 3D tisk a vytisknout ho na 3D tiskárně.

Výkresová část diplomové práce je provedena v programu ArchiCAD 21. V tomto programu je vytvořený model prvního nadzemního podlaží. Dále je použit program AutoCAD 2016 pro pomocné práce při modelování stavby.

Klíčová slova

3D tisk, tiskárna, cementová malta, metoda, materiál

Abstract

The master thesis deals with 3D printing in building construction. Various types of materials, 3D printing methods and used printers are described here. Furthermore, there are analyzed the design, design and dimensioning. The objective of this work is to create a building model for 3D printing and to print it on a 3D printer.

The drawing part of the thesis is made in ArchiCAD 21. In this program the model of the first floor is created. Furthermore, AutoCAD 2016 is used for auxiliary work in building modeling.

Keywords

3D printing, printer, cement mortal, method, material

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala svému vedoucímu diplomové práce panu Doc. Ing. Janu Paškovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, ochotu a čas při konzultačních hodinách.

Dále chci poděkovat společnosti Ateliér Soukup za poskytnutí potřebných materiálů k vytvoření 3D modelu.

Nakonec bych ráda poděkovala rodině, přítelovi a přátelům za trvalou podporu při studiu na Západočeské univerzitě v Plzni.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci a názvem „3D tisk ve stavitelství“ vypracovala samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 10.1.2020

Bc. Anna Poláková

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	- 9 -
ÚVOD	- 11 -
1 ÚVOD DO 3D TISKU	- 12 -
1.1 NEPRŮMYSLOVÉ APLIKACE 3D TISKU	- 12 -
1.2 PRŮMYSLOVÉ APLIKACE 3D TISKU	- 13 -
2 VÝVOJ 3D TISKU VE STAVITELSTVÍ	- 15 -
2.1 3D TISK VE SVĚTĚ	- 17 -
2.2 3D TISK V EVROPĚ	- 18 -
2.3 3D TISK V ČESKÉ REPUBLICE	- 19 -
2.4 3D TISK VE VESMÍRU	- 20 -
3 SOFTWAREVÉ NÁSTROJE	- 21 -
3.1 TINKERCAD	- 22 -
3.2 MESHMIXER	- 24 -
3.3 123D DESIGN	- 27 -
3.4 ARCHICAD	- 27 -
4 METODY 3D TISKU A MATERIÁL	- 29 -
4.1 METODY	- 29 -
4.1.1 <i>Stereolitografie</i>	- 36 -
4.1.2 <i>3D tisk z cementových malt</i>	- 36 -
4.1.3 <i>Betonový tisk (Concrete printing)</i>	- 43 -
4.1.4 <i>Polymerní 3D tiskové technologie</i>	- 46 -
4.1.5 <i>Fotopolymerace</i>	- 50 -
4.1.6 <i>Model fúzovaného vkladu</i>	- 50 -
4.1.7 <i>Electrospinning</i>	- 51 -
4.1.8 <i>Kov pro pevné struktury</i>	- 51 -
4.1.9 <i>Buněčná výroba</i>	- 52 -
4.1.10 <i>3D pěnový tisk</i>	- 52 -
4.1.11 <i>Výroba vytlačování za mrazu</i>	- 53 -
4.2 MATERIÁL	- 54 -
4.2.1 <i>Betonová směs</i>	- 54 -

4.2.2	Fillcrete.....	- 54 -
4.2.3	Materiály na bázi polymeru	- 54 -
4.2.4	Materiály na bázi cementu.....	- 55 -
4.2.5	Inkoustové pojivo Jetting	- 55 -
5	KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ 3D TISKÁREN.....	- 56 -
5.1	RÁMOVÉ 3D TISKÁRNY	- 56 -
5.2	3D TISKÁRNY S ROBOTICKOU RUKOU.....	- 57 -
5.3	MOBILNÍ 3D TISKÁRNY	- 58 -
6	NAVRHOVÁNÍ, KONSTRUOVÁNÍ A DIMENZOVÁNÍ STAVEB ZE 3D TISKU.....	- 60 -
6.1	POSTUP PŘI NÁVRHU 3D STAVBY	- 60 -
6.2	NAVRHOVÁNÍ STAVEB.....	- 60 -
6.3	DIMENZOVÁNÍ STAVEB.....	- 61 -
6.4	TECHNOLOGIE PROVÁDĚNÍ.....	- 61 -
6.5	PŘEDPISY	- 62 -
6.6	DŮLEŽITÉ VLASTNOSTI SMĚSI.....	- 62 -
6.6.1	Vytlačitelnost.....	- 63 -
6.6.2	Pevnost v tlaku	- 63 -
6.6.3	Tekutost.....	- 64 -
6.6.4	Stavitelnost.....	- 65 -
6.6.5	Otevřený čas.....	- 65 -
6.7	VÝHODY 3D TISKU	- 66 -
6.8	NEVÝHODY 3D TISKU	- 67 -
7	PŘÍKLADY STAVEB ZE 3D TISKÁRNY.....	- 68 -
7.1	10 MALÝCH DOMŮ V ŠANGHAJI.....	- 68 -
7.2	KANCELÁŘ V DUBAJI	- 68 -
7.3	PĚŠÍ MOST V MADRIDU	- 70 -
7.4	DŮM APIS COR.....	- 71 -
7.5	OCELOVÝ MOST V AMSTERDAMU	- 72 -
7.6	BUDOVA BAUHAUS V AMSTERDAMU	- 73 -
7.7	CANAL HOUSE V AMSTERDAMU	- 74 -
7.8	KASÁRNY PRO AMERICKOU ARMÁDU.....	- 77 -

8 PRAKTICKÁ ČÁST – MODEL BUDOVY ZE 3D TISKÁRNY.....	- 78 -
8.1 POROVNÁNÍ METOD S OHLEDEM NA VÝSTAVBU	- 78 -
8.1.1 <i>Základy</i>	- 79 -
8.1.2 <i>Nosný systém</i>	- 80 -
8.1.3 <i>Výplňové konstrukce</i>	- 82 -
8.1.4 <i>Schodiště</i>	- 83 -
8.1.5 <i>Obvodový a střešní plášť</i>	- 84 -
8.1.6 <i>Povrchové úpravy</i>	- 86 -
8.1.7 <i>Dilatační spáry</i>	- 88 -
8.1.8 <i>Tepelně technické vlastnosti</i>	- 89 -
8.2 POROVNÁNÍ METOD.....	- 90 -
8.3 MODEL ZE 3D TISKÁRNY	- 93 -
9 ZÁVĚR	- 99 -
SEZNAM OBRÁZKŮ	- 101 -
SEZNAM TABULEK	- 103 -
SEZNAM ROVNIC	- 103 -
POUŽITÝ SOFTWARE	- 103 -
CITOVANÁ LITERATURA.....	- 104 -
PŘÍLOHY	- 109 -

Seznam symbolů a zkratek

ABS	Akrylonitril butadien styren (Akrilonitril Butadien Styren)
AM	Aditivní výroba (proces) (Additive Manufacturing)
BIM	Informační model budovy (Building Information Modeling)
BJ	Tryskání s pojivem (Binder Jetting)
CC	Vytváření kontur (Contour Crafting)
CP	Betonový tisk (Concrete Printing)
C-Fab	Buněčná výroba (Cellular Fabrication)
CTPVV	Centrum technického a přírodovědného vzdělávání a výzkumu (Center of Technical and Science Education and Research)
DS	Tisk ve tvaru D (D-Shape)
EBM	Tavení elektronovým paprskem (Electron Beam Melting)
EPS	Expandovaný polystyren (Expanded polystyrene)
ETH	Švýcarský federální technologický institut v Curychu (Eidgenössische Technische Hochschule Zürich)
FDM	Model fúzaného vkladu (Fused Deposit Modeling)
FDM (tiskárna)	Roztavené ukládání modelování (Fused Deposition Modeling)
FEF	Výroba vytlačování za mrazu (Freeze-form Extrusion Fabrication)
FGM	Funkčně gradovaný (zesilovaný) materiál (Functionally graded materiál)
LOM	Výroba laminovaných předmětů (Laminated Object Manufacturing)
LMD	Laserové ukládání kovů (Laser Metal Deposition)
MJM	Multi-Jet modelování (a PolyJet) (Multi-Jet Modeling (and PolyJet))
NTIS	Nové technologie pro informační společnost (New Technologies for the Information Society))
PA	Polyamid (Polyamide)
PLA	Polylaktid, tzv. Biologicky rozložitelný plast (Polylactide)
PP	Termoplastický polymer (Polypropylen) (Polypropylene)
SA	Selektivní agregace (Selective Aggregation)
SBS	Styren-butadien-styren (Styrene-butadiene-styrene)
SDK	Sádrokarton (Plasterboard)
SLA	Stereolitografie (Stereolithography)

SLM.....	Selektivní laserové tavení (Selective Laser Melting)
SLS.....	Selektivní laserové slinování (Selective Laser Sntering)
XPS.....	Extrudovaný polystyren (Extruded polystyrene)
ŽB.....	Železobeton (Reinforced concrete)
3DFP.....	3D pěnový tisk (3D Foam Printing)
3DP.....	Trojrozměrný tisk (Three-Dimensional Printing)

ÚVOD

Diplomová práce se zabývá 3D tiskem ve stavitelství, pozemním i inženýrským. V první kapitole jsou rozebrány praktické možnosti 3D tisku pro běžné použití. Dále v této práci je popsán rozvoj 3D tisku ve světě a u nás v České Republice. Ve třetí kapitole je přiblížen používaný software. Ve stavitelství je pro 3D modelování nejvíce používaný program ArchiCAD, který je zde popsán. Dále se tato práce věnuje nejvíce používaným metodám pro 3D tisk a s tím je spojeno i použití různých druhů materiálů a konstrukcí tiskáren. Další problematika, která je zde poprána se týká navrhování, dimenzování a konstruování staveb ze 3D tiskárny. Sedmá kapitola popisuje stavby, které jsou 3D tiskárnou už vytištěny, uvedeny do zkušebního provozu nebo slouží, jako prototypy.

Praktická část práce je zaměřena na návrh modelu budovy pro 3D tisk. Pro model budovy je zvolena naše vysoká škola, budova NTIS a CTPVV. V této praktické části práce jsou popsány dva způsoby výstavby objektu pomocí 3D metod. Tyto dva způsoby jsou poté porovnané s tradiční metodou stavby. Pro praktickou ukázkou 3D tisku je vytvořen model 1.NP budovy NTIS a CTPVV, který je vytištěn na 3D tiskárně.

1 Úvod do 3D tisku

3D tisk je aditivní výrobní proces (AM), tzn. že jednotlivé vrstvy materiálu jsou na sebe vrstveny tak, aby vytvořili předmět. Vše je řízeno počítačem. Díky tomu lze vytisknout i geometricky složité konstrukce. [1] [2]

3D tisk se objevil už v 80. letech 20. století. V roce 1976 vznikla inkoustová tiskárna. 3D tiskárna je té inkoustové hodně podobná, obě potřebují k tisku datové soubory. V roce 1984 začala tiskárna k tisku používat i jiný materiál než inkoust a tak se zrodil přímo 3D tisk a i 3D tiskárna. Ale až po 35 letech se začal plně projevit a začal být cenově dostupný. Začínají se objevovat malé tiskárny pro domácí tisk a velké tiskárny pro firemní účely. Doma je možné tisknout hračky a různé předměty z plastu, zatímco velké tiskárny mohou vyrobit velké, složité a vysoce namáhané prvky.

3D tisk vynalezl americký inženýr Charles (Chuck) Hull v roce 1984. Nalezl tiskový proces, který z datového souboru vytvořil skutečný fyzický 3D objekt. A tím vznikla stereolitografie. [1] [2] [3] [4] [5]

3D tiskárny pro domácí tisk se v této době velice rozmohly. Dnes se dají koupit skoro kdekoliv. Je to proto, že lidé začínají více experimentovat a vytvářet si věci po svém. Na tomto stroji si vyrobí skoro vše, co je jen napadne. Stačí k tomu mít počítač s určitým programem a 3D tiskárnu a mít trochu představivosti. Některé věci se dají rovnou stáhnout na internetu a jen vytisknout anebo si je upravit podle svého.

1.1 Neprůmyslové aplikace 3D tisku

V dnešní době je možné vytisknout na 3D tiskárně už téměř cokoli. Využívá se k tisku modelů, hraček, součástek, ale i v lékařství.

V lékařství se používá k tisku náhradních kloubů (především kyčelních), zdravotnických pomůcek, protéz, rovnátek (*Obr. 1*) a dalších prvků. Rovnátko např. vyrábí společnost Invisalign. Jsou speciální, protože jsou skoro neviditelná a dokonale se přizpůsobí tvaru chrupu. Každý kus vzniká na zakázku a neexistují dva stejné. Tato firma vyrobí ročně asi 17 milionů těchto rovnátek. [6]



Obr. 1: Rovnátko od společnosti Invisalign

Zdroj: [7]

Díky 3D tisku můžou firmy vytisknout zákazníkům vše, co je napadne. Zákazník to dostane vytisknutý přímo na míru.

V budoucnosti se budou některé předměty vytisknout rovnou v obchodech, tzn. že ne všechno zboží bude přímo na skladě. Některé zboží se v obchodě přímo vytiskne nebo si zákazník zakoupí příslušný CAD soubor a vytiskne si zboží doma. V řetězci hobby marketu Lowe's Innovation Labs v obchodě Orchard Supply Hardware v kalifornském Mountain View už tato možnost funguje od roku 2015. Zákazník si zde může za pomoci personálu nebo sám upravit předmět nebo navrhnout předmět, který chce vytisknout. A ten poté také dostane. Další společností, která poskytuje takovéto služby je společnost UPS Store, která toto provozuje už od roku 2013. Má více než 4800 poboček v USA a v Kanadě. Zákazník si zde také může navrhnout vlastní předmět, anebo si upravit již hotový podle své potřeby a poté si ho nechat vytisknout. [6]

Toto je velice přívětivé. Pokud někdo bude nutně potřebovat nějakou součástku. Nebude muset chodit do obchodů, ale bude si jí moct objednat přes internet a doma nebo na pracovišti vytisknout během pár minut. Tím ušetří čas strávený na cestě do obchodu jinou prací a zároveň bude šetřit i životní prostředí, protože nepoužije automobil tak často, jako je tomu teď.

1.2 Průmyslové aplikace 3D tisku

Dnes se začíná 3D tisk objevovat i v průmyslu. Nejčastěji se využívá v leteckém, obranném, automobilovém a mechanickém průmyslu. Průmysl začíná používat 3D tiskárny k tisku různých součástek, které se dále používají. Dneska jsou 3D tiskárny, tak dokonalé, že se vytištěné součástky nemusí dále opracovávat. Ve strojírenství, tak odpadají další

procesy např. frézování, broušení, vrtání, soustružení a i svařování, které byli předtím potřeba provést, aby byla součástka dokonalá.

I ve stavitelství se 3D tisk začíná objevovat. Pomocí něj se začínají tisknout jednotlivé bloky a výjimkou nejsou ani celé budovy. Více je vše rozebrané v *kapitole 0*. [2]

[3] [8]

2 Vývoj 3D tisku ve stavitelství

3D tisk se začíná rozvíjet i ve stavitelství. Jako první se objevil u architektury, kde se pomocí něho tvoří modely jednotlivých detailů staveb, ale i celé budovy. Hlavní výhodou u těchto modelů je rychlost jejich vzniku a hospodárnost. Některé modely budov trvaly dvěma lidem postavit např. i 2 měsíce, zatímco s 3D tiskárnou to zvládne jeden člověk během pár hodin. Na těchto modelech se poté můžou dělat i různé testy, např. pro zatížení od větru, stabilitu při zemětřesení atd. [4] [5] [9]

V této práci tvoří praktická část vymodelování a vytištění 3D modelu. Vše bude probíhat na malé domácí tiskárně, kde se vytiskne model budovy, který se bude skládat z jednotlivých částí.



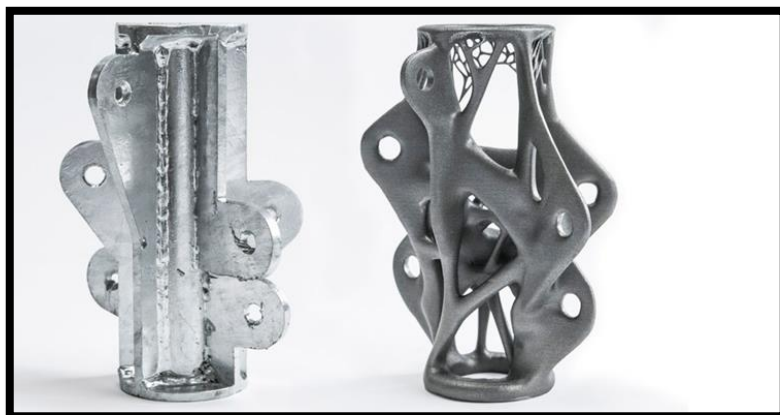
Obr. 2: 3D model budovy City Hall v Londýně

Zdroj: [5]

První kdo použil 3D tisk ve stavitelství byl pan Joseph J. Pegna v roce 1997. Navrhnul tisk pro velké struktury používané ve stavitelství a tím vynalezl proces zvaný Selektivní agregace (SA). Tento proces je určený pro tisk pevných tvarů o rozměrech nad 1 m. Tyto prvky mají poté podobnou pevnost v tlaku, jako normální konstrukce z betonu, ale pevnost v tahu je mnohokrát větší. Tato metoda se už dále nerozvíjí, ale má za následek inspiraci pro vývoj dalších podobných metod. Díky ní byly vynalezeny nové pokrokovější metody. [10]

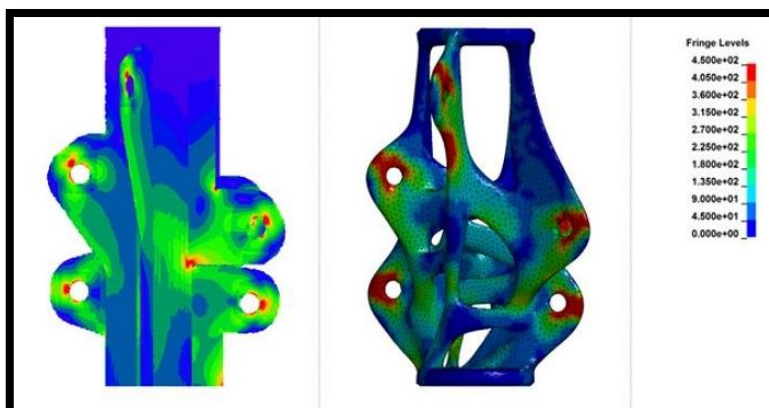
Vznikají i případy, kdy za pomoci 3D tisku byly vytištěny konstrukční prvky např. styčníky, ale jedná se spíše o experimenty. Na *Obr. 3* je první styčník vytvořený pomocí

běžné metody a druhý 3D tiskárnou. Poté je vidět na *Obr. 3* a *Obr. 4* porovnání rozložení napětí ve styčnicku. Je patrné, že u styčnicku ze 3D tiskárny vychází napětí lépe, než u klasického svařovaného styčnicku. [9]



Obr. 3: Porovnání tvaru styčnicku vyrobeného běžným způsobem a pomocí 3D tisku

Zdroj: [9]



Obr. 4: Rozložení napětí ve styčnicku při modelování topologickou optimalizací

Zdroj: [9]

Ve stavebním průmyslu se 3D tisk může více vyvinout díky novému stavebnímu informačnímu modelu BIM, který už se začíná hojně rozvíjet. [1] [11]

V modelu BIM se všechny stavby modelují ve 3D a jsou zde namodelovány i všechny inženýrské sítě. Je zde vidět kudy co povede, kolik bude potřeba materiálu a jak vše bude propojeno mezi sebou. Díky tomu by se na stavby mohli uplatnit nové technologické postupy, které jsou u metod 3D tisku.

Postupem času se 3D tisk začíná používat i ke stavbě budov. Díky přesně vytištěné konstrukci u složitějších nebo zakázkových předmětů lze snížit mzdové náklady a dále tím vzniká i méně odpadu. Pomocí různých metod se začínají tisknout i celé budovy. Už teď existuje spousta metod a materiálů, které se k tisku používají. Některé tyto metody a materiály jsou více rozebrány v kapitole 4. [1]

2.1 3D tisk ve světě

Prvním vynálezcem 3D tisku z materiálu na bázi betonu byl iránsko-americký profesor Behrokh Khoshnevis, který založil kalifornskou společnost Contour Crafting. [1] [9]

O 3D tisk se začíná zajímat více a více společností. Jako jsou firmy Skanska, AECOM nebo Vinci ve spolupráci s univerzitami nebo se startupy jako je WinSun, XtreeE, CyBe nebo Apis-Cor. Dále sem vstupují i firmy, které vyrábějí stavební hmoty, jako jsou Lafarge, DuPont, Holcim nebo BASF, které chtějí vyvinout speciální materiály pro 3D tisk. [9]

Americká nezisková společnost New Story se také začíná zabývat 3D tiskem. Jejím cílem je pomáhat v rozvojových zemích s výstavbou bydlení. A tak pracuje na projektu, kde by pomocí 3D tisku postavila celé čtvrti domů v Salvadoru. Chce vytisknout domy o dispozici 2+1, které by stáli kolem 3 500 USD (80 000 Kč) a výstavba by trvala jeden den. [12]

3D tisk zaujal v Americe i mariňáky. Jejich velitelství US Marine Corps Systems Command nedávno vyvinulo novou technologii pro 3D tisk kasáren. Jejich prototyp 3D tiskárny dokáže vytisknout betonové kasárny ani ne za dva dny. Toto velitelství spolupracovalo s mariňáky I Marine Expeditionary Force a s jejich pomocí vytisklo kasárny ve výzkumném centru v Champaign v Illinois. [13] [14]

Americká společnost CAZZA se zabývá speciálními roboty pro 3D tisk. Tato firma postavila tiskárnu Cazza X1, která je navržena na tisk domů pro katastrofické oblasti. Objekty z ní vytištěné mají vydržet tornáda, zemětřesení a další katastrofy. [8]

Čínská společnost WinSun Decoration Design and Engineering se také zabývá 3D tiskem. K tisku používá obrovské tiskárny a zrecyklovaný materiál z průmyslových odpadů, který přidává do betonu. Díky tomu považuje své stavby za ekologické. V roce 2014 vytiskla svůj první dům a v současnosti má již postaveno několik staveb, např. pětipodlažní bytový dům nebo deset domů, které vytiskla za jeden den. [1] [12] [15]

Další čínská společnost Qingdao Unique products Develop Co představila v červenci 2014 největší 3D tiskárnu. Vše proběhlo v Qindau na světové konferenci o 3D tisku. Dává si za úkol, že na ní vytiskne Chrám nebes, který bude mít výšku 7 metrů. [1]

Ve světě se 3D tisk rozvíjí nejvíce v Číně. Je to dáno především tím, že je v technologii mnohem vyspělejší než ostatní země.

2.2 3D tisk v Evropě

V Evropě je 3D tisk trochu opomíjený a to zvláště proto, že jsou zde přísná environmentální a bezpečnostní pravidla, která se musí dodržovat. Přesto se zde najdou společnosti, které se 3D tiskem zabývají. [12]

Rakouská firma Baunit Beteiligungen GmbH se začíná také zajímat o 3D tisk ve stavitelství. Ve spolupráci s Universität Innsbruck vyvíjela tři roky betonové díly, které může vyrábět ve velikosti od 50 cm do 5 m. Pro tisk těchto dílů využívá průmyslového robota od firmy ABB Robotics. [15]

V roce 2014 mezi sebou podepsaly smlouvu firma Skanska a Loughborough University, ve které se dohodli na vývoji prvního komerčního betonového tiskového robota na světě. [1] [11]

V roce 2018 měla začít rakouská firma Doka dodávat na trh 3D tiskárny k tisku rodinných domů, které se vytisknou za 2 dny. Tohle všechno jí umožnila kalifornská společnost Contour Crafting. Ta jí v červnu 2017 odprodala 30 % podíl ve své firmě. Zatím, ale k dodání 3D tiskáren nedošlo. [9]

Další evropskou firmou, která začíná využívat 3D tisk, je ruská společnost Apis Cor. Ta dokáže vytisknout dům o rozloze 37 m² za 24 hodin a to i v sibiřských mrazech. Jako materiál používá vláknitý beton nebo geopolymery.

Její zakladatelka a generální ředitelka Nikita Chen-iun-tai řekla: „*Věříme, že výroba aditiv je účinným řešením proti bytové krizi, a proto jsme náš projekt vyvinuli. Doufáme, že za několik let bude tento přístup důkladně otestován v různých částech světa, aby se prokázala jeho proveditelnost. Věříme, že tuto technologii přijme stále více stavebních společností, jak tomu již dnes je.*“ [8] [15] [16]

V roce 2018 se na první Mezinárodní konferenci o betonu a digitální výrobě ukázala firma BASF. Ta zde představila svojí firmu BASF 3D Printing Solutions. Zabývá se využitím 3D tisku u výroby bednění a betonových odlitků. [17]

Italská společnost WASP je další firmou, která se 3D tiskem zabývá. V září 2018

představila „nekonečnou 3D tiskárnu“. Je to systém, který se využívá hlavně pro tisk udržitelných domů. WASP si dala za cíl vyvinout 3D domy, které budou šetrné k životnímu prostředí. Tiskárny, které tato firma vyrobila, používají jako zdroj energie vítr, vodu nebo solární energii. Díky tomu mohou být tiskárny použity tam, kde není přístup k elektrické síti. [8] [16]

Francouzská společnost Constructions-3D vyrobila polární 3D tiskárnu. Tato tiskárna vytváří objekt uvnitř staveniště. Když je objekt hotov, tiskárna ho opustí předními dveřmi. Je složena z mechanické základny a robotického ramene. Rameno je vyšší než 8 m a vytiskne plochu o rozloze více než 250 m². [16]

Další francouzská společnost zabývající se 3D tiskem je Bouygues Construction. Ta se spojila ještě s Univerzitou v Nantes a společností Lafarge Holcim a společně vyvinuly průmyslového robota, který tiskne najednou ze tří materiálů. K tisku používají polymerní pěnu a beton. Pěna tvoří vnitřní a vnější plášť a zároveň slouží jako tepelná izolace. Beton tvoří prostřední vrstvu a slouží jako nosná konstrukce. [16]

2.3 3D tisk v České Republice

V České Republice se zatím 3D tisk moc neujal. Jediný přínos pro něj je projekt pana Dr. techn. Ing. Jana Podrouška z Fakulty stavební VUT v Brně. Projekt využívá „*geometrii minimálních ploch pro výplňovou strukturu sloupů a umožňuje dosáhnout při tisku z kukuřičného plastu velmi slibných statických vlastností*“. [9]



Obr. 5: Vzorok sloupů z kukuřičného plastu

Zdroj: [9]

2.4 3D tisk ve vesmíru

O 3D tisk se začíná zajímat i americká firma SpaceX. Ta chce pomocí 3D tisku vytisknout spalovací komoru přistávacích motorů SuperDraco pro kosmickou loď Dragon V2. Spalovací komora musí vydržet teplotu několika tisíc stupňů a tlak až 7 MPa po dobu 25 sekund. Při zkoušce prototypu vydržela komora 80 testů po celkové době 300 sekund. [3]

Vesmírné agentury NASA a ESA se též začínají zabývat 3D tiskem ve vesmíru. Začali ho zkoumat už před 15 lety a chtěli by pomocí něho postavit na Měsíci a Marsu základnu. Výstavba by probíhala pomocí robotů na místě ještě před příletem posádky. [8]
[9]

Pro výzkumné účely by to mělo rozhodně velké plus. Do vesmíru by se poslala nejprve 3D tiskárna s materiálem a s posádkou, která by jí obsluhovala. Vše by vytiskly na místě a připravili k provozu. Posádka, která by poté přiletěla, měla už hotové celé zázemí potřebné k přežití.

Jako hlavní materiál by se mohl využít i vesmírný prach (písek), který by se nacházel na těchto planetách. Jedinou nevýhodou je, že nejdříve se musí vynalézt metoda, která by byla schopna toto provést.

3 Softwarové nástroje

Už od 80. let 20. století se začínají objevovat návrhy staveb, které byly založeny na parametrickém a generativním navrhování. Toto navrhování vede k tzv. „*tvarům volných forem založených na dvakrát zakřivených plochách*“. Takové stavby byly na realizaci velmi složité, a proto jich je velmi málo.

Dnes, v době počítačů, je takové navrhování obvyklé. Parametrické navrhování pomocí počítače v sobě uchovává celou historii návrhu a díky tomu umožňuje kdykoli změnit parametry. U generativního navrhování je výsledek generován algoritmem díky okrajovým podmínkám, fyzikálním parametrům a předem určeným cílům, jako je hmotnost, konstrukční materiál, cena atd. Další navrhování je tzv. topologická optimalizace, ta napodobuje principy evoluce živých organismů. Optimalizuje vnitřní a vnější tvar a používá materiál tak, aby byl maximálně využit. Tvary, které vznikají, díky tomuto navrhování připomínají přírodní tvary s vylehčenými miniaturními komůrkami. [9]

Model budovy je vytvořený počítačem za pomoci různých softwarů (většinou CAD) a je uložen ve formátu .STL (STereoLitografie). S tímto formátem umí pracovat všechny 3D tiskárny. Soubor ve formátu STL představuje model, jako prostorové body, které se mezi sebou propojují do série trojúhelníků. Ty se poté nazývají „sít“ nebo „sítový objekt“ a celý soubor se nazývá „plášťový model“. Vytvořený model je možné prohlížet ze všech stran, takže člověk už má představu, jak bude vypadat. Některé softwary si zde přiblížíme. Nebo lze model vytvořit pomocí 3D skeneru. Tiskárna díky těmto datům stanoví jednotlivé vrstvy tiskové směsi a vytvoří daný objekt. Podle složitosti zadání se odvíjí délka celkového tisku. [1] [6] [18]



Obr. 6: Ukázka modelu budov ze 3D tiskárny

Zdroj: [4]

3.1 TinkerCAD

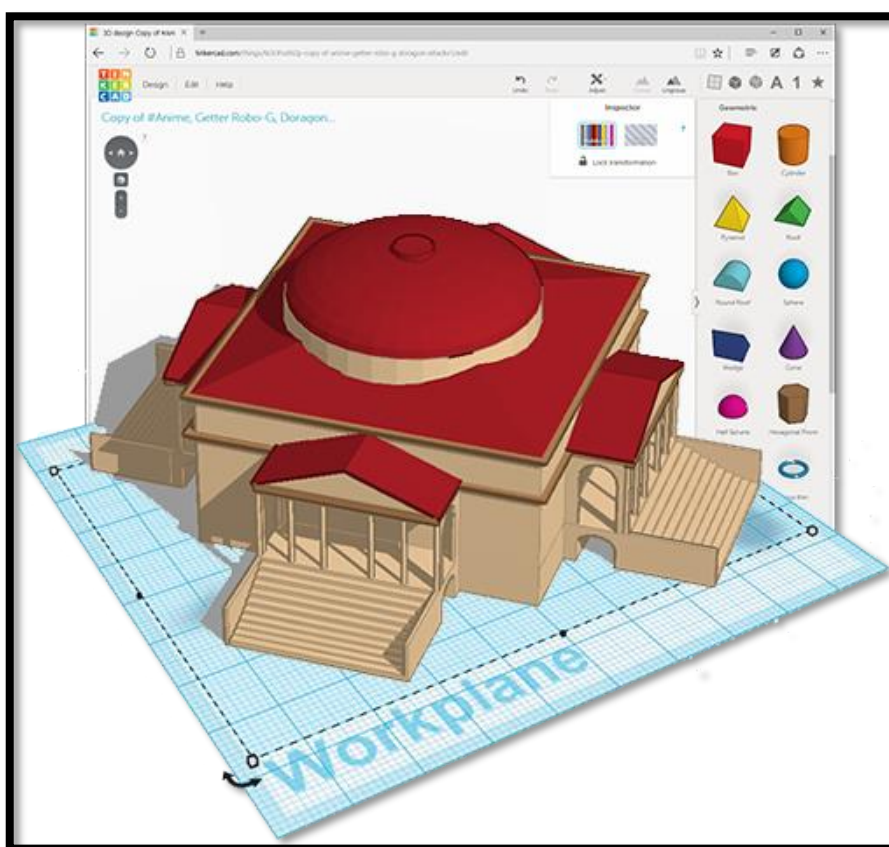
TinkerCAD je program pro začátečníky s 3D tiskem. Je od společnosti Autodesk a je k získání online na internetu a bezplatně. Naučíte se v něm snadno a rychle vytvářet 3D modely. Je jednoduchý a tak s ním dokáží programovat i děti od 9 let. Je vhodný pro domácí použití.

TinkerCAD pracuje přes internet na prohlížeči. Díky tomu se na něj můžete připojit z jakéhokoli počítače. Nejlépe pracuje na prohlížečích Chrome, Firefox nebo Safari. Můžete ho spustit i na prohlížeči Internet Explorer, ale tam se vám může stát, že se bude zasekávat a nepůjde plynule.

K přihlášení do tohoto programu stačí vytvořit uživatelský účet. Pokud se na účet přihlašuje osoba mladší 13 let, musí mu účet nejdříve schválit rodiče a až poté se dostane přímo do programu. Schválení může trvat až 24 h, proto pokud ho děti využívají ve škole k výuce, musí o schválení zažádat dříve.

Než se pustíte přímo do návrhu je vhodné si objekt nejdříve načrtnout na papír, ať vidíte, jak bude přibližně vypadat. Po spuštění programu je vhodné si projít nabídku online návodů, které jsou zdarma a jsou dostupné na tlačítku „Learn“ (výuka). Pod dalším tlačítkem „Create new design“ (vytvořit nový návrh) lze nalézt novou prázdnou plochu pro vaše tvoření. Pod tlačítkem „Geometric“ (geometrické tvary) se objeví nabídka s již předdefinovanými tvary. Zde si stačí vybrat tvar, přetáhnout ho do „Workplane“ (pracovní

plocha) a poté si ho může upravit podle sebe. Otáčení objektů je pomocí myši nebo přímo pomocí aplikace. V levém horním rohu se nachází ovladač k tomu určený. Pod tlačítkem „Inspector“ lze měnit barvy objektu nebo dělat pomocí něj otvory. Jednotlivé prvky lze mezi sebou provázat. Tím ušetříte hodně času při přesouvání objektů, protože se přesunou všechny provázané objekty najednou. Provázat lze prvky tlačítkem „Group“ (seskupit) a pro rozdělení prvků slouží zase tlačítko „Ungroup“ (rozdělit). Pomocí dalšího tlačítka „Shape Generators“ (generátory tvarů) lze vkládat do pracovní plochy text. Text lze poté měnit tlačítkem „Inspector“. Nakonec když je vymodelovaný objekt hotový, uloží se tlačítkem „Download for 3D Printing“ (stáhnout k 3D tisku) pod formátem „.STL“. Pouze soubor s tímto formátem lze vytisknout na 3D tiskárně. [6] [19]

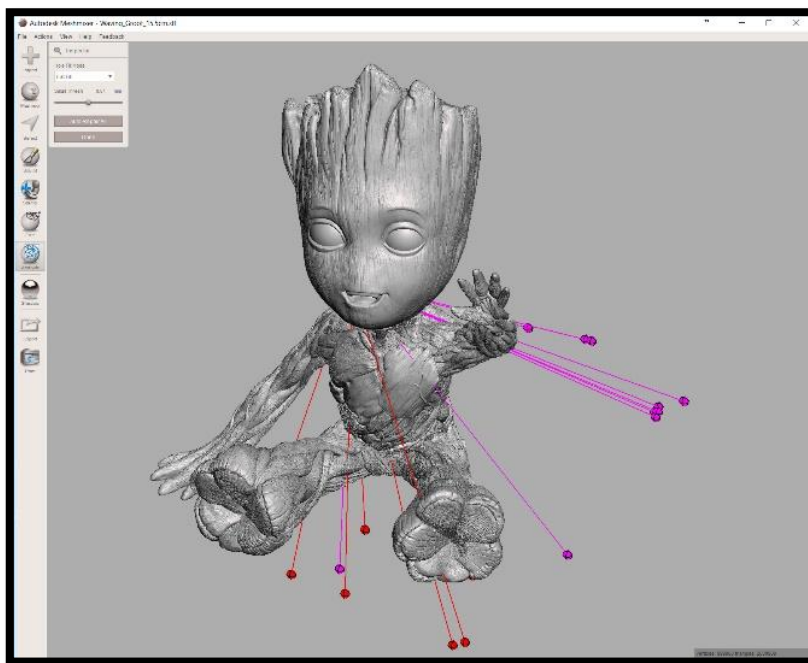


Obr. 7: Ukázka vymodelovaného objektu v programu TrinkerCAD

Zdroj: [20]

3.2 Meshmixer

Meshmixer je také program od společnosti Autodesk a je též dostupný zdarma. Je komplikovanější než TinkerCAD a nabízí mnohem více možností pro modelování. Modelují v něm jak začátečníci, tak i pokročilý. Pokročilý uživatelé v něm dokáží vytvořit složité tvary až mistrovská díla. Využívá se především pro domácí účely. [6]













Obr. 8: Ukázka vymodelovaného objektu v programu Meshmixer

Zdroj: [21]

Tento program je hodně oblíbený u kurzů pro 3D tisk. Propojuje digitální a fyzickou sféru pomocí 3D modelů a nástrojů k úspěšnému tisku. Tento program se naučí používat také děti od 9 let. Obsahuje přes 80 různých nástrojů, některé se mohou používat hned, jiné se musí před používáním naučit.

Tento program se nepoužívá přes internetový prohlížeč, ale musí se stáhnout a nainstalovat do počítače. Při instalaci se musí postupovat podle daných pokynů. Při prvním spuštění se objeví tabulka s počátečními volbami. Po vybrání příslušného souboru se otevře okno, kde se na levé straně obrazovky ukáží nástroje. [6]

Tab. 1: Nabídka nástrojů programu Meshmixer

	Import
	Tvorba sítě přetažením (Drag and Drop Meshing)
	Výběr nebo úpravy oblastí sítě (Selects / Edit Areas of the Mesh)
	Tvarování z digitální hlíny (Sculpting with Digital Clay)
	Vytvoření razítek v síti (Create Stamps on the Mesh)
	Manipulace s celou sítí najednou (Manipulace the Mesh All at Once)
	Analýza sítě (Analyze the Mesh)
	Změna prezentace sítě (Change How the Mesh is Presented to You)
	Uložení sítě do souboru typu STL nebo OBJ (Save Your Mesh as .STL / .OBJ)
	Zobrazení rozhraní 3D tiskové desky (Show the 3D Print Bed Interface)

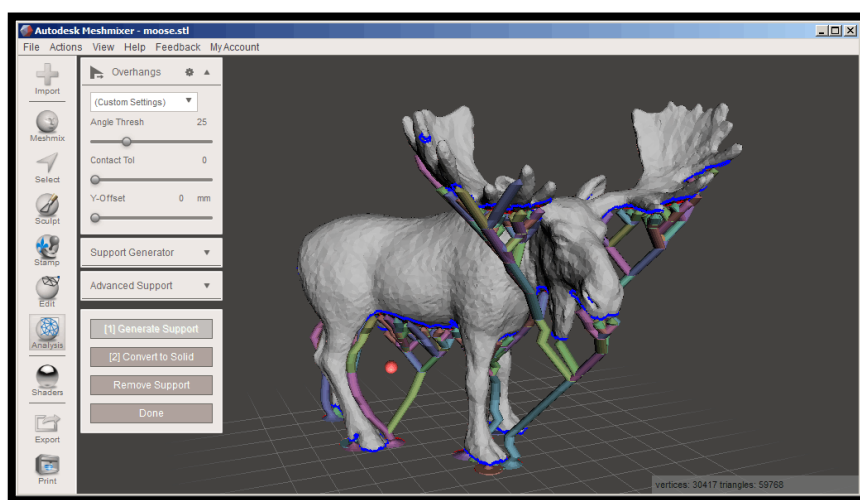
Zdroj: [6] [21]

První model vytvořený v tomto programu byl model králíka „Stanford Bunny“. Ten byl vytvořený v roce 1993 pomocí digitalizovaného 3D skeneru.

3D model musí být vždy uzavřený celek, jinak nepůjde vytisknout. Tento program obsahuje nástroje, které zjistí, zda je vytvořený model v pořádku a pokud ne, tak jsou schopný jej opravit. Nástroj „Inspector“ dokáže objevit chyby typu otvorů nebo malých oddělených částí. Model se musí otočit dokola, aby se zjistily všechny tyto otvory nebo oddělené části a mohli se poté pomocí nástroje „Inspector“ opravit. Otvory nebo části jsou vidět díky malému modrému „špendlíku“, který ukazuje všechna tato místa. Když se na špendlík klikne, všechny otvory se vyplní. Nakonec se klikne na tlačítko „Done“ (hotovo) a tím je model připraven k tisku. Nástroj „Inspector“ je vhodné použít u každého modelu, ať už je vytvořený uživatelem nebo je stažený z internetu, protože tím se zjistí, zda je model v pořádku pro tisk. [6]

Program Meshmixer zahrnuje více než 80 nástrojů. Další nástroj, který je u programu Meshmixer užitečný je tvorba dočasných podpor. Ty slouží k podepření částí modelu, které přecházejí z dané oblasti. Do modelu se přidají tlačítkem „Analysis → Overhangs“

(analýza → převisy). Zde si vyberete z možností v „Custom settings“ (vlastní nastavení), které odpovídají vaší tiskárně, např. „Ultimaker2“. Poté se na modelu červeně vybarví místa, kde budou vytvořeny pomocné podpory. Nakonec se stiskne tlačítko „[1] Generate Support“ (generovat podporu). Tím program zařídí, aby se vytvořili při tisku dočasné podpory pro přečnívající části. Než se vše začne tisknout, vymodelují se v programu, aby jste viděli, kde budou umístěné (Obr. 9). Pokud vám budou překážet nebo vadit, je možné s nimi hýbat nebo je i smazat. Pokud chcete ukončit nástroj dočasných podpor, stiskněte tlačítko „Convert to Solid“ (převést na plné těleso) a nakonec se objeví okno s dotazem na vytvoření „New Object“ (nový objekt) a „Replace Existing“ (nahradit stávající). Stiskněte jedno z těchto tlačítek a tím ukončíte nástroj dočasných podpor a vrátíte se zpět na hlavní stránku. Nakonec už stačí stisknout jen „Export“ anebo to uložit pro 3D tisk. [6]



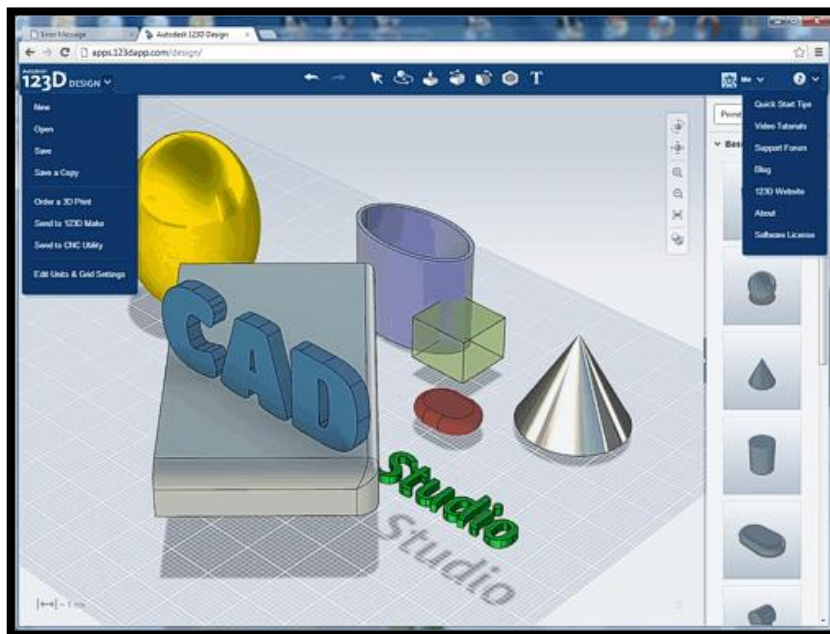
Obr. 9: Ukázka dočasných podpor v programu Meshmixer

Zdroj: [22]

V programu Meshmixer je spousta nástrojů. Zde se podrobněji rozebrali pouze některé nejvíce používané. Je dobré si projít i ostatní nástroje a vyzkoušet si, co vše dokáží vymodelovat. [6]

3.3 123D Design

Další program od společnosti Autodesk je 123D Design. Je to také jednoduchý program. Používají ho zejména nadšenci pro 3D tisk, kutilové a děti. Vytváří se v něm jednoduché tvary, jako je krychle, kužel nebo válec. Pracuje se zde s náčrtky ve 2D a po přidání výšky se náčrtek přemění na model ve 3D. Poté stačí jen jednotlivé tvary spojovat, odebírat, klonovat a rozdělovat podle toho, jak je potřeba. [23] [24]



Obr. 10: Pracovní plocha programu 123D Design

Zdroj: [24]

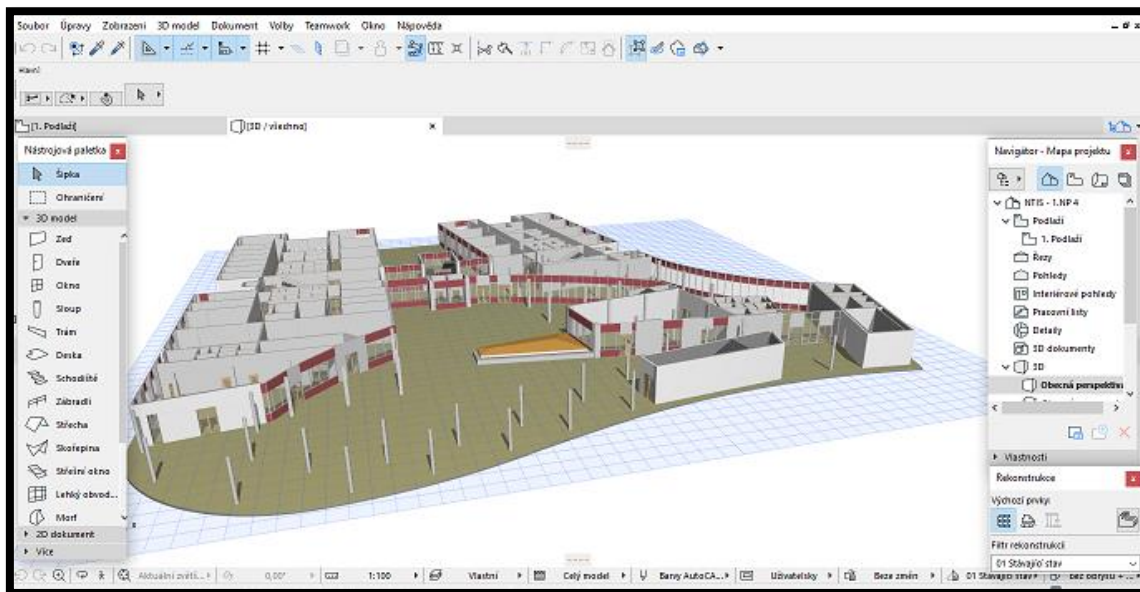
3.4 ArchiCAD

Další program pro 3D modelování je ArchiCAD. Vyvinula ho maďarská společnost Graphisoft v roce 1982 pro 2D projektování a od roku 1987 i pro 3D. Je rozšířený po celém světě a využívá ho přes 150 000 architektů.

ArchiCAD je program, který se musí nainstalovat do počítače. Není volně dostupný, proto je zapotřebí mít od něj platnou licenci, jinak nebude fungovat. Je možné si ho před pořízením licence vyzkoušet v demo verzi na 30 dní. Tak zjistíte, zda vám bude vyhovovat, anebo ne. Je to program, ve kterém se v současnosti navrhují stavby v BIM projektování.

Slouží pro modelování 2D i 3D objektů a především se v něm modelují stavební konstrukce. Aby se vše správně vytisklo, musí se zadat správné měřítko pro tisk. Lze

tisknout všechny prvky, ať se jedná o schodiště, vybavení nebo stěny. Vybavení je možné do projektu vložit z knihoven, které jsou zde k dispozici. Vytiskne se vše, co je ve výkresu. Jediné co je zde nevýhodou, je to, že se u 3D modelu s více podlažími vytiskne celý model najednou. Je proto lepší tisknout každé patro zvlášť nebo model rozdělit v jiném programu na jednotlivé části a ty poté poskládat dohromady. [23] [25] [26]



Obr. 11: Pracovní plocha programu ArchiCAD

Zdroj: Autor

4 Metody 3D tisku a materiál

4.1 Metody

Ve stavitelství existuje pro 3D tisk spousta tiskových metod. V následujících tabulkách je většina z nich představena. V první tabulce (*Tab. 2*) je název metody, stručný popis procesu a potřebný materiál. Ve druhé tabulce (

Tab. 3) je přehled konstrukcí, na které se 3D tisk používá, vlastnosti konstrukcí, rychlost tisku a výška tištěné vrstvy. Dále jsou v této kapitole některé vybrané metody více představeny a je zde rozebrán i potřebný materiál pro 3D tisk. [10]

Tab. 2: Přehled AM metod s potenciálem ve stavitelství – 1 část

Metoda		Vlastnosti procesu	Potřebné materiály	Stav výchozího materiálu
CC	Vytváření kontur (Contour Crafting)	Vytlačování, Vyžaduje podpory	Beton, keramika	Pasta
CP	Betonový tisk (Concrete Printing)	Vytlačování, Opětovně použitelné podpory	Beton	Pasta
C-Fab	Buněčná výroba (Cellular Fabrication)	Vytlačování, Nevyžaduje podpory	Polymery	Pasta
3DFP	3D pěnový tisk (3D Foam Printing)	Vytlačování, Nevyžaduje vždy podpory	Polyuretanová pěna (PUR)	Kapalina
FDM	Model fúzaného vkladu (Fused Deposit Modeling)	Vytlačování, Vyžaduje podpory	Keramika, sklo, polymery	Pasta
FEF	Výroba vytlačování za mrazu (Freeze-form Extrusion Fabrication)	Vytlačování, Tuhnutí zmrazením, Nevyžaduje podpory	Keramika, kovy, FGM	Pasta
DS	Tisk ve tvaru D (D-Shape)	Binder Jetting, Nevyžaduje podpory	Pískovec	Prášek
3DP	Trojrozměrný tisk (Three-Dimensional Printing)	Binder Jetting, Nevyžaduje podpory	Pískovec, keramika, polymery, kovy	Prášek
SLA	Stereolitografie (Stereolithography)	Vat Photopolymerization, Vyžaduje podpory	Keramika, polymery, kovy	Kapalina

Pokračování Tab. 2

Metoda		Vlastnosti procesu	Potřebné materiály	Stav výchozího materiálu
MJM	Multi-Jet modelování (a PolyJet) (Multi-Jet Modeling (and PolyJet))	Tryskání materiálu, Vyžaduje podpory	Polymery, kovy, FGM	Kapalina
LOM	Výroba laminovaných předmětů (Laminated Object Manufacturing)	Laminování plechu, Vyžaduje podpory	Keramika, polymery, kovy, dřevo, FGM	Pevné listy
SLS	Selektivní laserové slinování (Selective Laser Sintering)	Fúze s práškovým ložem, Nevyžaduje podpory	Keramika, sklo, polymery, kovy	Prášek
SLM	Selektivní laserové tavení (Selective Laser Melting)	Fúze s práškovým ložem, Nevyžaduje podpory	Keramika, sklo, kovy	Prášek
EBM	Tavení elektronovým paprskem (Electron Beam Melting)	Fúze s práškovým ložem, Nevyžaduje podpory	Kovy	Prášek
LMD	Laserové ukládání kovů (Laser Metal Deposition)	Řízené ukládání energie, Nevyžaduje vždy podpory	Kovy, FGM	Prášek, Pevné dráty

Zdroj: [10]

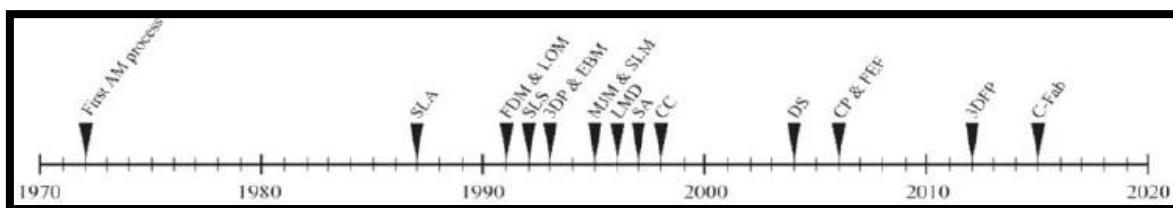
Tab. 3: Přehled AM metod s potenciálem ve stavitelství – 2 část

Aplikace ve stavitelství	Maximální objem sestavení (m³)	Strukturální vlastnosti	Rychlost tisku	Výška vrstvy (mm)
Přístřeší a bydlení (na místě), Stěny	55,7	Nosné, Zesílení možné	1,2 m/min. lineární, 0,13 m/h v ose z	>13
Zakřivené obkladové panely, Strukturální objekty, Fasádní prvky	128	Nosné, Zesílení možné	5 m/min lineární, Dlouhá otevřená doba	6 – 25
Vnitřní příčky, Dekoratивní stěny /prvky/stropy, Bednění	324	Nenosné, Podpora pro beton	0,68 kg/h	1 – 10
Izolační bednění (stěny), Nouzové bydlení	2786	Nenosné	100 – 200 mm/s lineární, Rychlá doba vytvrzování	10 – 20
Velké architektonické komponenty, Nestandardní cihly, Konstrukční prvky	216	Nosné, Nejsilnější AM proces založený na polymeru	240 – 350 mm/s lineární	0,04 – 0,33
Malé funkčně odstupňované kompozitní a kovové části	0,13	Nosné	127 – 250 mm/s lineární	0,5 – 0,65
Funkční stěny, oddíly, panely, Formy pro volný tvar	180	Nosné, Vlákno vyztužené	6,25 mm/h v ose z	4 – 6
Dekorace budov, Zakřivené bednění, Formy pro volný tvar	8	Nenosné	15 – 50 mm/h v ose z	0,09 – 0,3

Pokračování Tab. 3

Aplikace ve stavitelství	Maximální objem sestavení (m ³)	Strukturální vlastnosti	Rychlost tisku	Výška vrstvy (mm)
Stavební dekorace	1,18	Nenosné	10 – 100 mm/h v ose z	0,05 – 0,15
Malé detailní objekty z více materiálů	0,4	Nenosné (křehké)	15,4 mm/h v ose z	0,016 – 0,03
Kovové/dřevěné díly, Inteligentní konstrukce	6	Nosné	6 mm/h v ose z, Dlouhé zpracování	0,05 – 0,3
Kovové fasádní komponenty, Stavební spoje	0,15	Nosné	20 – 35 mm/h v ose z	0,1 – 0,2
Kovové fasádní komponenty	0,72	Nosné	7 – 8mm/h v ose z	0,1 – 0,2
Složité uzly, Systémy pro zasklení kovů	0,04	Nosné	6 – 7 mm/h v ose z	0,1 – 0,5
Složité velké díly, Zesílení, Ochrana proti korozi	8,6	Nosné	10 – 40 mm/s lineární	0,1 – 1,8

Zdroj: [10]



Obr. 12: Přehled metod podle vývoje

Zdroj: [10]

Tab. 4: Porovnání AM metod mezi sebou – 1. část

Kategorie / Metoda		CC	CP	C-Fab	3DFP	FDM	FEF	DS	3DP
Měřítko	Velké	X		X	X			X	
	Střední		X	X		X			X
	Malé					X	X		X
Umístění	Výroba na místě	X			X	X		X	
	Prefabrikace		X	X	X	X	X	X	X
	Venkovní aplikace	X	X	X	X	X		X	
Materiál	Beton	X	X						
	Pískovec							X	X
	Keramika	X				X	X		X
	Sklo					X			
	Polymery			X	X	X			X
	Kov						X		X
	FGM						X		
Forma	Dvojitě zakřivené objekty		X	X	X	X		X	X
	Hladký povrch								

Zdroj: [10]

Tab. 5: Porovnání AM metod mezi sebou – 2. část

Kategorie / Metoda		SLA	MJM	LOM	SLS	SLM	SBM	LMD
Měřítko	Velké							X
	Střední	X		X				X
	Malé	X	X	X	X	X	X	X
Umístění	Výroba na místě							X
	Prefabrikace	X	X	X	X	X	X	X
	Venkovní aplikace				X	X	X	X
Materiál	Beton							
	Pískovec							
	Keramika	X		X	X	X		
	Sklo				X	X		
	Polymery	X	X	X	X			
	Kov	X	X	X	X	X	X	X
	FGM		X	X				X
Forma	Dvojitě zakřivené objekty	X	X		X	X	X	X
	Hladký povrch	X	X					

Zdroj: [10]

Z tabulek (Tab. 4, Tab. 5) je vidět, že ne všechny metody lze všude využít. Pro velké měřítko se využívají zejména metody Vytváření kontur (CC), Buněčná výroba (C-Fab), 3D pěnový tisk (3DFP) a Tisk ve tvaru D (DS). Ty se používají zejména pro tisk velkých konstrukcí.

Skoro všechny metody se dají použít pro tisk prefabrikovaných konstrukcí. Jen jedna metoda se k tomu nepoužívá a to je metoda Vytváření kontur (CC).

Pro venkovní aplikace se nepoužívají metody Výroba vytlačování za mrazu (FEF), Trojrozměrný tisk (3DP), Stereolitografie (SLA), Multi-Jet modelování (a PolyJet) (MJM) a Výroba laminovaných předmětů (LOM).

Jako materiál používá většina metod polymery nebo kov. S betonem pracují pouze 2

metody a to Vytváření kontur (CC) a Betonový tisk (CP).

Pro dvojité zakřivené objekty se používají skoro všechny metody, až na Vytváření kontur (CC), Výroba vytlačování za mrazu (FEF) a Výroba laminovaných předmětů (LOM).

Hladký povrch vytvoří pouze 2 metody. Jsou to Stereolitografie (SLA) a Multi-Jet modelování (a PolyJet) (MJM). U těchto metod není poté nutné dělat povrchové úpravy.

4.1.1 Stereolitografie

Stereolitografie (SLA) je první metoda pro 3D tisk, kterou vynalezl americký inženýr Charles (Chuck) Hull v roce 1984. Byla využívána především pro tisk menších konstrukcí. Podle této metody byla poté vyvinuta fotopolymerace.

Výhodou této metody byla velká přesnost a hladký povrch vytvořených konstrukcí.
[10]

4.1.2 3D tisk z cementových malt

U používaného materiálu ke 3D tisku se musí splňovat určité požadavky. Jako jsou:

- Malé rozměry zrn kameniva, aby prošly tryskou (tryska má průměr maximálně několik desítek milimetrů, proto je velikost zrna omezena maximálně na 4 mm)
- Rychlé tuhnutí, aby spodní vrstva unesla vrstvu vytištěnou nad ní
- Nízký vodní součinitel
- Vysoký obsah příměsí (křemičitý úlet, popílek, mikrosilica, atd.)
- Vysoký obsah přísad (plastifikátory, urychlovače)
- Přidaná vlákna, aby se omezilo smrštění

[9]

Kvůli těmto požadavkům nemůže být směs nazývaná betonem, ale cementovým kompozitem, maltou nebo pastou. Tato pasta se pak používá u dvou základních metod. [9]

4.1.2.1 3D tisk vytlačováním cementové malty – Vytváření kontur (Contour Crafting)

První, kdo tuto metodu použil, byl iránsko-americký vynálezce a profesor Behrokh Khoshnevis z Jihokaliifornské univerzity. Tato metoda je nejběžněji využívána ve stavitelství a je podobná nejrozšířenější metodě 3D tisku pro plast, tzv. tavného nanášení. Nejčastěji se pro tento tisk používá cementová malta, lze ale použít i sklo, nepálenou hlinu

nebo plast.

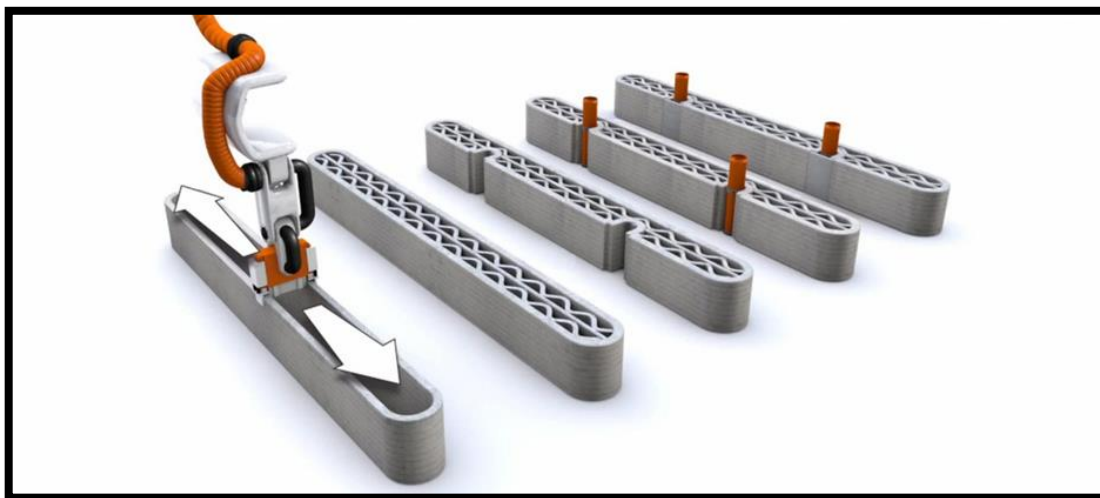
Na této metodě pracuje profesor Khoshnevis a jeho tým už od roku 1997. Během let přišli na řadu zlepšení a v roce 2004 si nechali metodu patentovat pod názvem Contour Crafting (CC), který je zároveň i názvem společnosti.

V této metodě se při tisku využívá nanášení provazců v horizontálních vrstvách, které jsou nanášeny na podkladní konstrukci. Provazce vznikají z betonové směsi, která je smíchána s dalšími přísadami a je vytlačována tryskou o průměru desítek mm². Směs se skládá z portlandského cementu typu II, písku, změkčovačů a vody. U jednotlivých vrstev musí být dodržena určitá únosnost. Každá vrstva musí unést samu sebe a ještě vrstvu, která přijde nad ní a nesmí nastat deformace. Proto se do směsi přidávají urychlovače tuhnutí. Nesmí se to s nimi, ale přehnat, aby směs nezačala tuhnout příliš rychle a tím pak došlo k nespojení vrstev mezi sebou. Návaznost jednotlivých vrstev je dána časovým intervalem tisku a délkou vrstev.

U tisku šikmých stěn nastává problém. Při domácím tisku z plastu se to řeší pomocí podpěr, které se poté odstraní. To u tisku z cementové malty bohužel nejde a proto je tato metoda ovlivněná maximálním sklonem 45° od svislice.

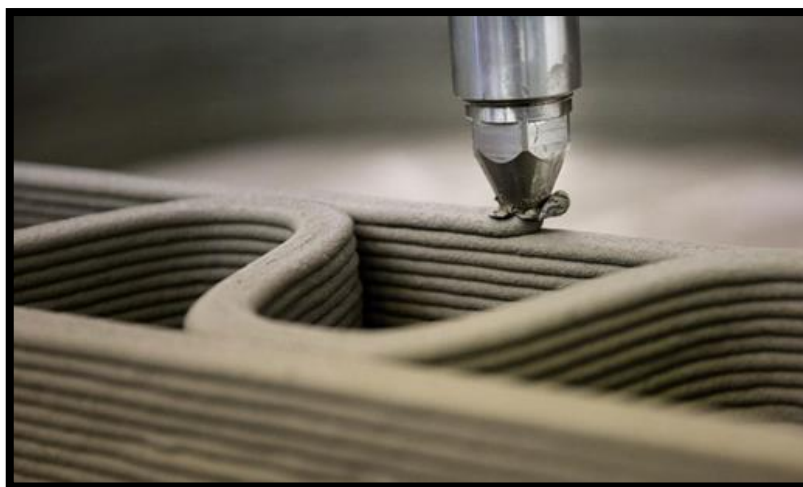
Metoda CC je navržena především na tisk venku. Tiskárna je proto umístěna na velkém portálovém rámu, který se dá lehce a rychle smontovat. Je vybavena tiskovou hlavou se třemi tryskami a hladítky, které poté upravují vytištěný povrch konstrukcí. Dvě trysky tisknou vnější strany stěny o výšce vrstvy 13 mm a třetí tryska tuto stěnu vyplňuje cementovou výplní s vlnitým tvarem. Tato hlava se nachází na robotickém portálovém systému, který nese ještě další pracovní nástroje a je umístěný na nosné konstrukci. Další součástí tiskárny je speciální systém robotické ruky, který osazuje překlady ze srolované lamelové rohože a i stropní konstrukce. U této metody lze vyztužovat, dělat obklady stěn a podlah, klempířské práce, elektrické systémy a lakování automatizovat a vše instalovat bez zásahu člověka. [2] [9] [10] [16] [27]

Postupem času by se touto metodou mohli tisknout rovnou i inženýrské sítě, které by byly zakreslené v modelu stavby. Vše by probíhalo na ráz a tím by se zkrátil i čas výstavby.



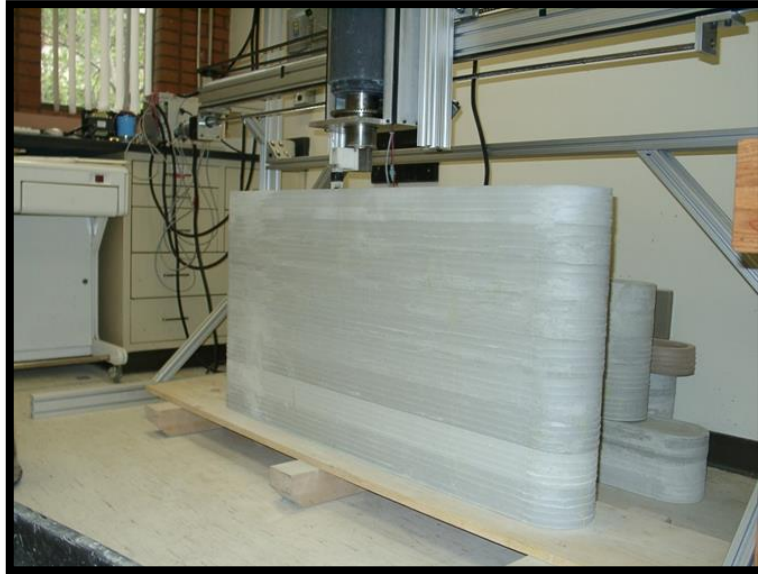
Obr. 13: Počítačová vizualizace tisknutí metodou Contour Crafting, USA

Zdroj: [9]



Obr. 14: Detail stěny vytištěné metodou Contour Crafting

Zdroj: [16]



Obr. 15: Vzorová stěna vytištěná metodou Contour Crafting, USA

Zdroj: [9]



Obr. 16: Model kopule pro základnu na jiné planetě vytištěný metodou Contour Crafting, USA

Zdroj: [9]

Společnosti, které se zabývají touto metodou, jsou například čínská společnost WinSun (ta byla dokonce nařčena firmou Contour Crafting za krádež patentu), rusko-americká společnost Apis-Cor, britská společnost Loughborough University a další.

Hlavní výhody této metody jsou bezodpadovost, rychlost tisku (oproti jiným

metodám u 3D tisku), snížení nehod, složité architektonické tvary a homogenita materiálu. Ten je při ukládání již smíšený.

Další výhoda metody CC může být urychlení stavebního procesu a ušetření materiálu. Díky duté konstrukci s vnitřní vlnitou strukturou (*Obr. 13, Obr. 14*) mohou být lepší tepelně izolační vlastnosti.

Nevýhodou může být omezení sklonu do 45°, rozlišení tisku v řádu desítek mm a viditelnost vrstev (*Obr. 14, Obr. 17*). Další komplikace nastává při statickém vyztužování konstrukcí, zvláště u těch ohybem namáhaných. To je řešeno ručním vkládáním výztuže nebo některé projekty využívají 3D tištěnou konstrukci, jako ztracené bednění. Toto bednění slouží poté, jako minimální krycí vrstva výztuže a zároveň tím odpadají náklady na bednění a odbedňování.

Další nevýhoda vzniká u převislých konstrukcí, kde je potřeba podpůrná konstrukce. Tu lze provést z překladů nad otvory nebo pomocí podpůrných sloupů. [9] [10] [16]

Podpůrné konstrukce lze odstranit dříve než u klasické metody. Je to dáno tím, že směs pro 3D tisk nabyde dříve určité pevnosti, kvůli propojení jednotlivých vrstev.



Obr. 17: Ukázka vytlačování cementové malty z tiskové hlavy, USA

Zdroj: [9]

4.1.2.2 3D tisk spojováním kameniva – Tisk ve tvaru D (D-Shape)

Tato metoda byla vyvinuta německou společností Voxejet a italským vynálezcem Enricem Dinnim v roce 2004. Je založena na technologii laserového slinování prášku, což je spojování (sprejování) vrstev plniva a tekutého pojiva. Jako plnivo se používá jemnozrnný písek a jako tekuté pojivo slouží buď kapalina na bázi chlóru, cement nebo polymerní pryskyřice. Dále to může být kaše na bázi portlandského nebo sorelského cementu, geopolymery a polymerní primery.

Vše se tiskne v ohraničené komoře 6 x 6 m, kvůli sprejování tekutého pojiva. Tisk probíhá pomocí dvou portálových robotů, z nichž jeden distribuuje zrnitý materiál a druhý má na sobě tiskovou hlavu s tryskami s pojivem. Proces začíná nanesením jedné vrstvičky plniva (písku) v tloušťce setin až jednotek mm. Na tu je poté nasprejováno tekuté pojivo v průměru desetin mm v místě, kde bude budoucí konstrukce. Tento proces je opakován pořád dokola až do poslední vrstvy. Nakonec se nevyužitá plniva v poslední vrstvě odstraní odsátím a v komoře zůstane pouze vytištěný prvek.

Tisková hlava je složena z 300 až 1000 trysek podle potřeby. Trysky jsou od sebe vzdáleny 20 mm. Z nich poté vychází pojivo, které se spojí s plnivem. Trysky se pohybují podél osy y a díky elektrickému pístu se pokryje celá oblast, kde se tiskne. [2] [9] [10] [16]



Obr. 18: Ukázka místa pro tisk metodou D-Shape

Zdroj: [16]



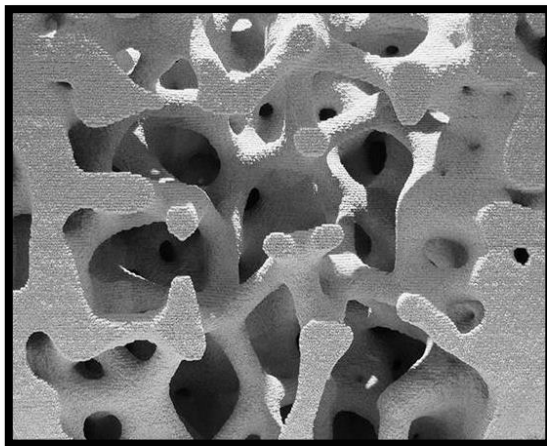
Obr. 19: Odstraňování přebytečného písku po dokončení 3D tisku metodou D-Shape

Zdroj: [9]

Hlavní výhodou této metody je rozlišení tisku, který umožňuje tisk detailů v řádu setin mm. Další výhodou je tisk vnitřních struktur s uzavřenými komůrkami (*Obr. 20*). To je výhoda především pro architekty při vytváření detailních návrhů vytvářených pomocí parametrického a generativního navrhování.

Nevýhodou této metody je nižší rychlost tisku, kvůli její přesnosti. Další nevýhodou je omezená velikost prvků díky velikosti tiskové komory. Dále je nutné všechny prvky na konci tisku očistit od přebytečného plniva. Musíme brát v potaz i nehomogenitu materiálu. Ta může vzniknout při nedokonalém spojení plniva s pojivem a tím má vliv i na mechanické vlastnosti prvků. [9]

Při této metodě je použito o něco více materiálu (především plniva) než je potřeba. Bylo by dobré, kdyby se tento přebytečný materiál dal zrecyklovat a použít zase při dalším tisku. Tím by se šetřilo i životní prostředí.



Obr. 20: Ukázka vnitřní struktury s uzavřenými komůrkami

Zdroj: [9]

4.1.3 Betonový tisk (Concrete printing)

Tato metoda byla vyvinuta v roce 2006 výzkumným týmem Freeform Construction na Univerzitě v Loughborough. Je založena na vytlačování cementové směsi a slouží spíše pro prefabrikovaný 3D tisk. Proces vytlačování je, ale více zaměřen na udržování trojrozměrného tvaru s vysokým rozlišením pro ukládání materiálu. Díky tomu se lépe udržuje kontrola vnitřních a vnějších geometrií. [10]

Pro betonový tisk se používá tisková hlava připevněná k šestiosému robotickému ramenu nebo k portálovému systému, který se nachází v uzavřené tiskové oblasti. Rozměry portálového systému se pohybují okolo 5,4 x 5,5 x 5,4 m. Další součásti tiskárny jsou řídicí jednotka, čerpadlo a směšovač.

U betonového tisku musí tisková směs splnit 4 vlastnosti.

1. Vytlačovatelnost – směs musí být přizpůsobená k tomu, aby šla dobře vytlačovat malými trubkami a tryskami u tiskové hlavy.
2. Zpracovatelnost – směs musí být dobře propracována, aby měla konzistentní vlastnosti.
3. Doba otevření – je to doba, kdy směs má správné vlastnosti. Má zachovanou tekutost, takže může být dobře čerpána a vytlačována. Dále je to doba, která určuje, za jak dlouho bude směs tvrdnout.
4. Stavitelnost – je to schopnost, kdy betonová směs po vytlačení udrží svůj tvar.

[2] [10]

U betonového tisku se začíná přípravou cementové malty, do které se přidá voda. Tato směs se ukládá do tzv. mixéru, tím se zabrání usazování směsi. Poté je smíchaná směs čerpána do tiskové hlavy, ve které se nachází míchací šroub. Tisková hlava tiskne jednotlivé vrstvy dokola, dokud není celý model vytištěný. Rychlost tisku se odvíjí od velikosti tiskové hlavy a tlaku čerpadla. Doba tisku, tzv. otevřený čas by neměl být moc dlouhý, aby bylo zajištěno propojení vrstev mezi sebou.

Jednotlivé vrstvy mají velký vliv na konečnou konstrukci. Záleží u nich na orientaci, protože v různých směrech mají rozdílnou pevnost. [2] [10]

Podobnou metodu metodě CP používá společnost Bruil od roku 2015. Ta chce pomocí 3D tisku vytvořit architektonický beton pro fasády objektů. Beton by měl být různě barevný během jednoho tisku.[10]

Tab. 6: Porovnání metod pro 3D tisk z cementových malt s betonovým tiskem

3D metoda	Průměr trysek (mm)	Tloušťka vrstvy (mm)	Zesílení	Pevnost v tlaku [MPa]	Pevnost v ohybu [MPa]
3D tisk vytlačování cementové malty (CC – Contour Crafting)	15	13	Ano	18	-
3D tisk spojováním kameniva (D-Shape)	0,1 - 4	4 - 6	Ne	235 - 242	14 - 19
Betonový tisk (CP – Concrete Printing)	9 - 20	6 - 25	Ano	70 - 110	12 - 13

Zdroj: [2]

Tyto údaje jsou pouze orientační. Vznikly z výsledků několika zkoušek.

Z Tab. 6 je patrné, že metody D-Shape a CP mají pevnost v tlaku a ohybu větší než metoda CC. Z těchto dvou metod má pak větší pevnost metoda D-Shape.

Velikost trysek a tloušťka vrstvy ovlivňují rychlost tisku. Čím větší je průměr a tloušťka vrstvy, tím se tiskne rychleji. Nejlépe je na tom metoda Betonový tisk. Nevýhoda potom je, že vytištěný model má menší rozlišení a jsou viditelné jednotlivé vrstvy tisku.

U metod CC a CP musí být použito zesílení. Například u otvoru nad okny se musí vložit překlad, který tiskárna objedná a tiskne až na něj. Překlad se tam poté nechá. U metody D-Shape se zesílení nemusí dělat. Tam překlad vytvoří sama tiskárna. [2]

Tab. 7: Pevnostní třídy betonu v tlaku pro obyčejný a těžký beton

Pevnostní třída v tlaku	$F_{ck,cyl}$ (válec) [MPa]	$F_{ck,cube}$ (krychle) [MPa]
C -/5	-	5
C -/7,5	-	7,5
C 8/10	8	10
C 12/15	12	15
C 16/20	16	20
C 20/25	20	25
C 25/30	25	30
C 30/37	30	37
C 35/45	35	45
C 40/50	40	50
C 45/55	45	55
C 50/60	50	60
Vysokopevnostní beton		
C 55/67	55	67
C 60/75	60	75
C 70/85	70	85
C 80/95	80	95
C 90/105	90	105
C 100/115	100	115

Zdroj: [28]

Při srovnání tabulek *Tab. 6* a *Tab. 7* je patrné, že konstrukce z materiálu pro 3D tisk mají mnohem větší pevnosti. Pevnost v tlaku je u metody D-Shape mnohonásobně větší. Je přibližně dvakrát větší než vysokopevnostní beton C 100/115. U D-Shape se uvádí pevnost 235 – 242 MPa a u betonu C 100/115 je to 115 MPa.

Pro metodu Betonový tisk je pevnost v tlaku také velká. Udává se 70 – 110 MPa.

Což odpovídá přibližně vysokopevnostnímu betonu C 55/67 až C 90/105.

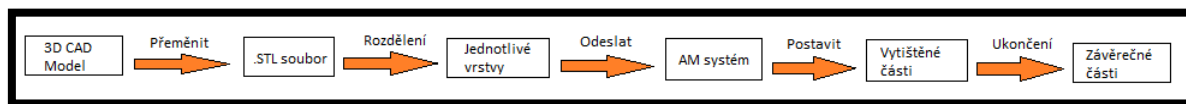
Za to u metody 3D tisk vytlačování cementové malty odpovídá pevnost betonu C 12/15 až C 16/20. Což je oproti předchozím metodám málo. A s porovnáním běžně používaného betonu také. V současnosti se používají především betony od třídy C 20/25 a vyšší. Záleží na druhu konstrukce, kde bude beton použit.

4.1.4 Polymerní 3D tiskové technologie

U 3D tisku existují 4 technologie založené na tisknutí z polymeru. Ty si v této části kapitoly představíme. [2]

4.1.4.1 BAAM[®]

BAAM[®] neboli výroba velkých ploch. Byla vynalezena společností Cincinnati Inc. (CI) a Oak Ridge National Laboratory (ORNL). Používá se pro rychlou a nákladově efektivní výrobu velkých dílů. Systém BAAM[®] vytlačuje roztavené vláknité polymerní kompozity. Dalším materiálem, který využívá, jsou pelety. Ty jsou levnější. Stojí přibližně 1/20 nákladů na vlákna a tím výrazně snižují náklady u této technologie. Další zkoumané materiály pro tuto technologii jsou biokompozitní kompozity, např. bambus, PLA (kukuřice, cukrová třtina nebo brambory) a polypropylen z celulósových vláken (PP). [2]



Obr. 21: Postup výroby tisku u metody BAAM[®]

Zdroj: Autor, [2]

Systém BAAM[®] umožňuje tisknout prvky o rozměrech 6 x 2,4 x 1,8 m. Primární osa vytlačovacího mechanismu je horizontálně orientovaná a tisková hlava se pohybuje v horizontální rovině x - y. Pelety, které vystupují z tiskové hlavy, se ukládají na vyhřívané lože nebo na již už nanesenou vrstvu. Aby nevznikali v tištěných částech bublinky z vlhkosti, je systém vybavený sušičkou pelet a vzduchem vyhřívaným poháněným dopravníkem. Díky tomu se vlhkost z pelet odstraní. Tisková hlava je osazena na portálovém systému x - y - z a má oválný tvar. Vyhřívaná základna se pohybuje svisle a synchronizuje se s portálovým a výtlačným zařízením.

Aby se jednotlivé vrstvy mezi sebou dobře propojili, byl vyvinut nový systém Z pro

metodu BAAM[®]. Systém Z neboli zhuštění, je velmi důležité pro vlákna vyztužený polymer. U těchto prvků vlákna polymeru netečou pod tlakem. Proto se zhuštění zvyšuje o sílu ve směru x o 10 % a zdvojnásobuje se u směru y. Další vlastnosti, jako je mechanická pevnost, fyzikální vlastnosti, teplota vytlačování, průtok a rychlost tiskové hlavy jsou dány provozními procesy a materiálovými parametry prvku. [2]

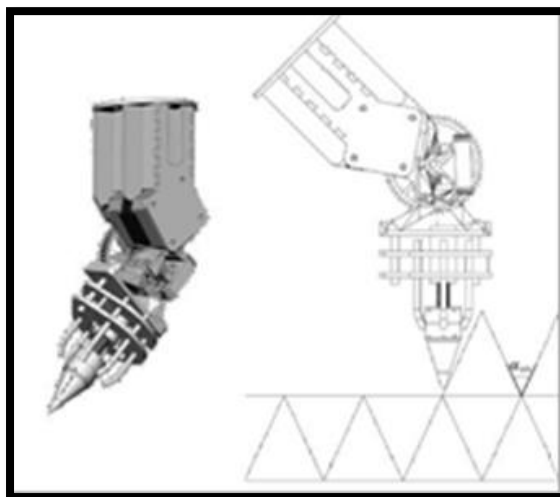
4.1.4.2 Systém Mesh Mould

Systém Mesh Mould vynalezli vědci švýcarského federálního technologického institutu v Curychu (ETH). Tato metoda sjednocuje výrobu výztuží a bednění. Používá se zde robotické rameno k vytlačování polymeru, který je vyztužený krátkými vlákny. Výsledné prvky slouží jako betonové bednění.

Kloubové robotické rameno vytváří bednění pomocí pohyblivé základny. Toto rameno využívá 6 stupňů volnosti. Materiál, který se zde používá, jsou plastové pelety nebo cívka z kontinuálních vláken, jako jsou bambus, čedič, kevlar nebo dráty ze skelných vláken. Na rameni je osazená hlavice, která vytlačuje horké vlákno. Toto vlákno se lepí na další vlákna a tím dochází k ochlazení. Tloušťka vytlačovaného vlákna je okolo 3 mm v průměru s kapacitou 10 l/s vzduchu pro ochlazení.

Systém Mesh Mould má pevnost v tahu s kontinuálními vlákny přibližně 6 – 7 krát větší než polymerní kompozity vyztužené krátkými vlákny.

Síťové bednění vyrobené pomocí Mesh Mould slouží, jako forma pro betonovou směs nebo jako výztužná struktura. Může obsahovat nepravidelné uspořádání trojúhelníkových nebo šestiúhelníkových otvorů o rozměrech od 2 cm do 4 cm. Rozměry otvorů závisí na podmínkách zatížení. Tyto otvory jsou vytvořeny tak, aby odolaly hydrostatickému tlaku mokřích cementových směsí. Hydrostatický tlak se odvíjí od výšky prvku. Ve spodní části je tlak největší, proto tam jsou otvory menší. V horní části je tlak menší, a proto jsou otvory větší. Tyto otvory byly navrženy podle výsledku analýzy konečných prvků. [2]



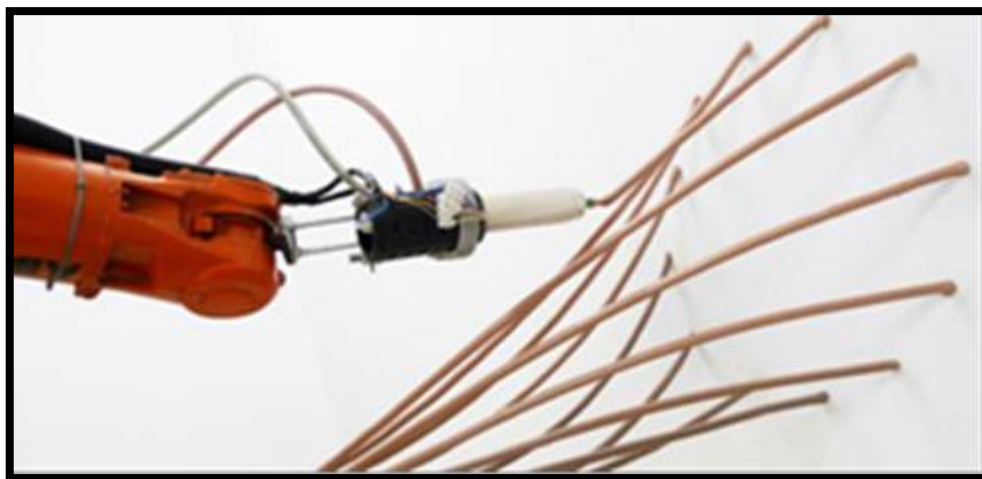
Obr. 22: Ukázka tiskové hlavy u systému Mesh Mould

Zdroj: [2]

4.1.4.3 3D tisk křivek

3D tisk křivek vynalezli ve Výzkumu 3D v Katalánsku. Slouží k tisku trojrozměrných křivek za účelem vytvoření objektu. Materiál se zde používá dvousložkový termosetovací polymer, jako je polyuretan. Tato metoda umožňuje tisk na různých plochách, různém sklonu a hladkosti plochy. Není zde potřeba žádná podpora při tisku.

Surovina, která se používá u 3D tisku křivek, je přivedena do statického mixéru, kde proběhne chemická reakce mezi dvěma tekutinami. Může sem být přidáváno i barvivo pro obarvení směsi. Vše je poté pomocí robotického ramena vytlačováno konstantní rychlostí při proudu vzduchu o teplotě 190°C. Ten je ohříván pomocí ohříváčů umístěných na trysce. Otvor tryskové hlavy je od 0,8 mm do 12 mm. Podle potřeby se dá měnit. Robotické rameno umísťuje trysku na určité místo dle digitálního modelu. Tryska se pohybuje rychlostí, která je potřebná podle délky vytvrzování a stability termosetového polymeru. Směs musí být vytvrzena do doby, kdy se trysková hlava pohybuje. [2]



Obr. 23: Ukázka 3D tisku metodou 3D tisk křivek

Zdroj: [2]

4.1.4.4 Lešení AM

Tato metoda byla vyvinuta společností Branch Technology a využívá se pro tisk lešení. Metoda používá podobné materiály jako metoda BAAM[®], tzn. pelety z jakéhokoli materiálu. Lešení vytváří tištěné díly v otevřeném prostoru z roztaveného polymerního kompozitu.

Lešení AM používá k tisku ramenního robota, který se pohybuje na desetimetrové trati a může tak tisknout objekty o rozměrech 7,6 m x 17,6 m. Sebou přepravuje kontejner s materiálem. Pevnost vytištěných prvků této metody je podobná, jako u systému BAAM[®], ale nižší než pevnost u metody Mesh Mould.

Lešení vytištěné pomocí této metody je hodně pórovité, ale má vysokou pevnost a tuhost. Podle společnosti Branch Technology je toto lešení asi trojnásobně pevnější v tahu než dřevěné výhonky, které mají 100 – 120 MPa. Bylo navrženo tak, aby se použilo méně tiskového materiálu a bylo vytištěno z tradičního materiálu (beton, izolační materiály). [2]

Tab. 8: Porovnání metod Polymerní 3D tiskové technologie

3D metoda	Průměr trysek (mm)	Tloušťka vrstvy	Použitý materiál	Zesílení	Pevnost v tahu v ose x [MPa]
BAAM®	7,6	4	Termoplast, Polymery	Krátká vlákna	50 – 70
Mesh Mould	2 - 4	2 - 4	Termoplast, Polymery	Nekonečná vlákna	300 – 400
3D tisk křivek	0,8 - 12	0,8 - 12	Termosetové polymery	-	60
Lešení AM	3	3	Termoplast, Polymery	Krátká vlákna	100 - 120

Zdroj: [2]

Z Tab. 8 je vidět, že metoda Mesh Mould má největší pevnost v tahu v ose x. Hned za ní je metoda Lešení AM, BAAM® a nakonec 3D tisk křivek.

Podle průměru trysky a tloušťky vrstvy je na tom nejlépe 3D tisk křivek a poté metoda BAAM®.

4.1.5 Fotopolymerace

Fotopolymerace (Vat Photopolymerization) využívá u 3D tisku UV laserový paprsek. Tento paprsek nebo jiný světelný zdroj je vyslán optickým systémem na vulkanizovatelnou pryskyřici, která je uložena na platformě (podkladu). Pryskyřice je poté vytvrzena a vytvoří danou strukturu. Při vytvrzování se pryskyřice ponoří mělce do platformy, pokaždé když se vytvrzuje další vrstva.

Tato metoda se využívá převážně u Stereolitografie. [2] [10]

4.1.6 Model fúzovaného vkladu

Model fúzovaného vkladu (FDM) byl vyvinut společností Stratasys v roce 1991. Je založen na procesu, kde do tiskové hlavy vede nit s daným materiálem. V hlavě se materiál zahřívá. Po vytlačení se materiál ihned ochladí, ztvdne a spojí se s předchozí vrstvou. Vše probíhá ve vyhřáté komoře.

Materiál, který se zde využívá, je na bázi polymerů nebo to může být keramický

materiál a sklo.

Výhodou této metody je vysoká pevnost vytištěných prvků. Ale mezi nevýhody patří pomalý tisk, protože je zde požadovaná vysoká přesnost. Další záporná vlastnost je, že je velmi obtížné tisknout ostré hrany. U převislých konstrukcí větších rozměrů musí být zřízeny podpěrné konstrukce, které je potřeba dodatečně zpracovat.

Touto metodou má být vytvořen objekt Canal House v Amsterdamu. V současnosti na návrhu pracují architekti ze společnosti DUS Architects. [10]



Obr. 24: Ukázky vytištěných prvků metodou Modelu fúzovaného vkladu

Zdroj: [10]

4.1.7 Electrospinning

Electrospinning využívá elektrohydrodynamické tryskání s ultratenkými vlákny. Elektrostatická odpuzování produkuje proud surovin, který je složen z polymerů s ultratenkými vlákny. Tato metoda je hojně využívána k výrobě tkáňového inženýrství – lešení. [2]

4.1.8 Kov pro pevné struktury

Tuto metodu vyvinula nizozemská společnost MX3D a nazvala jí WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing). Metoda umožňuje tisknout objekty z kovových materiálů. Pomáhá jí v tom šestiosý robot, který spotřebuje 2 kilogramy materiálu za hodinu.

Robota vyvinula společnost MX3D s pomocí Air Liquide a ArcelorMittal. Je vybaven svářečem a tryskou, aby mohl svařovat kovové tyče po vrstvách. Materiál, který robot využívá, může být i nerezová ocel, hliník, bronz nebo Inconel (slitina na bázi chromu a niklu). [16]

4.1.9 Buněčná výroba

Buněčná výroba neboli Cellular Fabrication (C-Fab) je metoda vytvořená společností Branch Technology. K tisku využívá ABS plastová a uhlíková vlákna. Pomocí této metody se tisknou struktury nahrazující bednění.

K tisku používá extrudér na robotickém rameni, který se pohybuje na 10 metrů dlouhé kolejnici. Díky tomu může tisknout i struktury větších rozměrů. [10]

4.1.10 3D pěnový tisk

Metoda 3D pěnový tisk (3D Foam Printing (3DFP)) umožňuje tisk pěnových struktur. Studii tohoto tisku provedla skupina The Mediated Matter z technologického institutu v Massachusetts. Materiál, který se zde používá je polyuretanová pěna (PUR). Je lehká, levná, adhezivní, má dobré izolační schopnosti a má rychlou dobu vytvrzení.

K tisku je též využíváno robotické rameno. To pěnu ukládá po vrstvách a vytváří tak izolační bednění. Výška vrstvy může být až 40 mm.

Nevýhoda u tohoto tisku je ucpaní tiskové hlavy. To je dáno tím, že pěna má rychlou vlastnost vytvrzování a hlava se tím rychleji zanáší. Další záporná vlastnost může být to, že vytištěný prvek má na povrchu viditelné vrstvy po tisku. To se dá, ale opravit konečnou povrchovou úpravou. Ta je dále důležitá kvůli slunečnímu záření. UV záření je pro PUR pěnu nebezpečné, protože se pod zářením rozpadá. Vytvořená povrchová úprava toto záření nepropustí dále a tím chrání PUR pěnu. [10]



Obr. 25: Ukázka vytištěného bednění z PUR pěny a tisk malého objektu metodou 3D pěnový tisk

Zdroj: [10]

Pomocí této metody by se daly zateplovat budovy. Místo stavebních dělníků, kteří zateplují stavby polystyrenem (EPS, XPS) nebo minerální vatou, by na stavbu byla přivezena 3D tiskárna. Ta by celou stavbu zateplila podle modelu, který by měla nahraný ve svém programu. K provozu tiskárny by bylo potřeba jedné osoby, která by pouze kontrolovala správný chod. Tím by se ušetřilo na lidských zdrojích, protože by bylo potřeba mnohem méně lidí. Dále by se ušetřil čas a peníze.

Jedinou nevýhodou by bylo přichycení materiálu k objektu. Na stavbě by musely být předem zhotoveny kotvící prvky, které by PUR pěna obklopila a tím se přichytila k objektu. Nebo by stavební dělníci uchytili pěnu kotvícími prvky, jak tomu je u běžného zateplování polystyrenem nebo vatou.

4.1.11 Výroba vytlačování za mrazu

Výroba vytlačování za mrazu neboli Freeze-Form Extrusion Fabrication (FEF) byla vyvinuta na univerzitě University of Science and Technology v Missouri. Je také založená na vytlačování materiálu, ale k jeho vytvrnutí se využívá zmrazení.

U této metody je tiskárna umístěna v mrazicí komoře a teplota zde nesmí být vyšší než 0° C. Vytlačovaný materiál zde ihned ztvrdne a není proto zapotřebí žádné podpůrné konstrukce. Lze jí použít k tisku kovových, keramických nebo kompozitních dílů.

Výhoda této metody je malá spotřeba pojiva, tím šetří životní prostředí. Dále může být použita k výrobě konstrukcí z různorodých materiálů. Mezi nevýhodou lze řadit, že při tisku mohou na konstrukci vznikat ledové krystaly, které mohou mít poté za následek dutiny v konstrukci a tím sníží určité mechanické vlastnosti. [10]

Tato metoda by se dala využít v částech světa, kde je celoročně zima, jako je např. Antarktida, Arktida, Sibiř atd. Místo toho, aby byla tiskárna umístěna v mrazicí komoře, byla by umístěna venku přímo na mrazu. Stavěly by se s ní stavby pro výzkumné stanice. Před příjezdem výzkumníků by byla na místo určení poslána 3D tiskárna, s materiálem a osobami, které by jí obsluhovaly. Ty by během krátké chvíle vytiskly budovy určené k bydlení a pro výzkumné účely. Až by byla stavba dokončena, byly by poslány zase zpět nebo na další místo určení.

Některé tiskárny by tam mohly zůstat pro potřebu výzkumníků. Ti by se s nimi naučili pracovat a v případě potřeby, by si sami vytiskli konstrukce, které by potřebovali.

4.2 Materiál

Materiály, které se používají k 3D tisku jsou např. betonová směs (cement a písek), kapalina, polymer, vlákny vyztužený polymer, kovy, keramika, prášek nebo listový materiál. Některé z nich si v této kapitole přiblížíme. [1] [2]

Podle tabulek (*Tab. 4, Tab. 5*) jsou nejvíce používané materiály polymery a kov. Z betonové směsi tisknou pouze dvě metody.

4.2.1 Betonová směs

Betonová směs je namíchaná z cementové směsi (malty), která se skládá ze skelných vláken, z recyklované stavební sutě nebo oceli. [12]

Základní betonová směs se skládá z portlandského cementu (9 - 15 %), vody (15 - 16 %), křemičitého kameniva (jemné 25 - 35 %, hrubé 30 - 45 %), vápencového plniva a speciálních přísad. [2]

Cementová malta má výrazněji vyšší cenu. To je dáno tím, že je zde více aditiv a zároveň musí mít malou frakci kameniva, kvůli tiskové hlavici, aby jí směs prošla. Toto kamenivo se může nahradit jemně mletým betonovým recyklátem, pískem nebo popílčkem. U betonového recyklátu se musí pouze vyřešit jeho nasákavost a tuhost. K vyztužování se používá krátké vlákno, např. nylonové, kovové, uhlíkové nebo skleněné. Uhlíkové vlákno se při tom testuje i na zmírnění praskání, smršťování a pro zvýšení pevnosti v ohybu. [2] [9]

4.2.2 Fillcrete

Fillcrete je lehčený buněčný beton. Jeho výhody jsou, že je lehčí, je ekologický, má lepší akustické a tepelné vlastnosti a tvrdne rychleji oproti normálnímu betonu. Díky tomu jsou menší náklady na vytápění a chlazení objektu. [29]

4.2.3 Materiály na bázi polymeru

Mezi materiály na bázi polymeru se řadí termoplastická vlákna, pelety vyrobené z akrylonitrilového butadien-styrenu (ABS), polykarbonát (PC), polylaktid (PLA), polyamid (PA) a směs z jakýchkoli dvou typů termoplastického materiálu.

Tyto materiály mají nízký bod tání, malé zkreslení, anizotropní mechanické vlastnosti a malou mechanickou pevnost. Kvůli těmto vlastnostem se začali vyvíjet nové materiály s lepšími vlastnostmi. [2]

4.2.4 Materiály na bázi cementu

Materiály na bázi cementu mají dobrou pevnost v tlaku, ale slabé napětí. To lze vylepšit krátkými vlákny přidanými do směsi. Pevnost v ohybu je také menší a proto se používá dodatečné vyztužení, které se musí provádět ručně.

Tyto materiály mají omezené fyzikální vlastnosti, a proto jsou modely z nich vytvořené v softwaru pro výpočet konečných prvků.

Při tisku z těchto materiálů musí být prostředí, kde se tiskne sledované. Je to proto, že při tisku pomocí polymeru nebo z jemných částic na bázi prášku vzniká prašné prostředí, které je pro lidské zdraví nebezpečné. Jsou proto zavedeny preventivní opatření. [2]

4.2.5 Inkoustové pojivo Jetting

Inkoustové pojivo Jetting (IBJ) používá ke 3D tisku zrnité materiály. Jsou to granulované materiály, které zahrnují písky, cementové materiály a nečistoty. Tyto materiály jsou suché, ale proces vytlačování je mokrá.

U mokrého procesu se materiály nejdříve smíchají s vodou a s přísadami, tím se urychlí proces tuhnutí. Tato směs se dále protlačí přes tiskovou hlavu a tím vznikne daný objekt. [2]

5 Konstrukční řešení 3D tiskáren

3D tiskárny mají různé velikosti, většinou několik (i desítky) metrů. Skládají se z několika částí: tisková hlava, samotná konstrukce tiskárny a pohonná jednotka. Tisková hlava má v sobě zabudovanou trysku a je celá nesena pomocí konstrukce tiskárny. Konstrukce se skládá z pohyblivých dílů a z pohonných jednotek. Podle uspořádání konstrukce tiskárny se určuje tiskový prostor a maximální rozměry vytištěného prvku.

Ve stavitelství se můžeme setkat se třemi základními typy tiskáren. [9] [12]

5.1 Rámové 3D tiskárny

Rámové 3D tiskárny se skládají z tiskové hlavy, která se pohybuje pomocí rámového portálu (stolice) (Obr. 26) nebo tzv. delta konstrukce. Pohyb hlavy pomocí rámového portálu je umožněn ve třech osách a má tvar kvádrů. Zatímco pohyb pomocí delta konstrukce je na třech svislých osách osazených do rovnostranného trojúhelníka a prostor pro tisk má poté tvar polokoule. [9]



Obr. 26: Rámový portál 3D tiskárny

Zdroj: [9]

Výhodou této tiskárny je její nosnost konstrukce. Dokáže unést těžší tiskovou hlavu. Přesnost tiskárny je založena na výrobním nastavení a to na velikosti jejího nejmenšího posunu krokového motoru a na tom, že tisk prvku je možný pouze v jedné poloze tiskárny. Tyto tiskárny mohou mít výšku přes několik podlaží, a proto je možné tisknout objekt i o

více podlažích najednou. Velikost vytištěného prvku je dána velikostí tiskárny. Dle velikosti prvku narůstá i cena dané tiskárny. Zvláště při tisku v in situ (venku) záleží na rozměrech tiskárny. Od nich se vyvíjí náklady na dopravu a tím vzroste i cena.

Rámová tiskárna, která má tři stupně volnosti je omezena na tisk v horizontálním směru. Při tisku v in situ je proto důležitý, aby terén pozemku byl co nejméně členitý. Tiskárna se pohybuje na kolejové dráze, jako např. portálový jeřáb. Proto je zapotřebí vodorovný povrch bez překážek.

Tyto tiskárny nejsou moc vhodné pro umístění dovnitř objektu. Hodí se více pro tisk v in situ a to na vytvoření základů, nosných prvků, příček a k tisku menších objektů. Dále jsou také vhodné pro výrobu prefabrikovaných konstrukcí. [9]

5.2 3D tiskárny s robotickou rukou

Tato tiskárna tiskne pomocí robotické ruky, na které je umístěna tisková hlava. Hlava má šest stupňů volnosti, tzn. šest os otáčení. Prostor tiskárny je určen délkou robotické ruky a jejím úhlem pootočení. Využívá se k tisku nosných konstrukcí v in situ, dále pro tisk prefabrikovaných konstrukcí, kompletačních konstrukcí a dokončovacích prací.

Výhoda tiskárny s robotickou rukou spočívá v tisku pouze z jedné strany. Proto se používá tam, kde je málo prostoru nebo je prostor omezen. Např. u tisku jednostranného ztraceného bednění v tunelech nebo u pažicích stěn. Další výhodou je malá hmotnost, rozměry a cena. Proto se hodí více pro tisk uvnitř budov. Dále díky tisku z jedné strany se hodí i na členitý terén. Výhodou díky menším rozměrům jsou i nižší náklady na její dopravu.

Tím, že se jedná o tiskárnu s robotickou rukou je možné jí i přeměnit. Robotickou ruku lze osadit i jinou koncovkou. Z tiskárny se poté stane např. CNC fréza nebo ruka s chapadly či přísavkami na přemísťování předmětů. Díky šesti osám otáčení má větší variabilitu a může tisknout i vertikálně.

Nevýhodou může být menší tiskový prostor. Ten se může upravit pomocí mobilního podvozku nebo osazením tiskárny na kolejovou dráhu. [9]



Obr. 27: Tisk stěn pomocí tiskárny s robotickou rukou, společnost Apis-Cor, Rusko

Zdroj: [9]

5.3 Mobilní 3D tiskárny

Mobilní 3D tiskárny nejsou pevně spojeny se zemí. Sami se během tisku pohybují pomocí pásového podvozku, příp. po kolejnici. Přesnost tisku závisí na přesnosti výroby robota a polohovacího stroje, ten určuje koordinaci mezi jednotlivými pracovními pozicemi. Velikost vytištěných prvků je téměř neomezená tím, že se tiskárna sama pohybuje. Jediný co určuje velikost je délka napájení a systém přívodu materiálu.

Výhodou těchto tiskáren je menší rozměr, nižší hmotnost, pořizovací cena a nízké náklady na přepravu. Tiskárna může tisknout různé typy konstrukcí a lze je i kombinovat. Dále je možné využívat více robotů najednou a tím zvýšit i produktivitu. Důležité, ale je zajistit jejich prostorovou i technologickou koordinaci.

Jediná nevýhoda, ve které jsou mobilní tiskárny omezeny, je přívod materiálu pro tisk. [9]



Obr. 28: Ukázka tisku pomocí mobilní 3D tiskárny, IAAC Barcelona, Španělsko

Zdroj: [9]

Tyto tiskárny jsou podle získaných informací nejvýhodnější. Dají se používat uvnitř budov, tak i vně. Mají malé rozměry, díky kterým se snadno dopravují. Další klad je jejich mobilita, ta zaručuje, že tiskárny mohou vytisknout jakkoli velký objekt. Musí se pouze zaručit přívod energie a materiálu.

6 Navrhování, konstruování a dimenzování staveb ze 3D tisku

Očekává se, že 3D tisk se začne více vyvíjet a v roce 2022 vzroste až o 13% vůči současnosti. Je to dáno i přechodem na 4. průmyslovou revoluci, která začala po roce 2010. Rozvoj začne hlavně proto, že se 3D tiskem začíná zajímat více a více firem. Některé firmy už mají zhotovené reálné stavby a další mají spíše teoretické představy. Hlavními faktory na rozvoj tisku jsou popularita ekologické výstavby, časové tlaky na výstavbu a nákladná technologie. [9] [16] [29]

3D tisk může zažehnat krizi ohledně bydlení. Oproti normální výstavbě má nižší náklady na práci a je rychlejší na zhotovení. Dalším přínosem je malé množství odpadu, které při něm vzniká a používá se při něm recyklovaný materiál. Tiskárny dále vytisknout všechny možné struktury, které návrháři navrhnou a to s velikou přesností. [8]

6.1 Postup při návrhu 3D stavby

Pro 3D tisk je nejdůležitější návrh stavby (modelu). Vše začíná u samotné myšlenky, která je poté přenesena do návrhu v počítači, kde se celá stavba vymodeluje ve 3D ve vybraném programu. Nejdříve se narýsuje objekt ve 2D a poté se převede do 3D nebo se rovnou navrhne ve 3D. Daný soubor se nakonec uloží do formátu .STL. Poté si zadavatel musí vybrat, jakou metodou, z jakého materiálu, venku nebo vevnitř bude chtít stavbu vytisknout a podle toho se zvolí tiskárna. Ta musí splňovat všechny podmínky určené zadavatelem podle navrženého objektu. Nakonec se objekt otevře v programu, který je určen pro 3D tiskárnu výrobcem. Program si stavbu překontroluje, zda je vše správně a rozdělí si objekt na jednotlivé vodorovné řezy, které poté tiskem skládá na sebe. Tento program vytvoří digitální soubor s kódem, který 3D tiskárna přečte. Většinou to bývá soubor G-Code. Tento soubor s tímto kódem se poté nahraje do tiskárny, buď přímo přes kabel, bezdrátově nebo SD kartou. A může se tisknout. [6]

6.2 Navrhování staveb

Stavby, pro které se hodí 3D tisk v současnosti jsou např. malé domy a prefabrikované konstrukce. U prefabrikovaných konstrukcí tiskárny nahradí stroje, které vytváří prefabrikáty. Výroba těchto dílů bude o něco rychlejší, díky speciálním materiálům, které se používají pro 3D tisk. Tyto materiály mají rychlejší dobu vytvrzování

oproti klasickým materiálům. Malé domy budou díky mobilním tiskárnám vytištěny přímo na místě. Bude zhotovena celá hrubá stavba, kde se jen osadí inženýrské sítě. A v budoucnosti se bude tisknout celá stavba a to i s obklady, povrchovými úpravami, instalacemi a dalšími částmi. Díky tomu se zrychlí u všech objektů výstavba.

Postupem času se budou pomocí 3D tisku stavět i mrakodrapy. U nich bude využito prefabrikátů z 3D tiskáren a některé menší části budou vytištěny přímo na místě na stavbě.

6.3 Dimenzování staveb

Dimenzování staveb, které jsou vytvořené 3D tiskem, je zatím problematické. Nejsou totiž žádné předpisy, podle kterých by se mělo navrhovat. Zatím se staví podle současných předpisů pro běžné technologie ty, ale pro 3D tisk nevyhovují. [9]

6.4 Technologie provádění

U technologie provádění se musí především vyřešit statické vyztužování konstrukcí při zatížení ohybem a tlakem. U prefabrikovaných konstrukcí z 3D tisku to může být vyřešeno vkládáním předpínacích lan. U konstrukcí, které jsou tištěné v in situ by se k tiskárnám mohli dodávat součásti, které budou automaticky vkládat výztuž do konstrukce, např. nastřelováním. Nebo to lze vyřešit také vkládáním výztuže mezi jednotlivé vrstvy. [9]

U 3D tisku se musí vyřešit překlenování stropních konstrukcí. Samotné tiskárny nezvládnou překlenout tak velký prostor. Musí se zde využít buď stropního bednění, které by se zřídilo pod stropní konstrukcí, jak tomu je u klasické monolitické metody. Díky materiálům pro 3D tisk, by se dalo odstranit dříve než u klasické metody. Nebo by se stropní konstrukce zhotovily pomocí prefabrikovaných konstrukcí. Tyto konstrukce by byly vyrobeny též 3D tiskem, akorát ve výrobních halách. Tím by se výstavba ještě více urychlila.

6.5 Předpisy

3D tisk se začíná rozvíjet především ve světě, jako je Čína nebo USA, tam nemají tak přísné předpisy. Evropa zůstává kvůli předpisům o něco pozadu. Musíme dodržovat přísná bezpečnostní a environmentální pravidla pro stavby. [12]

Rychle se, ale začínají rozvíjet vědecká a univerzitní centra, která jsou podporovaná investory. Ti chtějí, aby byly na prototypch ze 3D tiskáren a materiálech pro 3D tisk dělané zkoušky. Díky těmto zkouškám by se zhotovili předpisy pro 3D tisk. [30]

V České Republice se musí dodržovat tyto předpisy:

- ČSN EN 1990: Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí
- ČSN 73 0001: Navrhování stavebních konstrukcí
- ČSN 73 1201: Navrhování betonových konstrukcí
- ČSN 73 1401: Navrhování ocelových konstrukcí
- ČSN 73 1601: Plastové konstrukce – základní ustanovení pro navrhování
- A další

[31]

Jsou zde vyjmenované pouze některé základní předpisy. V České Republice je spousta předpisů, které se musí dodržet. A protože materiály pro 3D tisk nemají dané normové vlastnosti, jen těžko se dají zařadit mezi běžně používané materiály.

6.6 Důležité vlastnosti směsi

U betonové směsi pro 3D tisk musí být dodržena určitá kritéria a ty musí směs splňovat. Jsou to především vytlačitelnost, pevnost v tlaku, tekutost směsi, stavitelnost a otevřený čas, kdy má směs správnou konzistenci. Pro tyto kritéria si zde přiblížíme některé zkušební postupy. [27]

U dalších materiálů (např. speciální betonové směsi), které se používají ke 3D tisku, se liší mechanické vlastnosti. Ty nelze zjistit tradičními zkouškami směsi. Budou se muset vyvinout nové zkušební procesy, aby byly zajištěny správné výsledky ze zkoušek těchto směsí. [9]

6.6.1 Vytlačitelnost

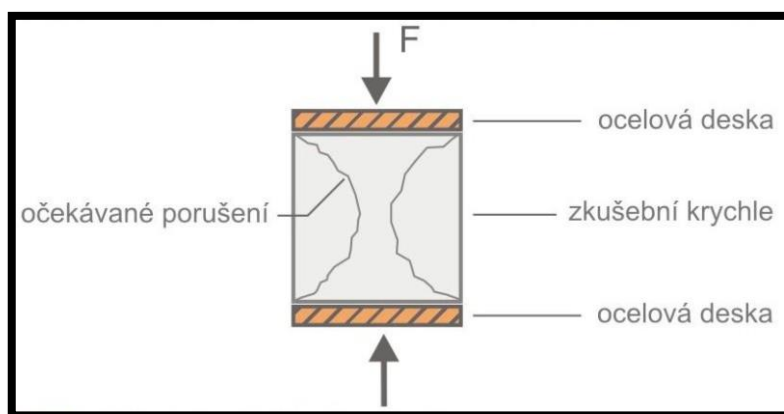
Betonová směs pro 3D tisk musí mít správnou vytlačitelnost kvůli vytlačování betonu tiskovou hlavicí.

U vytlačovatelnosti se provádějí předběžné zkušební testy, aby bylo zajištěno správného tisku. Vše je ovlivněno suchými složkami ve směsi. Hodnocení směsi závisí na vzdálenosti, ve které je pasta tištěna a nezablokuje trysky. Vytištěná pasta nesmí obsahovat praskliny a separace. [27]

6.6.2 Pevnost v tlaku

Betonová směs pro 3D tisk musí zajistit správnou pevnost v tlaku. Zkoušky se provádí na vzorku krychle 50/50/50 mm. Pevnost je zde velmi důležitá, protože model je vytištěný ve vrstvách a každá z nich musí být dostatečně pevná. Záleží zde i na čase, protože se vrstva tiskne jen pár minut a na ní je vytištěná hned další vrstva. Proto spodní vrstvy musí být dostatečně pevné během krátké doby. [27]

U klasické metody se pevnost v tlaku zkouší na krychli o rozměrech 150/150/150 mm nebo na válci 150/300 mm. Stáří těchto předmětů je 28 dní. Zkouška probíhá minimálně na 3 vzorcích, aby se zaručilo, že nedojde ke zkreslení výsledků. Na konci je poté vytvořen protokol o výsledcích zkoušky. [32] [33]



Obr. 29: Zkouška pevnosti betonu v tlaku

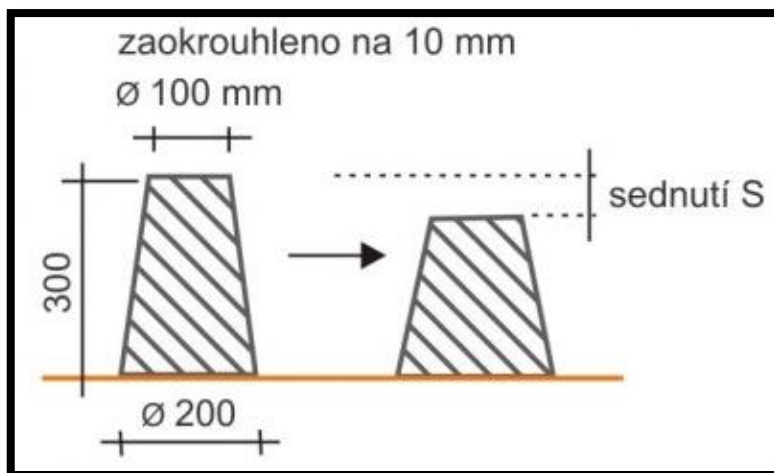
Zdroj: [33]

6.6.3 Tekutost

Tekutost betonové směsi se odvíjí od vytlačitelnosti směsi pomocí tiskové hlavy a podle zpracovatelnosti směsi.

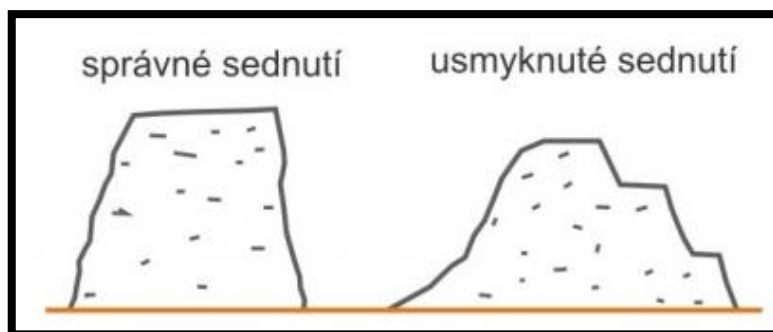
Tekutost směsi se zkouší pomocí obráceného kužele. Kužel se celý naplní směsí a poté se zvedne z podkladu. Měří se čas, za jak dlouho se směs rozprostře a celková plocha rozprostření. Podle toho se pozná, zda má směs správnou tekutost a zpracovatelnost. [27]

Tekutost (konzistence) betonu pro klasické metody se zkouší několika metodami. Jedna z nich je Abramsův kužel. Díky této zkoušce se zjistí konzistence betonu, jestli není moc suchý, anebo tekutý. Podle toho se poté směs řadí do 5 skupin. [34] [35]



Obr. 30: Zkouška sednutí kužele – Abramsův kužel

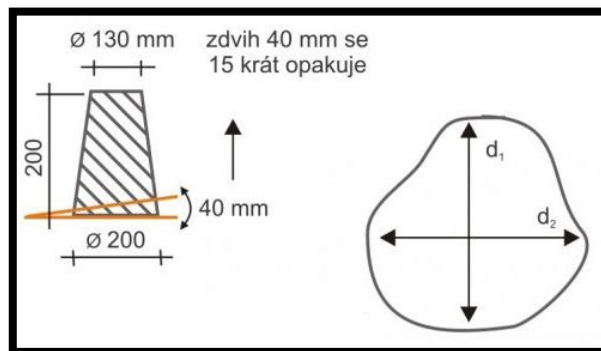
Zdroj: [35]



Obr. 31: Ukázka sednutí betonu – Abramsův kužel

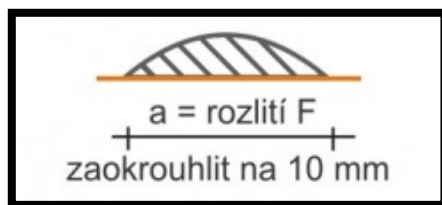
Zdroj: [35]

Další metodou pro zjištění konzistence směsi u klasické metody je rozlití. Ukazuje také, jak je směs tekutá, anebo suchá. Podle výsledku se zkouška dělí do 7 tříd. [34] [36]



Obr. 32: Zkouška sednutí betonu – rozlití

Zdroj: [36]



Obr. 33: Zkouška sednutí betonu – zaokrouhlení

Zdroj: [36]

6.6.4 Stavitelnost

Stavitelnost zajišťuje betonové směsi pro 3D tisk držet vrstvy nad sebou, aby nedošlo ke zhroucení. Měří se po jednotlivých vrstvách, dokud není dosaženo kolapsu. [27]

6.6.5 Otevřený čas

Otevřený čas je schopnost směsi zůstat dostatečně tekutá, aby se zajistilo spojení mezi jednotlivými vrstvami a zároveň byly vrstvy dostatečně nosné, aby unesly sami sebe a ještě vrstvy nad sebou. Tato zkouška je velmi důležitá. Měří se a vypočítává pomocí testu propadového toku. Tím se získá tekutost směsi během specifických časových intervalů. [27]

6.7 Výhody 3D tisku

U 3D tisku vznikají výhody. Mezi hlavní patří:

- Tvary jsou definovány pouze virtuálním modelem a jejich složitost díky tomu, nemá vliv na cenu (některé tvary, ale potřebují podpůrnou konstrukci)
- Rychlost výstavby (záleží na zvolené metodě)
- Lze vyrábět vylehčené dílce s uzavřenými komůrkami (nelze vyrobit jinou technologií)
- Lze tisknout mechanicky spojené části (okna, dveře vč. rámu a pantů)
- Nevzniká nadbytečný odpad
- Lze kombinovat různé materiály u jednoho výrobku
- Méně pracovníků na stavbě

[9]

Největší výhodou u 3D modelování je jednoduchost, se kterou lze vytvářet složité tvary. Vše je namodelováno v programu a tiskárna to podle modelu vytiskne. Nejsou zapotřebí složité tvary bednění a pracovníci, kteří ho poskládají dohromady. Tím vzniknout menší náklady na výstavbu.

Další výhodou 3D tisku je rychlost výstavby (odvíjí se podle metody). Většina metod, ale umožní malý objekt vytisknout za 3 až 4 dny místo 14 dnů u klasické výstavby. Díky tomu se snižuje i riziko úrazu. Podle mě je to určitě výhoda. V dnešní době je výstavba zdoluhavá a ovlivňují to hlavně technologické přestávky, které u 3D tisku nejsou.

Tyto metody lze použít i v rozvojových zemích, kde potřebují levnou a rychlou výstavbu budov. V současnosti je 3D tisk drahou záležitostí, ale postupem času se to určitě zlepší a bude výhodnější než klasická metoda.

3D tisk je i ekonomický z ohledu materiálu. Používá se ho méně při výstavbě a nevzniká nadbytečný odpad. Materiál, který se používá je i zrecyklovaný stavební odpad. Tím snižuje dopad na životní prostředí. Díky tomu nebudou vznikat žádné další skládky a díky recyklaci materiálu budou současné skládky a skládky stavební sutě i prospěšné.

Další výhoda je, že se u 3D tisku používá většinou zrecyklovaný materiál, tím se při tisku vypouští mnohem méně emisí CO₂ do ovzduší a šetří se znova životní prostředí. [2] [16] [27]

Díky 3D tiskárnám je na stavbě potřeba méně pracovníků. Tiskárny vše obslouží sami. Pracovníci kontrolují pouze správný běh tiskáren a dostatek materiálu.

6.8 Nevýhody 3D tisku

Oproti klasickým technologiím (stavební technologie, odlévání, CNC obrábění kovu, vakuové vstřikování apod.) vznikají nevýhody:

- Nižší kvalita povrchu a úprava tištěného výrobku
- Horší mechanické vlastnosti (záleží na volbě materiálu)
- Omezené rozměry staveb
- Vysoká cena oproti klasické výstavbě (ta vzniká kvůli vysoké ceně 3D tiskáren, jejich provozem a cenou materiálu, ze kterého se tiskne)

[2] [9]

V současnosti je pro 3D tisk nevýhodou přímo sama metoda. Metoda není jedna z klasických, a proto pro ni nejsou žádné výpočty, jak statické tak v odolnosti v čase. Je to obtížné realizovat, proto se musí ze začátku provádět experimenty, na kterých budou všechny výpočty prověřeny. [16]

Další nevýhodou je, že u 3D tisku zatím není vyřešené překlenutí stropních konstrukcí. Je zapotřebí využít klasické stropní bednění, jako podporu pro 3D tiskárnu nebo použít prefabrikované stropní dílce.

Vysoká cena je dána tím, že 3D tiskáren je málo. Převoz z místa na místo je také nákladný, ale záleží na velikosti 3D tiskárny. U velkých portálových tiskáren se převoz provádí pomocí nákladních automobilů a ty si účtují vyšší sazby. U menších tiskáren (malé mobilní) se převoz koná dodávkami, které nejsou tolik nákladné a může je převést i menší stavební firma. Dále má na cenu vliv i použitý materiál. Ten je oproti klasickému dražší, protože je branný zatím pouze, jako zkušební. Firmy ho používají ke zkouškám a k výrobě prototypů.

7 Příklady staveb ze 3D tiskárny

Na světě je už vytištěna spousta staveb ze 3D tiskáren. V této kapitole si některé z nich přiblížíme.

7.1 10 malých domů v Šanghaji

V roce 2015 vyvinula společnost WinSun Decoration Desing and Engineering systém, který vytiskne 10 domů za den. Tato společnost se zabývá výrobou materiálů a působí v Číně.

Tiskárna, která vytiskla tyto domy, pracuje s materiálem, který byl vyřazen z oběhu. Byl to stavební materiál a cement, který byl díky tiskárně zrecyklovaný a znova použitý. Každý objekt byl vytištěný z 3D stěn a základů, ale střecha byla zhotovena z kovové konstrukce.

Jedna budova byla vytištěna za méně než 5 000 USD (115 000 Kč). Najednou se mohly tisknout 4 budovy. Bylo zapotřebí málo lidské práce, protože tiskárna pracovala sama.

Jednotlivé části budov byly vytištěny v továrně a na stavbu byly poté převezeny, kde se smontovaly dohromady.

WinSun si myslí, že v budoucnu bude tato technika použita při výstavbě větších domů nebo i mrakodrapů. [1] [5] [27]

7.2 Kancelář v Dubaji

První kancelářská budova tohoto typu vznikla v Dubaji v roce 2016. Na její stavbě se také podílela čínská firma WinSun. Tato budova posouvá design u 3D tisku na úplně jinou úroveň. Části stavby vznikly pomocí 3D tiskárny, která je dlouhá 36,6 m, široká 12,2 m a vysoká 6,1 m a byly vytištěny během 17 dnů. Tisk částí provádělo velké robotické rameno. To vytvořilo ve stěnách i otvory pro instalaci potrubí a elektroinstalace. Materiál, ze kterého je budova postavena, je speciální směs vyztuženého betonu (speciální směs cementu, písku, vláken a přísad) a zrecyklovaného stavebního materiálu. Celá stavba má plochu okolo 250 m².

Díky 3D tisku byla stavba až o 50 % levnější, než kdyby se stavěla obvyklým způsobem. Stavba byla postavena za 2 dny a celkem se na ní podílelo 18 lidí. Jeden technik, který dohlížel na správný tisk. Sedm dělníků, kteří instalovali jednotlivé stavební

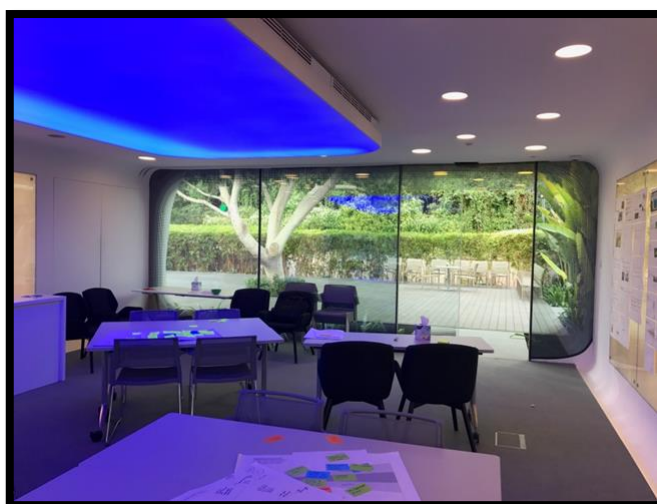
části. Deset elektrikářů a specialistů, kteří měli na starosti elektrotechnické práce.

Budova teď slouží, jako správní kancelář pro „Museum of the Future“ a poskytuje ředitelství pro Dubai Future Foundation. [2] [9] [37] [38]



Obr. 34: Budova kanceláře v Dubaji

Zdroj: [37]



Obr. 35: Ukázka vnitřního prostoru v budově

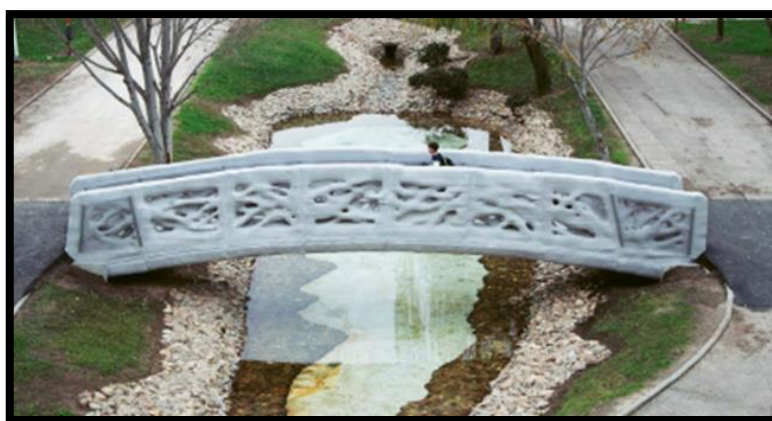
Zdroj: [38]

Tato stavba je na pohled moc pěkná. Při pohledu na ní, není vůbec poznat, že byla vytištěna na 3D tiskárně.

7.3 Pěší most v Madridu

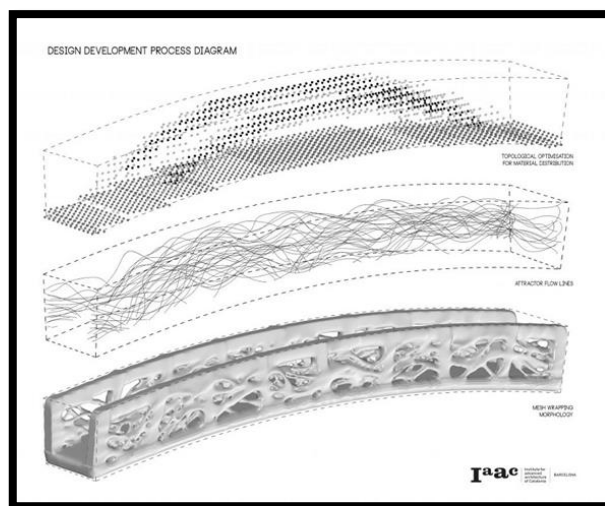
První most vytištěný na místě provedla španělská firma ACCIONA. Byl slavnostně otevřen 14. prosince 2016 v městském parku Castilla-La Mancha v Alcobendas v Madridu. Vznikl z mikrolegovaného (vyztuženého) betonu, který byl na sebe po vrstvičkách nanášen pomocí robotu. Rozměry mostu jsou 12 m na délku a 1,75 m na šířku. Tisk celého mostu trval dva měsíce. Jeho podoba připomíná stromovité struktury.

Návrh mostu byl vytvořen Institutem pokročilé architektury IAAC v Katalánsku. Společnost ACCIONA měla na starost konstrukční návrh, vývoj materiálu a technologii 3DBUILD. 3D tiskárna, která zde byla použita, byla od firmy D-Shape. [1] [4] [30]



Obr. 36: Pěší most v Madridu

Zdroj: [30]



Obr. 37: Návrh pěšího mostu

Zdroj: [39]

Na první pohled je vidět, že tento most je jiný než ostatní. Jeho struktura je jedinečná. Na světě není zatím žádný jiný takový most. Při návštěvě Madridu stojí určitě za navštívení. Kde jinde na světě se v této době dá projít po mostu vytvořený 3D tiskárnou.

7.4 Dům Apis Cor

Dům Apis Cor vytvořila stejnojmenná společnost za pomoci společnosti PIK. Byl vybudován v roce 2016 pomocí mobilní 3D tiskárny na beton. Jeho celková plocha je 38 m².

Objekt byl vytištěn na tiskárně o rozměrech 4 x 1,6 x 1,5 metru a byl vytištěn na místě. Tuto tiskárnu lze nastavit za 30 minut a nepotřebuje speciální plochu pro tisk, protože je vybavena aktivním protizávaží pro stabilizaci. Její tisková plocha je 132 m² a tiskne pomocí otočného manipulačního ramene ve 360°. Může tisknout objekty do 3,3 metrů výšky. Tisková směs, která se zde použila pro vyztužení, je doplněna o další přísady a tím dosahuje nosnosti až 550 kN. Na stavbu je dodávaná, jako suchá směs a až na místě je v mobilní míchací stanici smíchána s vodou.

Apis Cor je vytvořen ze stěn z betonu, které slouží jako bednění. Do těchto stěn je vkládána plastová výztuž po 600 mm, která je poté zalita betonem s vertikální výztuží. V určitých místech se nachází pěnová izolace, která je umístěná v dutinách k tomu určených. Střecha je z polymerové membrány a výplně otvorů byli instalovány ručně.

Celková cena stavby se pohybovala okolo 10 134 USD (240 000 Kč) nebo 275 USD/m² (6 300 Kč/m²) a výstavba trvala 24 hodin. [2]



Obr. 38: Dům Apis Cor

Zdroj: [2]

7.5 Ocelový most v Amsterdamu

První ocelový most vyrobený pomocí 3D tiskárny byl vytvořen v Amsterdamu v Nizozemsku. Postavila ho soukromá společnost MX3D. Byl vyrobený z nerezové oceli v rozměrech 12 m na délku a 6,3 m na šířku za pomoci metody Laserové ukládání kovů (LMD).

Hlavním projektantem a designérem byl pan Joris Laarman. Pod jeho vedením se vytiskl prototyp. Ten byl poté ukázán veřejnosti v Einhovenu v říjnu 2018.

V současné době je most v hale u firmy MX3D, kde bude docházet k dalším úpravám (např. vybavení inteligentními senzory) a bude prověřena jeho pevnost a odolnost. Nizozemské úřady totiž požadují osvědčení o bezpečnostním standardu, aby mohl být most usazen na místo určení. [10] [30]



Obr. 39: Tisk ocelového mostu

Zdroj: [30]



Obr. 40: Prototyp ocelového mostu

Zdroj: [30]

7.6 Budova Bauhaus v Amsterdamu

Budova Bauhaus byla postavena stavebně technologickou společností Aectual v Amsterdamu za pomoci architektů DUS. Společně vytvořili románovou budovu s názvem „Tiny Bauhaus“.

Stavba byla vytištěna na 3D tiskárně. Díky tomu měli architekti svobodu při jejím návrhu. Při pohledu na ní jsou na zdech vidět baldachýny, regály a místa pro sezení. Materiál, ze kterého je stavba vytištěna zahrnoval bioplasty, paletu skla, dřeva a kamene. Použitý bioplast je plně recyklovatelný a může mít jakoukoliv barvu.

Generální ředitel společnosti Aectual Hans Vermeulen řekl o jejím designu: *„Bauhaus vedl k modernizaci architektury, standardizace a hromadné výrobě, a nyní vstupujeme do nové éry nabízející hromadnou výrobu na míru. Umožňujeme architektům, jako je studio DUS, vytvářet skutečně zakázkové designy.“* [40]



Obr. 41: Budova Bauhaus

Zdroj: [40]



Obr. 42: Pohled na budovu Bauhaus z druhé strany a ukázka baldachýnů

Zdroj: [40]

7.7 Canal House v Amsterdamu

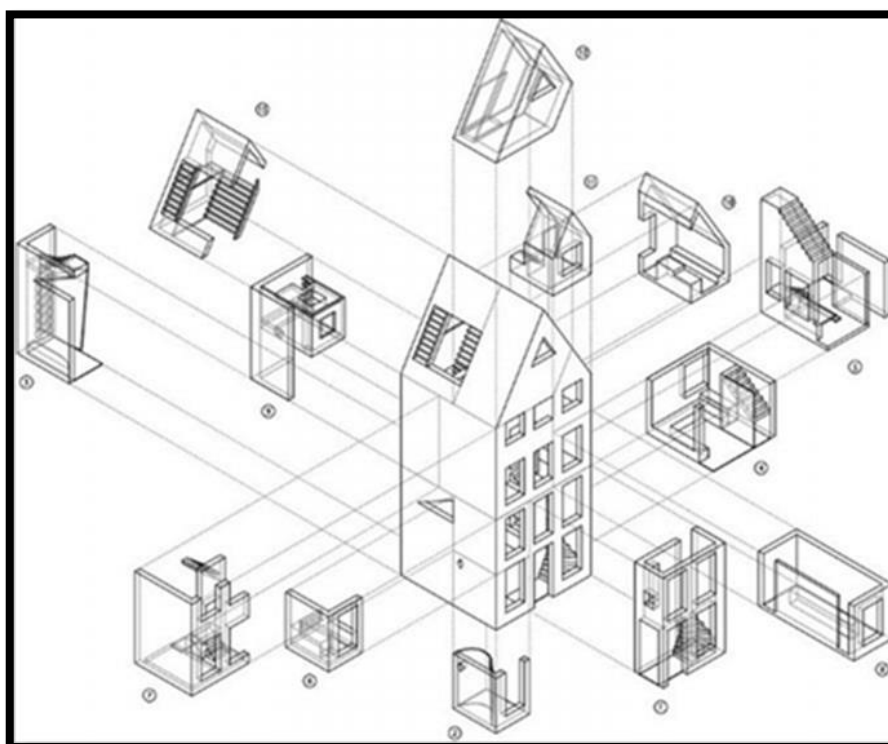
Společnost DUS Architects v Amsterdamu si dala za cíl vytisknout 3D dům. Projekt 3D domu s názvem Canal House má vyrůst v Amsterdamu poblíž kanálu Tolhuiskanaal. Bude to objekt se 13 pokoji.

U kanálu Tolhuiskanaal bude umístěna tiskárna s názvem „KamerMaker“. Ta bude tisknout části z bioplastické směsi plastových vláken a 80 % rostlinného oleje. Rozměry jednotlivých částí budou maximálně o rozměru 2,2 x 2,2 x 3,5 m. Ty se poté do sebe budou skládat, jako stavebnice z Lega. Každá část bude dutá, a aby byla stavba pevnější, budou vyplněny biobetonem a výztužnými materiály. Všechny použité materiály budou recyklovatelné. Pro umístění potrubí a elektroinstalace budou též sloužit duté otvory v jednotlivých částech. [5] [10] [41]



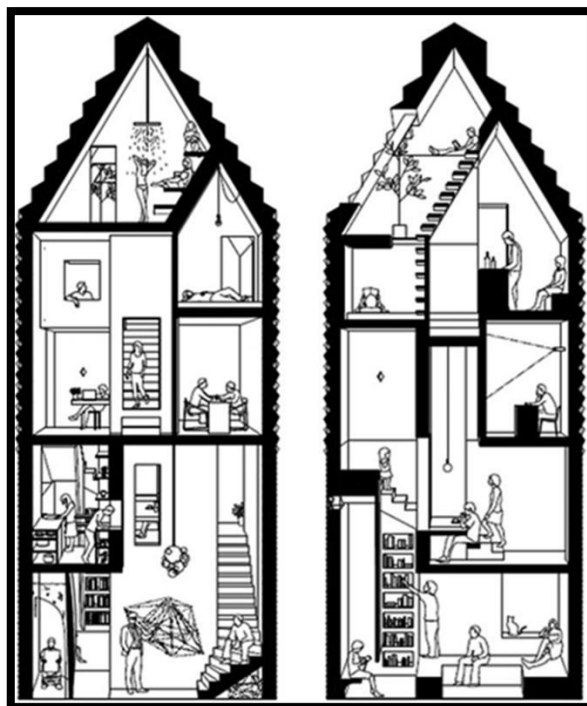
Obr. 43: Canal House v Amsterdamu

Zdroj: [5]



Obr. 44: Rozklad modelu Canal House

Zdroj: [5]



Obr. 45: Řez modelem Canal House

Zdroj: [5]



Obr. 46: Ukázka stavebního bloku pro Canal House

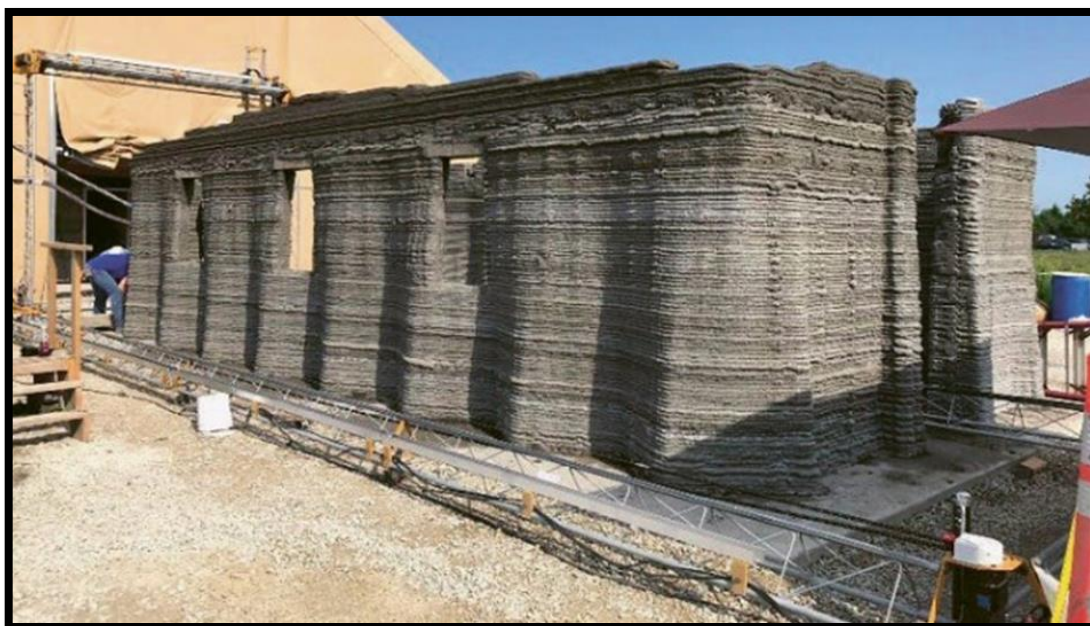
Zdroj: [5]

7.8 Kasárny pro Americkou armádu

Velitelství US Marine Corps Systems Command nedávno vyvinulo novou technologii pro 3D tisk kasáren. Jako prototyp vytisklo první budovu ve výzkumném centru v Champaigni v Illinois. Tiskárna vytiskla budovu o rozloze 46 m² za 40 hodin. Kdyby takovou budovu stavěli mariňáci obvyklým způsobem, tzn. dřevěnou, trvalo by jim to v 10 lidech asi 5 dní.

3D tiskárna vytiskne kasárny podle předem vytvořeného počítačového modelu. Jako materiál tiskárna používá beton, který míchají sami mariňáci a plní s ním tiskárnu. Beton proudí z trysek a ukládá se po vrstvách na sebe. Okna, dveře a konstrukci střechy provedou sami mariňáci.

Velitelství se snaží tento proces vylepšit. Chtějí přijít na to, jak automatizovat míchání betonu a plnění tiskárny. Díky tomu by budova kasáren mohla být postavena i za pouhý den. Dále by to ušetřilo pomocnou lidskou sílu, peníze a čas. [13] [14]



Obr. 47: Ukázka prototypu vytištěné budovy kasáren

Zdroj: [13]

8 Praktická část – Model budovy ze 3D tiskárny

Praktická část je založená na porovnání klasické metody ve stavitelství s 3D tiskem. Stavba, která je zde řešena je nová budova NTIS a CTPVV Západočeské univerzity v Plzni. Je umístěna v Plzni na Borech (Zelený trojúhelník) a výstavba byla zahájena v roce 2010 a dokončena v roce 2014.

Budova se skládá ze dvou částí, a to Výzkumného centra Fakulty aplikovaných věd (NTIS) umístěného ve vyšší části a Fakultou aplikovaných věd v nižší části, ve které se nachází i Centrum technického a přírodovědeckého vzdělávání a výzkumu (CTPVV). Ty jsou mezi sebou propojené. Budova NTIS je šestipodlažní a budova CTPVV je čtyřpodlažní. Celá stavba je poté podsklepená, kde se nachází podzemní parkoviště pro zaměstnance. [42]



Obr. 48: Budova NTIS a CTPVV

Zdroj: Autor

8.1 Porovnání metod s ohledem na výstavbu

V této části je porovnaná klasická metoda se dvěma metodami pro 3D tisk, a to s metodou Vytváření kontur (CC) (*Odst. 4.1.2.1*) a Betonovým tiskem (CP) (*Odst. 4.1.3.*).

Objekt má půdorys ve tvaru H a celkové rozměry této stavby jsou 95,32 x 75,5 m. Je složený ze dvou částí, které jsou mezi sebou propojené společným zázemím. Stavba má rastr v modulu 7,5 x 6 m, ten je stejný pro obě části, jen ta jedna je mírně pootočená. Celá stavba je podsklepená, kde je 155 parkovacích stání, z toho je 8 míst pro osoby s omezenou schopností pohybu. V objektu se dále nachází zasedací místnosti a sály, učebny, kanceláře, laboratoře a společné zázemí.

Konstrukční výška objektu je v 1.PP 3300 mm, v 1.NP 5200 mm, ve 2.NP 4800 mm a ve 3.-6.NP 3600 mm. Světlá výška objektu je v 1.PP 2230 mm, v 1.NP 3700 mm, ve 2.NP 3700 mm a ve 3-6.NP 2750 mm.

Celková užitková plocha objektu je 24 460,66 m² a celkový obestavěný prostor je 102 800,5 m³. Stavba je dále orientovaná podélnou osou na sever a kanceláře s laboratořemi jsou orientované na západ – východ. [43]

8.1.1 Základy

Před zahájením stavebních prací byly na místě stávající stavby provedeny všechny potřebné průzkumy, tj. inženýrsko-geologický, základní geologický, radonový, pyrotechnický. Vše bylo zhotoveno pomocí průzkumných vrtů. Dále bylo provedeno zhodnocení základových poměrů.

Podle výsledků těchto průzkumů se zvolilo založení objektu na pilotách. Než se začali vytvářet samotné základy stavby. Bylo staveniště a základová spára překontrolovaná statikem, odborným geologem a hydrogeologem, kteří schválili převzetí staveniště. Dále bylo vytyčeno umístění všech inženýrských sítí. Vše je zapsáno ve stavebním deníku.

Tradiční metodou je stavba založena na vrtaných pilotách v rastru 7,5 x 6 m. Ty jsou dlouhé 14 až 16 metrů podle jejich zatížení a jsou vyplněné betonovou směsí. Piloty jsou o průměru 900 - 1200 mm a jsou doplněny o trubku s průměrem 120 mm. Ta je uložena ve středu piloty a je vetknutá do tzv. bílé vany, kde je celkem 150 mm této trubky. Dále je u této trubky stabilizační trn dlouhý 600 mm. Piloty jsou zhotoveny z betonu C 30/37 XC3 XF2, jejich průsakovost je maximálně 50 mm a krytí výztuže je 75 mm.

Dále se spodní stavba skládá z podkladního betonu C 12/15, který je v tloušťce 80 - 100 mm a z vanové konstrukce, tzv. bílé vany z vodostavebního betonu, která je založena na vrtaných pilotách. Tloušťku má 400 mm a její stěny mají tloušťku 300 mm. Je z betonu C 30/37 XC3 XF2 XA2, která má maximální průsak 35 mm a krytí výztuže 50 mm. [43]



Obr. 49: Výkopové práce na stavbě budovy NTIS a CTPVV

Zdroj: [42]

Základy stavby vytvořené metodou Vytváření kontur budou řešeny stejně, jako u té stávající, tzn. vrtané piloty a bílá vana z vodostavebního betonu. Je to dáno tím, že v současnosti ještě nebyl nalezen způsob, jak pomocí 3D tisku vytvořit takovéto základy (piloty). Běžné základy, tzn. deska a pasy, už byly touto metodou vytvořeny.

U metody Betonového tisku budou základy vytvořeny stejně, jako u stávající stavby, tzn. vrtané piloty s bílou vanou. Je pravda, že piloty by mohli být zhotoveny, jako prefabrikovaný prvek vytvořený 3D tiskárnou, který by byl vsunut do předem připraveného výkopu. Tím, jak by pilota byla zhotovena předem ve výrobní hale, by se nedocílilo správného tření mezi pilotou a zeminou. Proto bude použita stávající metoda vrtaných pilot.

8.1.2 Nosný systém

Nosný systém u klasické metody je monolitický ŽB sloupový se skrytými průvlaky v rastru 7,5 x 6 m. ŽB sloupy v 1.PP jsou o rozměru 400 x 600 mm a jsou zde v kombinaci se ŽB rámy. V ostatních nadzemních podlažích jsou o rozměru 400 x 400 mm. Skryté průvlaky jsou o šířce 1200 - 1600 mm.

Stropní ŽB deska je nad 1.PP o tloušťce 400 mm. Ostatní ŽB monolitické desky jsou

o tloušťce 330 mm a nachází se v nich skryté průvlaky. V místech, kde se nachází prostupy vzduchotechniky, jsou průvlaky o výšce 300 mm umístěny pod ŽB stropní deskou.

Stropní desky nad výtahem jsou o tloušťce 200 mm a nad strojovny se vzduchotechnikou jsou o tloušťce 250 mm.

Všechny nosné konstrukce vrchní stavby jsou z betonu C 30/37. Krytí výztuže u sloupů je 45 mm a u stropní desky 35 mm. [43]

Nosné konstrukce u metody Vytváření kontur budou zhotovené na místě 3D tiskárnou. Ta bude tisknout všechny konstrukce, které se na stavbě nacházejí. Konstrukce budou zhotoveny z cementové směsi, která bude vyztužena přidanými vlákny, aby se zvýšila její pevnost a dále ještě vkládanou výztuží.

Vše bude zhotoveno po jednotlivých podlažích. Jakmile budou hotové nosné konstrukce jednoho podlaží, přesunou se tiskárny o podlaží výše.

Nosnou svislou konstrukci, což jsou především sloupy, bude tisknout tiskárna na portálovém systému. Dále bude tisknout, ale i konstrukce na ně napojené. Ta bude vše tisknout podle projektové dokumentace. Sloupy v 1.PP budou o rozměrech 400 x 600 mm a v ostatních podlažích budou o rozměrech 400 x 400 mm, stejně jako u klasické metody. Pouze nebudou plně vyplněny, ale budou v nich dutiny, které vytvoří 3D tiskárna a tím se ušetří i použitý materiál na nosné konstrukce. Přestože je směs vyztužena vlákny, není dostatečně pevná. Proto se bude muset vkládat do konstrukcí dodatečná výztuž. Tu budou ukládat buď pomocní pracovníci, anebo speciální roboti, kteří na to budou naprogramováni. Tato výztuž bude vložena do vytvořených dutin a poté bude zalita cementovou směsí o menší pevnosti. Nebo by mohla být zalita i směsí z cementu a izolačních materiálů u obvodových nosných sloupů. Tím by se zajistily lepší tepelně izolační vlastnosti. Takovéto materiály, ale ještě nejsou vytvořeny. Dá se o nich pouze uvažovat. Myslím si, že postupem času někdo takovýto materiál vynalezne.

Vytvořený sloup ze 3D tiskárny bude sloužit, jako tzv. ztracené bednění a tím zajistí i správné krytí výztuže.

Problém nastává u vytvoření vodorovných nosných konstrukcí. Portálová tiskárna sama nezvládne vytisknout konstrukce na delší vzdálenosti. Sloupy jsou v rastru 7,5 x 6 m, což už je pro tiskárnu moc daleko. Směs, která je zde používána, není na takovéto vzdálenosti tvořena. Proto, se zde bude muset postavit dočasné stropní bednění, jako u

klasické monolitické metody. Tloušťky vodorovných konstrukcí budou stejné, jako u stávající stavby, tzn. 200 – 400 mm dle umístění. Vodorovné konstrukce se budou muset také dodatečně vyztužit. Materiál bude použitý stejný, jako u svislých konstrukcí. Díky přidaným urychlovačům ve směsi, budou mít konstrukce dříve dostatečnou pevnost a stropní bednění se bude dát moc dříve odstranit než u klasické metody. Tím se zrychlí výstavba.

Nosný systém u Betonového tisku bude vytvořený ve výrobní hale pomocí 3D tiskáren. Ty budou tisknout jednotlivé prvky podle výkresové dokumentace. Každý prvek bude vytištěný tak, aby do něho zapadl další, tzn. že, na prvku bude vytvořené pero a drážka. Tím se celý systém mezi sebou propojí. Všechny prvky budou mít v sobě vytvořené dutiny, které zhotoví 3D tiskárna. Tím se docílí toho, že budou odlehčené a ušetří se i spotřeba materiálu.

Jakmile budou jednotlivé prvky připravené, převezou se na stavbu, kde se sestaví dohromady, jako u klasické prefabrikované metody.

Nosný systém zde budou tvořit sloupy a skryté průvlaky. V 1.PP budou sloupy o rozměru 400 x 600 mm a v ostatních podlažích budou o rozměru 400 x 400 mm. Sloupy budou podobně, jako u předchozí metody s dutinami, které vytvoří 3D tiskárna ve výrobní hale. Díky pevnějšímu materiálu se nebude muset dělat dodatečné vyztužování.

Vodorovné konstrukce budou vytvořeny ve výrobní hale pomocí 3D tiskárny. Pouze tyto konstrukce budou delší než 5,5 m, aby dokázaly překlenout rastr dlouhý 6 m. Budou tvořeny stejně, jako svislé konstrukce. Díky tomu odpadá stropní bednění a zrychlí se tím výstavba. Tloušťky vodorovných konstrukcí budou stejné, jako u stávající stavby, tzn. 200 – 400 mm dle umístění.

8.1.3 Výplňové konstrukce

Objekt je uvnitř rozdělen zděnými konstrukcemi. Ty jsou u klasické metody zhotoveny z děrovaných cihelných bloků o tloušťce 75, 115, 125, 150 a 190 mm. Tyto vyzdívky musí splňovat akustické vlastnosti podle místnosti, kde jsou použité. Vyzděny jsou na maltu dle technické dokumentace (malta M5 a M10).

Všechny zděné konstrukce musí být uchyceny do nosného systému. [43]

Původní vyzděný obvodový plášť bude u metody Vytváření kontur nahrazen vytištěnými stěnami z cementové směsi. Ten bude tisknout také tiskárna na portálovém systému. Tyto stěny budou o tloušťce 365 mm a nebudou zcela vyplněné. Uvnitř vzniknou dutiny, jako u vytištěných sloupů. Protože se bude jednat o obvodový plášť, nebude nutné jej tolik vyztužovat jako nosné sloupy. Proto budou do něj vloženy výztuže s větší osovou vzdáleností. Tyto dutiny budou vyplněny cementovou směsí, tam kde bude výztuž. Tam kde výztuž nebude, můžou zůstat dutiny nevyplněné. Nebo lze všechny dutiny vyplnit směsí z cementu a izolačních materiálů. Takovéto materiály ještě nejsou vytvořeny, jak už bylo zmíněno dříve. Dá se o nich pouze uvažovat. Tím by byly, ale zajištěny lepší tepelně izolační vlastnosti.

Ostatní konstrukce, které slouží jako dělicí, budou zhotoveny též pomocí 3D portálových tiskáren. Ty budou vše tisknout podle navrženého modelu, který mají uložený ve svém softwaru. Dělicí stěny budou o různých tloušťkách a to 75, 115, 125, 150 a 190 mm. Tyto stěny budou mít v sobě také dutiny vytvořené tiskárnou. Díky tomu bude menší spotřeba použitého materiálu a zároveň budou tyto dutiny sloužit i jako zvuková izolace.

U metody Betonový tisk bude zděný plášť stavby zhotovený 3D tiskárnou ve výrobní hale. Bude vytištěn stejně, jako všechny ostatní prvky ve výrobní hale. Stěny budou mít tloušťku 365 mm a budou s dutinami. Tyto dutiny by se mohli dát vyplnit speciální směsí, která by napomohla tepelně technickým vlastnostem. O této směsi se dá pouze jen spekulovat, zatím jí nikdo nevynechal. Myslím si, ale jak se pořád zlepšuje stavitelství, tak nebude trvat dlouho a někdo takovou směs vytvoří.

Tiskárna na těchto obvodových stěnách vytvoří pera a drážky, aby se konstrukce mohli k sobě lehce spojovat a vytvořili tím celek.

Dělicí konstrukce, budou též zhotoveny ve výrobní hale. Budou o různých tloušťkách, a to 75, 115, 125, 150 a 190 mm. Tyto konstrukce budou též vylehčené dutinami. Tím se zmenší spotřeba materiálu a dutiny budou zároveň sloužit, jako zvuková izolace. I tyto konstrukce budou mít na sobě vytvořené pero, aby se mohli dát propojit s ostatními prvky.

8.1.4 Schodiště

Hlavní schodiště a vedlejší, které se nachází na východní straně, jsou u klasické metody betonová monolitická. Hlavní schodiště uprostřed objektu je pravotočivé

dvouramenné. Má průchozí šířku 1700 mm a mezipodestu o šířce 1700 mm. Schodiště v pravé části je levotočivé dvouramenné a schodiště v levé části je pravotočivé dvouramenné. Obě mají průchozí šířku 1500 mm a mezipodestu o šířce 1500 mm. Vedlejší schodiště, které se nachází ve vnějším prostředí, má tři ramena. Jejich průchozí šířka je 2150, 2000, 2150 mm. Všechna schodiště mají sklon do 28°.

Ostatní schodiště jsou ocelová a splňují všechny požadavky na požární ochranu. Jejich průchozí šířka je 1650 mm. [43]

U Vytváření kontur budou hlavní i vedlejší schodiště vytvořené na místě pomocí 3D metody. Budou umístěné na stejném místě, jako u stávající stavby. Použitý materiál bude stejný, jako u nosných konstrukcí, tzn. cementová malta vyztužená vlákny. Pro spodní část schodiště bude zhotovená podpůrná konstrukce s bedněním. Je to proto, že tiskárna nedokáže tisknout plochy pod menším úhlem než 45°. Tyto schodiště budou mít sklon 28°. Dále sem bude též dodatečně vložena výztuž.

U Betonového tisku budou všechna schodiště provedena pomocí 3D tisku ve výrobní hale. Na stavbu budou poté dovezena a umístěna na stejné místo, jako u stávající stavby. Materiál bude použitý stejný, jako u nosných konstrukcí, tzn. cementová malta.

8.1.5 Obvodový a střešní plášť

Obvodový plášť stávající budovy je lehký zavěšený a prosklený. Vše je uchyceno na systému předsunutých hliníkových sloupkových profilech. Ty jsou kotveny k základové konstrukci a ke stropní konstrukci. Lehký plášť je tvořen z izolačního hliníkového sendviče a z provětrávaného obkladu z voštinových desek. Tyto desky jsou na hlavní a boční štítové stěně. Jsou velkoformátové a největší šířka je 1500 mm a výška 4000 mm. Tloušťka je 25 mm. Jsou tvořeny z hliníkového plechu tloušťky 1 mm, voštinovým jádrem a hliníkovým plechem s povrchovou úpravou. Tyto desky tvoří tzv. provětrávanou fasádu, kde vzduchová mezera má tloušťku 35 – 50 mm. U hliníkového sendviče je dodatečně přidána tepelná izolace o tloušťce 240 – 250 mm.

Každý prvek lehkého pláště je uchycený zvlášť k fasádě, aby ho šlo samostatně odjímat. Dále je vybaven tlumiči, kvůli vibracím, které vznikají větrem.

Částečně je obvodový plášť i zděný. Je vyzděný z cihelných bloků v tloušťce 365 mm P+D P10, P15 na maltu M5 a M10. Je zateplený minerální tepelnou izolací v tloušťce

300 mm. Celé je to omítnuté imitací pohledového betonu.

Střešní konstrukce je plochá a nachází se na ní střešní plášť, který je tvořen kačírčkem frakce 16-32 mm v tloušťce minimálně 100 mm, živičnou hydroizolací z SBS modifikovaného asfaltu z polyesterové rohože a aditivy proti prorůstání kořenů v tloušťce 5 mm, tepelně izolačními dílci z EPS 100S Stabil s kaširovaným asfaltovým pásem v tloušťce 350 mm a parotěsnou zábranou z živičného pásu. V místě atik, žlabů a atypických částí střechy jsou použity klempířské prvky z titanžinku v tloušťce 0,7 mm.
[43]



Obr. 50: Zděný obvodový plášť budovy NTIS a CTPVV

Zdroj: [42]

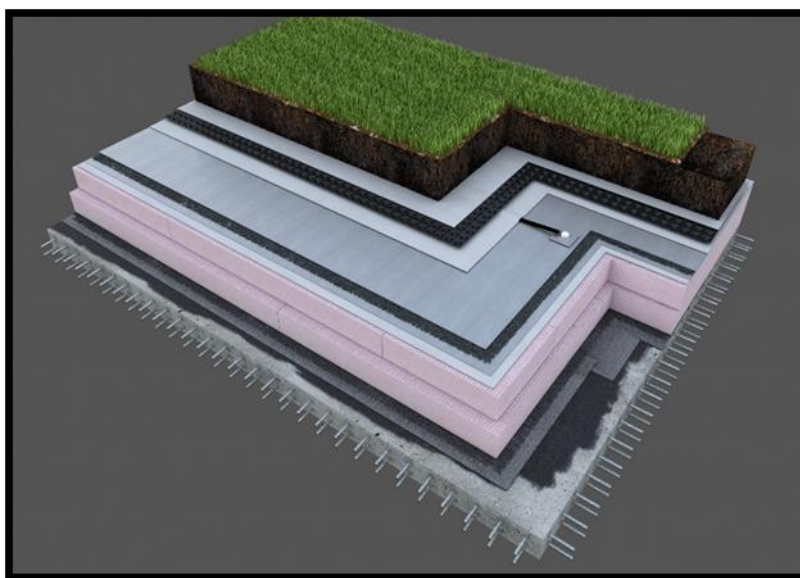


Obr. 51: Pohled na fasádu budovy NTIS a CTPVV

Zdroj: [42]

Obvodový plášť u 3D metod bude obdobný, jako u stávající stavby, tzn. bude lehký zavěšený a prosklený. Skládat se bude ze systému předsunutých hliníkových sloupkových profilů a bude ukotven do nosného systému stavby.

Střešní plášť může být proveden stejně, jako u stávající stavby nebo může být řešený, jako zelená střecha. U zelené střechy by se volila skladba s travnatým kobercem. Ten nepotřebuje tolik práce na údržbu, oproti ostatním skladbám. Skládal by se z trávnickového koberce, trávnickového substrátu, intenzivního substrátu, netkané textilie FILTEK 200, nopové fólie DEKDREN T20 GARDEN, netkané textilie FILTEK 500, pěnového polystyrenu s uzavřenou povrchovou strukturou DEKPERIMETR SD 150, rohože z prostorově orientovaných polyethylenových vláken DEKDREN P 900, pásu z SBS modifikovaného asfaltu s hliníkovou vložkou GLASTEK AL 40 MINERAL, nátěrem DEKPRIMER, monolitickou silikátovou vrstvou ve spádu a nosnou deskou. Nosná deska a deska ve spádu budou zhotoveny 3D tiskárnou. [44]



Obr. 52: Ukázka zelené střechy

Zdroj: [44]

8.1.6 Povrchové úpravy

Všechny podlahy u tradiční metody jsou navrženy dle technických norem, které odpovídají hygienickým a technickým požadavkům. Všude je zhotovena keramická dlažba. Ta je v místě dilatací prořezána a je zde uložena dilatace. Šířka dilatace je 10 – 15 mm.

Vnitřní omítky jsou rozděleny podle funkce a materiálu, na které byly omítány.

V 1.PP se nachází podzemní parkoviště a technické zázemí, proto je zde omítka jednovrstvá strojně omítaná. Ta se dá použít na beton i na lehčené stavební konstrukce. Skládá se z vápenného hydrátu, cementu a vápencového lomového písku. V technických místnostech je tenkovrstvá stěrková omítka. Vše je nakonec přetažené 2x tónovaným nátěrem včetně penetrace, který je otěruvzdorný.

V ostatních podlažích je jednovrstvá sádrovápenná omítka. Ta je strojně omítaná a dá se použít na všechny typy materiálu (beton i lehčené stavební prvky). Skládá se ze sádry, hydrátu, drceného vápence a jsou v ní organické podíly maximálně 1 %. Vše je nakonec také přetažené 2x tónovaným nátěrem včetně penetrace, který je otěruvzdorný.

Na sociálních zařízeních jsou omítky jednovrstvé jádrové a také keramické obklady. Omítky se skládají z vápenného hydrátu, cementu a vápencového písku. Není zde obsažena sádra, protože ta přitahuje vlhkost a to se zde nevyžaduje. V technických místnostech je omítka tenkovrstvá stěrková nebo jen nátěr na beton. Závěrečná úprava je zase 2x tónovaný nátěr včetně penetrace, který je otěruvzdorný.

Všechny omítky jsou omítnuty na rovný, rovnoměrně vyschlý, čistý podklad. Jsou zhotoveny podle technických předpisů výrobce. Spáry mezi různými stavebními prvky jsou přetažené armovací tkaninou do horní třetiny tloušťky omítky. A též jsou zhotoveny podle technických předpisů výrobce.

Ve všech omítkách jsou zhotoveny dilatační spáry. Ty zamezují popraskání omítek a obkladů při objemových změnách konstrukce. Spáry jsou zhotoveny podle technických předpisů výrobce.

Vnější omítky jsou tenkovrstvé vrchní. Ty lze použít do vnějšího prostředí. Jsou to probarvené silikátové omítky anebo 2x silikátový nátěr. Tyto omítky jsou zhotoveny na kontaktní zateplovací systém a mají zrnitost 1,5. V místě soklu je proveden vodoodpudivý nátěr.

Podhledy jsou řešeny, jako kazetové a sádrokartonové (SDK). Kazety jsou o rozměru 600 x 600 mm v tloušťce 15 - 20 mm. Kazety jsou zavěšené na rastru a mírně vystupují do interiéru. Mají dobré akustické vlastnosti, proto zde byly zvoleny.

Sádrokartonové podhledy jsou v místnostech, kde jsou provedené křivky, jako je hlavní vstupní podlaží a foyer konferenčního centra. Jsou uloženy na nosném rastru, který je upevněn k ŽB stropní konstrukci ve dvou úrovních. [43]

U metod z 3D tisku budou povrchové úpravy dělané stejně, jako u té klasické.

8.1.7 Dilatační spáry

Kvůli velkým rozměrům stavby musí být řešeny dilatační spáry. Ty umožňují rozdílné sedání stavby a zajišťují i objemové změny konstrukcí.

Dilatační spáry v klasické metodě jsou řešeny tzv. vloženým polem a vloženou dilatací. Vložené pole je provedeno pomocí vložených betonových desek. Vložená dilatace je uložena buď v profilu, anebo v lištách. Tvoří jí minerální rohož o tloušťce 20 – 30 mm. Šířka spáry musí být taková, aby umožňovala objemové změny a nedocházelo k poškozování konstrukcí. Dále musí být spára dostatečně těsná a nesmí zde vznikat tepelný most. Spára musí umožňovat pohyb konstrukcí.

Všechny dilatační spáry jsou zhotoveny podle technických předpisů, který udává výrobce. [43]

U Vytváření kontur vzniknou dilatační spáry pomocí 3D tiskárny. Ty budou mít dilatační spáry nahrané ve svém softwaru a podle toho je také zhotoví. Proto bude důležité na tyto spáry nezapomenout už při návrhu stavby. Musí být zanesené do všech výkresů, které budou mít k dispozici 3D tiskárny. Pokud nebude něco ve výkresu uvedeno. Tiskárny to nevytisknou a nastane problém.

Tiskárny vytisknou konstrukce podle návrhu a do dilatačních spár, které zde vytvoří, budou dodatečně vložené dilatační materiály (minerální rohož).

U sedání objektu budou dilatační spáry řešeny vloženým polem pomocí vložených betonových desek. Tyto desky vytvoří tiskárna předem, jako prefabrikovaný kus, který bude na místo dodatečně osazen.

Dilatační spáry u metody Betonový tisk budou provedeny na místě a vzniknou v místech, kde se na sebe budou napojovat jednotlivé části stěn (jednotlivé díly). Je důležité, aby byly navrženy v návrhu stavby a tiskárny ve výrobní hale poznaly, kde je mají předpřipravit. Tudíž musí být viditelné ve všech výkresech a i v softwaru, který je určen pro tyto 3D tiskárny.

Dilatační spáry, které budou zhotoveny kvůli roztažnosti materiálů, budou vyplněny dilatačními materiály (minerální rohoží). Rohož bude o tloušťce 20 - 30 mm. Šířka spáry musí být taková, aby umožňovala objemové změny a nedocházelo tak k porušení konstrukcí.

U sedání objektu budou dilatační spáry provedeny, tzn. vloženým polem. Tyto pole budou z desek vytvořených 3D tiskem. Budou zhotovené ve výrobní hale a na místě osazeny.

8.1.8 Tepelně technické vlastnosti

Prosklený plášť stávající budovy je řešený pomocí panelů a prosklených ploch. Prosklené plochy jsou řešeny z trojskla a mají součinitel prostupu tepla $U_w = 0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$. U neprůhledného prosklení je $U_g = 0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$. Celkově má fasáda $U_{cw} = 0,56 \text{ W/m}^2\text{K}$. Je z 50% prosklená a z 50% neprosklená nebo neprůsvitná (neprůhledná).

Panely jsou uchyceny do hliníkového systému lehkého obvodového pláště, který má prostup tepla $U_f = 0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$.

U vyzděného obvodového pláště cihelnými bloky s tepelnou izolací je součinitel prostupu tepla $U_w = 0,107 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Provětrávaná fasáda tvořená voštinovými deskami a vzduchovou mezerou má součinitel prostupu tepla $U_w = 0,112 \text{ W/m}^2\text{K}$. V úrovni parapetů a u neprůhledného skla je dodatečně vložena ještě teplená izolace v tloušťce 250 mm a součinitel prostupu tepla je $U_w = 0,137 \text{ W/m}^2\text{K}$. [43]

U metod 3D tisku nejsou známi zatím žádné tepelně technické parametry pro používaný materiál. Proto zatím nelze určit tyto parametry. Předběžně se dá, ale říci, že budou asi podobné, jako u betonu nebo cementových směsí.

U ostatních materiálů, které zde budou použity, budou parametry stejné, jako u stávající stavby.

Prosklený plášť bude shodný se stávající stavbou. Bude řešený z panelů a prosklených ploch. Prosklené plochy budou z trojskla a součinitel prostupu tepla bude $U_w = 0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$. Neprůhledné prosklení bude mít $U_g = 0,6 \text{ W/m}^2\text{K}$. Protože nevíme, jaké tepelně technické vlastnosti má materiál u této metody, nemůžeme říci, jaký bude součinitel prostupu tepla pro celou obálku budovy.

U lehkého obvodového pláště z voštinových desek také nelze říci, jaký bude součinitel prostupu tepla. Samotné desky mají svůj součinitel prostupu tepla, ale pro 3D materiál ho neznáme a tak nemůžeme říci, jaký by byl pro společnou konstrukci.

U jednotlivých 3D metod se musí provést určité zkoušky materiálů, aby se zjistily dané parametry a mohly se určit tepelně technické vlastnosti.

8.2 Porovnání metod

Hlavní rozdíl mezi klasickou metodou a metodami pro 3D tisk je ten, že odpadají technologické přestávky, které musí u monolitické metody být. Ty slouží hlavně proto, aby betonová směs dosáhla určité pevnosti a po zatížení se nezdeformovala a nezhroutila. Tyto přestávky bývají dlouhé 28 dní. Můžou se, ale zkrátit pokud se do betonové směsi přimíchají určité přísady a příměsi, např. urychlovače tuhnutí a tvrdnutí.

Další rozdíl je ten, že u metod 3D tisku nemusí být tolik pracovní síly. Je potřeba jen pár osob, které budou obsluhovat a kontrolovat tiskárny, zda pracují správně a budou jim dodávat potřebný materiál. Tyto tiskárny mohou pracovat 24 h denně a tím se také urychlí výstavba. Obsluhující osoby se u nich budou pouze střídat podle pracovních směn.

U metody Vytváření kontur, která se bude provádět přímo na místě, se musí vytvářet dodatečné bednění pouze u stropních konstrukcí, schodišť a dalších vodorovných prvků, které mají větší rozměry. Tiskárna totiž sama nedokáže překlenout velký prostor, proto potřebuje pomocné podpěry. Ty jsou stejné, jako u monolitické metody. Kvůli těmto podpěrám vzniká také technologická přestávka, ale díky speciální cementové směsi, která se u této metody používá, je doba této přestávky kratší.

U metody Betonový tisk, která se bude provádět ve výrobní hale, jako prefabrikovaná metoda, odpadají technologické přestávky. Na stavbu budou dovezeny rovnou hotové prvky, které se pouze osadí a propojí mezi sebou, aby vytvořili jeden celek.

Výstavba budovy NTIS a CTPVV trvala klasickou metodou 4 roky. U těchto dvou metod se zatím nikde neuvádí přesná rychlost tisku. Víme pouze to, že tloušťka vrstvy u Vytváření kontur je 13 mm (*Tab. 6*) a u Betonového tisku 6 - 25 mm (*Tab. 6*). Dále z *Tab. 3* lze zjistit, že stěny lze tisknout přibližně 1,2 m/min. Celková výška stávajícího objektu je 28,99 m a přibližně se zde nachází 1000 m stěn.

$$CC_1 = \frac{28,99}{0,013} = 2\,230$$

(rov. 1)

Zdroj: Autor

$$CC_2 = \frac{1\,000}{1,2} = 833,3 \text{ min}$$

(rov. 2)

Zdroj: Autor

$$CC = 2\,230 * 833,3 = 1\,858\,259 \text{ min} = 30\,970 \text{ h} = 1\,290 \text{ dní} = \mathbf{3,5 \text{ roku}}$$

(rov. 3)

Zdroj: Autor

$$CP1_1 = \frac{28,99}{0,006} = 4\,831,6$$

(rov. 4)

Zdroj: Autor

$$CP1_2 = \frac{1000}{1,2} = 833,3 \text{ min}$$

(rov. 5)

Zdroj: Autor

$$CP1 = 4\,831,6 * 833,3 = 4\,026\,228 \text{ min} = 67\,104 \text{ h} = 62\,796 \text{ dní} = \mathbf{7,7 \text{ roku}}$$

(rov. 6)

Zdroj: Autor

$$CP2_1 = \frac{28,99}{0,025} = 1159,6$$

(rov. 7)

Zdroj: Autor

$$CP2_2 = \frac{1000}{1,2} = 833,3 \text{ min}$$

(rov. 8)

Zdroj: Autor

$$CP2 = 1159,6 * 833,3 = 966\,295 \text{ min} = 16\,105 \text{ h} = 671 \text{ dní} = \mathbf{1,8 \text{ roku}}$$

(rov. 9)

Zdroj: Autor

Tab. 9: Porovnání časové náročnosti

Metoda	Klasická metoda	Metoda Vytváření kontur (CC) – tl. vrstvy 13 mm	Metoda Betonový tisk (CP1) – tl. vrstvy 6 mm	Metoda Betonový tisk (CP2) – tl. vrstvy 25 mm
Délka výstavby [roky]	4	3,5	7,7	1,8

Zdroj: Autor

Všechny výpočty jsou pouze zjednodušené. V *Tab. 9* je uvažováno vytvoření stavby pouze 3D tiskárnou. Dokončovací práce jsou zanedbané, a to proto, že při dokončení jednoho podlaží se tiskárna přesune o podlaží výše. V hotovém podlaží se mezitím začne s dokončovacími pracemi a tím se zkrátí čas, který je potřeba k dokončení prací. Tiskárna tiskne 24 h denně.

Metoda Vytváření kontur je časově podobná té klasické metodě. Je to proto, že se uvažovalo pouze s jednou tiskárnou. Na stavbě jich, ale může pracovat mnohem více a tím se zkrátí doba výstavby. Vše se bude odvíjet pouze podle počtu tiskáren. Dále se to, ale projeví na finanční stránce. Při použití více tiskáren bude stavba dříve hotová, ale finančně náročnější. Je to pouze na investorovi, co zvolí za variantu.

Rychlost metody Betonový tisk se odvíjí podle tloušťky vrstvy. V *Tab. 9* je vidět obří rozdíl mezi jednotlivými tloušťkami vrstev. U nejvyšší potvrzené vrstvy, což je 25 mm, je tisk rychlejší. Počítalo se všude pouze s jednou tiskárnou, ale může se zde použít více tiskáren, tím se zrychlí čas výstavby. Dále má vliv na časovou náročnost u této metody práce ve výrobní hale, tzn. lze pracovat za každého počasí a 24 hodin denně. To je další faktor, který může zkrátit dobu výstavby.

Po finanční stránce tyto metody nelze porovnat s klasickou metodou. Většina staveb, které byly zhotoveny 3D tiskárnou jsou prototypy a ceny se uvádí pouze u některých. Ceny těchto staveb jsou pouze orientační a záleží na jejich rozměrech. Všechny zhotovené objekty byly pouze malých rozměrů, a proto nelze určit, jaká by byla cena u takto velké stavby. Dá se pouze předpokládat, že je to nová technologie, což se bude odvíjet i na ceně a proto bude vyšší než u klasické metody.

8.3 Model ze 3D tiskárny

Cílem práce je vytvořit model stavby na 3D tiskárně. K vytvoření 3D modelu je použit program ArchiCAD 21, ve kterém se vytvořil model 1.NP budovy NTIS a CTPVV.

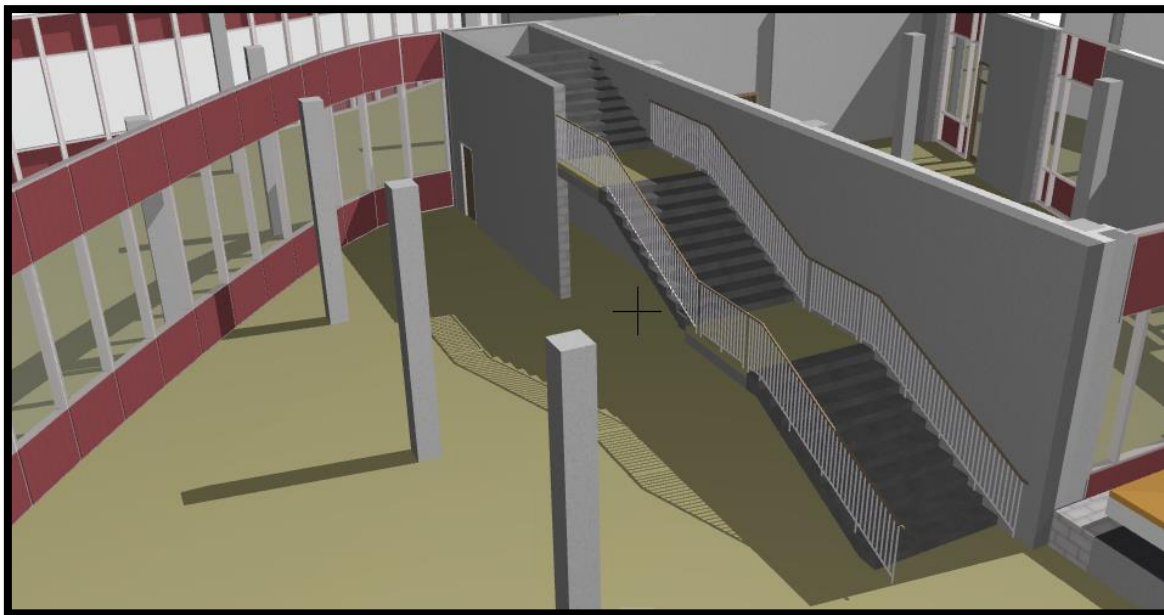


Obr. 53: Model budovy NTIS a CTPVV z ArchiCADU 21

Zdroj: Autor

Model na vytvoření byl složitější. Hlavně pro svoje rozměry. V programu to trvalo přibližně 50 hodin, než se vytvořilo jedno podlaží. Vše se zhotovilo podle získaných výkresů od společnosti Ateliér Soukup. Ta poskytla výkresy v DWG souboru, které se poté otevřely v programu AutoCAD 2016 a uložily, jako soubor pro program ArchiCAD 21.

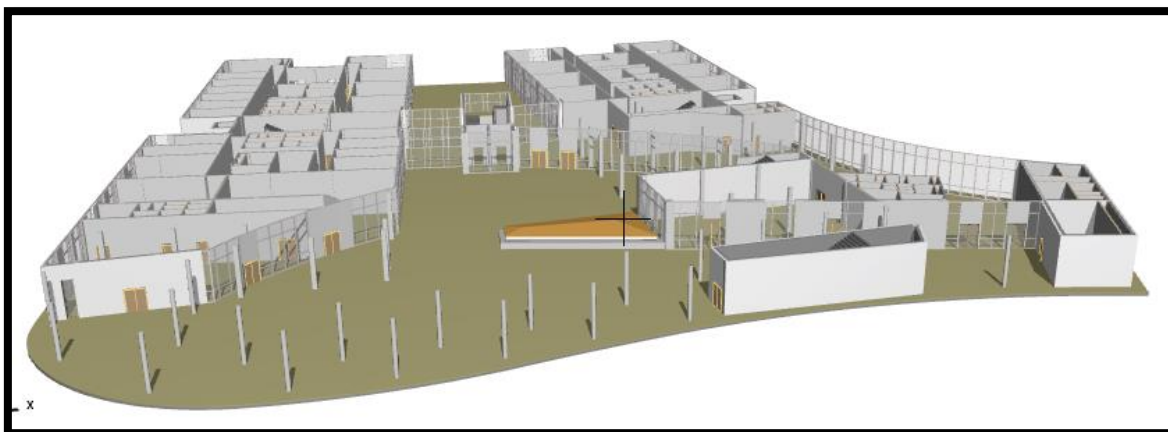
Modely jsou vytvořené dva. Jeden propracovaný do detailů a druhý pro 3D tiskárnu. V propracovaném detailu jsou vytvořené všechny dveře, okna, lehký obvodový plášť a schodiště i se zábradlím.



Obr. 54: Model schodiště se zábradlím

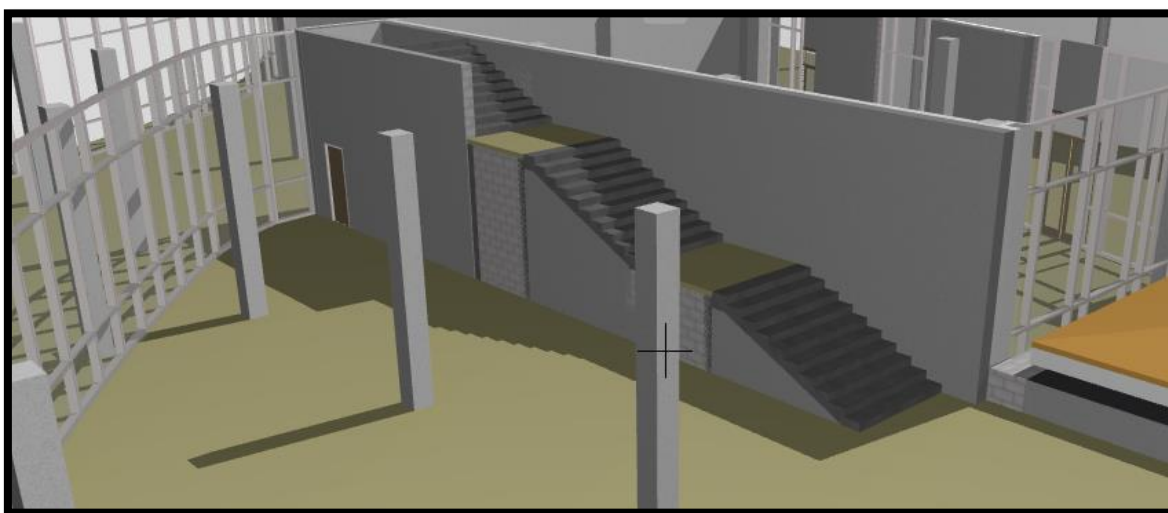
Zdroj: Autor

V modelu pro 3D tiskárnu musely nastat nějaké změny, a to hlavně proto, že tiskárna nedokáže vše vytisknout. Lehký obvodový plášť byl u prvního modelu na 3D tiskárnu moc tenký, proto musel být zhotoven silnější, aby ho tiskárna dokázala vytisknout a byl v modelu vidět. Takováto změna nastala i u oken a dveří. Ty musely dostat větší tloušťku, aby mohli být vytištěny. Pouze dveře u výtahů, které jsou posunovací, jsem dala pryč a nechala tam jen předpřipravený otvor. Dále musely být dveře zbaveny i klik, které jsou pro tiskárnu též moc malé. Další úpravy musely být provedeny i u schodiště. To muselo být zbaveno zábradlí, protože tiskárna tak malé části nevytiskne. Prostor pod schodištěm musel být také upraven. Musel být celý vyplněn, aby tiskárna schodiště vytiskla. Ta totiž bez podpory nedokáže tisknout prvky, které se vznášejí ve vzduchu.



Obr. 55: Upravený model pro 3D tiskárnu

Zdroj: Autor

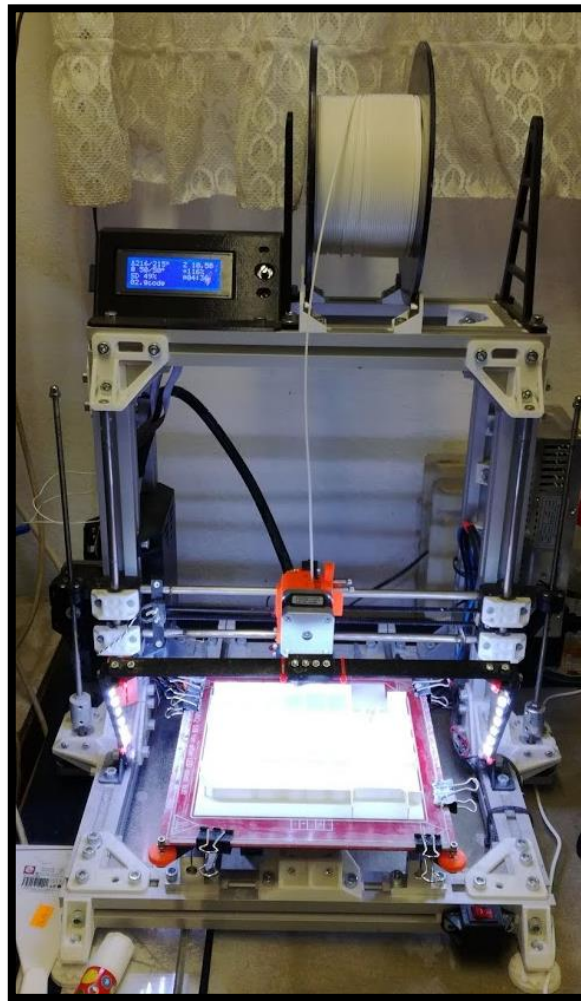


Obr. 56: Upravený prostor pod schodištěm a lehký obvodový plášť

Zdroj: Autor

Model je vytisknut na prototypové 3D tiskárně typu FDM (tzv. roztavené ukládání modelování). Rozměry tiskové plochy jsou 220 x 220 mm a maximální výška tisku je 260 mm. Lepší je, ale tisknout prvky o rozměru 180 x 180 mm, ty se bez potíží vejdou na tiskovou podložku.

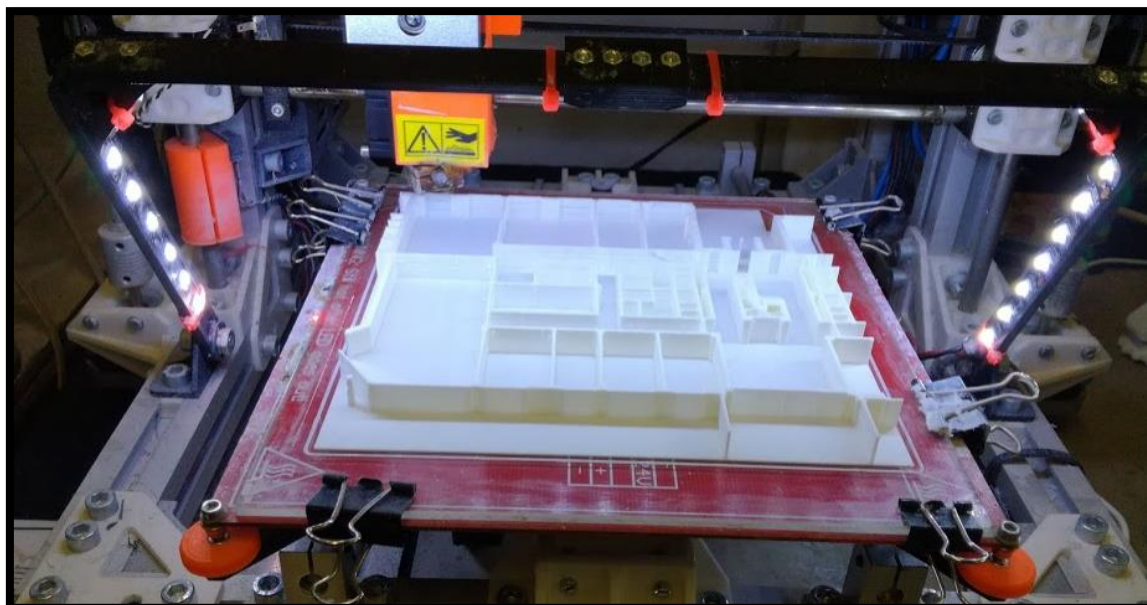
3D tiskárna pracuje s programem Solid. V tomto programu byl také otevřen model, který byl uložen ve formátu .STL. Model budovy je rozdělen do několika částí, které vytvoří sám program, aby se vešly na tiskovou plochu. Bohužel, víc si toho program sám neupraví, proto musely nastat nějaké změny v původním modelu budovy.



Obr. 57: Prototypová 3D tiskárna typu FDM

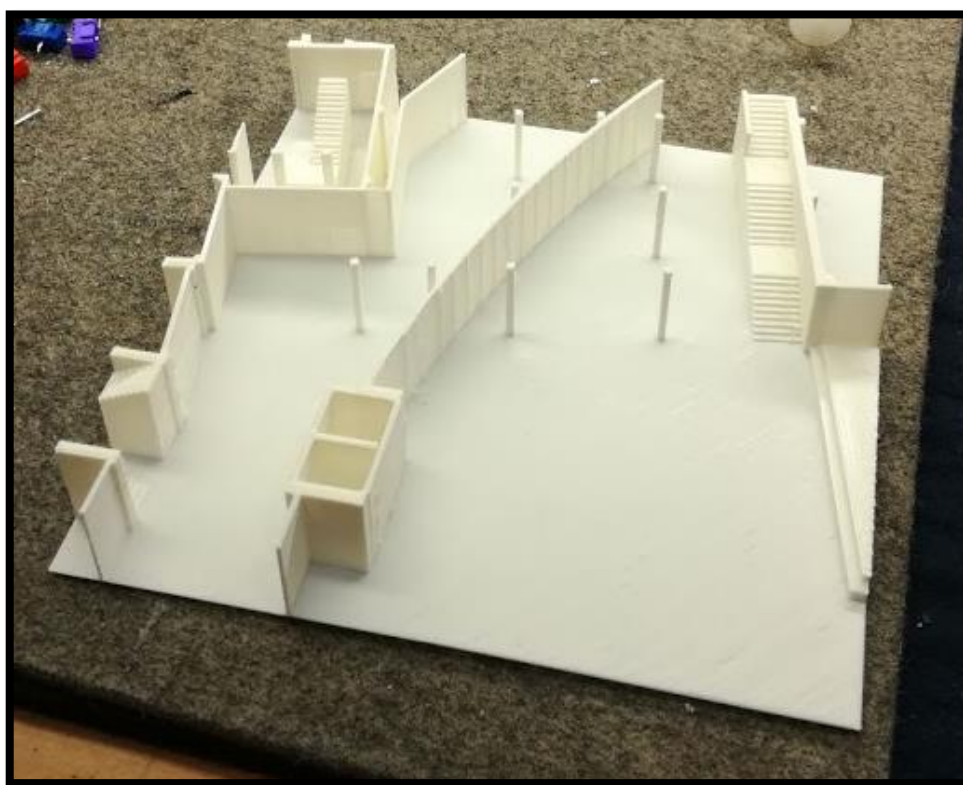
Zdroj: Autor

Model je vytištěn v měřítku 1:200. Jeho rozměry jsou přibližně 500 x 500 mm. Proto musel být rozdělen na více částí, aby mohl být vytisknutý. Skládá se tedy z 8 částí, které se tiskly postupně. Doba tisku celého modelu je přibližně 140 hodin. Nejjednodušší části mají dobu tisku kolem 9 hodin a ty složitější mají dobu tisku až 20 hodin.



Obr. 58: Tisk 2. části modelu 1.NP NTIS a CTPVV

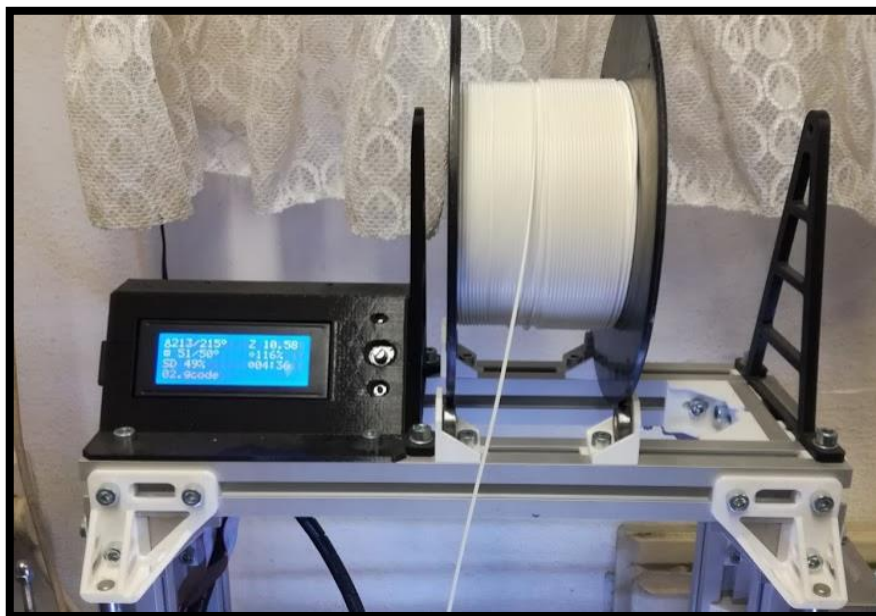
Zdroj: Autor



Obr. 59: Vytištěná 1. část modelu 1.NP budovy NTIS a CTPVV

Zdroj: Autor

K tisku bylo použito vlákno z materiálu PLA o průměru 1,75 mm bílé barvy. Bylo ho spotřebováno přibližně 0,5 kg. Tento materiál je vytlačován tryskou o průměru 0,4 mm a výška jedné tiskové vrstvy je 0,2 mm.



Obr. 60: Použité PLA vlákno

Zdroj: Autor

9 Závěr

Z diplomové práce vyplývá, že se 3D tisk ve stavitelství začíná pomalu rozvíjet a staví se pomocí něho malé stavby, které zatím slouží pouze, jako prototypy.

Nejvíce je 3D tisk rozšířený hlavně ve světě a to především v asijských zemích. Zde se 3D tiskem zabývá nejvíce firem. Tou nejvíce průkopnickou firmou je společnost WinSun Decoration Design and Engineering, která má zhotoveno už 10 malých rodinných domů a i pětipodlažní bytový dům.

Pro projektanty je nejvhodnější program ArchiCAD. Všechny potřebné konstrukce jsou zde uvedené v menu. Při modelování je stačí pouze vybrat. Dále je hlavní výhodou tohoto programu, že se v něm dají vytvářet modely pro BIM projektování.

Mezi nejvíce používané metody patří především 3D tisk z cementových malt a betonový tisk, které jsou použity v praktické části. U těchto metod se používá materiál na bázi cementové malty. U ostatních metod se používají především polymery a kov.

U 3D tisku ve stavitelství se využívají 3 typy konstrukcí tiskáren. Rámové tiskárny se používají především ve výrobních halách nebo i přímo na stavbě. Tiskárny s robotickou rukou se mohou používat kdekoli. Jejich hlavní výhodou je, že tisknou pouze z jedné strany a tak můžou stát i na členitém terénu. Nevýhodou je, že mají menší tiskový prostor, proto se musí osazovat na kolejovou dráhu, ze které zaberou více tiskové plochy. Nejvýhodnější jsou mobilní 3D tiskárny. Ty se pohybují sami pomocí svého podvozku. Omezeny jsou pouze délkou přívodní hadice s tiskovým materiálem.

Největší problém pro 3D tisk ve stavitelství nastává u navrhování, konstruování a dimenzování staveb. Je to dáno tím, že pro běžné stavby a materiály jsou vytvořeny normy a předpisy, které se musí dodržovat. Pro stavby ze 3D tiskárny a používaný materiál zatím žádné takovéto předpisy nejsou. Je to především tím, že jsou to nové metody a nové materiály, které nejsou podobné těm dnešním. Nelze tudíž odvodit vlastnosti jednotlivých prvků. Je nutné nejprve provést zkoušky materiálů a podle výsledků vytvořit speciální předpisy a normy pro stavby ze 3D tisku a materiál pro 3D tisk.

V praktické části jsou porovnány dvě metody 3D tisku s tradiční metodou stavby. Z tohoto porovnání vyplývá, že nejrychlejší výstavba by byla za pomoci metody Betonového tisku, který by měl výšku tištěné vrstvy 25 mm.

Přestože se 3D tisk ve stavitelství rozvíjí rychle. Nejsou hotové žádné předpisy pro 3D tisk. To je hlavní nevýhoda, proč se ještě pomocí 3D tisku nestaví. Dále je problém i u

finanční stránky. Oproti stávajícím metodám je metoda 3D tisku dražší. Je to dáno tím, že 3D tiskáren je málo a zatím se používají ke stavbě malých budov, především prototypů. U takto velké budovy by muselo být mnohem více tiskáren, aby se to investorovy po stránce výstavby vyplatilo. Další problém nastává u materiálů, které se zde používají. Neví se, zda mají správné mechanické, tepelně technické, akustické a další vlastnosti. Ty se projeví až po absolvování zkoušek.

Podle zjištěných informací se takto velká stavba zatím nevyplatí stavět pomocí 3D tisku. Časem až se metody a materiály schválí, a budou k nim platné předpisy, bude určitě prospěšnější stavět 3D tiskem. Většinu práce budou dělat pouze tiskárny a to 24 hodin denně. Práce, kterou budou provádět pracovníci, bude díky tomu minimální.

Seznam obrázků

OBR. 1: ROVNÁTKA OD SPOLEČNOSTI INVISALIGN	- 13 -
OBR. 2: 3D MODEL BUDOVY CITY HALL V LONDÝŇĚ	- 15 -
OBR. 3: POROVNÁNÍ TVARU STYČNÍKU VYROBENÉHO BĚŽNÝM ZPŮSOBEM A POMOCÍ 3D TISKU	- 16 -
OBR. 4: ROZLOŽENÍ NAPĚTÍ VE STYČNÍKU PŘI MODELOVÁNÍ TOPOLOGICKOU OPTIMALIZACÍ.....	- 16 -
OBR. 5: VZORKY SLOUPŮ Z KUKUŘIČNÉHO PLASTU	- 19 -
OBR. 6: UKÁZKA MODELU BUDOV ZE 3D TISKÁRNY.....	- 22 -
OBR. 7: UKÁZKA VYMODELOVANÉHO OBJEKTU V PROGRAMU TRINKERCAD	- 23 -
OBR. 8: UKÁZKA VYMODELOVANÉHO OBJEKTU V PROGRAMU MESHMIXER.....	- 24 -
OBR. 9: UKÁZKA DOČASNÝCH PODPOR V PROGRAMU MESHMIXER.....	- 26 -
OBR. 10: PRACOVNÍ PLOCHA PROGRAMU 123D DESIGN.....	- 27 -
OBR. 11: PRACOVNÍ PLOCHA PROGRAMU ARCHICAD	- 28 -
OBR. 12: PŘEHLED METOD PODLE VÝVOJE	- 33 -
OBR. 13: POČÍTAČOVÁ VIZUALIZACE TISKNUTÍ METODOU CONTOUR CRAFTING, USA	- 38 -
OBR. 14: DETAIL STĚNY VYTIŠTĚNÉ METODOU CONTOUR CRAFTING	- 38 -
OBR. 15: VZOROVÁ STĚNA VYTIŠTĚNÁ METODOU CONTOUR CRAFTING, USA	- 39 -
OBR. 16: MODEL KOPULE PRO ZÁKLADNU NA JINÉ PLANETĚ VYTIŠTĚNÝ METODOU CONTOUR CRAFTING, USA.....	- 39 -
OBR. 17: UKÁZKA VYTLAČOVÁNÍ CEMENTOVÉ MALTY Z TISKOVÉ HLAVY, USA.....	- 40 -
OBR. 18: UKÁZKA MÍSTA PRO TISK METODOU D-SHAPE	- 41 -
OBR. 19: ODSTRAŇOVÁNÍ PŘEBYTEČNÉHO PÍSKU PO DOKONČENÍ 3D TISKU METODOU D-SHAPE.....	- 42 -
OBR. 20: UKÁZKA VNITŘNÍ STRUKTURY S UZAVŘENÝMI KOMŮRKAMI	- 43 -
OBR. 21: POSTUP VÝROBY TISKU U METODY BAAM®	- 46 -
OBR. 22: UKÁZKA TISKOVÉ HLAVY U SYSTÉMU MESH MOULD	- 48 -
OBR. 23: UKÁZKA 3D TISKU METODOU 3D TISK KŘÍVEK	- 49 -
OBR. 24: UKÁZKY VYTIŠTĚNÝCH PRVKŮ METODOU MODELU FÚZOVANÉHO VKLADU	- 51 -
OBR. 25: UKÁZKA VYTIŠTĚNÉHO BEDNĚNÍ Z PUR PĚNY A TISK MALÉHO OBJEKTU METODOU 3D PĚNOVÝ TISK	- 52 -
OBR. 26: RÁMOVÝ PORTÁL 3D TISKÁRNY.....	- 56 -
OBR. 27: TISK STĚN POMOCÍ TISKÁRNY S ROBOTICKOU RUKOU, SPOLEČNOST APIS-COR, RUSKO	- 58 -
OBR. 28: UKÁZKA TISKU POMOCÍ MOBILNÍ 3D TISKÁRNY, IAAC BARCELONA, ŠPANĚLSKO	- 59 -
OBR. 29: ZKOUŠKA PEVNOSTI BETONU V TLAKU	- 63 -
OBR. 30: ZKOUŠKA SEDNUTÍ KUŽELE – ABRAMSŮV KUŽEL	- 64 -
OBR. 31: UKÁZKA SEDNUTÍ BETONU – ABRAMSŮV KUŽEL	- 64 -
OBR. 32: ZKOUŠKA SEDNUTÍ BETONU – ROZLITÍ.....	- 65 -
OBR. 33: ZKOUŠKA SEDNUTÍ BETONU – ZAOKROUHLENÍ	- 65 -

OBR. 34: BUDOVA KANCELÁŘE V DUBAJI	- 69 -
OBR. 35: UKÁZKA VNITŘNÍHO PROSTORU V BUDOVĚ.....	- 69 -
OBR. 36: PĚŠÍ MOST V MADRIDU	- 70 -
OBR. 37: NÁVRH PĚŠÍHO MOSTU	- 70 -
OBR. 38: DŮM APIS COR.....	- 71 -
OBR. 39: TISK OCELOVÉHO MOSTU.....	- 72 -
OBR. 40: PROTOTYP OCELOVÉHO MOSTU	- 72 -
OBR. 41: BUDOVA BAUHAUS.....	- 73 -
OBR. 42: POHLED NA BUDOVU BAUHAUS Z DRUHÉ STRANY A UKÁZKA BALDACHÝŇŮ	- 74 -
OBR. 43: CANAL HOUSE V AMSTERDAMU	- 75 -
OBR. 44: ROZKLAD MODELU CANAL HOUSE	- 75 -
OBR. 45: ŘEZ MODELEM CANAL HOUSE.....	- 76 -
OBR. 46: UKÁZKA STAVEBNÍHO BLOKU PRO CANAL HOUSE	- 76 -
OBR. 47: UKÁZKA PROTOTYPU VYTIŠTĚNÉ BUDOVY KASÁREN	- 77 -
OBR. 48: BUDOVA NTIS A CTPVV.....	- 78 -
OBR. 49: VÝKOPOVÉ PRÁCE NA STAVBĚ BUDOVY NTIS A CTPVV	- 80 -
OBR. 50: ZDĚNÝ OBVODOVÝ PLÁŠŤ BUDOVY NTIS A CTPVV	- 85 -
OBR. 51: POHLED NA FASÁDU BUDOVY NTIS A CTPVV	- 85 -
OBR. 52: UKÁZKA ZELENÉ STŘECHY.....	- 86 -
OBR. 53: MODEL BUDOVY NTIS A CTPVV Z ACHICADU 21	- 93 -
OBR. 54: MODEL SCHODIŠTĚ SE ZÁBRADLÍM	- 94 -
OBR. 55: UPRAVENÝ MODEL PRO 3D TISKÁRNU	- 95 -
OBR. 56: UPRAVENÝ PROSTOR POD SCHODIŠTĚM A LEHKÝ OBVODOVÝ PLÁŠŤ.....	- 95 -
OBR. 57: PROTOTYPOVÁ 3D TISKÁRNA TYPU FDM	- 96 -
OBR. 58: TISK 2. ČÁSTI MODELU 1.NP NTIS A CTPVV	- 97 -
OBR. 59: VYTIŠTĚNÁ 1. ČÁST MODELU 1.NP BUDOVY NTIS A CTPVV	- 97 -
OBR. 60: POUŽITÉ PLA VLÁKNO.....	- 98 -

Seznam tabulek

TAB. 1: NABÍDKA NÁSTROJŮ PROGRAMU MESHMIXER.....	- 25 -
TAB. 2: PŘEHLED AM METOD S POTENCIÁLEM VE STAVITELSTVÍ – 1 ČÁST	- 30 -
TAB. 3: PŘEHLED AM METOD S POTENCIÁLEM VE STAVITELSTVÍ – 2 ČÁST	- 32 -
TAB. 4: POROVNÁNÍ AM METOD MEZI SEBOU – 1. ČÁST.....	- 34 -
TAB. 5: POROVNÁNÍ AM METOD MEZI SEBOU – 2. ČÁST.....	- 35 -
TAB. 6: POROVNÁNÍ METOD PRO 3D TISK Z CEMENTOVÝCH MALT S BETONOVÝM TISKEM	- 44 -
TAB. 7: PEVNOSTNÍ TŘÍDY BETONU V TLAKU PRO OBYČEJNÝ A TĚŽKÝ BETON	- 45 -
TAB. 8: POROVNÁNÍ METOD POLYMERNÍ 3D TISKOVÉ TECHNOLOGIE.....	- 50 -
TAB. 9: POROVNÁNÍ ČASOVÉ NÁROČNOSTI.....	- 92 -

Seznam rovnic

(ROV. 1): VÝPOČET KOLIKRÁT TISKÁRNA OBJEDE OBJEKT, PŘI VÝŠCE VRSTVY 0,013 M	- 90 -
(ROV. 2): VÝPOČET DÉLKY TISKU NA 1000 M STĚNY	- 90 -
(ROV. 3): CELKOVÁ DOBA VÝSTAVBY U METODY VYTVÁŘENÍ KONTUR	- 91 -
(ROV. 4): VÝPOČET KOLIKRÁT TISKÁRNA OBJEDE OBJEKT, PŘI VÝŠCE VRSTVY 0,006 M	- 91 -
(ROV. 5): VÝPOČET DÉLKY TISKU NA 1000 M STĚNY	- 91 -
(ROV. 6): CELKOVÁ DOBA VÝSTAVBY U METODY BETONOVÝ TISK	- 91 -
(ROV. 7): VÝPOČET KOLIKRÁT TISKÁRNA OBJEDE OBJEKT, PŘI VÝŠCE VRSTVY 0,025 M	- 91 -
(ROV. 8): VÝPOČET DÉLKY TISKU NA 1000 M STĚNY	- 91 -
(ROV. 9): CELKOVÁ DOBA VÝSTAVBY U METODY BETONOVÝ TISK	- 91 -

Použitý software

Microsoft Word 2010

ArchiCAD 21

AutoCAD 2016

Citovaná literatura

- [1] Bez autora, „3D printing in construction,“ Designing Buildings Wiki, 26. 7. 2019. [Online]. Available: https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/3D_printing_in_construction.
- [2] Hongxi Yin, Ming Qu, „3D Printing and Buildings: A Technology Review and Future Outlook,“ 1. 2018. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/325491864>.
- [3] PhDr. Karel Červený, MSc., MBA, „Předpoklady úspěšných inovací (29),“ Technický týdeník, 4. 6. 2015. [Online]. Available: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/predpoklady-uspesnych-inovaci/predpoklady-uspesnych-inovaci-29_30995.html.
- [4] Bez autora, „The Future of 3D Printing for Architecture,“ 3Dinsider, 2019. [Online]. Available: <https://3dinsider.com/3d-printing-architecture/>.
- [5] Figen Beyhan, Semra Arslan Selçuk, „3D Printing in Architecture: One Step Closer to a Sustainable Built Environment,“ 3. 2018. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/324063338_3D_Printing_in_Architecture_One_Step_Closer_to_a_Sustainable_Built_Environment.
- [6] N. K. Liza Wallach Kloski, Začínáme s 3D tiskem, Brno: ALBATROS Media a.s., 2017.
- [7] Bez autora, „Neviditelná rovnátka Invisalign,“ American Dental, [Online]. Available: <http://www.americandental.cz/cs/poskytovana-pece/neviditelna-rovnatka-invisalign.html>.
- [8] Bez autora, „3D printing construction market,“ Designing Buildings Wiki, 8. 5. 2019. [Online]. Available: https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/3D_printing_construction_market.
- [9] Michal Kovařík, Pavel Svoboda, Petr Štemberk, „Technologie 3D tisku v architektuře a stavebnictví,“ EARCH, 3. 8. 2018. [Online]. Available: <http://www.earch.cz/cs/stavitelstvi/technologie-3d-tisku-v-architekture-stavebnictvi>.

- [10] Remco Van Woensel, Teun Van Oirschot, Mats Burgmans, Masi Mohammadi, Kristel Hermans, „The International Journal of the Constructed Environment,“ v *Printing Architecture - An Overview of Existing and Promising Additive Manufacturing Methods and Their Application in the Building Industry*, University of Illinois Research Park, Common Ground reasearch Networks, 2018, pp. 57 - 81.
- [11] Bez autora, „3D concrete printer,“ Designing Buildings Wiki, 26. 7. 2019. [Online]. Available: https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/3D_concrete_printer.
- [12] Ing. Bára Baštová, „3D tisk domů je stále dostupnější. Domek vyjde na 80 000 Kč a je postavený za den,“ Dřevostavitel - Online svět dřevostaveb, 13. 9. 2018. [Online]. Available: <https://www.drevostavitel.cz/clanek/3d-tisk-domu-je-stale-dostupnejsi-domek-vyjde-na-80-000-kc-a-stoji-za-den>.
- [13] Mihulka Stanislav, „Americká armáda si vytiskne kasárna na největší 3D tiskárně světa,“ Technický týdeník, 11. 11. 2018. [Online]. Available: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/veda-vyzkum-inovace/americka-armada-si-vytiskne-kasarna-na-nejvetsi-3d-tiskarne-sveta_45237.html.
- [14] Bez autora, „Americká armáda si vytiskne kasárna na největší 3D tiskárně světa,“ Technický týdeník, 4. 3. 2019. [Online]. Available: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/americka-armada-si-vytiskne-kasarna-na-nejvetsi-3d-tiskarne-sveta_46405.html.
- [15] Bez autora, „3D tisk z písku a betonu,“ Technický týdeník, 8. 4. 2019. [Online]. Available: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/3d-tisk-z-pisku-a-betonu_46845.html.
- [16] Jamie D., „3D Printing: The Future of Construction,“ 3Dnatives your source for 3D printing, 31. 1. 2018. [Online]. Available: <https://www.3dnatives.com/en/3d-printing-construction-310120184/>.
- [17] Bez autora (pj), „BASF přichází s bedněním vyrobeným pomocí 3D tisku,“ Technický týdeník, 7. 10. 2018. [Online]. Available: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/denni-zpravodajstvi/basf-prichazi-s-bednenim-vyrobenym-pomoci-3d-tisku_45211.html.

- [18] Bez autora, „Printing 3D models od buildings,“ Designing Buildings Wiki, 17. 8. 2017. [Online]. Available: https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/Printing_3D_models_of_buildings.
- [19] Bez autora, „Od nápadu k návrhu během několika minut,“ Autodesk Tinkercad, 2019. [Online]. Available: <https://www.tinkercad.com/>.
- [20] Bez autora, „Tinkercad - jeden z nejjednodušších modelů pro 3D návrhy Minecraftu!“, Autodesk Tinkercad, 2019. [Online]. Available: <https://www.tinkercad.com/minecraft>.
- [21] Mikolas Zuza, „How to repair corrupted 3D models for Printing,“ Prusaprinters blog, 16. 2. 2018. [Online]. Available: <https://blog.prusaprinters.org/repair-3d-models-errors/>.
- [22] Krzysztof Matusiewicz, „Druk 3D – Projektowanie modeli #3 – własne podpory,“ Forbot, [Online]. Available: <https://forbot.pl/blog/druk-3d-projektowanie-modeli-3-wlasne-podpory-id10462>.
- [23] Michal Štros, Denisa Bauerová, „3D tisk ve stavebnictví,“ Střední průmyslová škola stavební a Obchodní akademie Kadaň, Kadaň, 2017.
- [24] Bez autora, „Autodesk 123D,“ cadstudio, 2019. [Online]. Available: <https://www.cadstudio.cz/123d>.
- [25] Bez autora, „ArchiCAD,“ Softech, [Online]. Available: <https://www.softech.cz/software-archicad>.
- [26] Bez autora, „ARCHICAD,“ Cegra - centrum pro podporu počítačové grafiky ČR s.r.o., [Online]. Available: <http://www.cegra.cz/produkty/software/archicad/>.
- [27] Zeina Malaeb, Hussein Hachem, Adel Tourbah, Toufic Maalouf, Nader El Zarwi, Farook Hamzeh, „3D Concrete Printing: Machine and Mix Design,“ 6. 2015. [Online].
- [28] EBETON, „Pevnost betonu v tlaku,“ EBeton, [Online]. Available: <http://www.ebeton.cz/pojmy/pevnost-betonu-v-tlaku>.
- [29] Bez autora, „3D concrete printing market,“ Designing Buildings Wiki, 11. 3. 2018. [Online]. Available: https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/3D_concrete_printing_market.

- [30] Ing. Jan Tůma, „První 3D tištěný ocelový most v Amsterdamu,“ Technický týdeník, 4. 2. 2019. [Online]. Available: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/denni-zpravodajstvi/prvni-3d-tisteny-ocelovy-most-v-amsterdamu_46185.html.
- [31] Bez autora, „73 - Navrhování a provádění staveb,“ Technické normy ČSN, 7. 11. 2019. [Online]. Available: <http://www.technicke-normy-csn.cz/technicke-normy/navrhovani-a-provadeni-staveb-73>.
- [32] EBETON, „Zkušební tělesa z betonu,“ EBeton, [Online]. Available: <http://www.ebeton.cz/pojmy/zkusebni-telesa-z-betonu>.
- [33] EBETON, „Pevnost betonu v tlaku - zkouška,“ EBeton, [Online]. Available: <http://www.ebeton.cz/pojmy/pevnost-betonu-v-tlaku-zkouska>.
- [34] EBETON, „Konzistence betonu,“ EBeton, [Online]. Available: <http://www.ebeton.cz/pojmy/konzistence-betonu>.
- [35] EBETON, „Sednutí kužele,“ EBeton, [Online]. Available: <http://www.ebeton.cz/pojmy/sednuti-kuzele>.
- [36] EBETON, „Zkouška rozlítím,“ EBeton, [Online]. Available: <http://www.ebeton.cz/pojmy/zkouska-rozlitim>.
- [37] Bez autora, „První kancelář vytištěná 3D tiskárnou,“ Technický týdeník, 5. 8. 2016. [Online]. Available: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/denni-zpravodajstvi/prvni-kancelar-vytistena-3d-tiskarnou_36738.html.
- [38] Bez autora, „3D Printed Office Dubai,“ Designing Buildings Wiki, 28. 12. 2018. [Online]. Available: https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/3D_Printed_Office_Dubai.
- [39] Bez autora, „3D printed bridge,“ Designing Buildings Wiki, 6. 8. 2017. [Online]. Available: https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/3D_printed_bridge.
- [40] Carlota V., „Tiny Bauhaus building: custom high-design architecture thanks to 3D printing,“ 3Dnatives your source for 3D printing, 3. 4. 2019. [Online]. Available: <https://www.3dnatives.com/en/actual-030420194/>.
- [41] Bez autora, „3D Print Canal House,“ [Online]. Available: <https://3dprintcanalhouse.com/>.

- [42] NTIS ZČU, „Realizace projektu,“ Copyright 1991 - 2018 ZČU Plzeň, [Online]. Available: https://ntis.zcu.cz/cz/o_centru/o_projektu/realizace/.
- [43] Ing. arch. Jirí Opl, Ing. arch. Jan Soukup, Ing. arch. Jan Trčka, *Technická zpráva - Výstavba objektu NTIS a CTPVV*, Plzeň: Atelier Soukup, K+B elektro technik, 2011.
- [44] DEK, „Vegetační střechy,“ DEK, 2019. [Online]. Available: <https://www.dek.cz/obsah/technicka-podpora/vegetacni-strechy>.
- [45] Atelier Soukup, *Stavební výkresy - Výstavba objektu NTIS a CTVPP, výkresy: F1.1.09. - PŮDORYS 1.NP, ČÁST 1., F1.1.10. - PŮDORYS 1.NP, ČÁST 2., F.1.1.23. - ŘEZ A - A', Plzeň, 2011.*

Přílohy

Výkresy

- 1 – VIZUALIZACE 1.NP NTIS A CTPVV
- 2 – VIZUALIZACE PRO 3D TISKÁRNU 1.NP NTIS A CTPVV